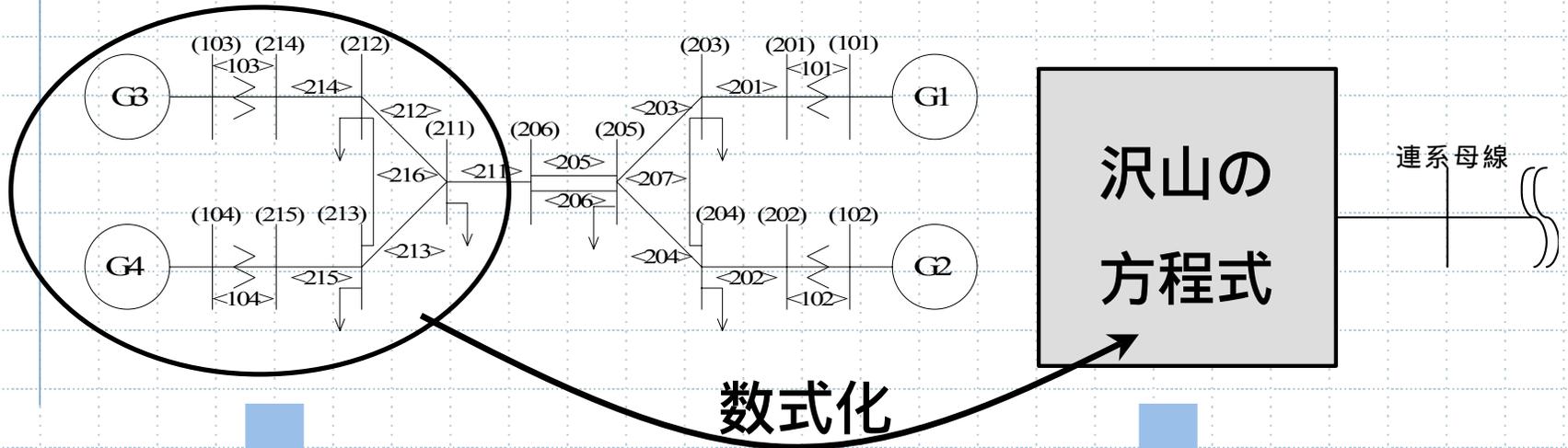


系統縮約手法に関する研究

先端電力工学(東北電力)寄附講座

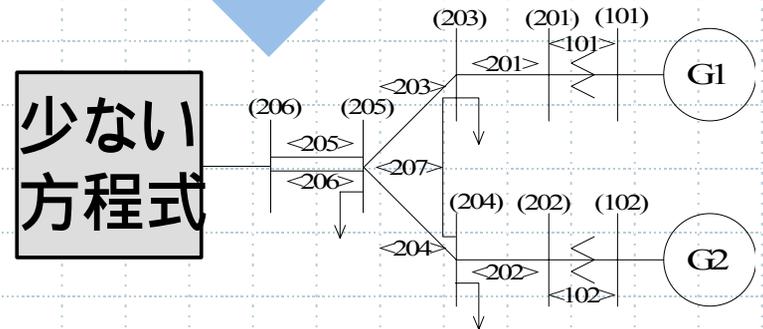
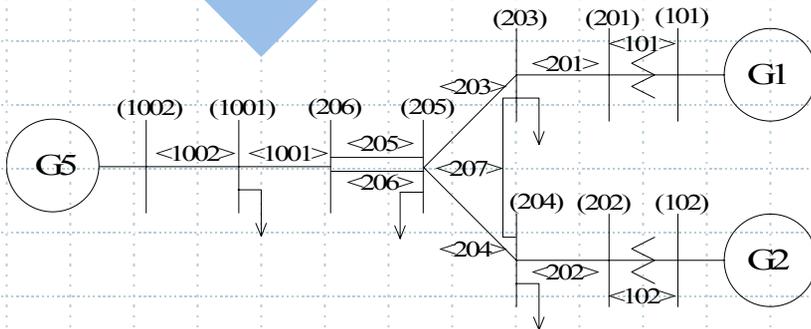
平岩 久幸

縮約手法の分類



工学的手法

数学的手法



研究の目的

工学的手法における

縮約後の励磁系の設定手法の開発

異なる励磁系を含む系統の縮約

コヒーレンシーの弱い系統の縮約

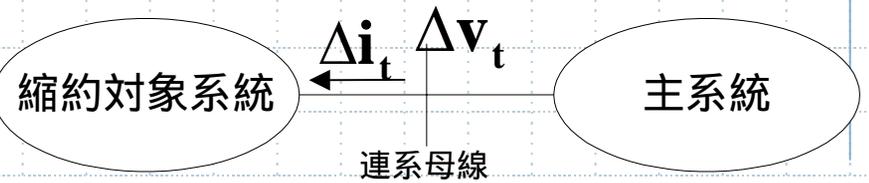
精度の良い数学的手法の考え方を利用する

モード法(数学的手法)

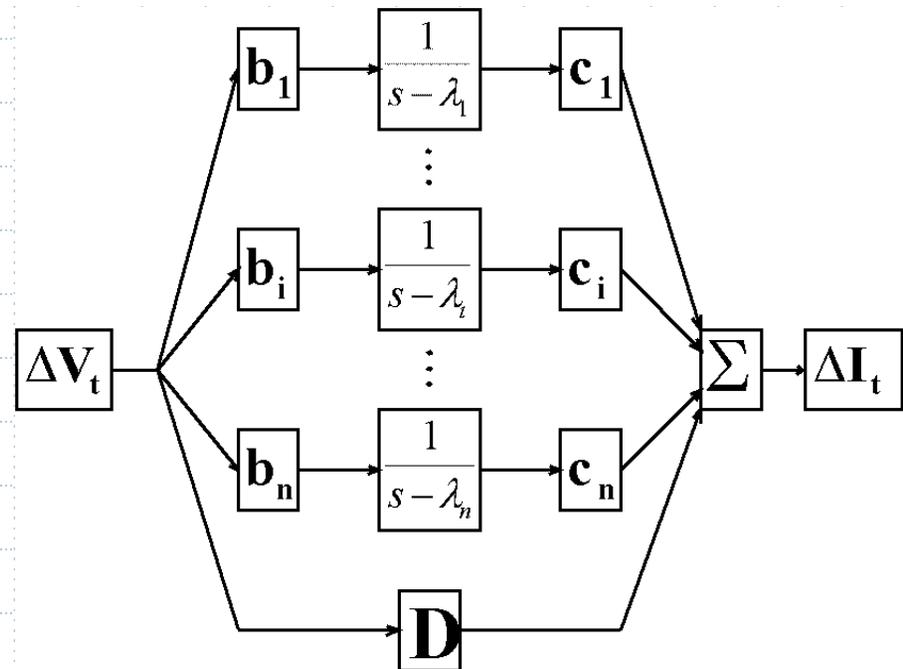
$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_t \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{i}_t = \mathbf{C}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_t \Delta \mathbf{v}_t \end{cases}$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{P} \mathbf{y}$$

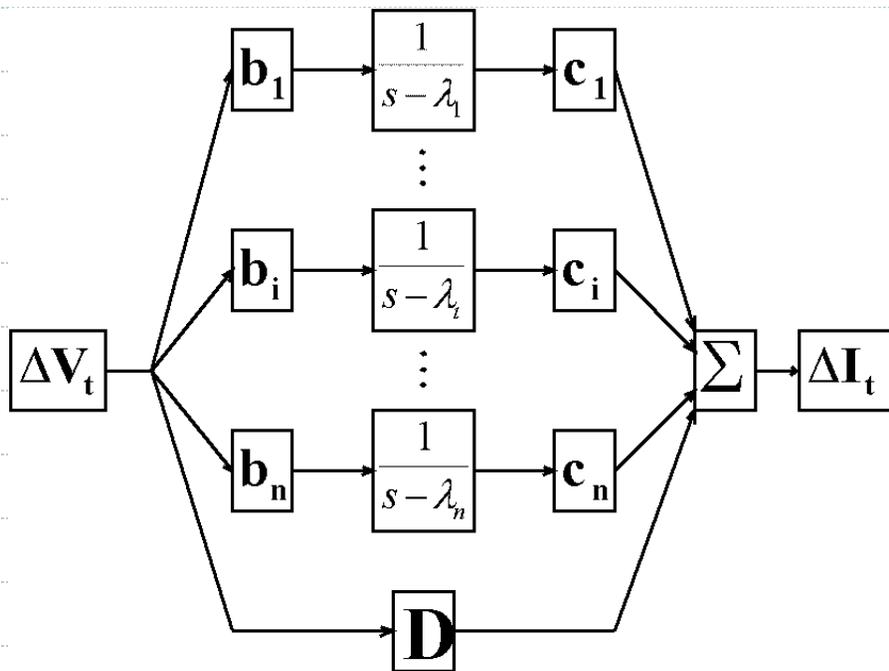
$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \vdots \\ \dot{y}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \mathbf{0} \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \lambda_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n \end{pmatrix} \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{i}_t = (\mathbf{c}_1 \quad \mathbf{c}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{c}_n) \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{v}_t \end{cases}$$



モード分解のイメージ

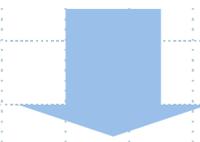


モードの影響度



ひとつのモード
の伝達関数

$$\Delta \mathbf{i}_t = \frac{\mathbf{c}_i \mathbf{b}_i}{s - \lambda_i} \Delta \mathbf{v}_t$$



モードの影響度

$$W_i = \frac{\sum |\mathbf{c}_i \mathbf{b}_i|}{|\mathit{real}(\lambda_i)|}$$

= 伝達関数の最大値

モードの特徴付け

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_t \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{i}_t = \mathbf{C}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_t \Delta \mathbf{v}_t \end{cases}$$

$$\Delta \mathbf{v}_t = \begin{pmatrix} \Delta v_{tR} \\ \Delta v_{tJ} \end{pmatrix}, \Delta \mathbf{i}_t = \begin{pmatrix} \Delta i_{tR} \\ \Delta i_{tJ} \end{pmatrix}$$



$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_t \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{S}_t = \mathbf{C}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_t \Delta \mathbf{v}_t \end{cases}$$

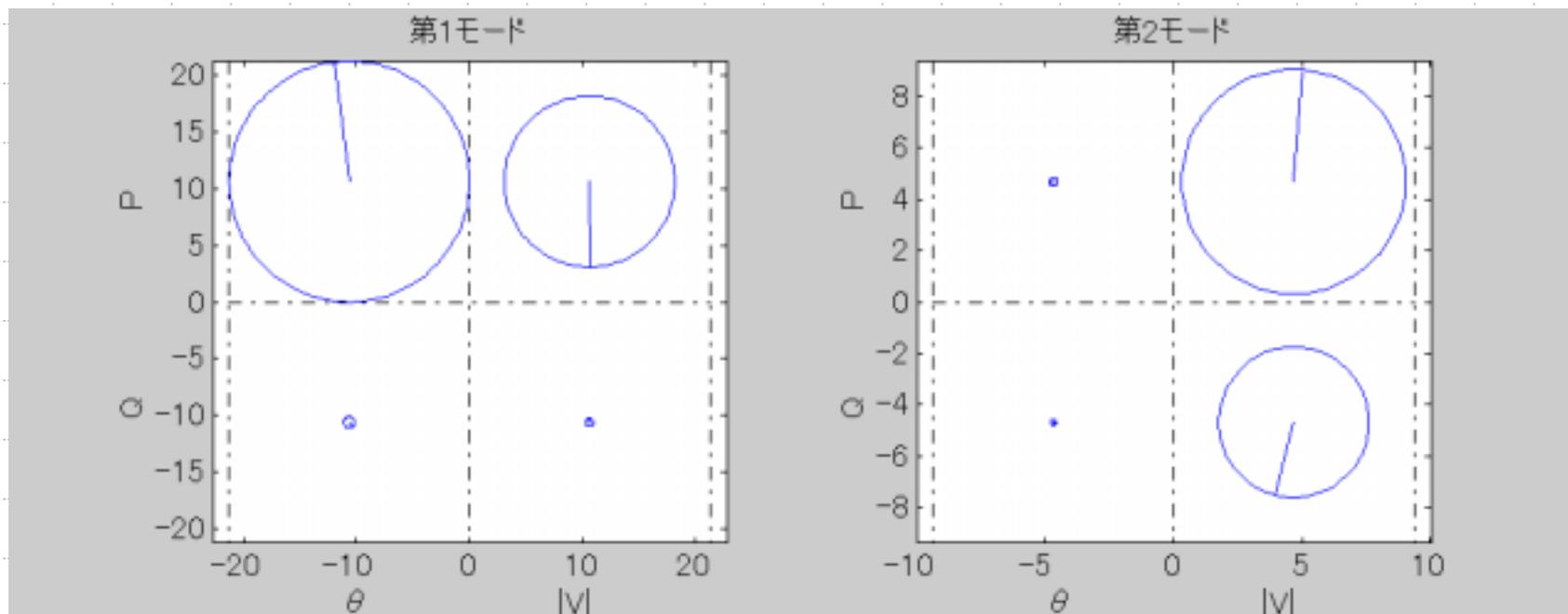
$$\Delta \mathbf{v}_t = \begin{pmatrix} \Delta \theta_t \\ \Delta |v_t| \end{pmatrix}, \Delta \mathbf{S}_t = \begin{pmatrix} \Delta P_t \\ \Delta Q_t \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta P_t \\ \Delta Q_t \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{K}_i}{s - \lambda_i} \begin{pmatrix} \Delta \theta_t \\ \Delta |v_t| \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix}}{s - \lambda_i} \begin{pmatrix} \Delta \theta_t \\ \Delta |v_t| \end{pmatrix}$$

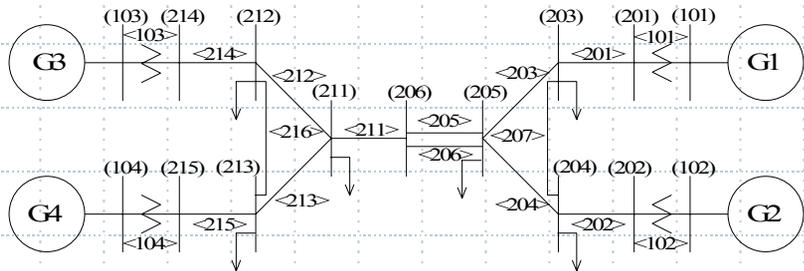
$$\begin{cases} k_{11} : \Delta \theta_t \Rightarrow \Delta P_t \\ k_{21} : \Delta \theta_t \Rightarrow \Delta Q_t \\ k_{12} : \Delta |v_t| \Rightarrow \Delta P_t \\ k_{22} : \Delta |v_t| \Rightarrow \Delta Q_t \end{cases}$$

モードの特徴の抽出

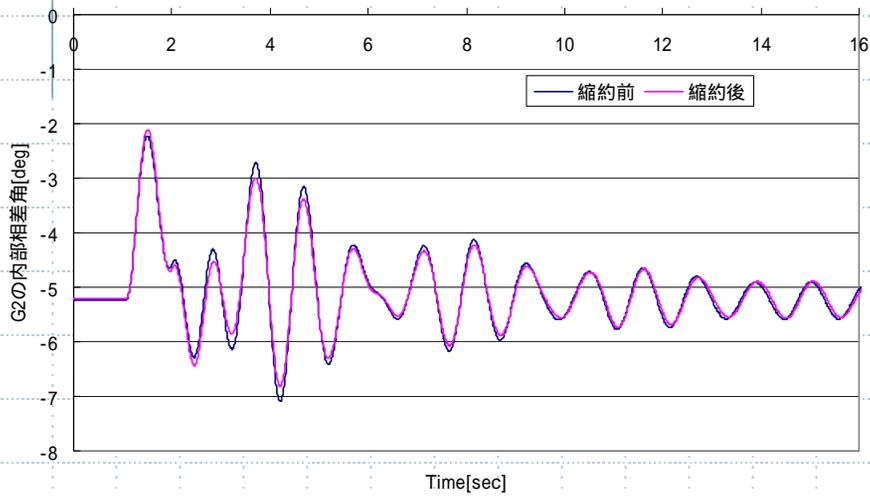
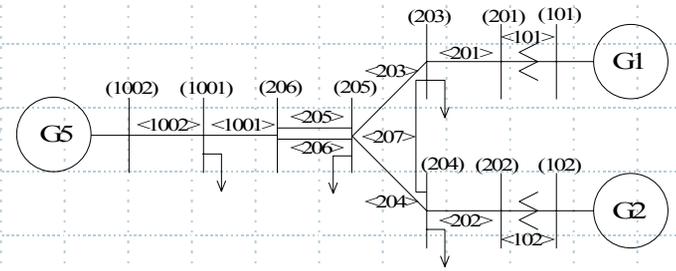
固有値	$-0.323 + 5.89i$	$-1.01 + 2.16i$
影響度	58.9	7.52
行列K	$\begin{bmatrix} -1.33 + 10.6i & 0.0709 - 7.56i \\ 0.0583 - 0.485i & -0.00135 + 0.347i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.156 - 0.0376i & 0.370 + 4.35i \\ 0.107 + 0.00756i & -0.727 - 2.84i \end{bmatrix}$



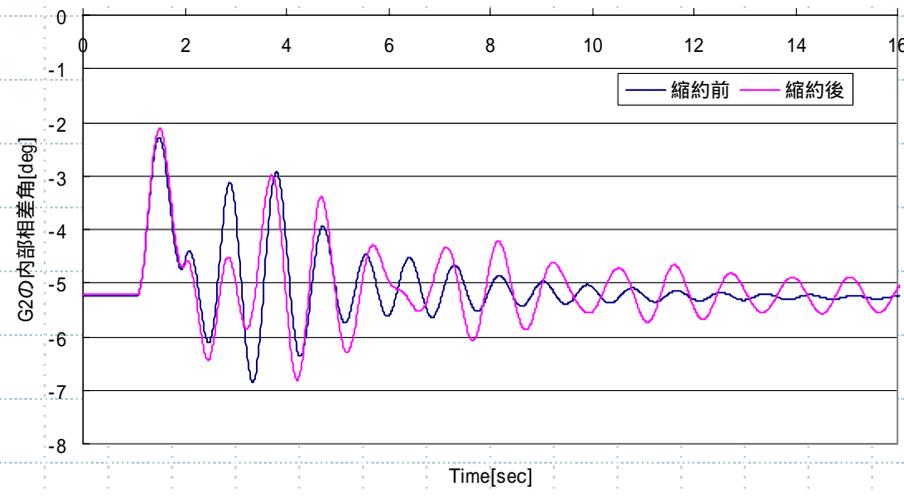
工学的手法における励磁系の問題



縮約



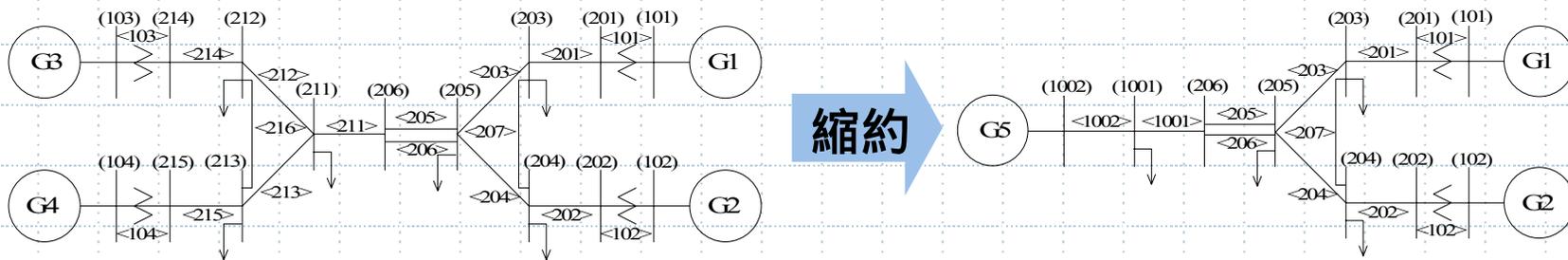
同一の励磁系



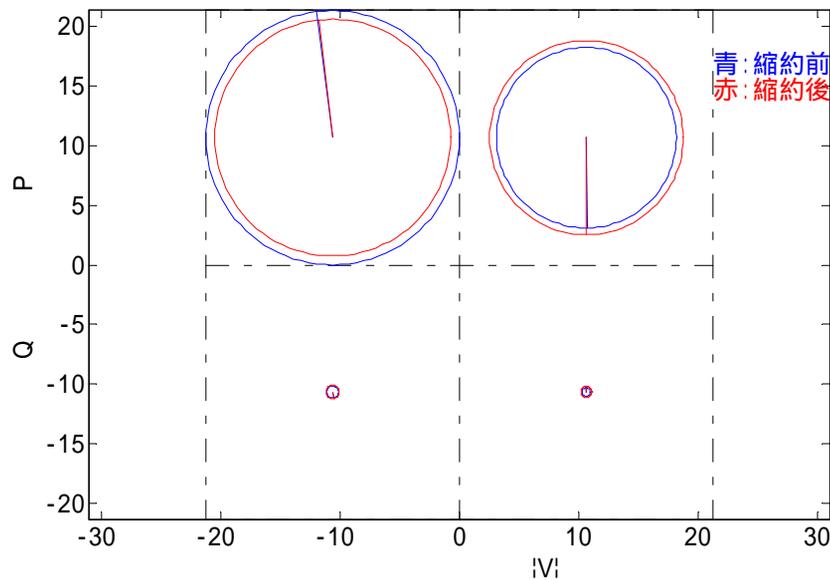
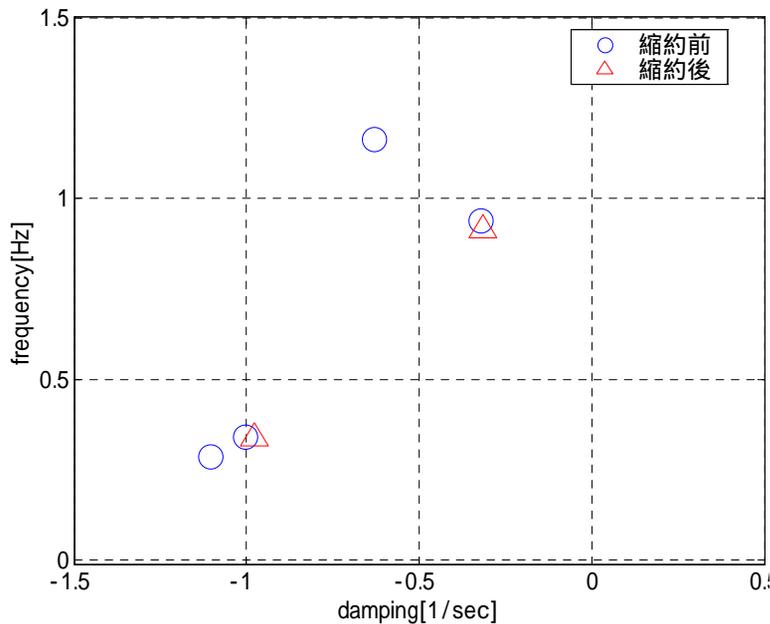
異なる励磁系

同一の励磁系の場合

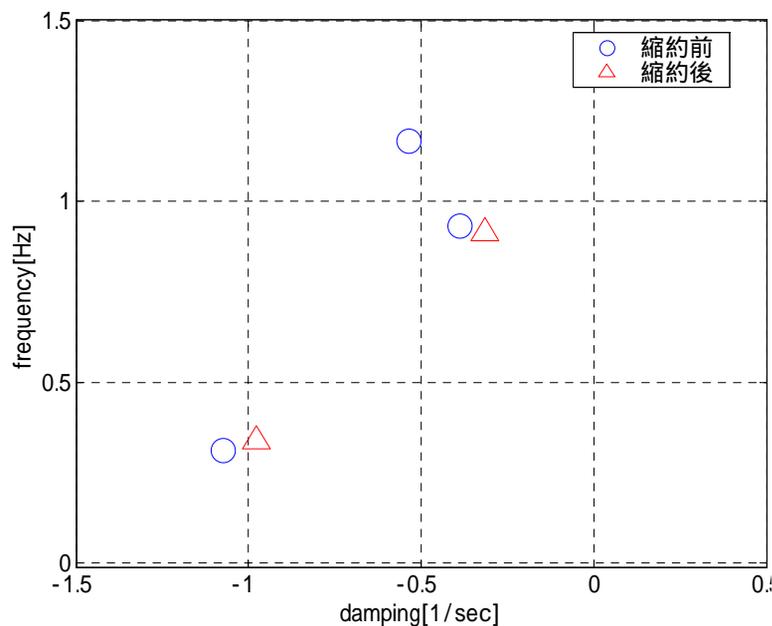
$$\Delta S_t = \frac{\mathbf{K}_i}{s - \lambda_i} \Delta \mathbf{v}_t$$



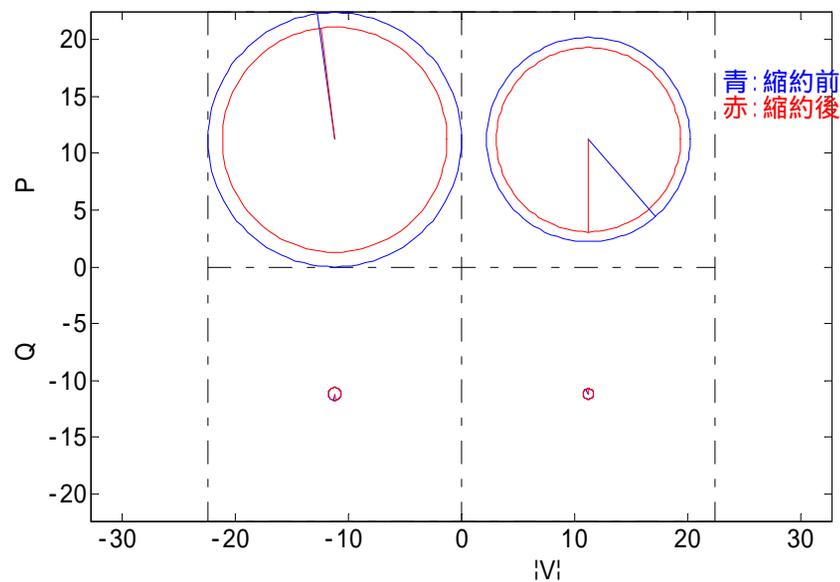
第1モードの特徴



異なる励磁系の場合



第1モードの特徴



モードの誤差を最小化する励磁系を求める

モードの近似

ひとつのモード

$$\Delta \mathbf{S}_t = \frac{\mathbf{K}_i}{s - \lambda_i} \Delta \mathbf{v}_t$$

$$\mathbf{K}_i \rightarrow \frac{\partial \mathbf{K}_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial \mathbf{c}_i \mathbf{b}_i}{\partial \alpha} \begin{cases} \mathbf{B} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}_t \\ \mathbf{C} = \mathbf{C}_t \mathbf{P} \end{cases}$$

固有ベクトル感度

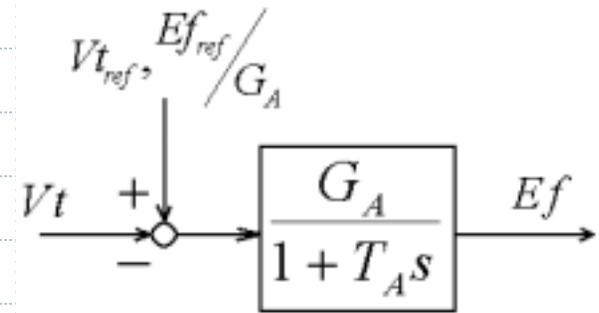
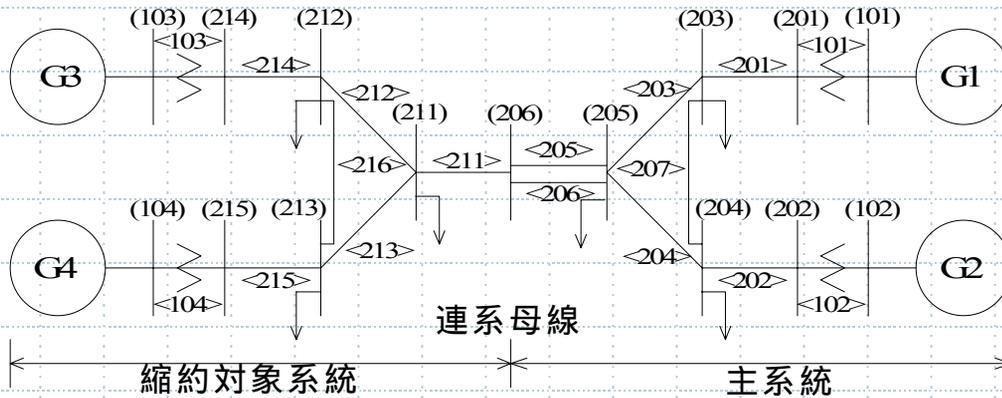
$$\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial \alpha} = \sum_{m=1, m \neq i}^n \frac{\mathbf{q}_m \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \mathbf{p}_i}{(\lambda_i - \lambda_m) \mathbf{q}_m \mathbf{p}_m} \mathbf{p}_m$$

$\lambda_i \rightarrow$ 固有値感度

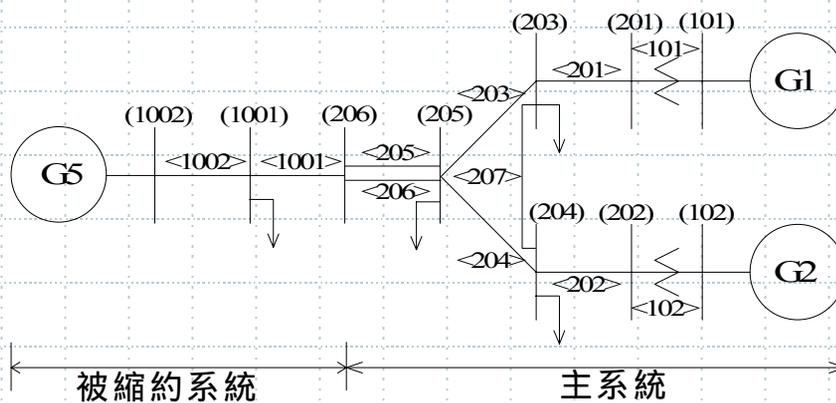
$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\mathbf{q}_i \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \mathbf{p}_i}{\mathbf{q}_i \mathbf{p}_i}$$

\mathbf{A} : システム行列
 λ_i : \mathbf{A} の固有値
 \mathbf{p}_i : \mathbf{A} の右固有ベクトル
 \mathbf{q}_i : \mathbf{A} の左固有ベクトル
 α : 励磁系パラメータ

計算条件



縮約
↓
短絡電流法

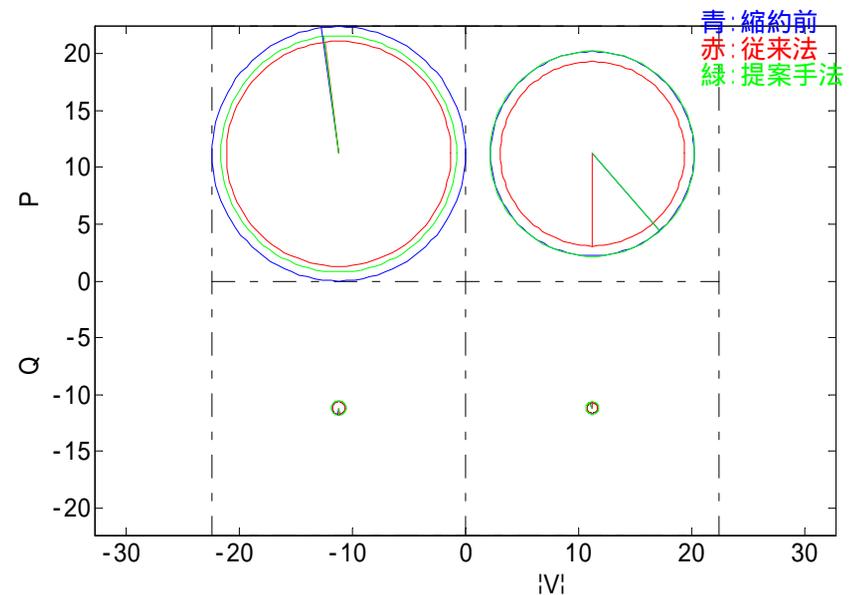
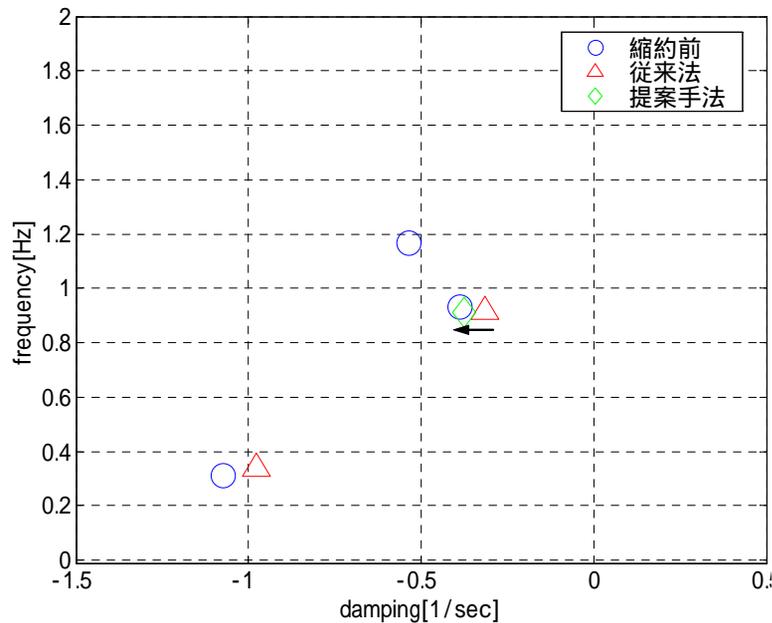


	ゲイン	時定数
G3	50	0.1
G4	25	0.5

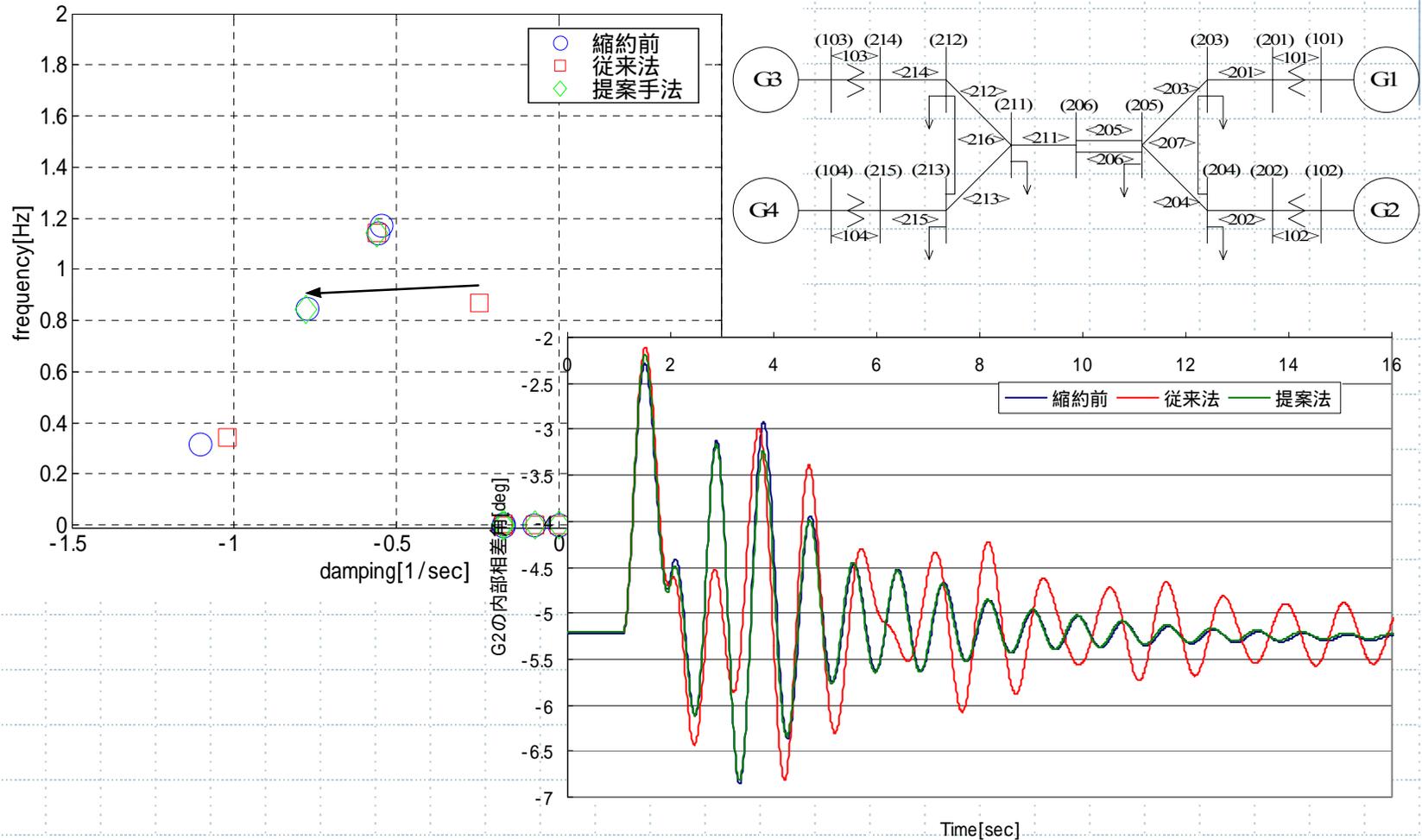
部分システムモードの修正

	ゲイン	時定数
修正前	50	0.1
修正後	22.59	0.049

$$\Delta S_t = \frac{K_i}{s - \lambda_i} \Delta v_t$$



全系での解析精度の比較



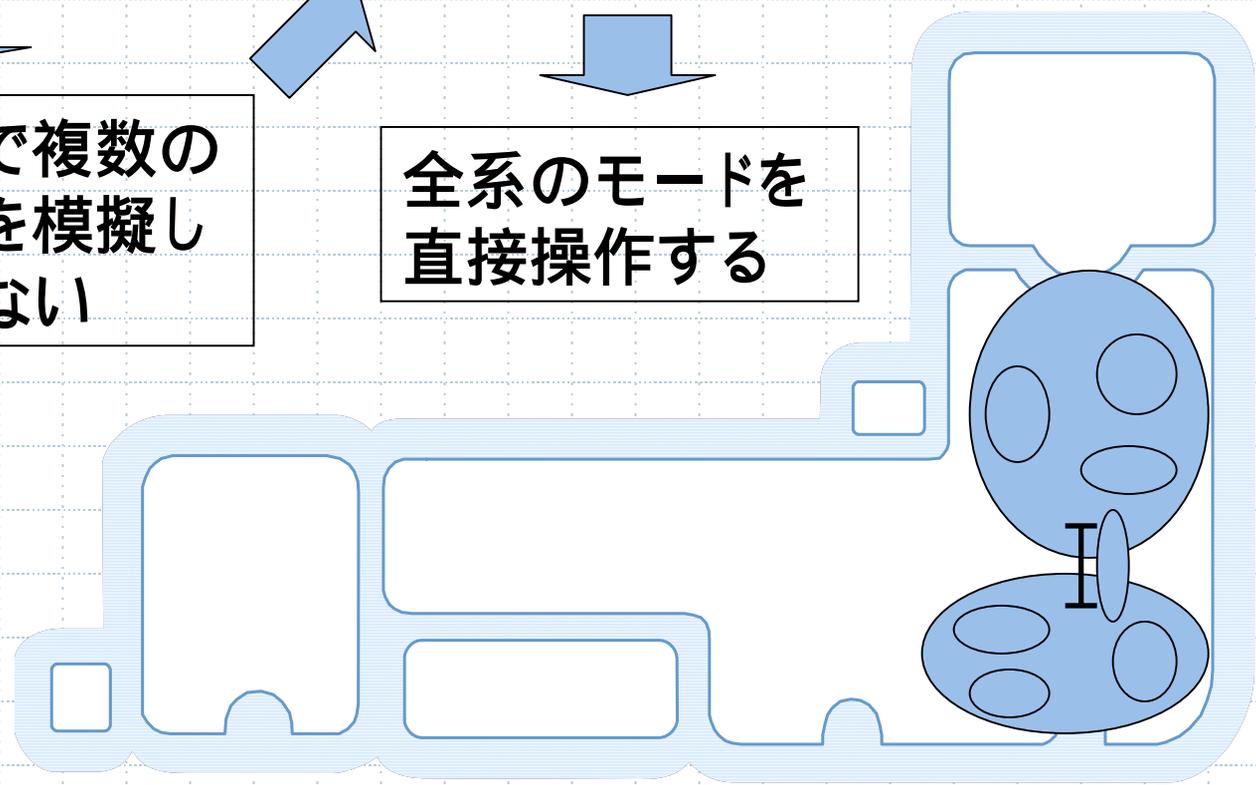
コヒーレンシーの弱い系統の縮約

縮約後はローカルなモードが消える

部分系統の情報のみでは困難

一つのモードで複数のモードの応答を模擬しなければならない

全系のモードを直接操作する



固有値, 固有ベクトルの近似

固有値感度

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\mathbf{q}_i \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \mathbf{p}_i}{\mathbf{q}_i \mathbf{p}_i}$$

固有ベクトル感度

$$\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial \alpha} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^n \frac{\mathbf{q}_m \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \mathbf{p}_i}{(\lambda_i - \lambda_m) \mathbf{q}_m \mathbf{p}_m} \mathbf{p}_m$$

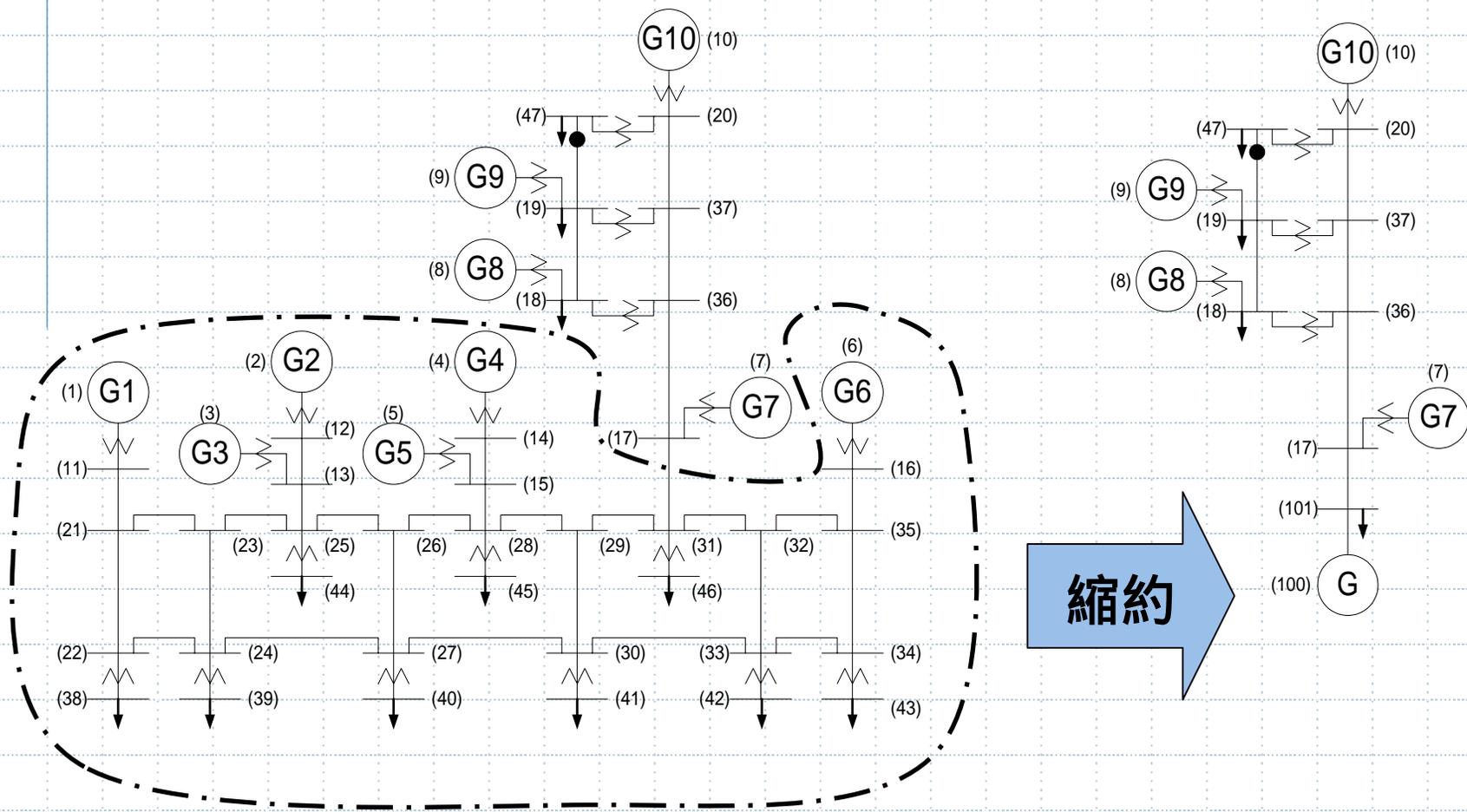
全系の主要なモード

(固有値、固有ベクトル)の

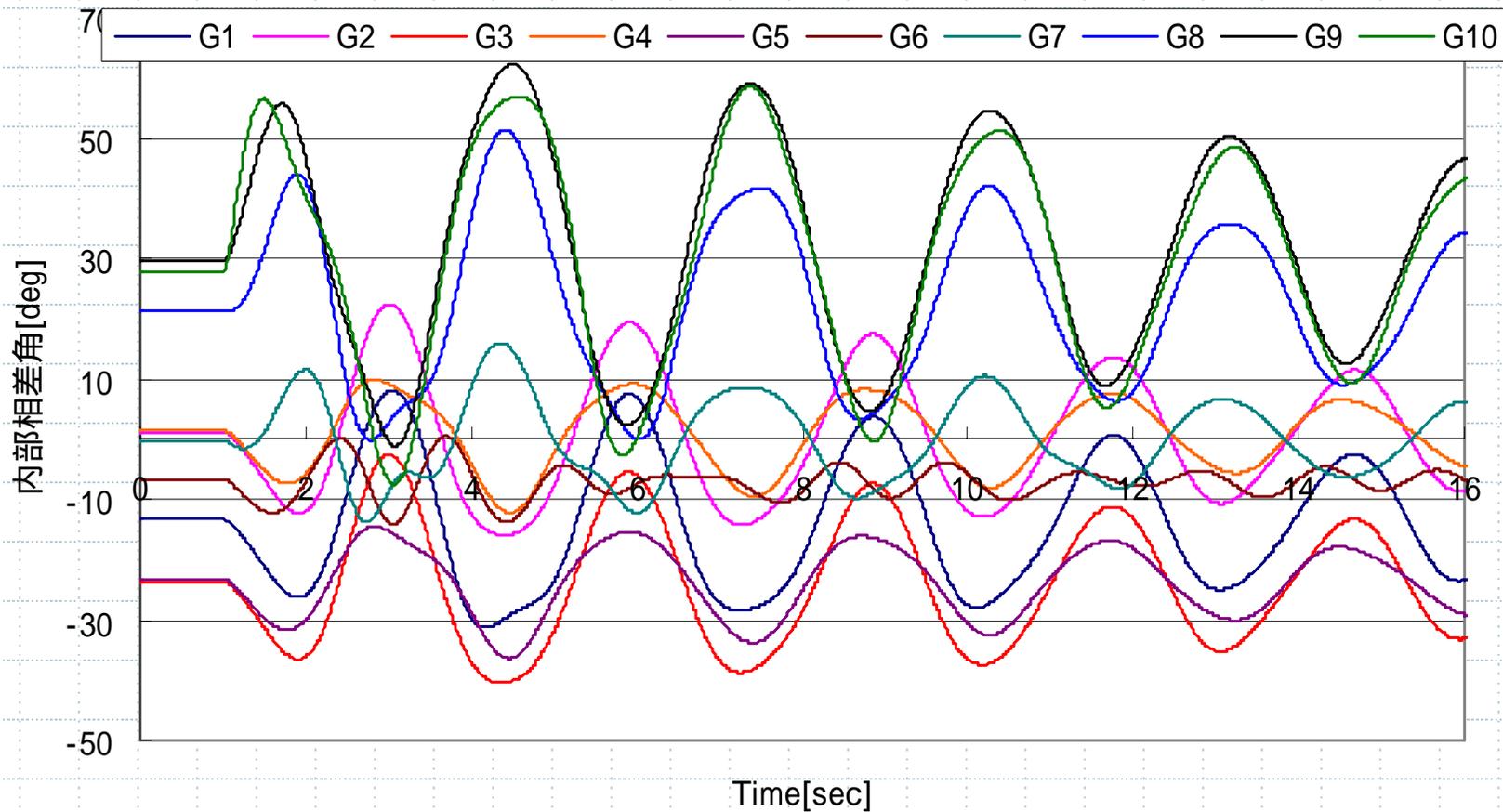
縮約前後の誤差を最小とする

励磁系を求める

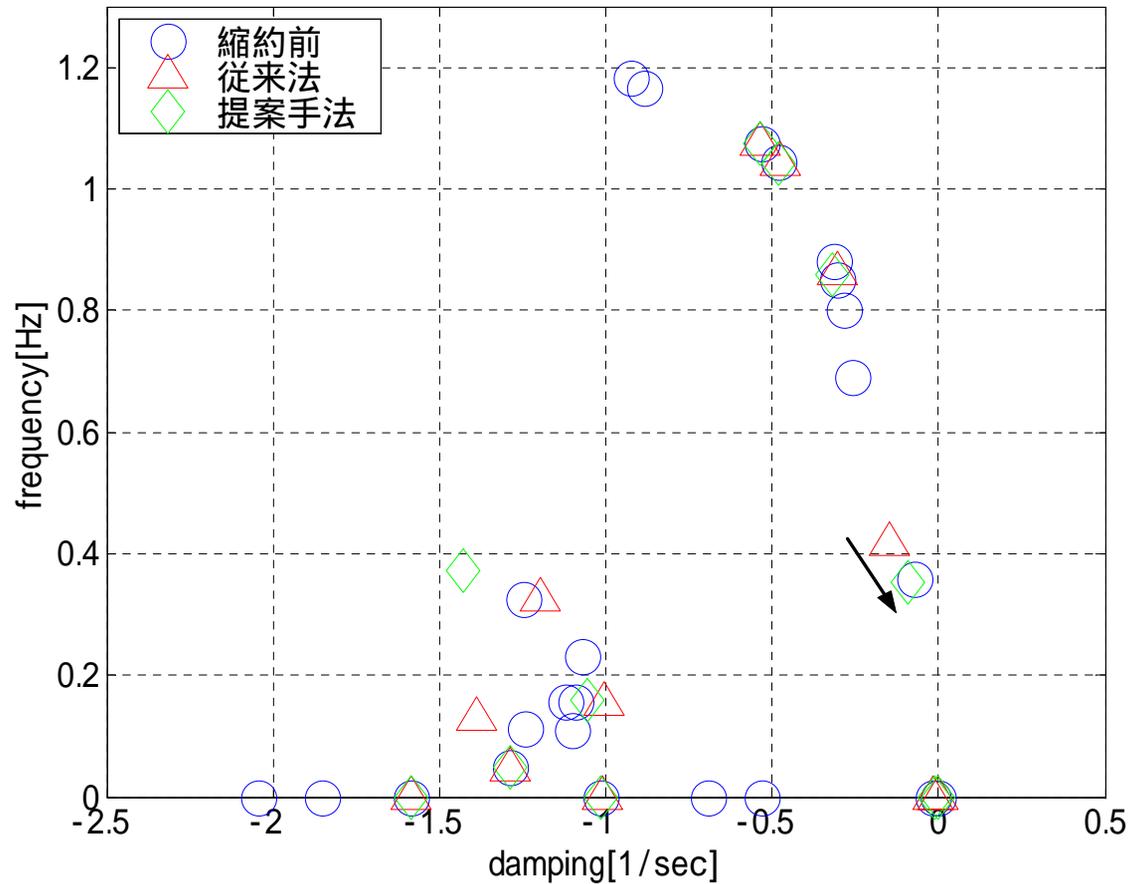
IEEJ East10機系統モデル



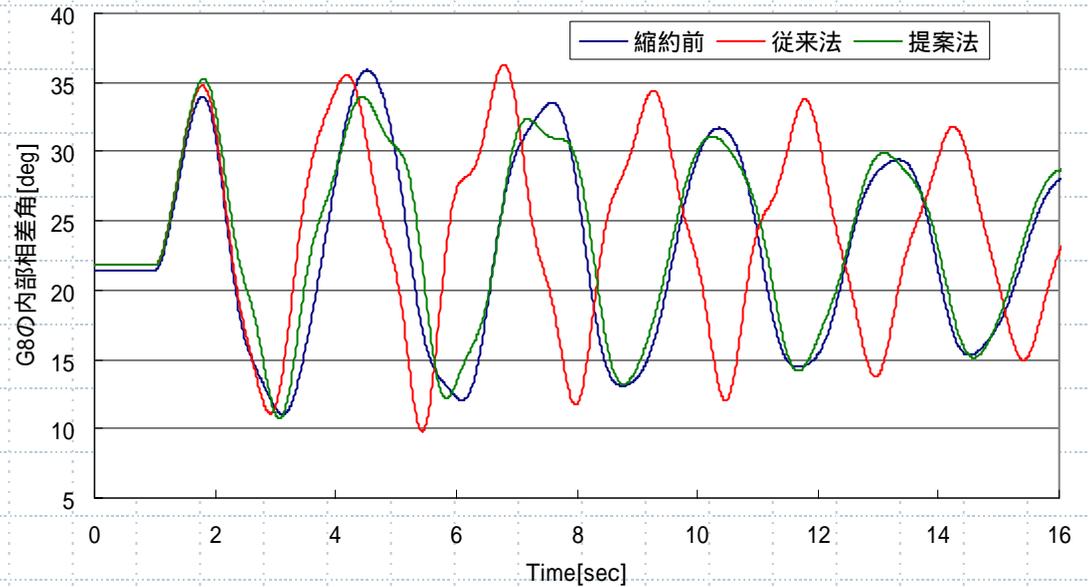
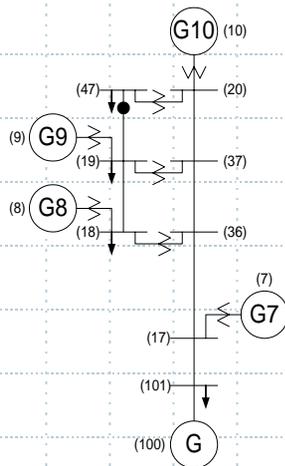
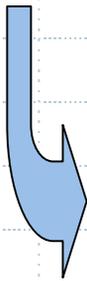
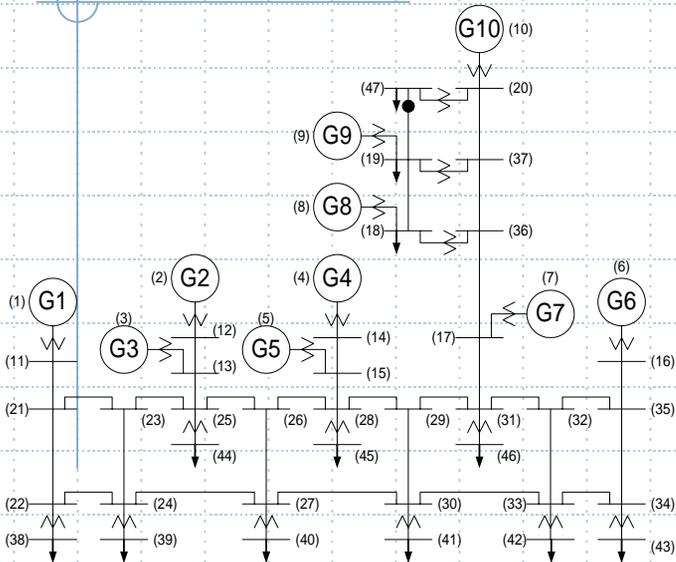
コヒーレンシーの確認



全系の固有値の修正



シミュレーション精度の比較



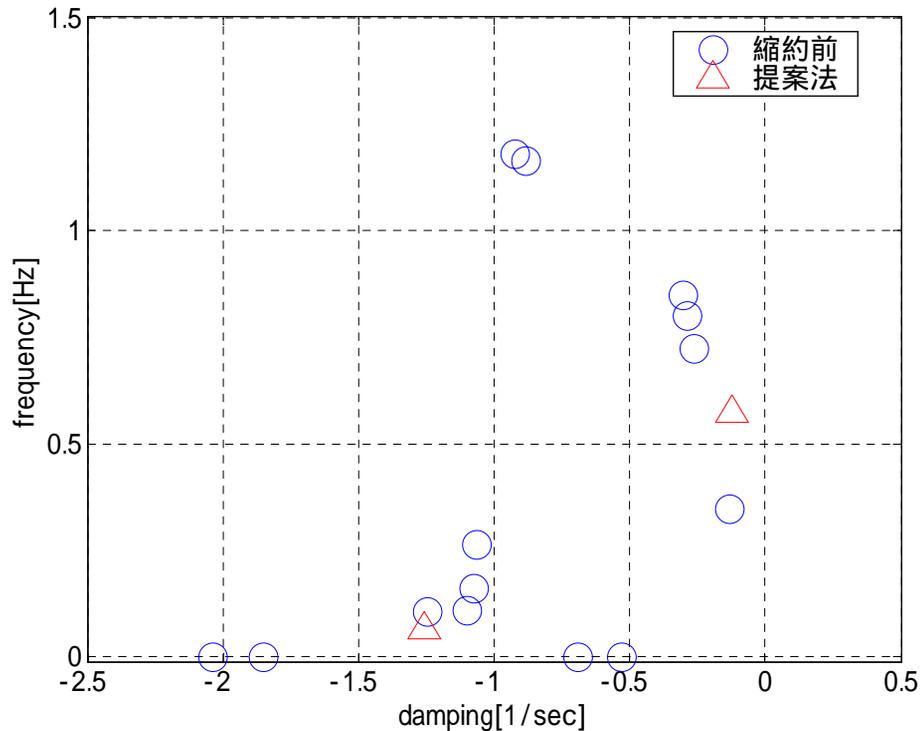
まとめ

- ◆ 縮約後の励磁系設定手法の開発
 - 部分システムのモードの特徴を利用
- ◆ これまで困難とされてきた縮約が可能
 - 異なる励磁系を含むシステムの縮約
 - コヒーレンシーの弱いシステムの縮約

今後の課題

- ◆ AVR以外の制御系における検討
- ◆ 発電機定数の考慮
- ◆ 部分システムモードと全系モードの関係

部分システムモードの様子

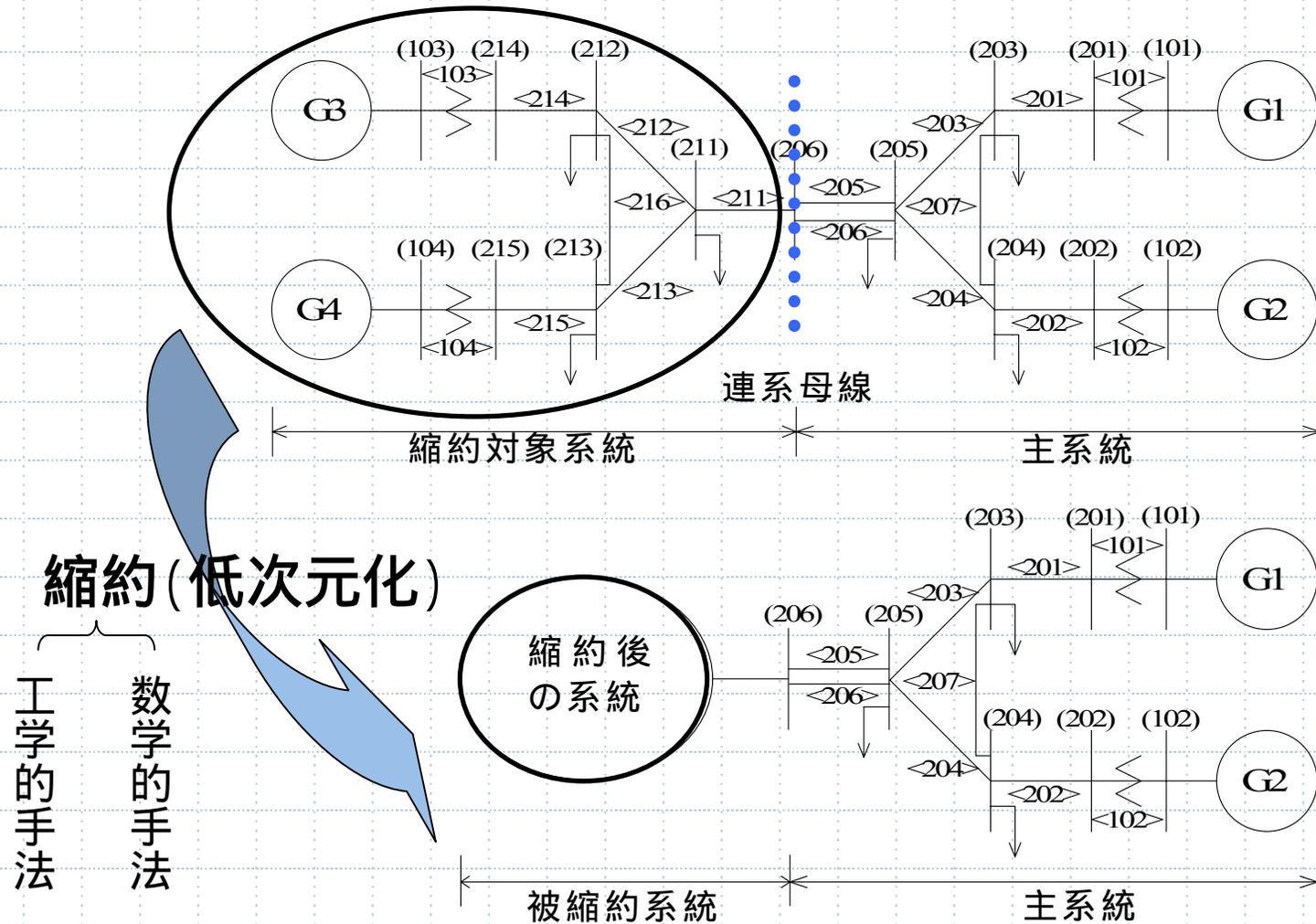


縮約後のモードは、縮約前のいくつかのモードの中間に位置している

発表の概要

1. 系統縮約の現状
2. 既存手法の問題点と本研究の目的
3. 提案法の基本的な考え方
4. 異なる励磁系を含む系統の縮約
5. コヒーレンシーの弱い系統の縮約
6. まとめ

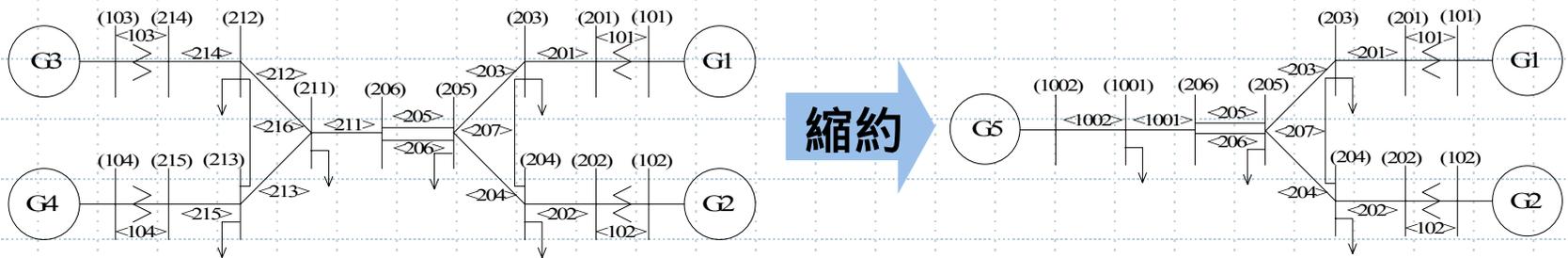
電力システムにおける低次元化



両手法の比較

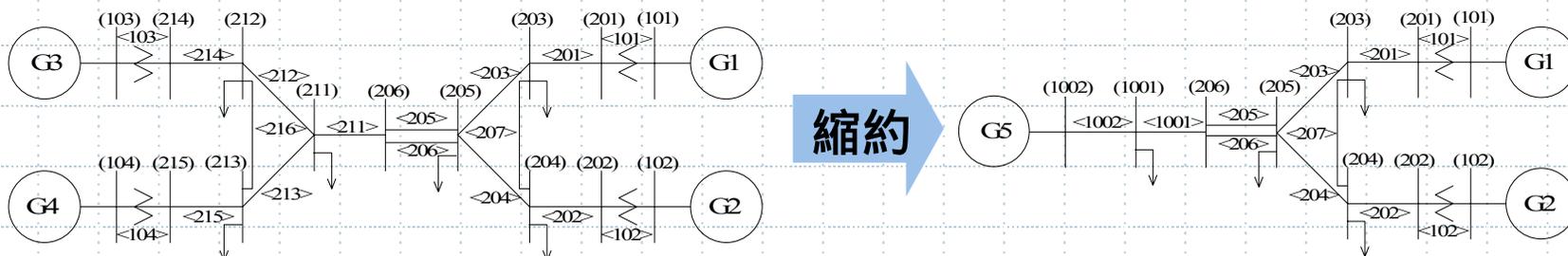
	工学的手法	数学的手法
長所	<ul style="list-style-type: none">● 縮約後に物理的なイメージが存在する● 扱いやすい	<ul style="list-style-type: none">● 誤差の評価が容易● 精度が良い
短所	<ul style="list-style-type: none">● 縮約対象システムに対する要件が多い	<ul style="list-style-type: none">● 縮約後は数式のブラックボックス
手法	<ul style="list-style-type: none">● 短絡電流法	<ul style="list-style-type: none">● モード法

工学的縮約が困難な系統

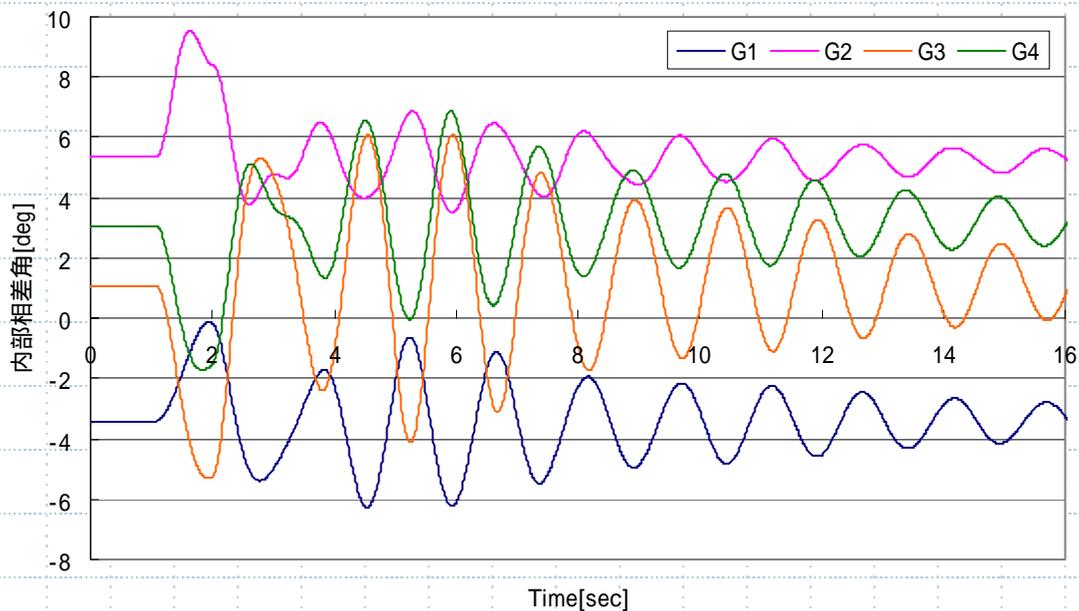


1. コヒーレンシーの弱い系統
2. 異なる励磁系を含む系統

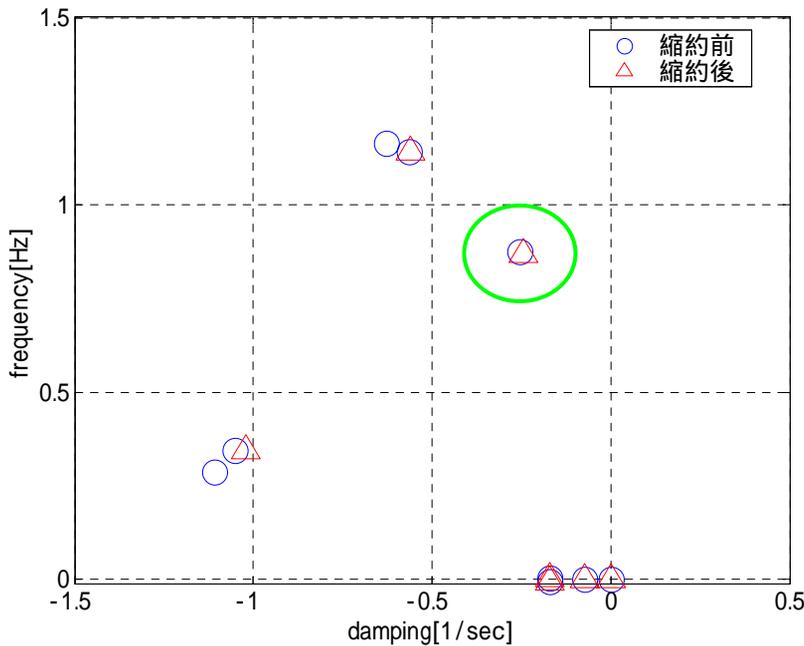
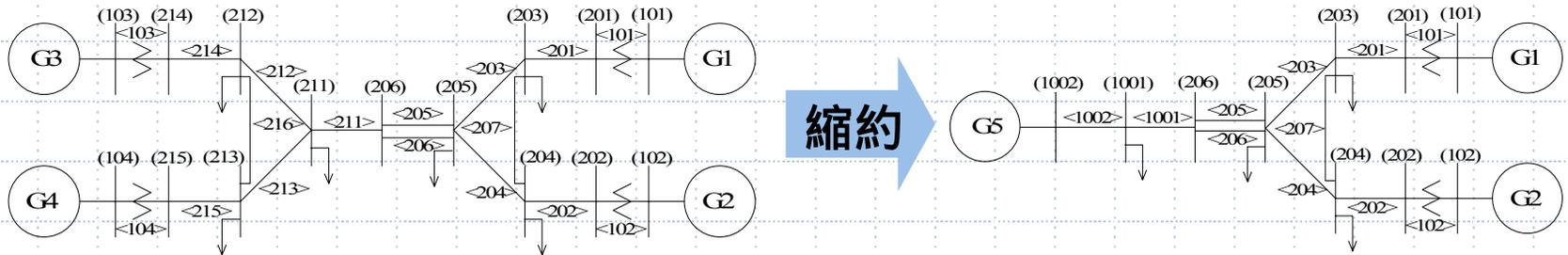
コヒーレンシー



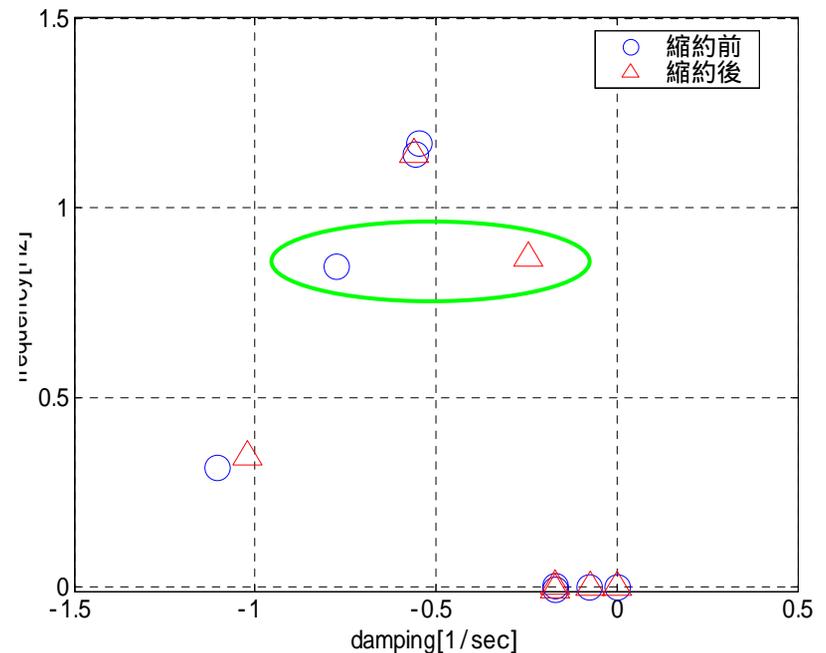
工学的手法の前提条件



励磁系の同異による固有値の違い

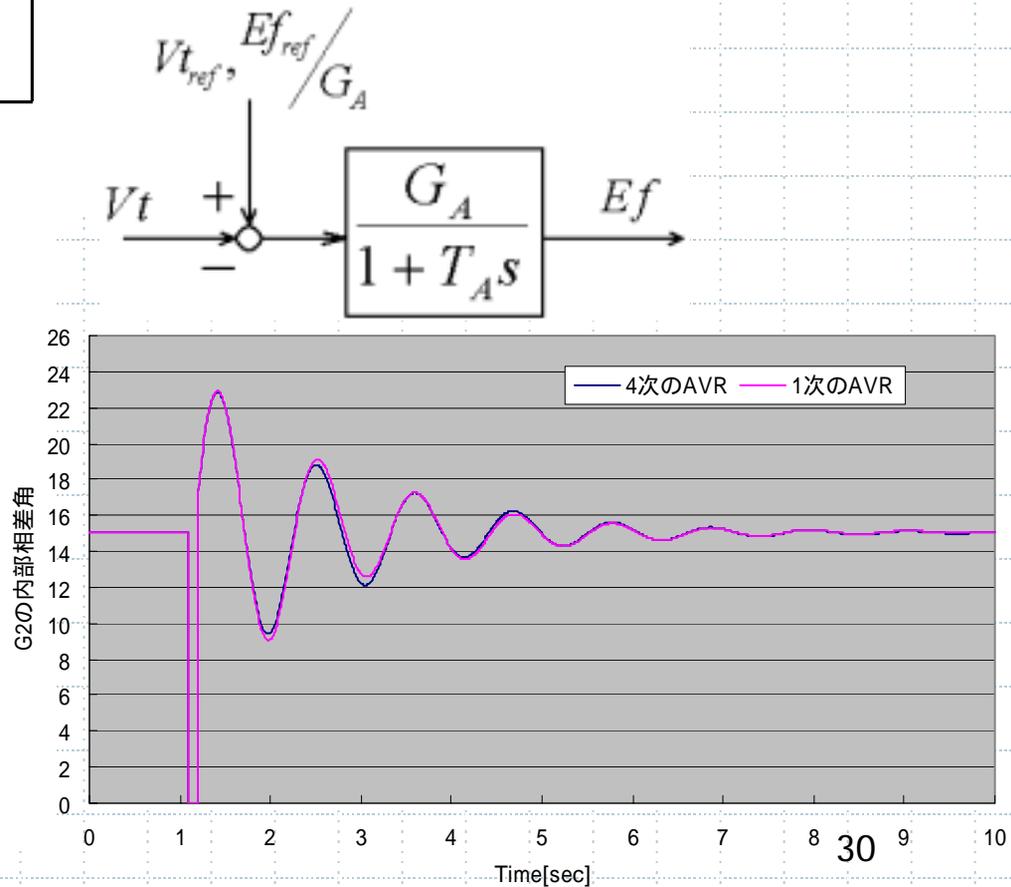
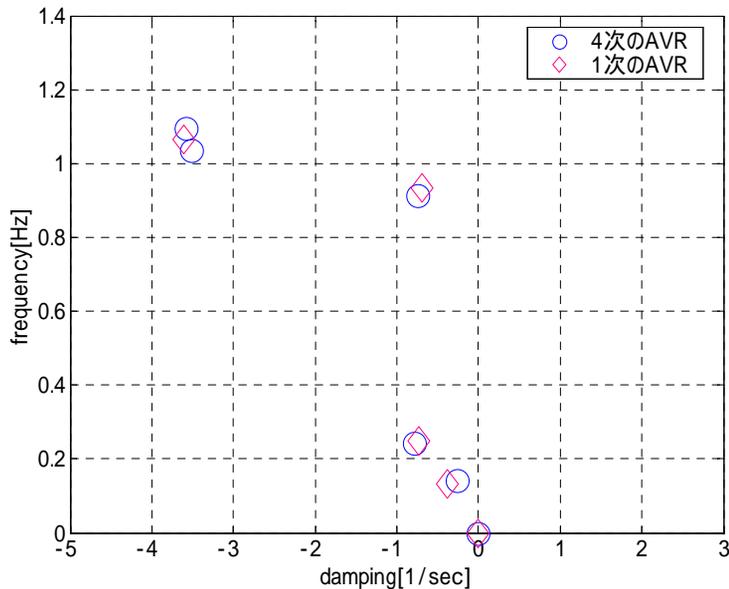
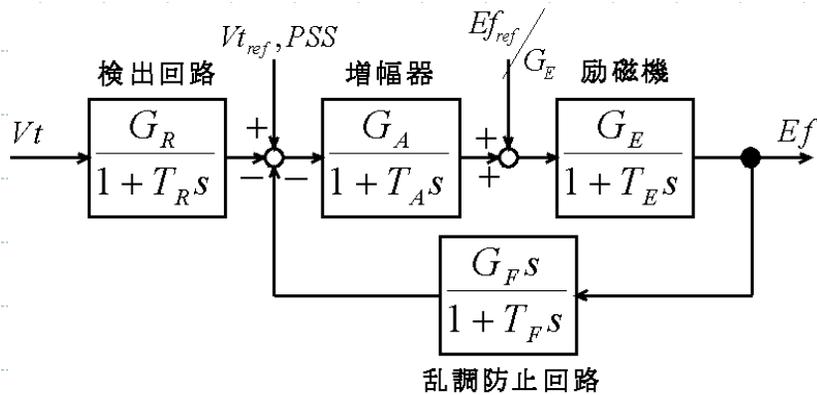


同一の励磁系

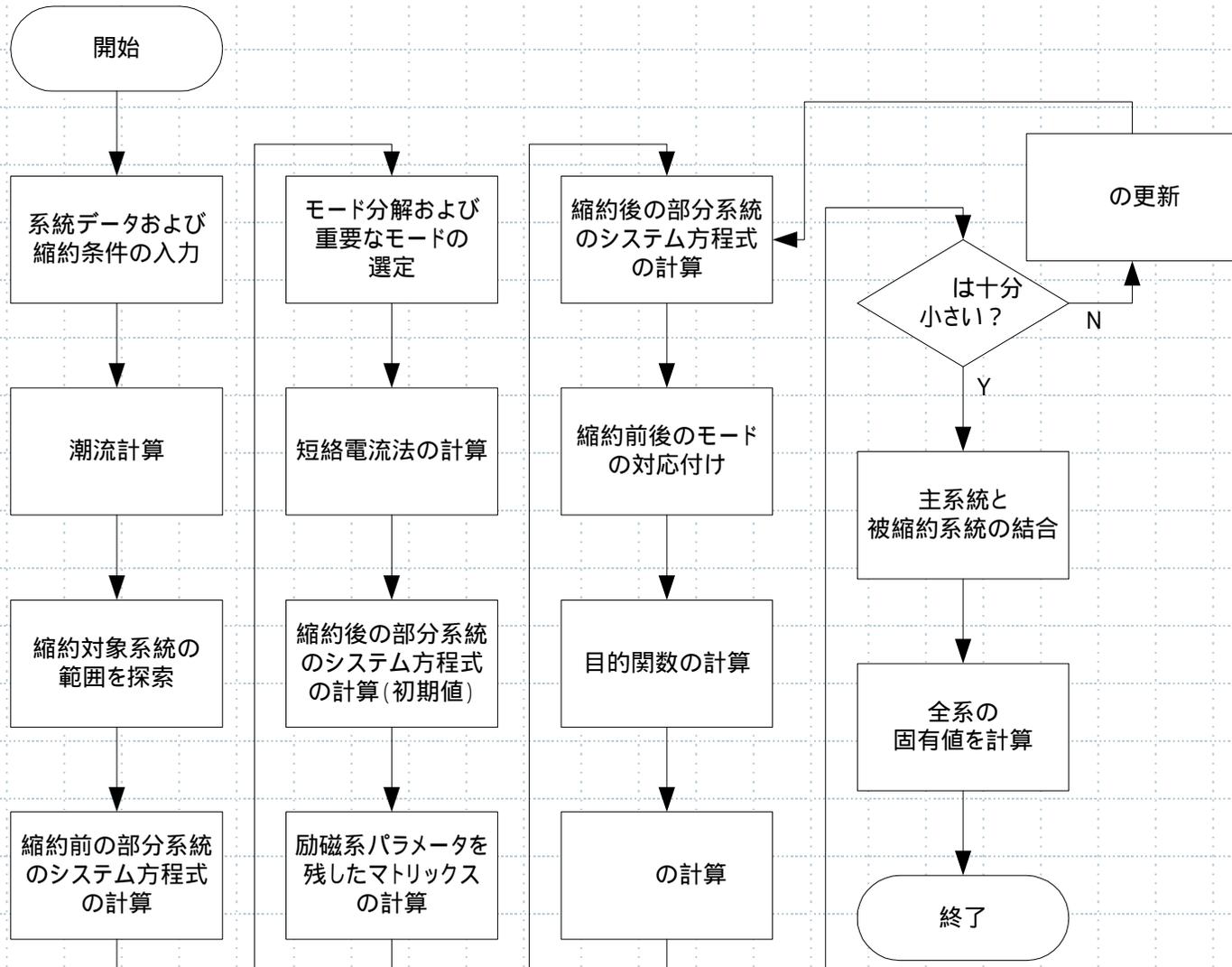


異なる励磁系

AVRの低次元モデルによる表現



提案手法のフロー



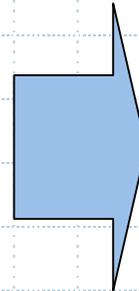
部分系統のシステム方程式

線形化した部分系統 の動特性

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_g \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_g \Delta \mathbf{v}_g \\ \Delta \mathbf{i}_g = \mathbf{C}_g \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_g \Delta \mathbf{v}_g \end{cases}$$

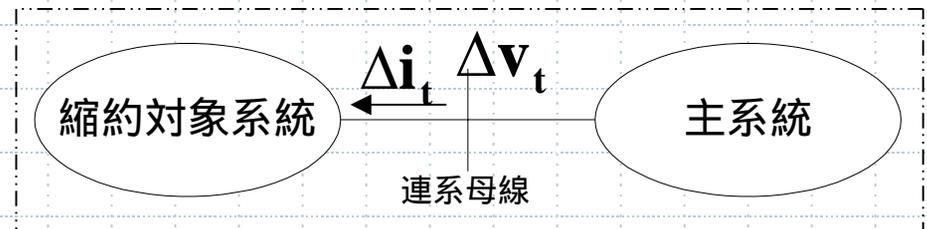
$$\Delta \mathbf{i}_L = \mathbf{J} \Delta \mathbf{v}_L$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{i}_g \\ \Delta \mathbf{i}_t \\ \Delta \mathbf{i}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gt} & \mathbf{Y}_{gL} \\ \mathbf{Y}_{tg} & \mathbf{Y}_{tt} & \mathbf{Y}_{tL} \\ \mathbf{Y}_{Lg} & \mathbf{Y}_{Lt} & \mathbf{Y}_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{v}_g \\ \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{v}_L \end{pmatrix}$$



縮約対象系統の システム方程式

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_t \Delta \mathbf{v}_t \\ \Delta \mathbf{i}_t = \mathbf{C}_t \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_t \Delta \mathbf{v}_t \end{cases}$$



全系の固有ベクトルの修正

