

平成15年3月6日

東北電力寄附講座 第2期報告会

UPFCによる電力系統の
安定度向上に関する研究

先端電力工学(東北電力)寄附講座

浦山 雅彦

近年、電力系統は大規模・複雑化



パワエレ機器を活用して安定度向上
送電能力の増大をはかることが有効

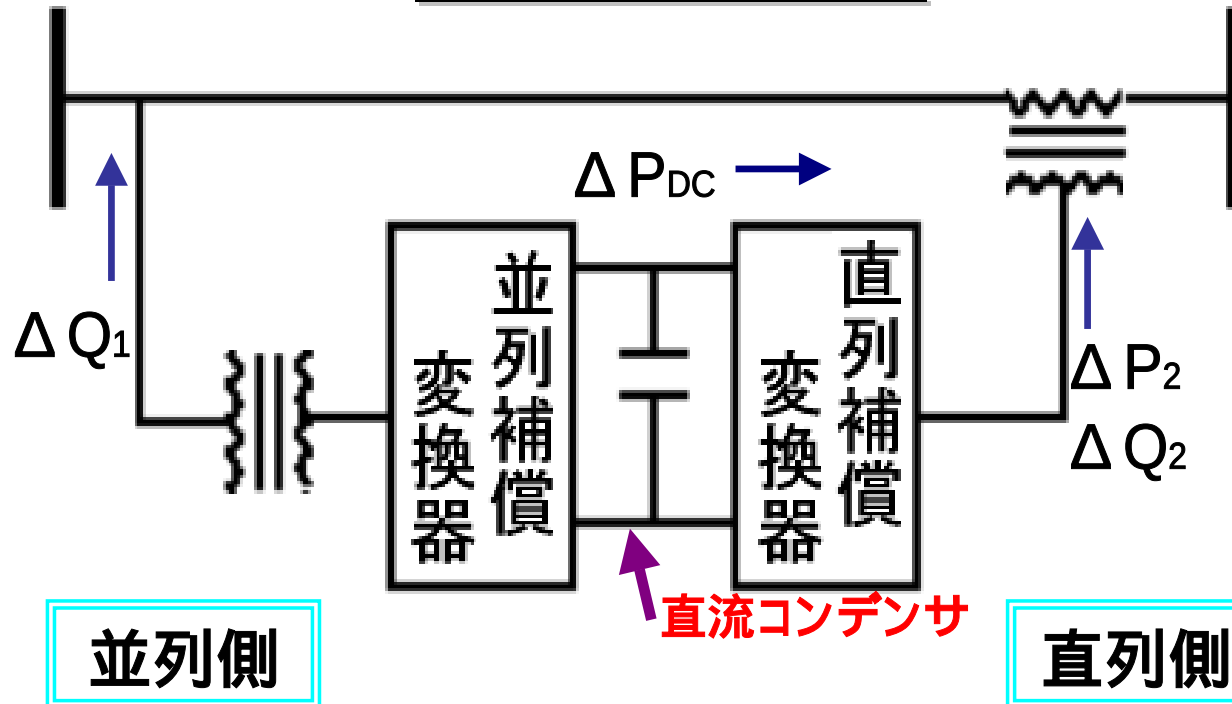
本研究では

UPFC (Unified Power Flow Controller) を用いて、安定度の向上効果という観点から検討を行う

- ・UPFC設置系統の固有値解析を行う
- ・UPFC制御系定数の設計
- ・制御系の入力に用いる情報による効果の違いを明らかにし、UPFCの最適な制御系の検討

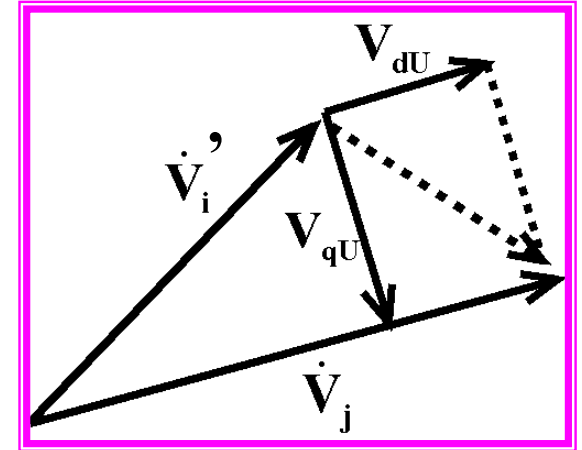
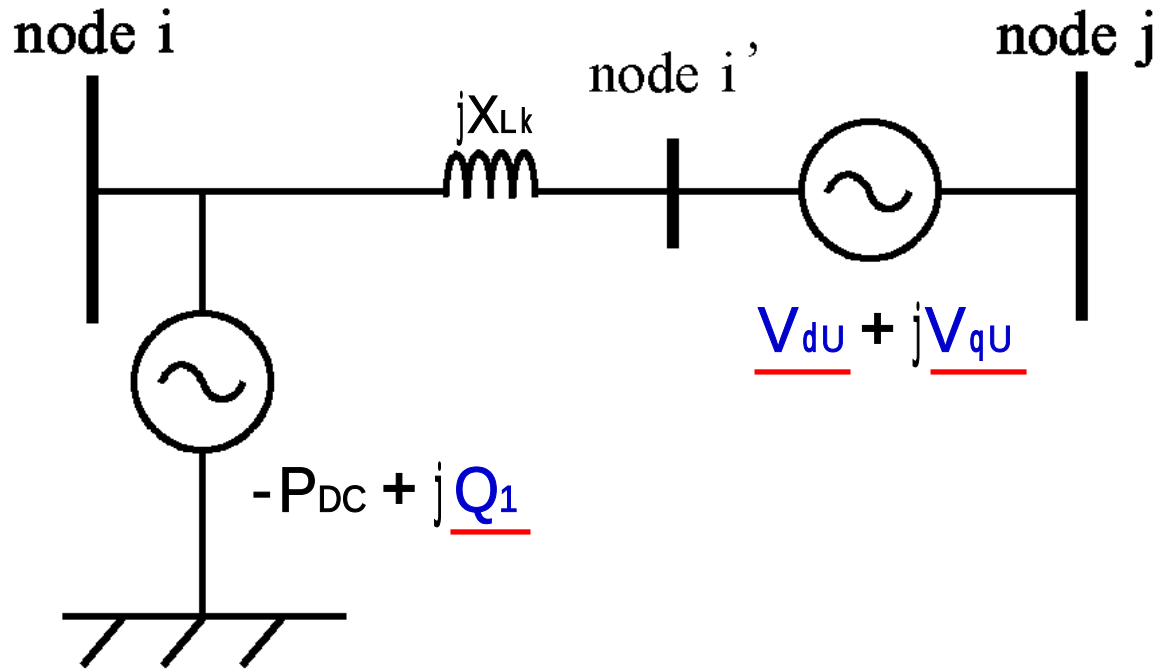
UPFC のモデル化と固有値解析手法の開発

UPFC の構成



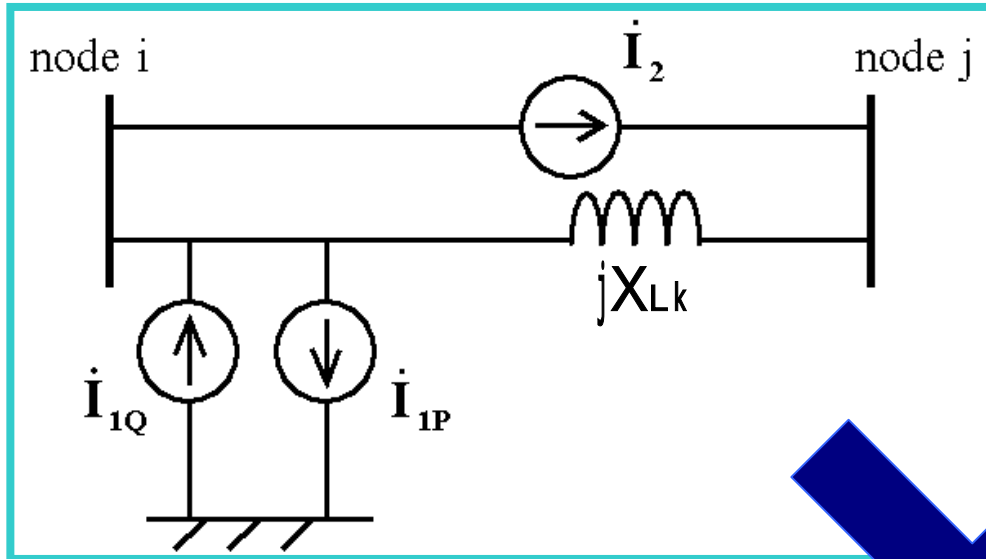
直列側・・・有効・無効電力を独立に制御
並列側・・・無効電力の制御と
直列側で発生した有効分の補完

UPFC の等価モデル



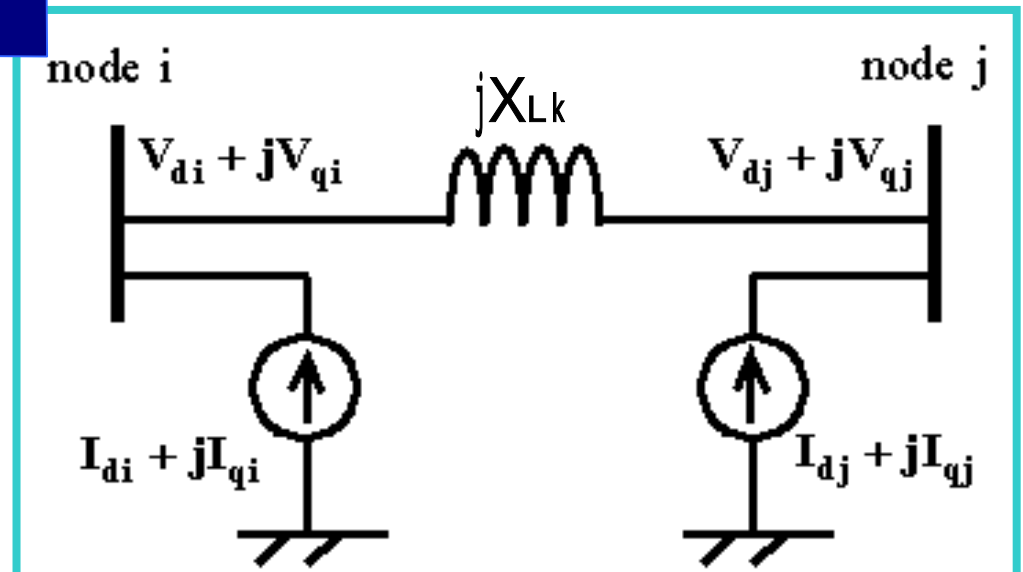
直列側と並列側をそれぞれ等価電圧源
操作変数は V_{dU} 、 V_{qU} 、 Q_1

UPFC の等価電流源モデル



$V_{di} + jV_{qi}$ をノードの定理
により電流源 I_2 へ

UPFCの等価電流源モデル
により解析する



固有値法による安定度解析

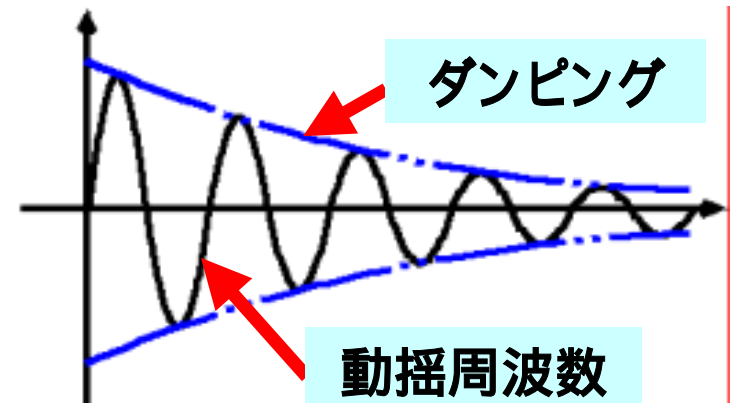
発電機と、UPFCそれぞれ線形化状態方程式を導き、

$$\begin{cases} \Delta \dot{X}_G = A_G \Delta X_G + B_G \Delta V_G \\ \Delta I_G = C_G \Delta X_G + D_G \Delta V_G \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta \dot{X}_U = A_U \Delta X_U + B_U \Delta V_U \\ \Delta I_U = C_U \Delta X_U + D_U \Delta V_U \end{cases}$$

これらを、系統アドミタンス行列、負荷特性の式より統合
 $\dot{X} = AX$ から固有値算出

固有値実部 ……ダンピング（減衰性）示す。正なら発散し、不安定

固有値虚部 ……動揺の周波数示す



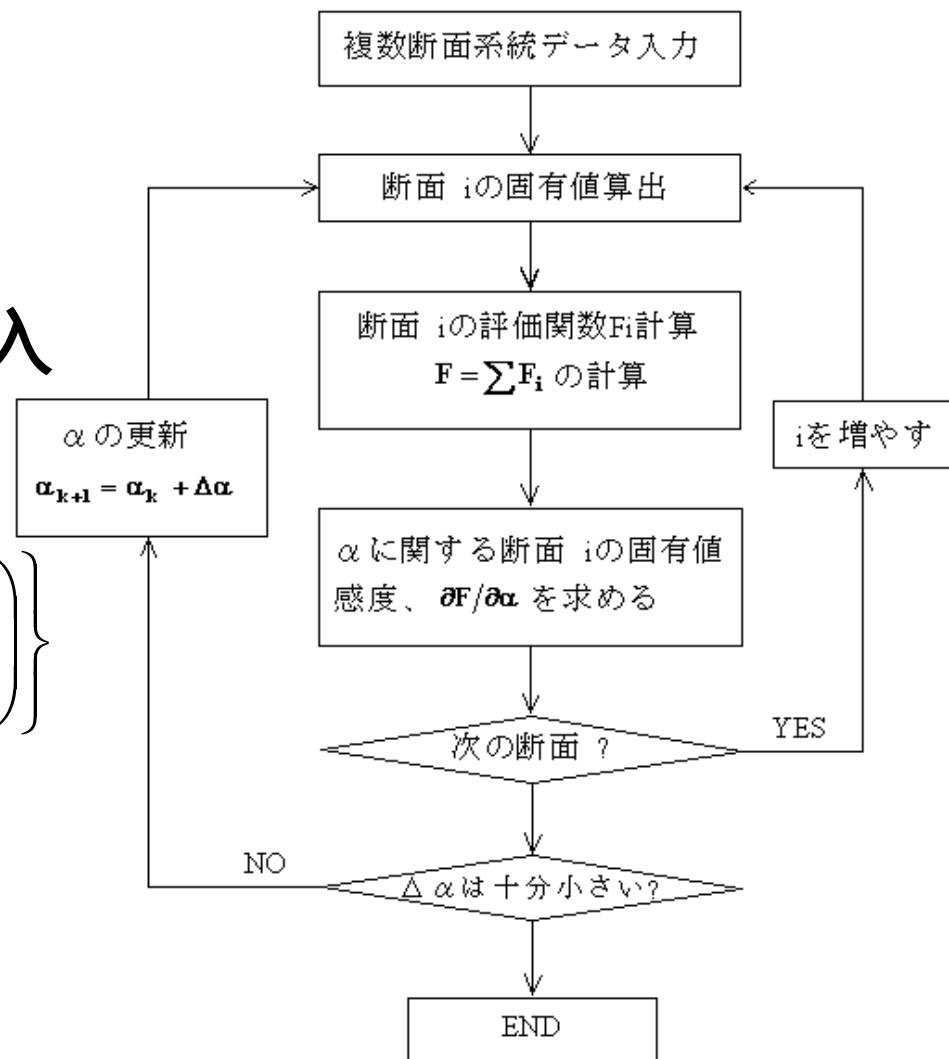
UPFC制御系定数最適化

UPFC制御系の位相補償時定数 やゲインの設計手法

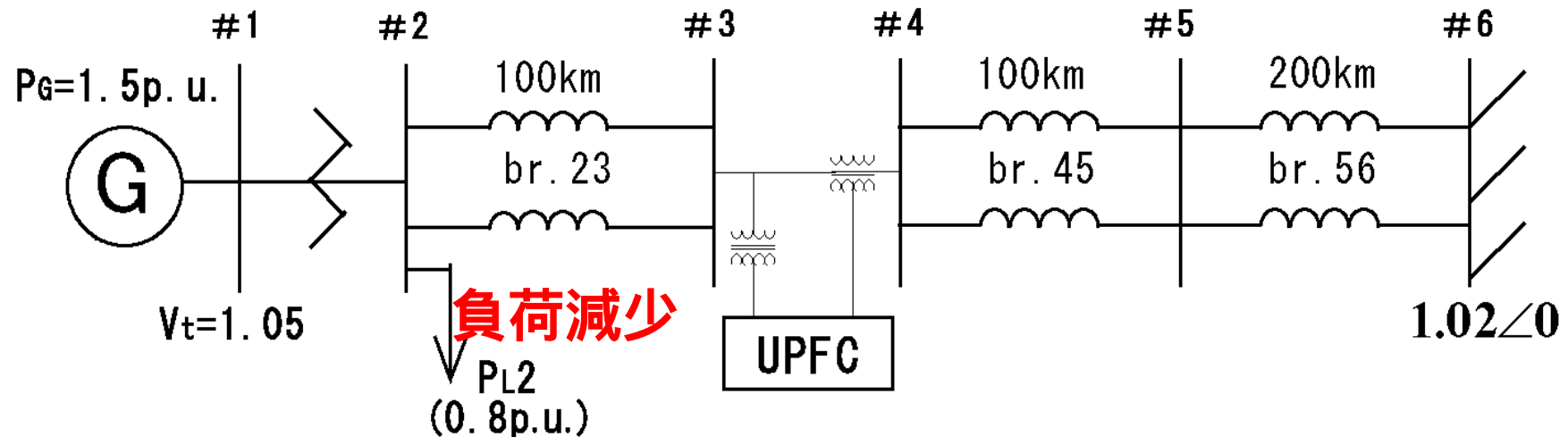
固有値を利用した評価関数を導入

$$F = \sum_{i=1}^n \left\{ \exp(k_f \lambda_{Ri}) + \exp\left(k_\omega \frac{\omega_{i0} - \omega_i}{\omega_{i0}}\right) \right\}$$

固有値感度から $\partial F / \partial \alpha$ を計算し
山登り法により最小化



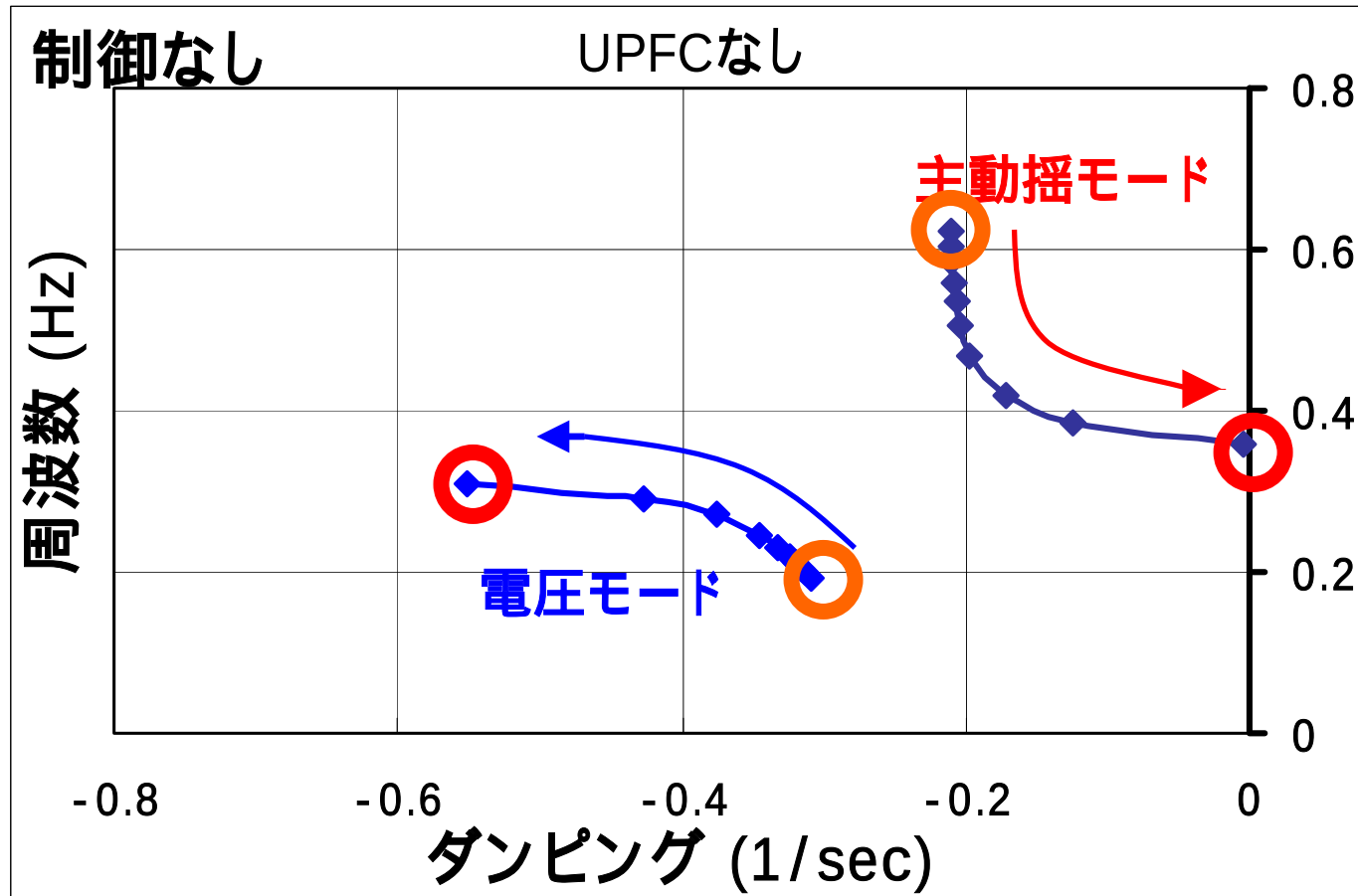
系統安定化のためのUPFC最適制御系の検討



- ・基準容量1000MVA
- ・発電機容量2000MVA
- ・AVRあり
- ・#2の負荷 P_{L2} を減少させて右向き潮流を増加させる

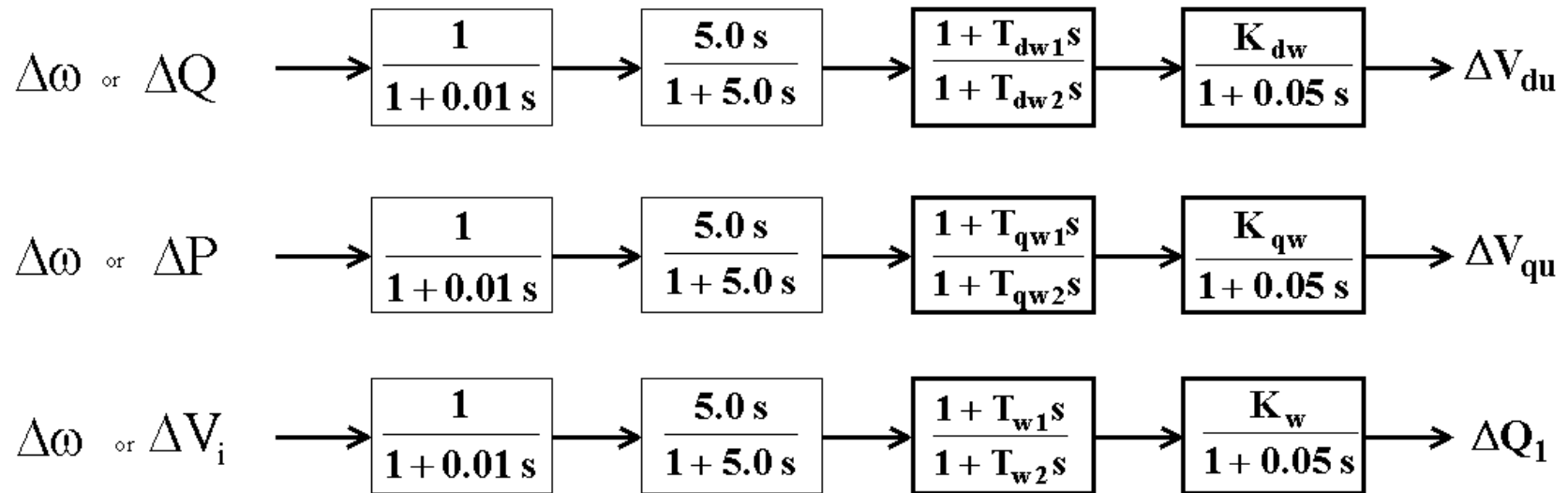
今回はまず、 V_{dU} 、 V_{qU} 、 Q_1 の3つの操作変数のうち、まず1つだけを制御した際の固有値を、それぞれ求めている

UPFCなしの固有値変化



右向き潮流増加に対し、主動揺モードはダンピング・動揺周波数が低下し、逆に電圧モードは安定化する

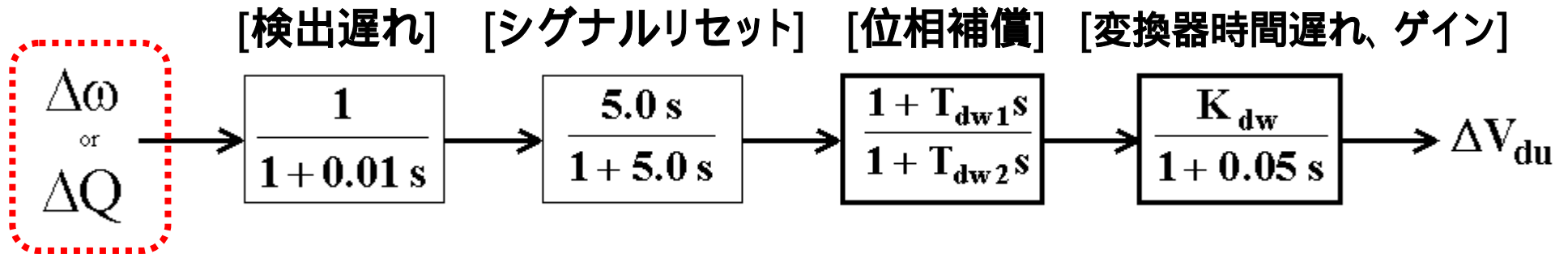
UPFC制御系の入力情報選定



遠端情報	$\Delta\omega$: 発電機角速度偏差	ΔV_t : 発電機端子電圧偏差
ローカル情報	ΔP : UPFC通過有効電力 ΔV_i : UPFC設置端子電圧偏差	ΔQ : UPFC通過無効電力

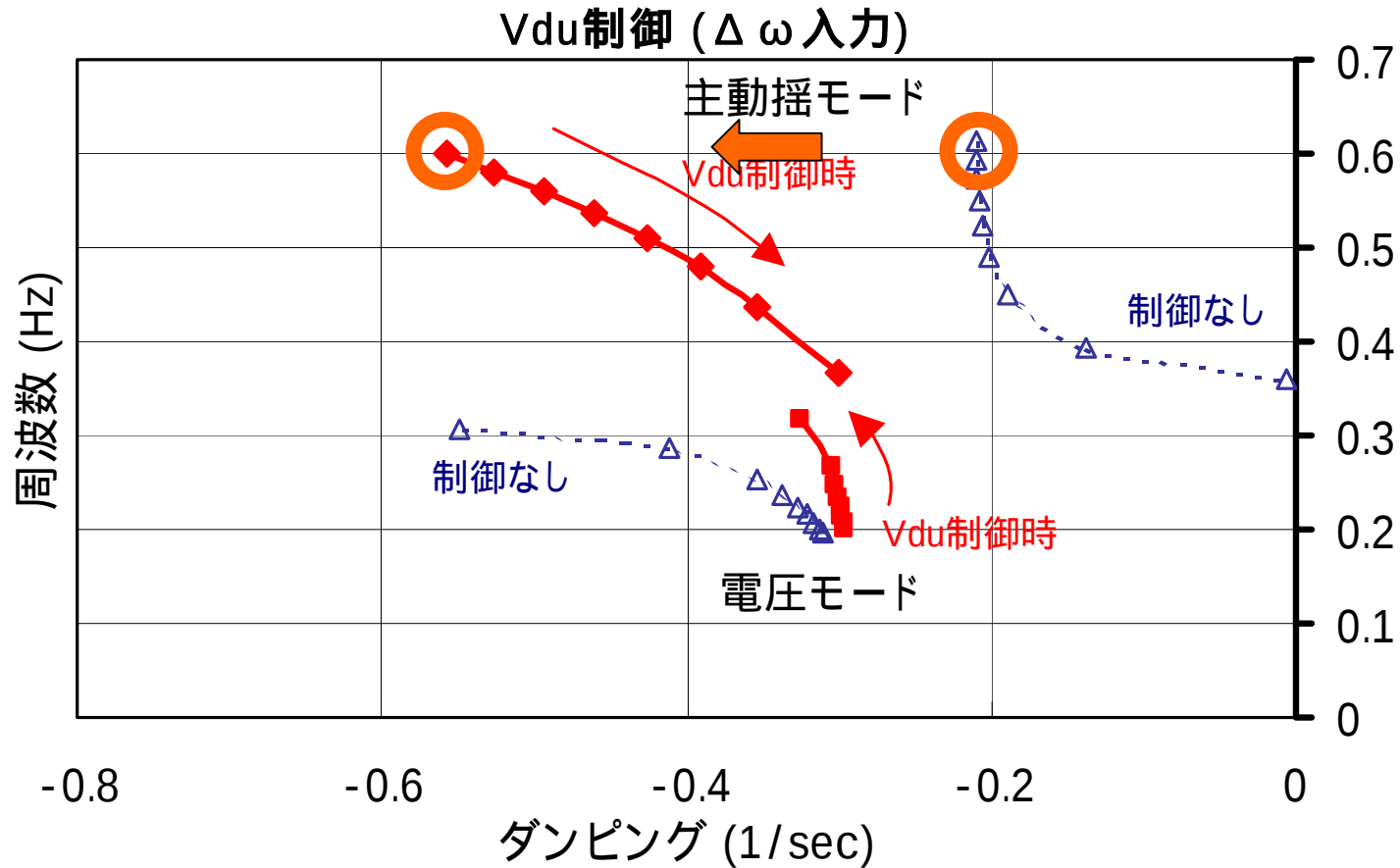
制御入力による安定化効果の違いを、それぞれの操作変数に対して比較検討

V_{du} 制御の比較



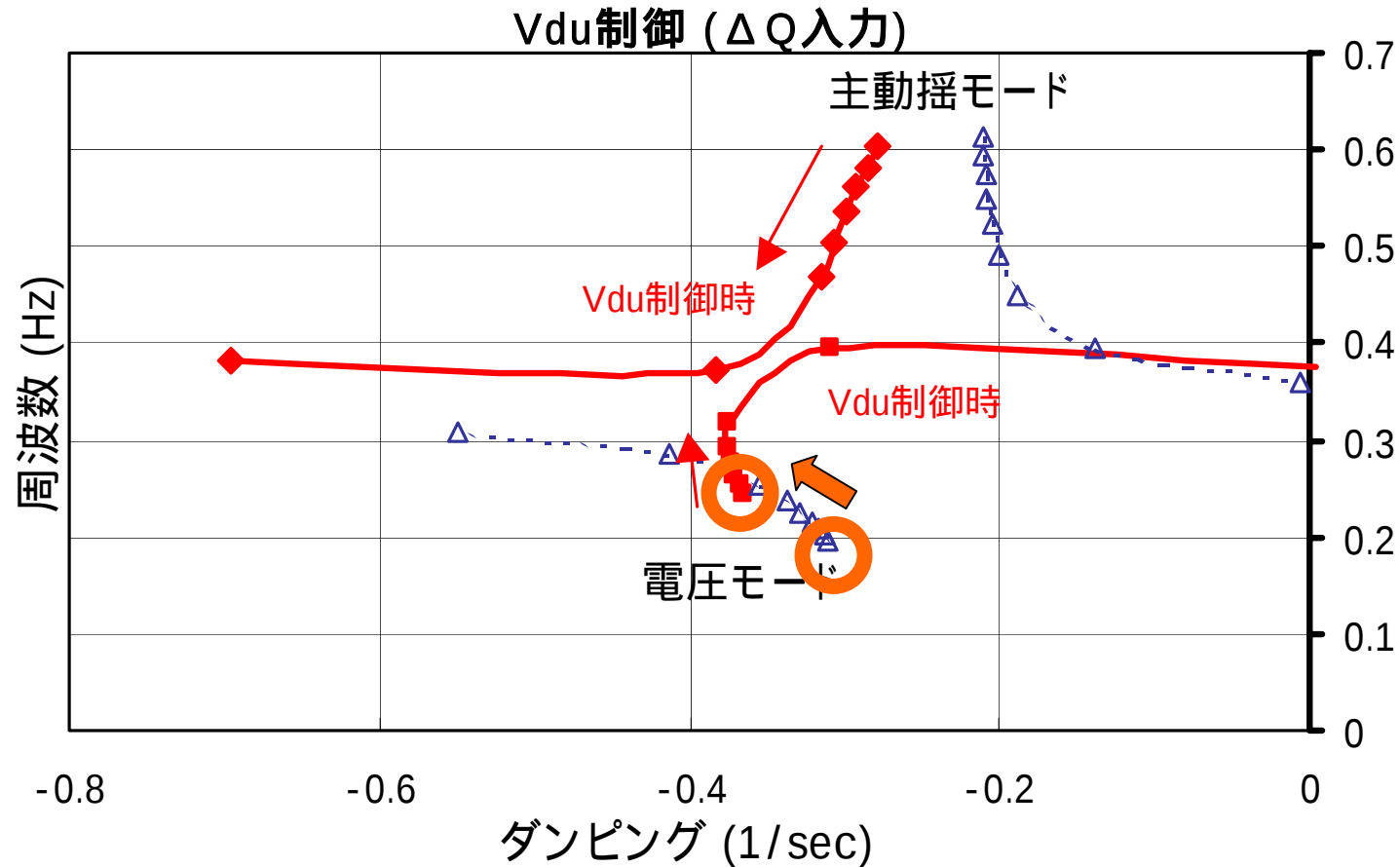
- ・発電機角速度偏差 $\Delta \omega$ を入力。ダンピング向上をはかる
- ・ V_{du} は無効電力に影響が大きいいためUPFC設置地点無効電力を入力にする制御系も効果が期待

V_{du} 制御のみの固有値($\Delta \omega$ 入力)



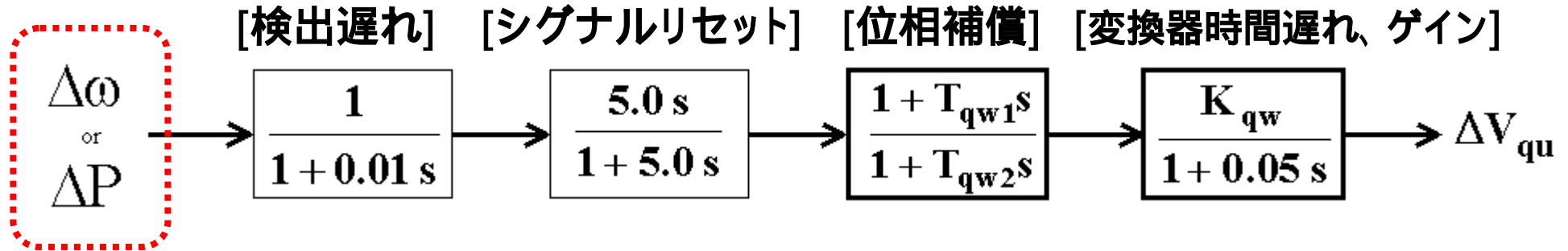
主動揺モードのダンピング向上。一方、電圧モードは潮流増加に伴い少し不安定化する

V_{du} 制御のみの固有値(ΔQ 入力)



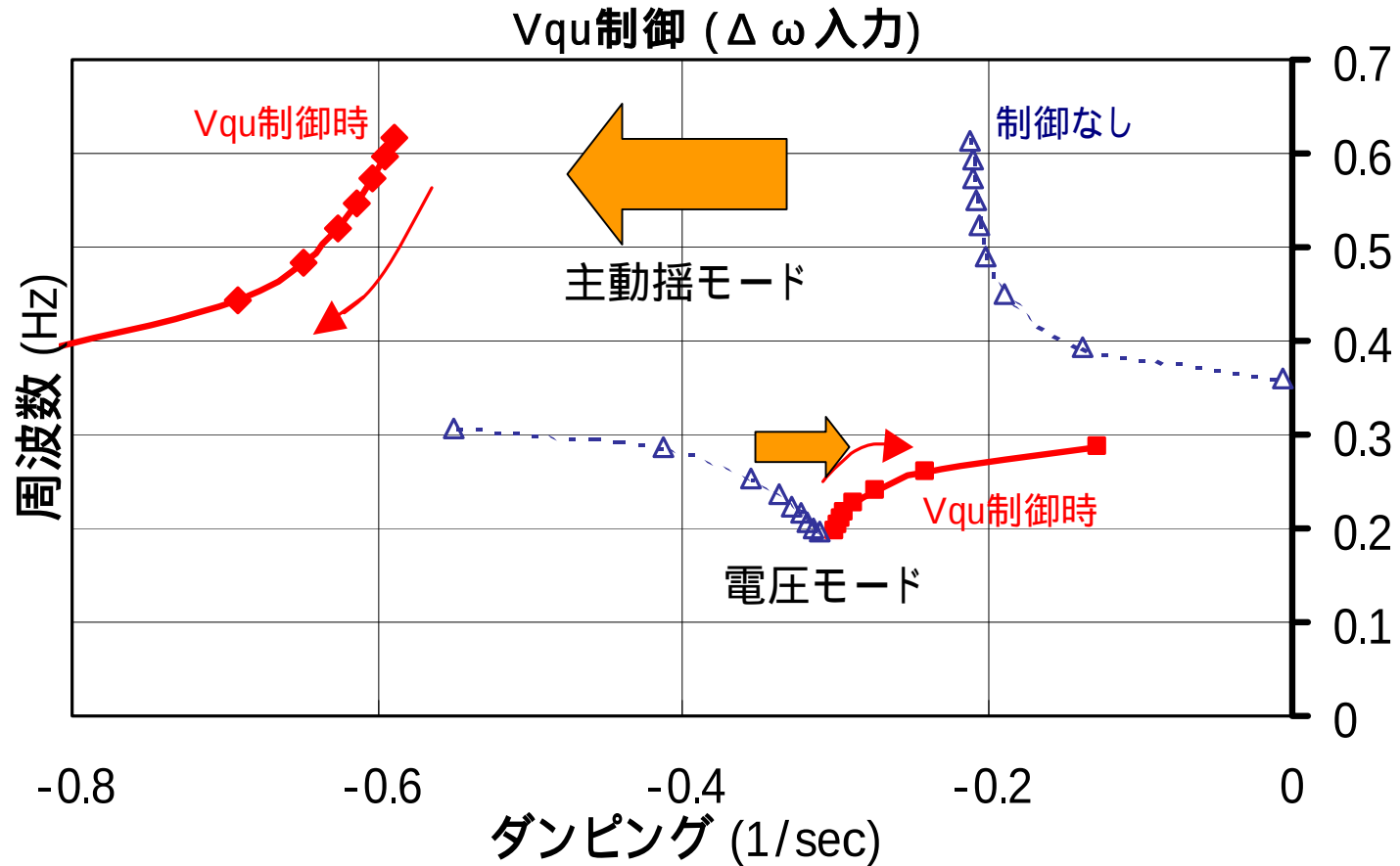
電圧モードが安定化
主動揺モードのダンピングも少し向上

V_{qu} 制御の比較



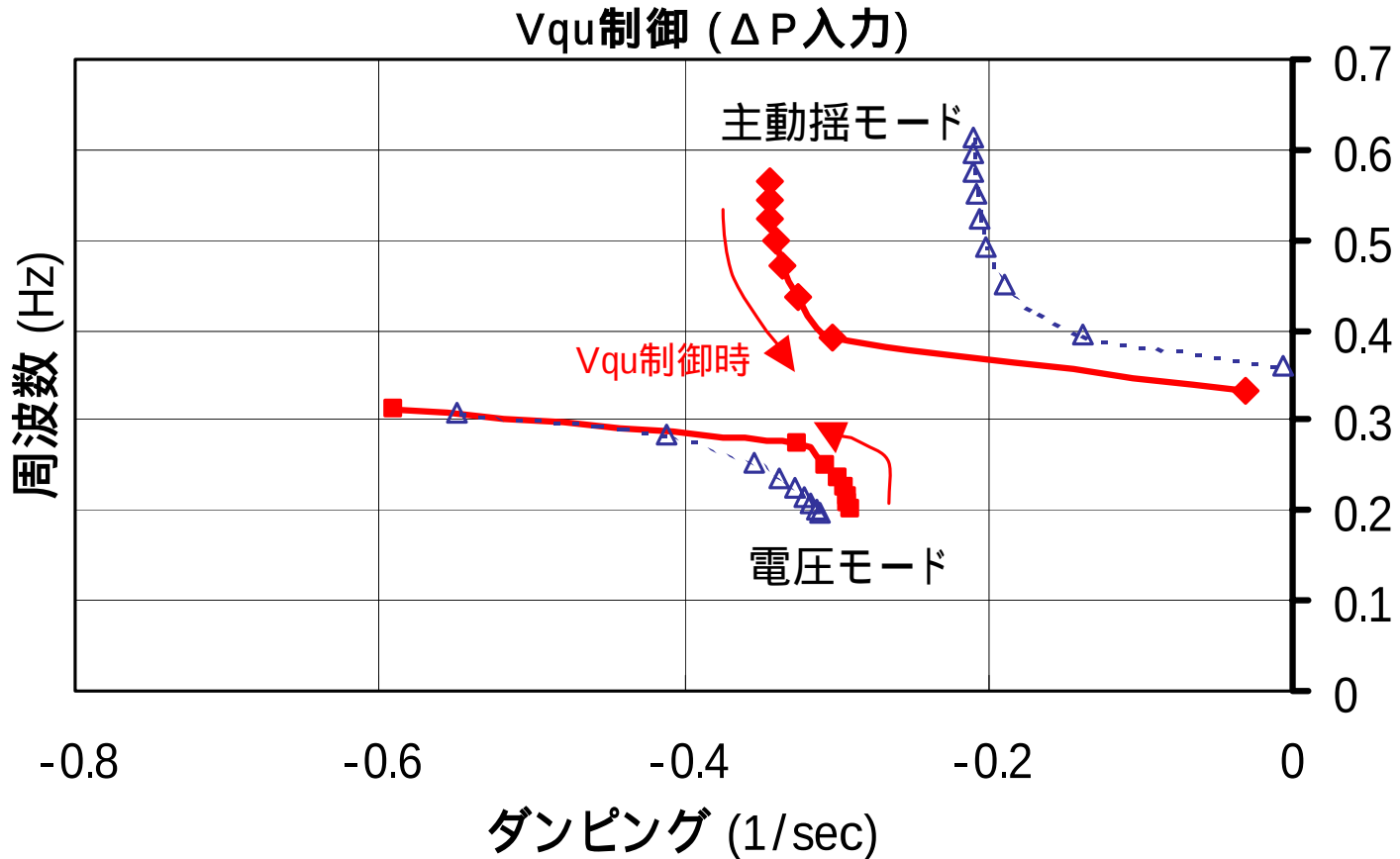
- ・発電機角速度偏差 $\Delta\omega$ を入力とする制御系で主動揺モードのダンピング向上をはかる
- ・ V_{qu} は有効電力に影響が大きいいため有効電力を入力にする制御系も効果が期待

V_{qu} 制御のみの固有値($\Delta \omega$ 入力)



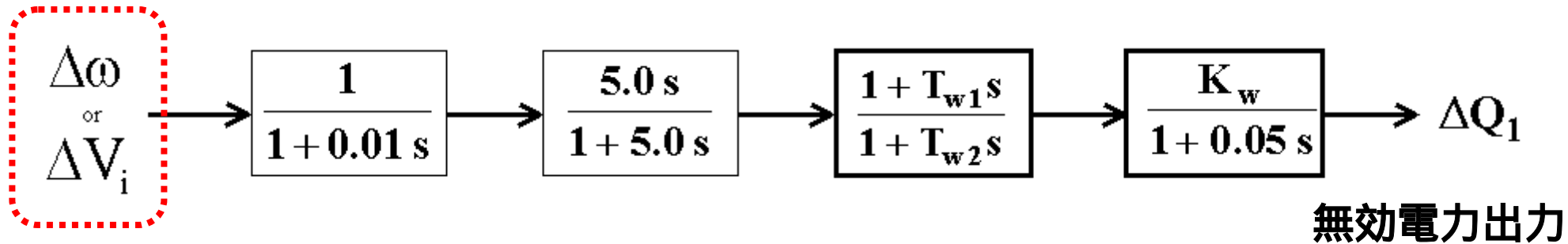
V_{qu} 制御で主動揺モードのダンピングが大きく向上。
一方、電圧モードは逆に不安定化

V_{qu} 制御のみの固有値(ΔP 入力)



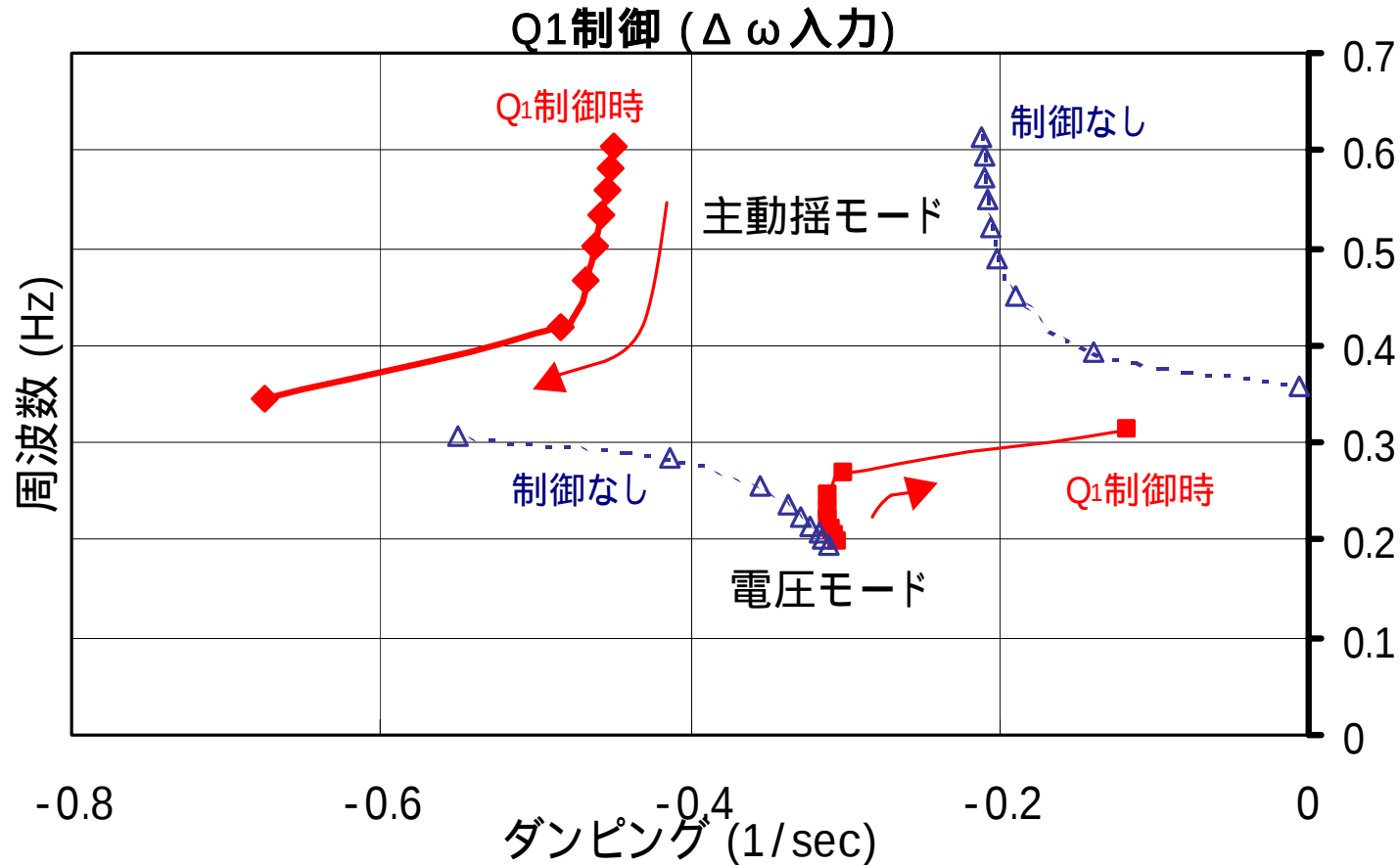
主動揺モードのダンピングが向上。電圧モードは $\Delta \omega$ 入力のように不安定化しない

Q₁制御の比較



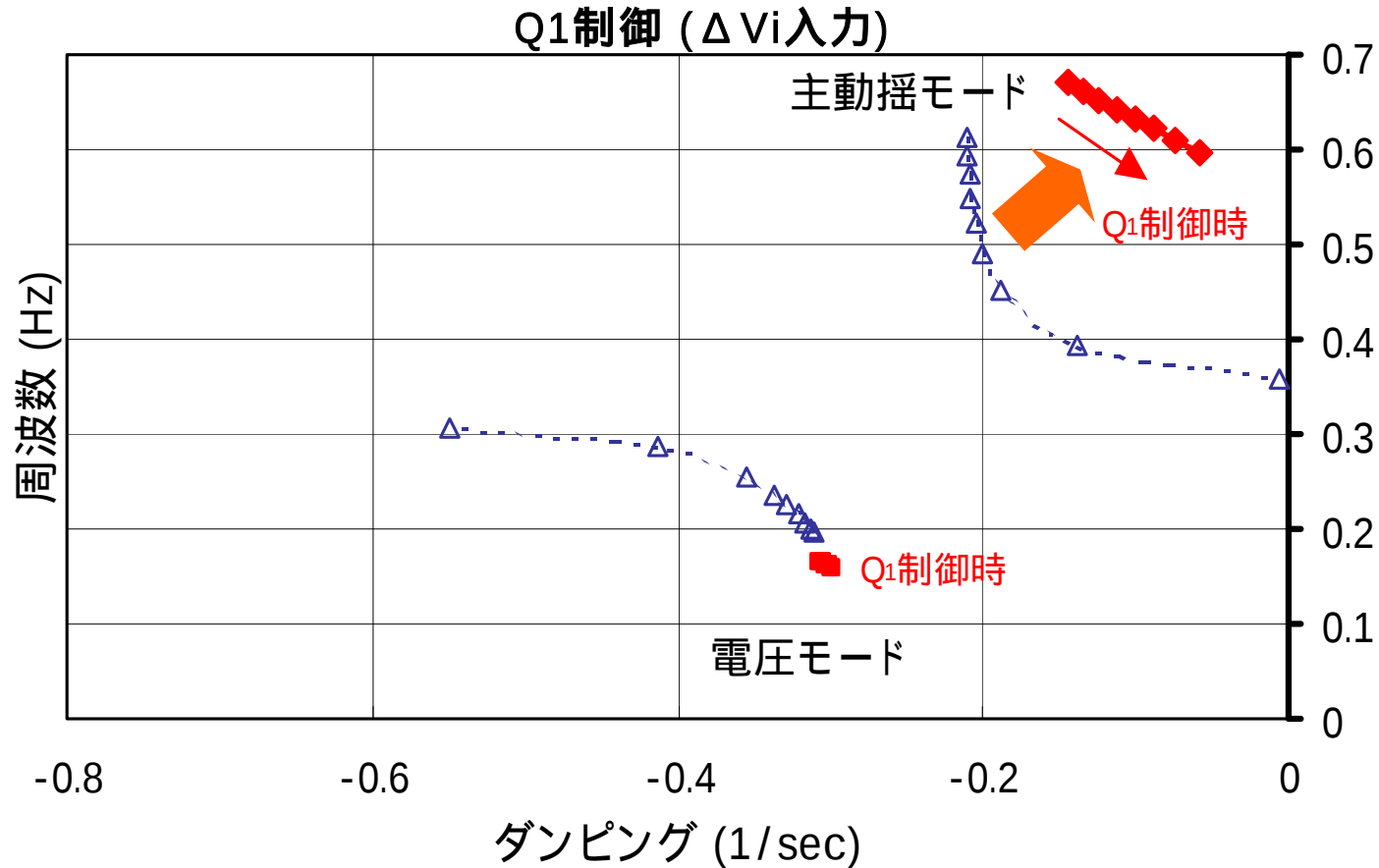
- ・発電機角速度偏差 $\Delta\omega$ を入力。ダンピング向上期待
- ・電圧の偏差を解消するため、設置端子電圧 V_i を入力とし無効電力を出力する制御系

Q1制御のみの固有値($\Delta \omega$ 入力)



V_{du}制御と同様に主動揺モードのダンピングが向上
電圧モードは不安定化

Q1制御のみの固有値(ΔV_i 入力)



主動揺モードのダンピングが悪化するが周波数は向上
また、電圧モードも安定

UPFC各操作変数ごとの固有値解析結果

主動揺モードの安定化

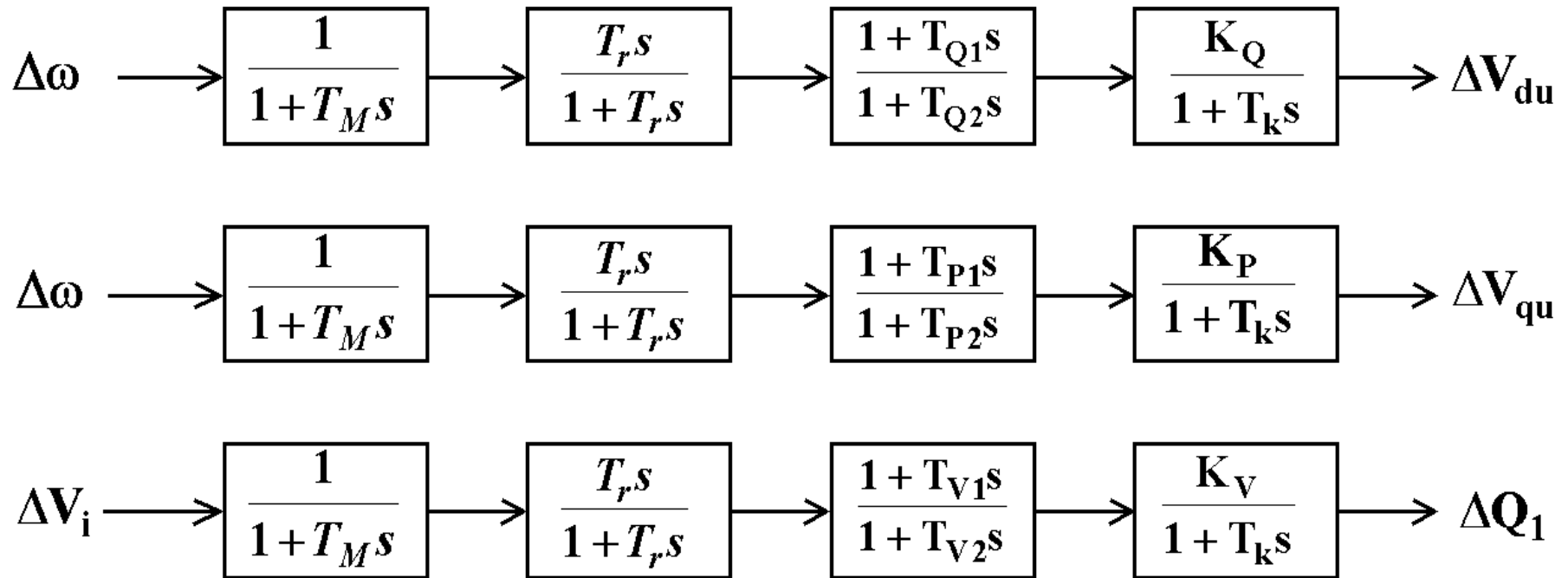
- ・ $\Delta \omega$ の制御入力では基本的にダンピングが向上
特に V_{qU} 制御で位相角を制御するのが効果大きい

これは内部相差角 δ に直接関係する ω を制御入力することで ΔP 入力よりも大幅に安定化している

電圧モード

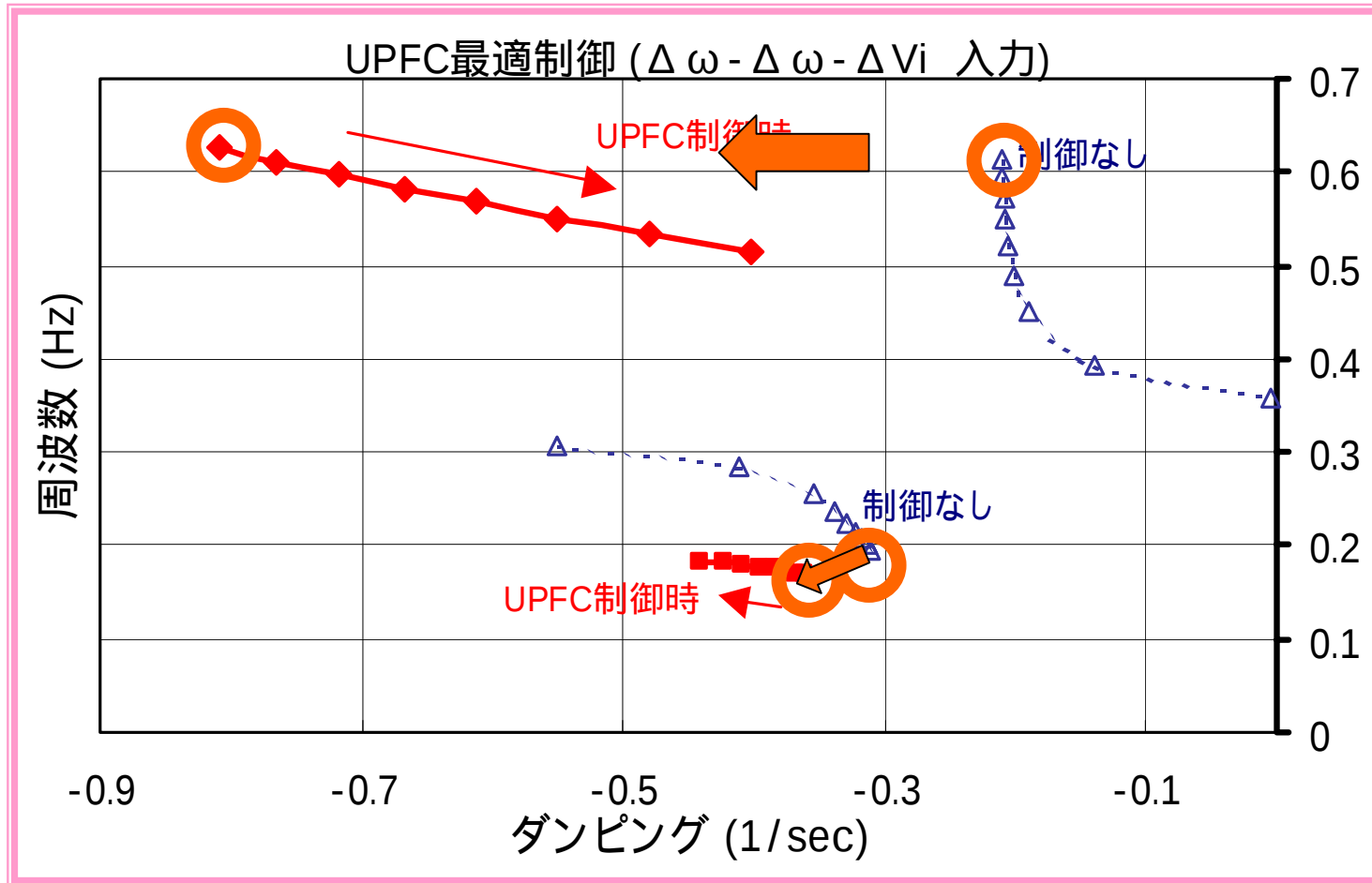
- ・ $\Delta \omega$ の制御入力では安定化効果はほとんどない
- ・ 電圧モード安定化にはローカル情報が必要と考えられる

UPFC制御系 (最適制御系)



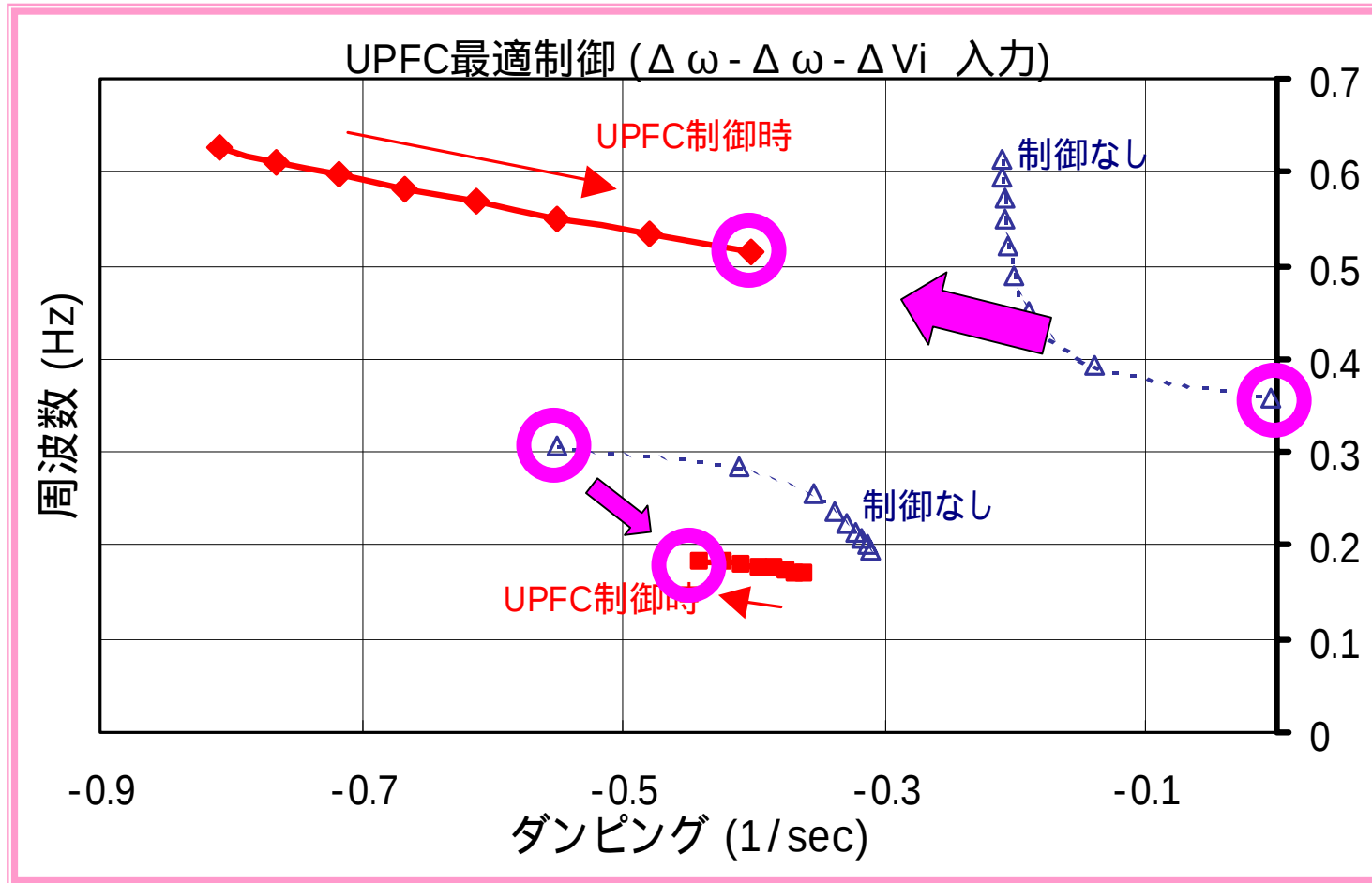
入力情報がローカルか遠端かを問わず、最適と思われる制御系入力との組み合わせ

UPFC最適制御系



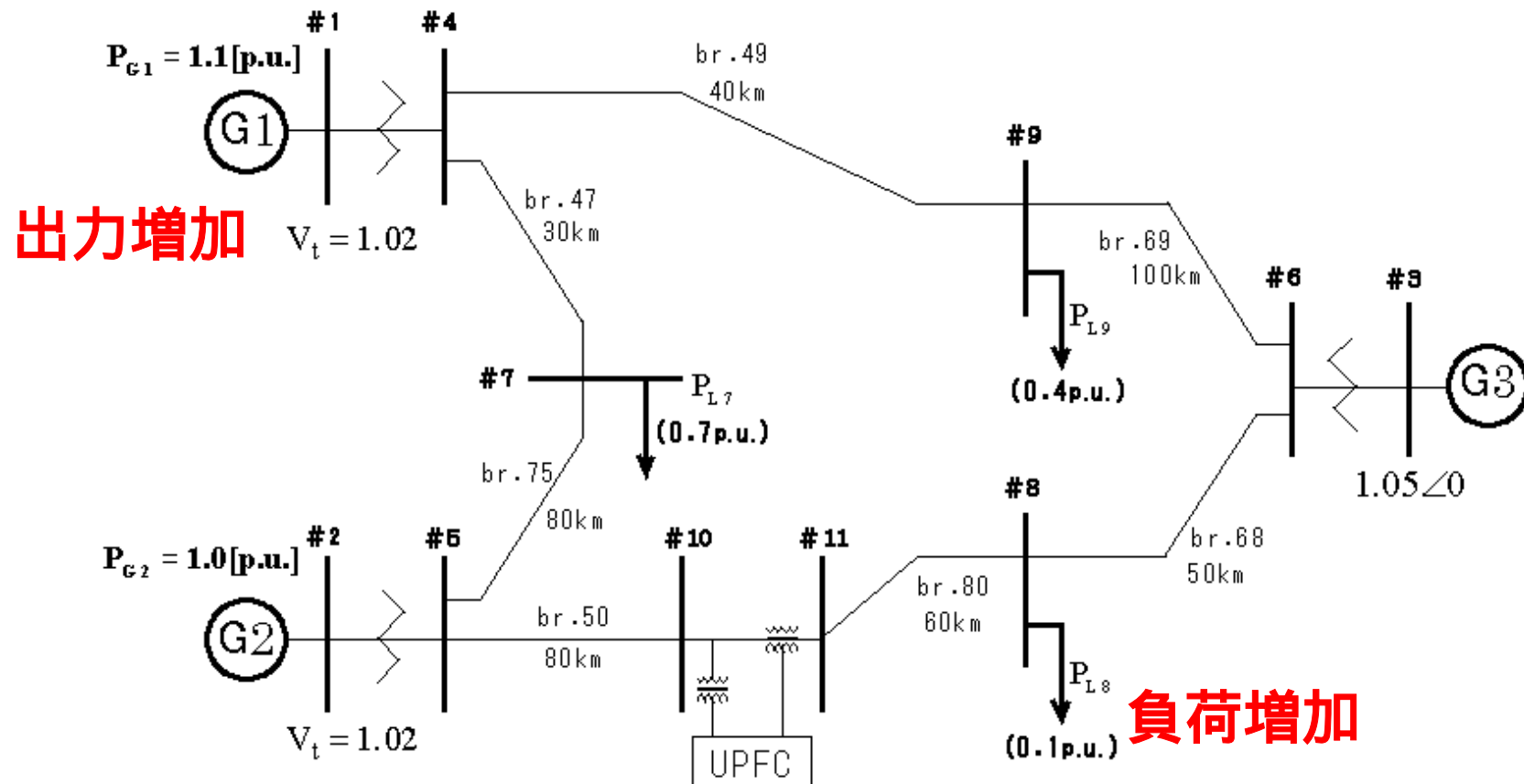
主動揺モードがダンピング・周波数ともに向上
電圧モードも不安定化しない、効果的な制御

UPFC最適制御系



主動揺モードがダンピング・周波数ともに向上
電圧モードも不安定化しない、効果的な制御

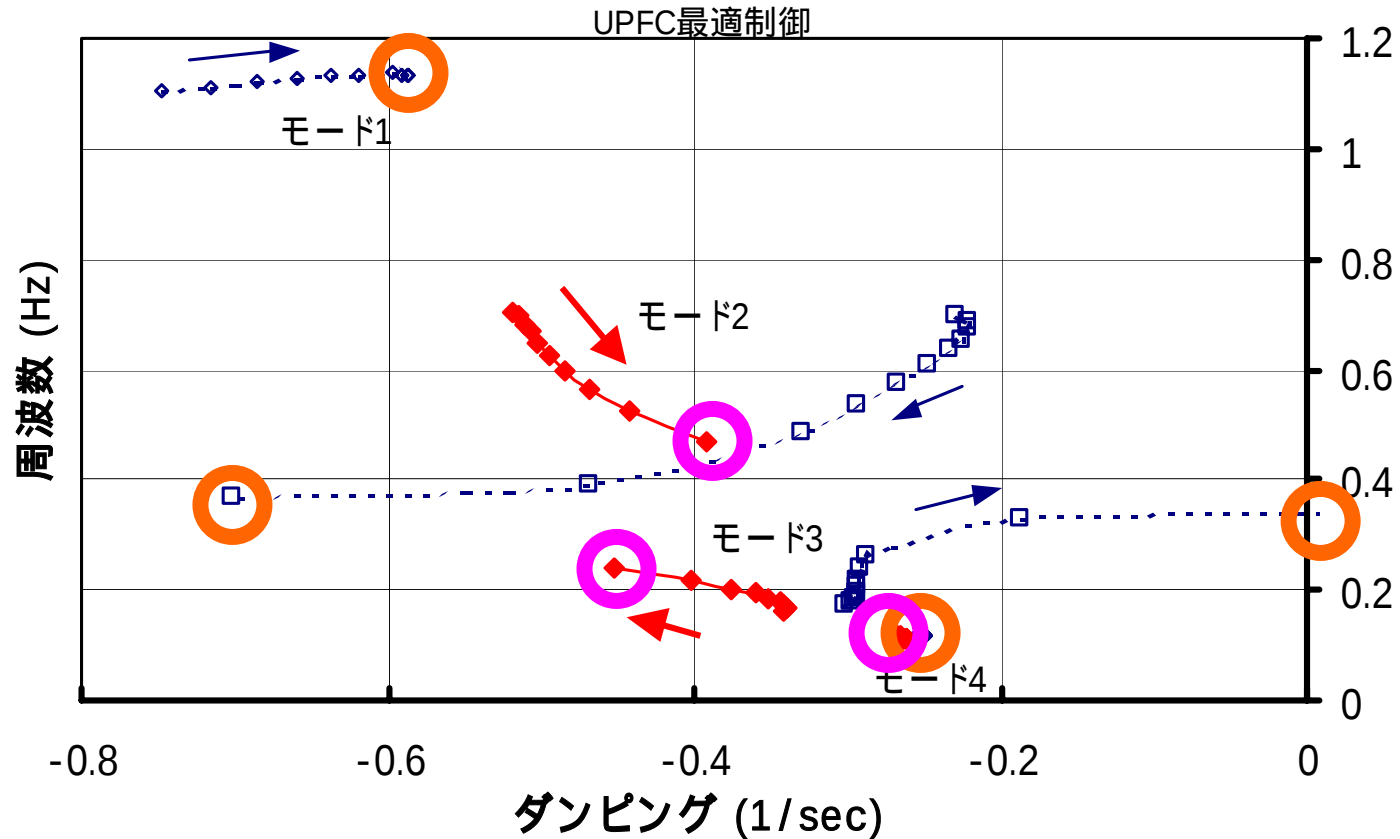
多機系でのUPFCによる安定化効果



- ・発電機G1定格2000MVA
- ・G2定格1100MVA
- ・#8の負荷 P_{L8} が増加、G1が出力増加で対応

最適制御系による3機系の安定化効果

$$\Delta Q \rightarrow V_{dU} \quad \Delta \omega \rightarrow V_{qU} \quad \Delta V_i \rightarrow Q_1$$



全てのモードが安定化。UPFC制御効果を3機系でも確認

まとめ

- ✦ UPFC設置系統の固有値解析プログラムを開発
- ✦ 3つの操作変数に用いる制御入力の違いによる安定化効果の違いを明らかにした
- ✦ 制御入力の選定と定数最適化により、UPFCによる系統安定化効果を明らかにした