

修士論文

FACTS 機器を用いた電力系統の  
電圧安定性向上に関する研究  
Application of FACTS Devices to Voltage  
Stability Enhancement in Power Systems

2010 年 2 月 9 日

指導教員 横山明彦教授  
東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻  
37-086537  
若林悠太

# 内容梗概

本研究では FACTS 機器を用いた電力系統の電圧安定性向上に関する検討を行った。その結果、FACTS 機器が無効電力注入と電圧印加によって送電能力を向上させていることを明らかにした。また、電力系統の潮流分布や送電線定数などから FACTS 機器の適切な設置場所を明らかにした。さらに、負荷状態が変化する系統における FACTS 機器の動的制御系の制御効果を明らかにした。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	近年の電力系統の動向	1
1.2	送電能力低下の原因	2
1.3	系統の送電能力の拡大	3
1.4	FACTS 機器	4
1.5	本論文の内容	4
第 2 章	電圧安定性の解析	5
2.1	電圧安定性の定義	5
2.2	電圧安定性解析のための動的負荷モデル	10
2.3	無効電力損失和を用いた解析	12
2.4	まとめ	13
第 3 章	FACTS 機器	14
3.1	FACTS 機器の構成	14
3.2	FACTS 機器の詳細な解析モデル	18
3.3	FACTS 機器の設置と制御パラメータ	21
3.4	まとめ	24
第 4 章	電圧安定性向上に対する FACTS 機器の貢献	25
4.1	概要	25
4.2	最適潮流制御の定式化	25
4.3	FACTS 機器の機能の電圧安定性向上への貢献	28
4.4	電圧安定性向上に対する FACTS 機器の比較	34
4.5	送電線事故時の緊急制御	38
4.6	まとめ	40
第 5 章	FACTS 機器の設置場所	41
5.1	概要	41
5.2	小規模系統での最適設置場所	42

5.3	多機系統での解析 . . . . .	51
5.4	複数 FACTS 機器を設置する場合の設置場所 . . . . .	54
5.5	まとめ . . . . .	56
<b>第 6 章</b>	<b>動的な電圧安定性向上制御</b>	<b>57</b>
6.1	概要 . . . . .	57
6.2	制御系の構成 . . . . .	57
6.3	無効電力損失和削減のための制御系 . . . . .	63
6.4	近似モデルを用いた解析 . . . . .	69
6.5	まとめ . . . . .	72
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>73</b>
	<b>参考文献</b>	<b>75</b>
	<b>発表文献</b>	<b>77</b>
<b>付録 A</b>	<b>電力系統モデル</b>	<b>78</b>
A.1	7 機 23 母線系統 . . . . .	78
A.2	系統機器データ . . . . .	81
	<b>謝辞</b>	<b>85</b>

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 近年の電力系統の動向

近年、情報化社会の急速な進展に伴い、国内外を問わず電力に対する需要は拡大を続けている。先進国は少子高齢化に伴う人口減少の影響で電力消費量がほぼ横ばいであるが、発展途上国では依然として大きく増加している。中国やインドなど人口が増加している地域では今後も電力需要が高まることが予測されている [1]。

こうした電力需要の増加に応えるために電力事業者は発電所の建設を行ってきた。日本の発電電力量の比率を図 1.1 に示す。日本の発電事業は主に水力、火力、原子力によって支えられている。発電所はその立地制約や住民の反対運動などによって建設できる場所が限られている。その結果として発電所や負荷の局所化や偏在化が進み、送電線や異なる電力事業者間の連系線の潮流がより重くなる傾向がある。

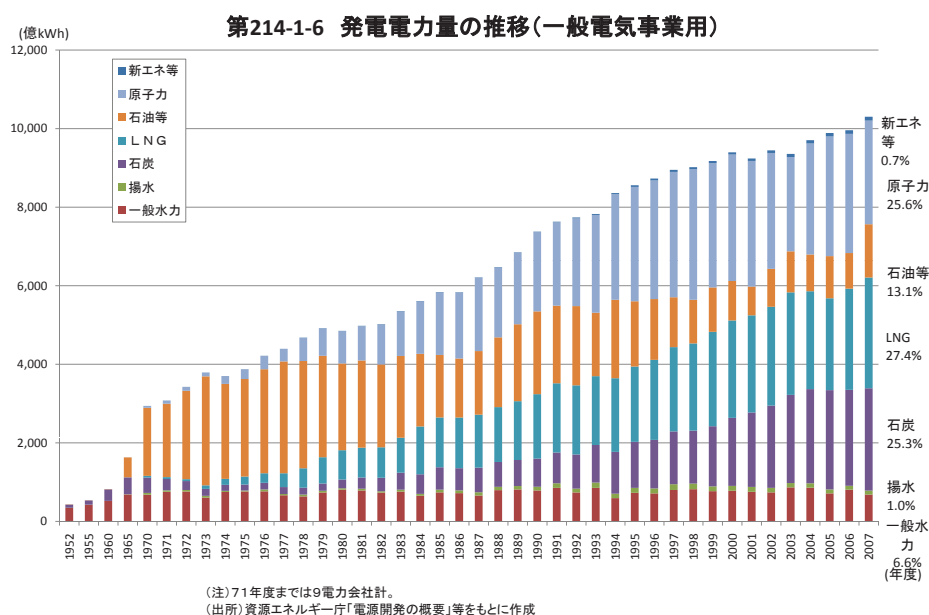


図 1.1 電源別発電電力量の実績および見通し

近年、電力業界では電力自由化の動きが進んでいる。アメリカやヨーロッパではで 1990 年台にこの制度が導入されて以降、取引量が増加している。日本でも段階的に自由化が進み、現在では 50kw 以上の事業者で売買が可能である [2]。こうした電力自由化は電力会社の競争を激化させ、結果として系統運用に大きな負担を強いることが懸念されている。2000 年のカリフォルニア大停電は電力自由化の問題点を浮き彫りにした事例であるといえる。

地球温暖化問題に対処するため、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換が世界的に進んでいる。そのため系統の周波数の安定化が課題となっている。とりわけ電力業界は CO2 排出の割合が多く、ここでの対策の影響力は大きい。具体的には石炭や石油、天然ガスのような化石燃料の発電から脱却し、太陽光や風力といった発電方式に移行する必要がある。

このように、電力系統にとってより不安定な要因が増加していくものと見込まれる。これに対する何らかの対策が必要である。

## 1.2 送電能力低下の原因

電力系統の送電能力を抑制する要因としては熱容量、電圧、安定性など様々な要因がある。の中で最もボトルネックとなる要因は送電線長に依存している。一般に送電線が短いときは熱容量が最もボトルネックとなっているが、長くなるにつれて電圧や安定性の問題がより顕著に表れてくる。同時に送電能力も低下する。この点についての先行研究での調査結果がある [3]。図 1.2 に送電のボトルネックとなる要因を示した。一般に電力系統では約 100[km] 以下の距離では熱的制約、300[km] 以下では電圧の大きさの制約、それ以上では安定性の制約が支配的になる。日本の電力系統は欧米諸国と比較してくし形に細長い系統構成をとっている。このような環境下では必然的に送電距離が長くなり、設備の熱容量の問題よりも安定性の問題が生じるリスクが高いといえる。

また、図 1.3 には送電線の送電量、電圧と損失の関係を示した。

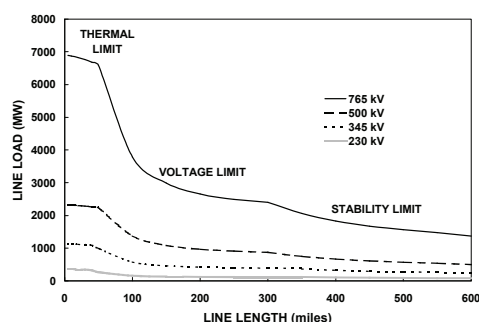


図 1.2 送電能力低下の要因

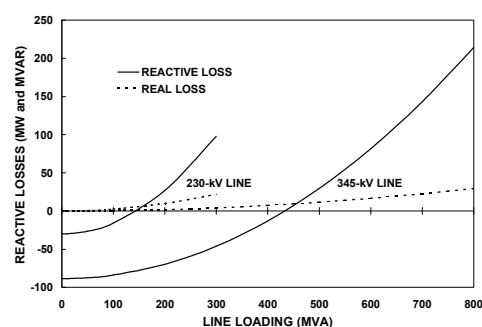


図 1.3 送電線の損失

電力系統の安定性の定義は IEEE と CIGRE の見解では、「所与の初期状態にある電力系統が、物理的なじょう乱が発生した後に、定常的な運用状態を回復する能力のこと。このとき、系統の状態の大半は発散することなく、系統全体が実用的な意味で維持されているもの

とする。」とされている [4]。IEEE と CIGRE では図 1.4 のように安定性は主に位相角安定性、電圧安定性、周波数安定性に分類し、いずれも電力系統の指標となっている。安定性が十分に確保されていない状態では系統のわずかな擾乱が大規模な停電に至ることがある。1987 年の首都圏大停電や 2003 年の北米大停電はその一例である。

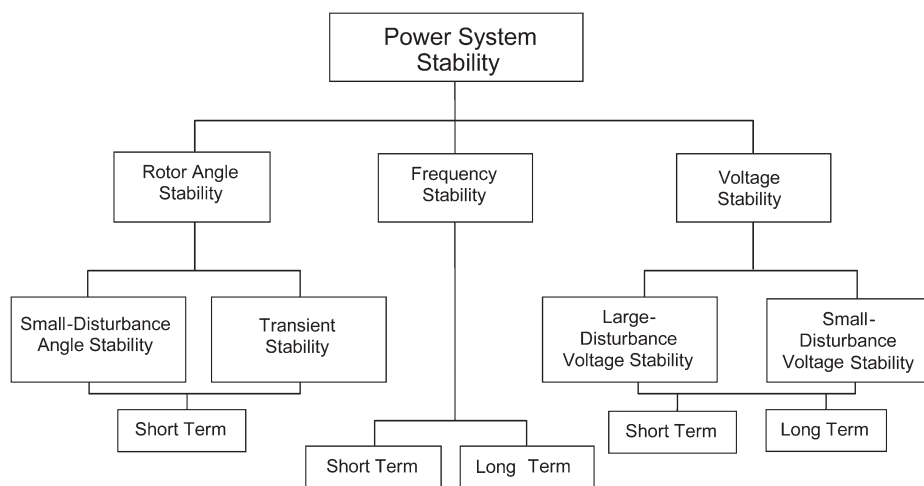


図 1.4 電力系統の安定性の分類

系統の安定性を改善する試みは古くから行われてきた。近年では **FACTS** 機器を用いた安定性向上制御も行われている。従来はとりわけ定態安定度や過渡安定度といった発電機の位相角安定性が注目を浴びることが多かったが、今後は電圧安定性も考慮した制御を行う必要性があると考えられる。

## 1.3 系統の送電能力の拡大

近年の電力系統をめぐる状況から判断して、今後も送電能力を向上させることが望ましい。こうした送電能力の拡大手法は大きく分けてつぎのようなハードウェア的アプローチ、およびソフトウェア的アプローチの二つに分類される。前者のハードウェア的なアプローチとは、具体的には発電所や送電線の新規建設や熱容量の拡大といった対策を行う手段である。しかし、前者の方法は今後より困難になることが予測されている。一般に、送電線の建設に必要な用地の取得には莫大なコストがかかる。さらにこうした建設は地球環境に与える影響が大きい。こうした理由からハードウェア的な対策は現状では適切な対策ではないと考えられる。

後者のソフトウェア的アプローチとは既存の電力系統の運用手法を工夫することで送電能力を拡大する手段である。現状の系統では一部の送電線や機器が熱容量限界付近で運転されている一方で、まだ限界までに余裕のある機器も少なくない。こうした機器をフル活用できるようにすることによって、ボトルネックを解消することが可能である。今後はこうしたソフトウェア的な対策を行う議論が活発化することが予測されている。

## 1.4 FACTS 機器

ソフトウェア的なアプローチといっても様々な手段があるが、近年特に注目を浴びているのがパワーエレクトロニクス技術を応用した可変インピーダンス型機器である。こうした機器を総称して 1980 年代に米国の Hingorai 氏と Gyugyi 氏が FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器という概念を提唱した [5]。FACTS 機器はパワエレ機器であるがゆえに、高速かつ高信頼度な動作が保障されている。そのため系統運用において、従来から用いられている電力用コンデンサや分路リアクトルに代わって FACTS 機器を用いる研究がこれまで数多く報告されている。FACTS 機器の利用目的は様々であり、一例を挙げるならば最適潮流制御、送電能力拡大、電圧制御、無効電力調相、電力品質の向上などある。また、FACTS 機器と蓄電池を組み合わせた機器の研究も行われている。

半導体素子の大容量化に伴ってより高機能な FACTS 機器の開発も進んでいる。表に FACTS 機器の種類と分類を示した。例えば、従来は他励式変換器を用いた SVC や可変直列コンデンサや高速移相器などが用いられていたが、近年は GTO (Gate Turn Off Thyristor) に代表されるような自己消弧機能を持つデバイスが登場したことによって、STATCOM や UPFC のような自励式変換器を用いた FACTS 機器が登場している。こうした機器は有効電力と無効電力を独立に制御でき、さらに自己転流能力を持っているために系統に同期連系しない単独運転が可能であるなどの利点を持っている。

表 1.1 FACTS 機器の種類

	Thyristorvalve	Voltage Source Converter (VSC)
Shunt-Devices	SVC	STATCOM
Series-Devices	TCSC	SSSC
Shunt and Series-Devices	DFC	UPFC/IPFC
	HVDC B2B	HDVC VSC B2B

## 1.5 本論文の内容

本論文の目的は FACTS 機器を用いて電力系統の電圧安定性を向上させることである。以下に本論文の内容を示す。

第 2 章では本研究の制御対象である電圧安定性の定義、解析手法、およびそれを改善するための手法について説明する。第 3 章では FACTS 機器の種類やモデル化について説明する。第 4 章では FACTS 機器のどのような機能が電圧安定性向上に貢献するかを検討する。第 5 章では FACTS 機器の設置場所について考察を行う。第 6 章では電圧安定性向上のための動的な制御系の検討を行う。第 7 章で結論と今後の展望を述べる。

## 第 2 章

# 電圧安定性の解析

## 2.1 電圧安定性の定義

### 2.1.1 PV 曲線

電圧安定性は電力系統に擾乱が生じたときに電圧を維持する能力のことである。電圧安定性はインバータ機器の増加などによる定電力負荷の増加に伴って、より問題になってくる。

最初に図 2.1 のような一機無限大母線系統を考える。発電機端は電圧が  $E$  の無限大母線、負荷端は消費電力が  $P + jQ$  の定電力負荷であるとする。負荷側には定インピーダンスの電力用コンデンサ  $jC$  がある。このような場合での負荷の有効電力  $P$  と負荷端の母線電圧の関係を示したものを図 2.2 に示す。この曲線は **PV 曲線** と呼ばれており、電圧安定性を解析する上で重要な意味を持つ [6]。

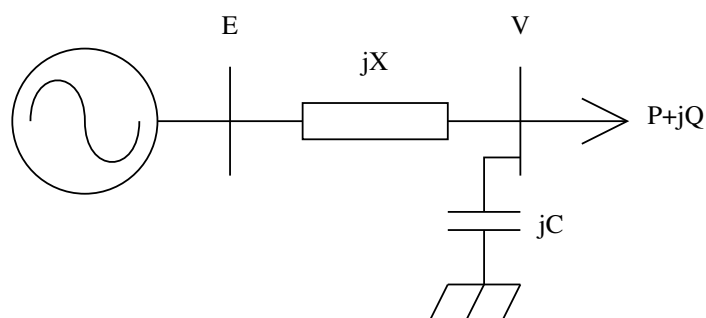


図 2.1 一機無限大母線系統

この **PV 曲線** は一般に放物線を横にしたような形をしている。仮に負荷側からある値の負荷の指令値が与えられたとき、それに対応する電圧解は 2 個存在する。一般にその中で電圧が高いほうの解を高め解、電圧が低いほうの解を低め解と呼ぶ。同じ電力の値が与えられたとき、高め解は電圧が大きく電流が小さい解、逆に低め解は電圧が小さく電流が大きい解に対応している。多機系統の電力では無限大母線以外のすべての母線に対し、それぞれ高め解と低め解の 2 種類がそれぞれ存在し、潮流方程式の解は  $2^N$  個存在する。こうした問題は

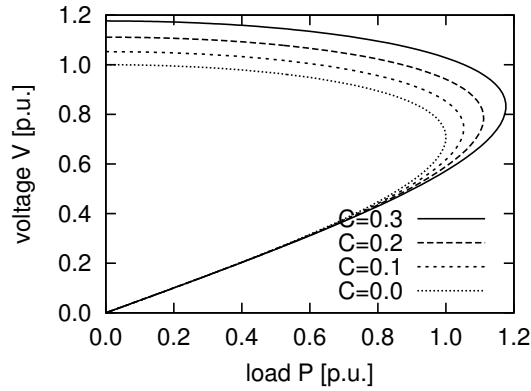


図 2.2 一機無限大母線系統の PV 曲線

潮流多根問題として正確な解法が提唱されている [7]。しかし、本研究では後に説明するように高め解のみを使用する。

多機系統においては PV 曲線の定義方法はさまざまであるが、横軸に系統内の全負荷が同一力率、同一比率で増加した場合の負荷量の合計を取る場合が多い。この場合の PV 曲線の先端での負荷の大きさは、その系統が電圧安定性の制約に違反せずに送電できる最大電力を示している。この値を **Maximum Loading** と呼ぶ。なお、**Maximum Loading** はあくまで電圧安定性だけに着目した場合の送電限界を表わしており、実際の電力系統では設備の熱容量や発電機の安定性の問題のように多くの制約があるため、本当に送電できる電力は **Maximum Loading** より小さくなる。これを表わす指標として **TTC** や **MTC** といった指標が提唱されている [8]。しかし、本研究では電圧安定性の制約に特に注目してその向上方法を検討しているため、本論文では扱わないこととする。

### 2.1.2 PV 曲線と安定性の関連

さて通常運転している電力系統の運転状態は高め解の状態である。このことは次のように説明できる。ある高め解の動作点において微小な擾乱が発生し、負荷の電圧が減少したと仮定する。このとき、PV 曲線より負荷に供給される電力は増加する。負荷のインバータ制御系などは、負荷の電力を指令値に戻そうとして、負荷を流れる電流を減少させる。その結果、送電線のリアクタンスでの電圧降下が減少し、負荷電圧が回復する。このようにして擾乱が発生しても元の状態に戻ることが可能である。（電圧が上昇した場合も同様に説明できる。）

もちろん、事故時などで低め解に相当する状態になることもあるが、これは不安定である。負荷が低め解に陥る原因としては、負荷の増加によって PV 曲線の先端を超える需要があるときや、事故直後に一時的に送電線の供給能力が低下し、解が存在しなくなるケースがある。このような不安定によって負荷電圧が低下を続け、電圧ゼロに収束するのが電圧崩壊である。

PV 曲線は静的な解析だけでなく動的な解析でも意味を持つ。系統が動揺する際に、負荷の母線電圧と電力の描く軌跡は PV 曲線に近似できることが明らかにされている [9]。動的な系統の各時間断面におけるこの PV 曲線の軌跡は短時間 PV 曲線と呼ばれ、この形状によって系統が安定かどうかを判別することができる。

電圧崩壊の予防策として、PV 曲線を拡大させる制御が重要である。図 2.1 のように負荷に電力用コンデンサを設置し、無効電力補償を行うことによって PV 曲線が大きくなることが分かる。本研究で行う FACTS 機器による電圧安定性の向上も、基本的にはこのように PV 曲線を拡大させることに他ならない。

### 2.1.3 Maximum Loading の算出法

端的に言えば、Maximum Loading は潮流方程式におけるヤコビ行列の行列式が 0 になる点での送電電力の大きさから求めることができる。しかし、実際にはこのような方程式は非常に収束特性が悪く、安定な解を求めることが困難である。そこで本研究では試行錯誤的に潮流計算（最適潮流計算）を繰り返し、Maximum Loading を算出手法を用いた。

最初に最適潮流計算のような収束特性の悪い計算を行う際のブロック線図を図 2.3 に示した。最初にある負荷状態  $P_0$  での安定な解  $X_0$  があると仮定する。負荷状態  $P_n$  における解  $X_n$  が求まっているとき、負荷状態  $P_n + d$  における最適潮流計算を  $X_n$  を初期値として行う。この最適潮流計算が安定な解  $x$  に収束すれば、 $P_{n+1} = P_n + d$ ,  $X_{n+1} = x$  とし、さらに  $d$  を  $r$  倍して同様の計算を継続する。最適潮流計算が不安定である場合は、 $d$  を  $r^{-1}$  倍した上で、もう一度  $X_n$  を初期値として最適潮流計算を行う。このような計算を繰り返し、 $d$  がある小さな値以下になった時に終了し、このときの  $P_n$  を Maximum Loading とする。

最適潮流計算が不安定になるのは次のようなケースである。

- 最適潮流計算が収束しない場合
- 最適潮流計算の各種制約条件を満たせない解に収束する場合
- 低め解に収束する場合

特に低め解に収束するケースは、それ自体は不安定ではないが<sup>\*1</sup>、その後の計算を行う際に正しい解が得られなくなる恐れがある。

上に示したブロック線図は最適潮流計算が初期値に強く依存するケースであるが、初期値への依存度が小さいケース（小規模系統の通常の潮流計算程度）ではもう少し簡略に計算することが可能である。そのブロック線図を図 2.4 に示した。これは 2 分探索を応用した解析法である。潮流計算が安定になる負荷状態  $P_l$  と不安定になる負荷状態  $P_h$  の中間の値の負荷状態  $P_m$  の計算を行い、ここで安定であれば  $P_l$  を、不安定であれば  $P_h$  を更新していく方式である。

---

<sup>\*1</sup> 低め解に収束する場合は必ずそれに対応する高め解が存在する。低め解は現実の系統で得られる解ではないが、Maximum Loading を計算する際は安定と見なることができる。

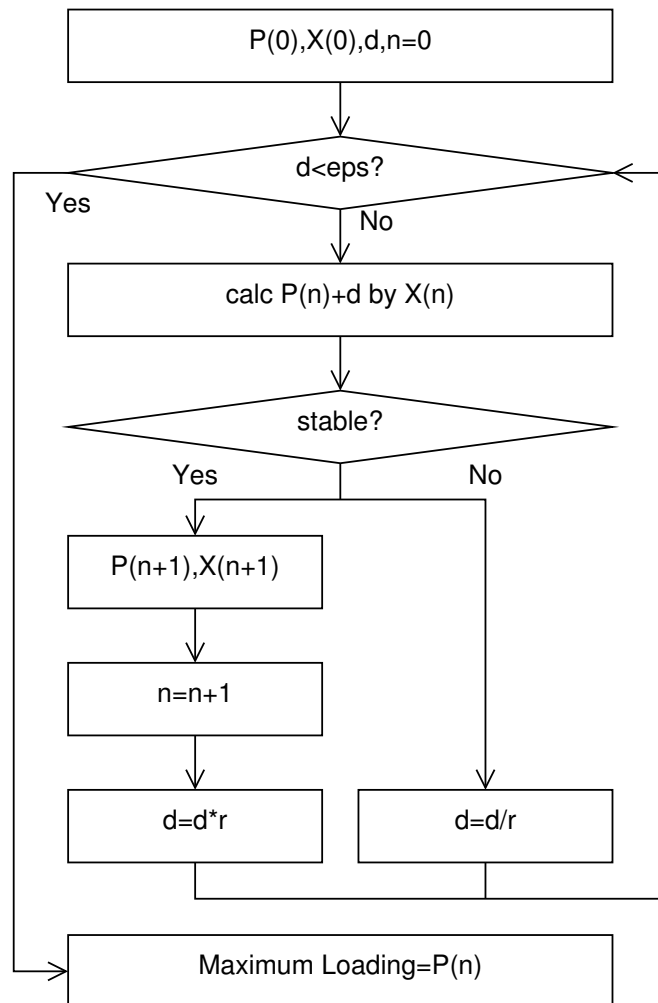


図 2.3 最適潮流計算を行う際の Maximum Loading の計算法

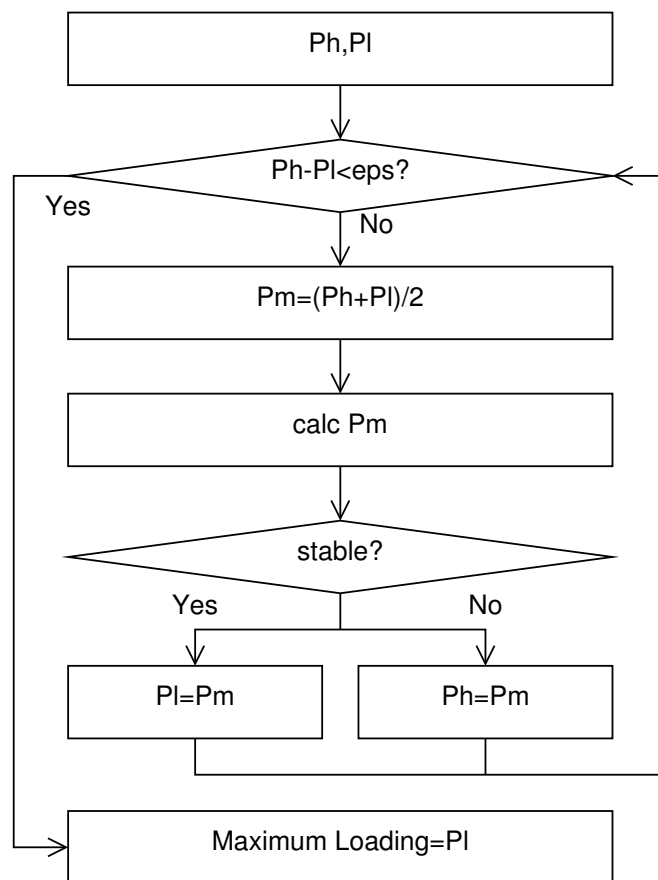


図 2.4 最適潮流計算を行わない際の Maximum Loading の計算法

## 2.2 電圧安定性解析のための動的負荷モデル

### 2.2.1 定電力負荷と誘導機負荷

本研究では，負荷モデルとしてより電圧安定性に悪影響を与える定電力負荷モデルを使用する。静的な解析を行う際には負荷を定電力負荷として扱えばよい。しかし，動的なシミュレーションを行う際にはこのような定電力負荷として扱うことは不都合である。これは厳密な定電力源の負荷が導入された系統の解析には収束計算が必要になるためである。特に事故時の電圧崩壊の様子を模擬したシミュレーションを行う際には，収束計算の解として低め解の解が必要になることもあるが，通常の収束計算だけで正確な解を得るのは困難である。

そこで本研究では，動的なシミュレーションを行う際に収束計算の不要な誘導機負荷モデルを使用することとする。誘導機負荷モデルは機械的出力一定の誘導電動機を負荷として与え，その滑りが変化することによってインピーダンスが変化する負荷である。系統内に擾乱がない場合は，有効電力消費はほぼ定電力負荷とみなすことが可能である。

### 2.2.2 誘導機負荷モデルの定式化

本研究で用いる誘導機負荷モデルは図 2.5 のようになっている [10]。誘導機は二次側の  $R$  と  $X$  のみで構成されており，一時側の漏れリアクタンスは無視することとする。図中の  $s$  は滑りである。さらに誘導機と並列に電力用コンデンサが設置されていると仮定する。この電力用コンデンサは，需要家が自らの設備の力率を改善するために設置するものであり，電力会社が設置するものとは異なる。

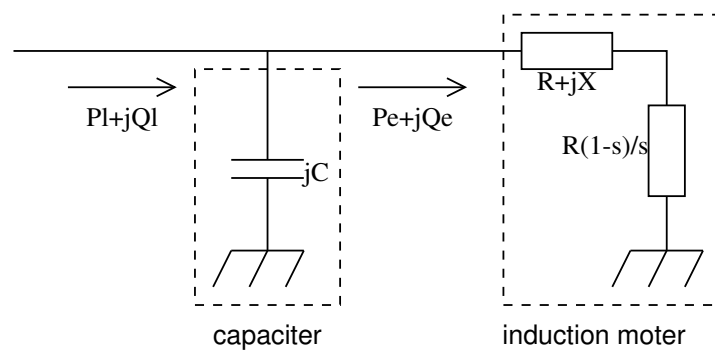


図 2.5 誘導機負荷モデル

最初に誘導機の状態変数に関する微分方程式を示す。

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{H} \left( \frac{P_m}{1-s} - P_e \right) \quad (2.1)$$

ただし、 $H$  は誘導機の慣性定数 [s]、 $P_m$  は誘導機の機械出力 [p.u.]、 $P_e$  は誘導機設置端を通過する有効電力 [p.u.] である。ここの  $P_m$  は滑り  $s$  に依存する関数であり、次のように定義する。

$$P_m = P_{m0} \quad (2.2)$$

$$P_m = 20^2(1-s)^2 P_{m0} \quad (2.3)$$

誘導機が通常運転する範囲においては定電力な特性、一方で誘導機の回転数が低い状態では誘導機にブレーキをかけるように動作することと定義する。この場合、電力系統からの電気入力  $P_e$  がなくなると、誘導機の滑りは 1 に収束する。また、 $P_e$  は設置端電圧  $V$  と滑り  $s$  を用いて次の式で定義される。

$$P_e = V^2 \left( \frac{s}{R - jsX} - jC \right) \quad (2.4)$$

次に誘導機の系統側から見たアドミタンス  $Y$  は、次のように表わされる。

$$Y = \frac{s}{R + jsX} + jC \quad (2.5)$$

動的なシミュレーションを行う際の各ステップにおいては、この式で表わされる定インピーダンス負荷として扱うことで、収束計算が不要になる。

最後に、設置端電圧の大きさ  $V$  と需要家設置端電力  $P_l + jQ_l$  が分かっているときの、電力用コンデンサの大きさ  $C$  と滑り  $s$  の計算式を示す。

$$C = \frac{P_l \delta - Q_l}{V^2} \quad (2.6)$$

$$s = \frac{R\delta}{X} \quad (2.7)$$

ただし

$$\delta = \frac{\lambda}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{2XP_l}{V^2} \quad (2.9)$$

である。

### 2.2.3 電圧崩壊時の負荷の動作

電圧崩壊が起これと負荷の滑りは 1 に収束するが、この場合は負荷に大電流が流れ続けている状態になっている。しかし現実的な系統では、このようになる前に負荷を遮断することを行う。本研究では誘導機の滑り（回転数）を 0.1[s] の遅れ時定数で観測し、観測した滑りが 0.3 を超えた段階で遮断を行う。一度遮断した負荷は二度と再投入しないと仮定する。制御系は図 2.6 のような構成をしている。

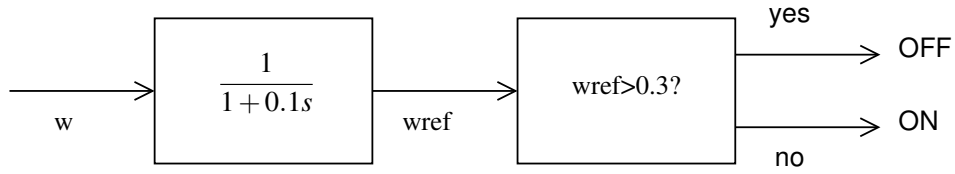


図 2.6 誘導機負荷を遮断する制御系

## 2.3 無効電力損失和を用いた解析

### 2.3.1 解析の概要

電力系統の電圧安定性の向上には，Maximum Loading を拡大させる制御を行うことが重要であることを説明してきた。しかし，Maximum Loading を求める計算が解析的に行うことができる小規模系統を除き，大規模系統で Maximum Loading を直接動かすことは不可能である。そこで本研究では無効電力損失和を最小化することにより，間接的に Maximum Loading を拡大させる手法を用いて計算を行う [11]。

本研究で扱う無効電力損失和は送電線と変圧器での無効電力損失によって算出する。本研究で用いる送電線は図 2.7 のように熱抵抗，リアクタンスと対地容量で構成されている  $\pi$  型のモデルを用いる。(変圧器もほぼ同様である。)

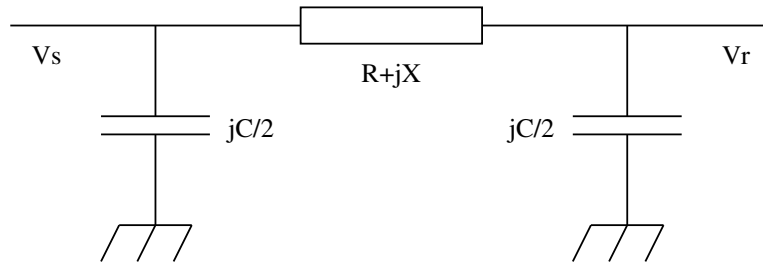


図 2.7 送電線の  $\pi$  型モデル

送電線両端の電圧をそれぞれ  $V_s$ ,  $V_r$  とするとき，各値は次のように求められる。

$$Q_L = \text{Im} \left( \frac{|V_s - V_r|^2}{R - jX} \right) \quad (2.10)$$

$$Q_C = \text{Im} \left( \frac{jC|V_s|^2}{2} + \frac{jC|V_r|^2}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{loss}} = Q_L - Q_C \quad (2.12)$$

$Q_L$  とは送電線のリアクタンス  $X$  で消費されている無効電力である。 $Q_C$  とは送電線の対地容量  $C$  から注入されている無効電力である。各送電線についてこの値を計算し，系統全体での総和を求めることで，無効電力損失和を計算できる。

あるいは，系統全体のアドミタンス行列と電圧から次のようにも計算できる。これは無効電力損失は系統に出入りする無効電力の総和に等しくなることを利用している。

$$Q_{loss} = \Sigma(\text{diag}(V)\overline{YV}) \quad (2.13)$$

本研究で扱う無効電力損失和はあくまで送電線と変圧器についてのみ計算する。発電機，負荷，FACTS 機器における漏れリアクタンスは考慮しない。

## 2.4 まとめ

本章では電圧安定性の解析方法について紹介した。静的な解析では主に **PV** 曲線を使用し，その **Maximum Loading** を拡大させるためには無効電力損失和の最小化が効果的である点を述べた。また動的な解析を行うための誘導機負荷モデルを説明した。

## 第 3 章

# FACTS 機器

### 3.1 FACTS 機器の構成

#### 3.1.1 自励式変換器

本研究で扱う FACTS 機器は VSC（電圧型自励式変換器）を用いたものを使用する。SVC や TCSC のような機器もあるが、基本的にそれより上位に位置する変換器のほうが高機能になることが予想されるからである。

VSC は図 3.1 のような構成をしており、三相交流と直流を相互に変換する機能を持っている。直流回路側にはコンデンサが設置されており、直流側の電圧をほぼ一定に保つ役割をしている。GTO の動作を変えることによって、三相交流側の電圧や電流を制御することができる [12]。

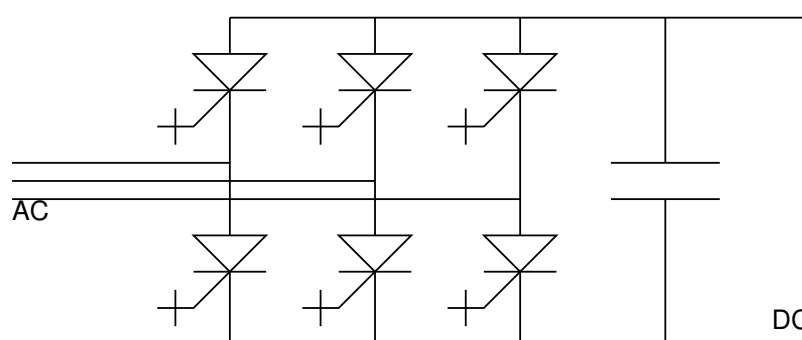


図 3.1 VSC の構成

FACTS 機器として本研究では 5 種類扱う。それぞれを順に説明していく。

#### 3.1.2 STATCOM

STATCOM は 1 台の変換器を用いて母線に並列に電圧を印加する機器である。機器の構成を図 3.2 に示す。STATCOM は無効電力を補償できるが、有効電力については制御をす

ることができない。STATCOM の制御自由度は 1 である。

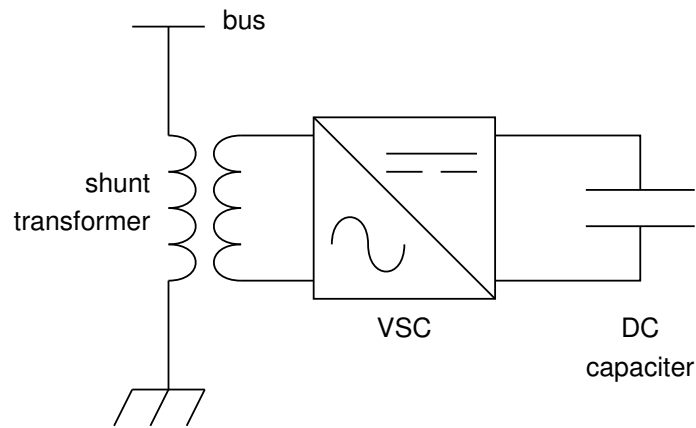


図 3.2 STATCOM の構成

### 3.1.3 SSSC

SSSC は 1 台の変換器を送電線と直列に接続して電圧を印加する機器である。その構成を図 3.3 に示す。SSSC は電圧を印加する方向が STATCOM と異なるだけで、それ以外の特性は STATCOM と同様である。

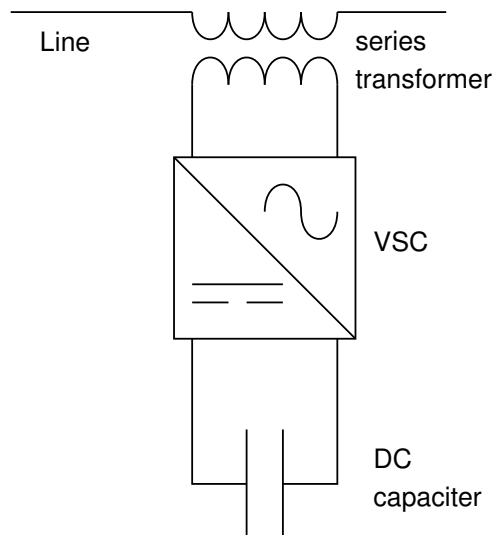


図 3.3 SSSC の構成

### 3.1.4 BTB

BTB は図 3.4 のように 2 台の並列変換器は DC 回路でリンクされた構成となっている。一般に BTB は長距離の直流送電などにも利用されているのであるが、本研究で用いるもの

は同一の変電所内で直交変換するタイプのものを考えている。制御パラメータは 4 つあるが、全体の有効電力の入出力が釣り合っていないため、自由度は 3 になる。

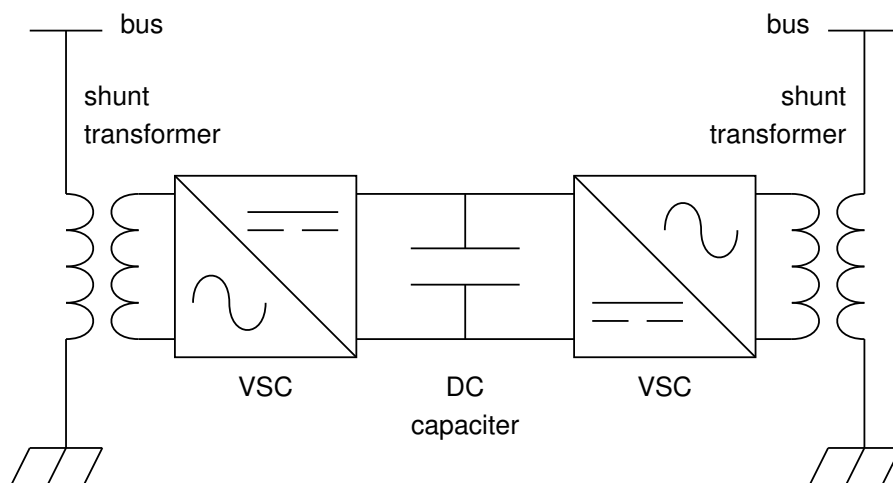


図 3.4 BTB の構成

### 3.1.5 UPFC

UPFC は図 3.5 のように 2 台の変換器が一方は直列に、他方が並列に接続された構成になっている。制御自由度は **BTB** と同様に 3 になる。

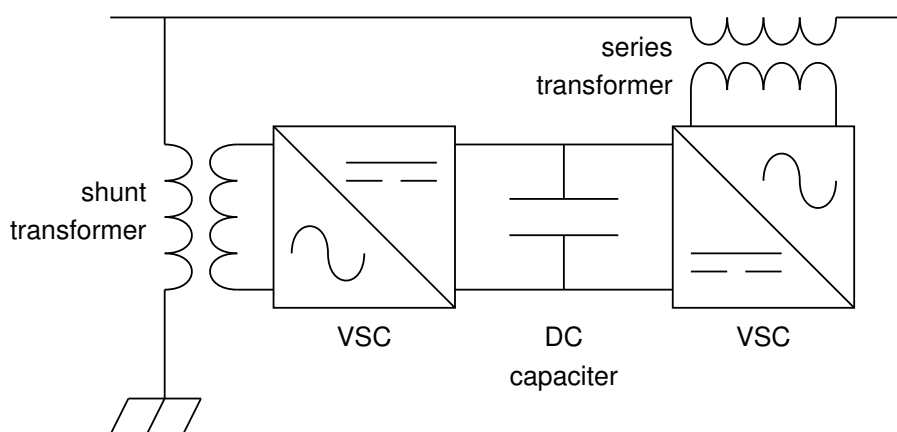


図 3.5 UPFC の構成

### 3.1.6 IPFC

IPFC は図 3.6 のように 2 台の変換器が直列に接続された構成になっている。制御自由度は **BTB** や **UPFC** と同様に 3 になる。

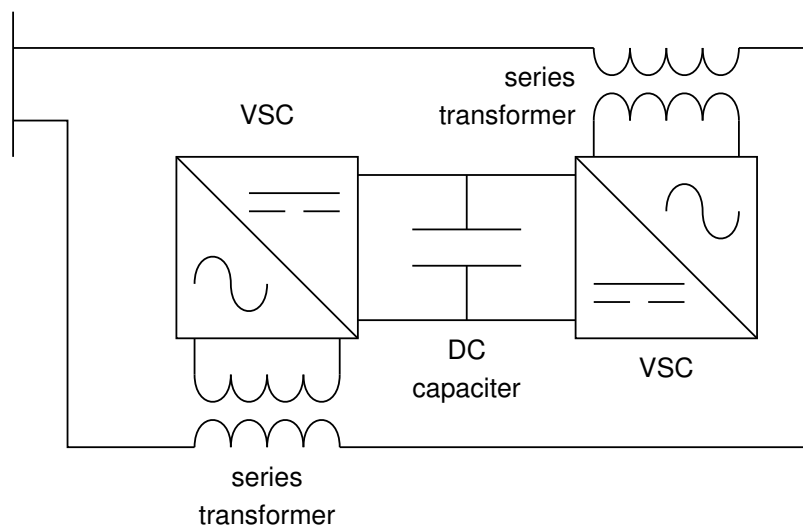


図 3.6 IPFC の構成

## 3.2 FACTS 機器の詳細な解析モデル

### 3.2.1 初期状態の算出

本研究で扱う FACTS 機器は 5 種類あり、それぞれ異なる方式で計算を行うのであるが、ここでは UPFC を例に各定式化を行う。他の機器についても UPFC と同様の手法で計算することが可能であるが、ここでは省略する。UPFC の動的な解析モデルを図 3.7 に示す [13]。

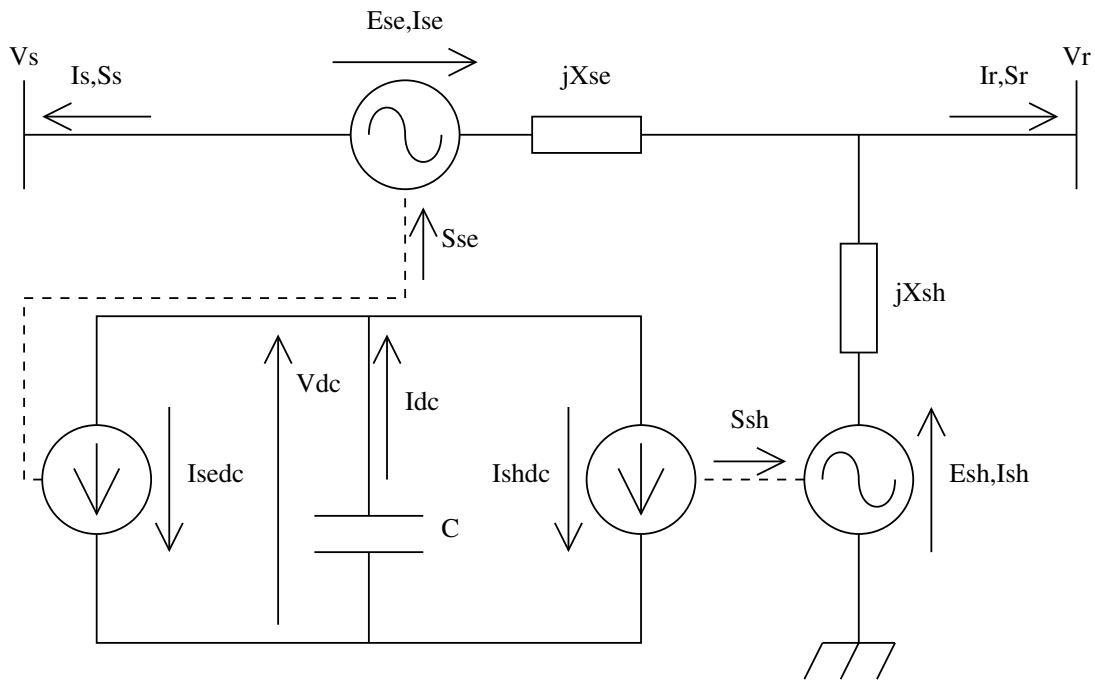


図 3.7 UPFC の動的な詳細モデル

最初に、UPFC 設置端の電圧とその電流が求まっている場合の、各変数の導出についてまとめている。直列側変換器が設置されている側の端子電圧を  $V_s$ 、逆を  $V_r$  とする。またこれらの端子から系統に注入されている電流をそれぞれ  $I_s$ 、 $I_r$  とする。このとき、各変換器を流れる電流（印加電圧と同じ方向を正とする。）は次のように求められる。

$$I_{se} = -I_s \quad (3.1)$$

$$I_{sh} = I_s + I_r \quad (3.2)$$

各変圧器の漏れリアクタンスをそれぞれ  $X_{se}$ 、 $X_{sh}$  とするとき、各変換器で印加している電圧の大きさは次のようになる。

$$E_{se} = jX_{se}I_{se} + V_r - V_s \quad (3.3)$$

$$E_{sh} = jX_{sh}I_{sh} + V_r \quad (3.4)$$

DC 回路のコンデンサ電圧を  $V_{dc}$  とするとき、DC 回路側から AC 回路への電圧ゲインは次のようになる。

$$\phi_{se} = \frac{E_{se}}{V_{dc}} \quad (3.5)$$

$$\phi_{sh} = \frac{E_{sh}}{V_{dc}} \quad (3.6)$$

このとき、各変換器を通じて系統側に注入される皮相電力は次のようになる。

$$S_{se} = P_{se} + jQ_{se} = E_{se}\overline{I_{se}} \quad (3.7)$$

$$S_{sh} = P_{sh} + jQ_{sh} = E_{sh}\overline{I_{sh}} \quad (3.8)$$

一方、この注入される皮相電力の中で、有効電力は DC 回路から供給されることになる。よって、DC 回路を流れる各電流は次のようになる。

$$I_{dcse} = \frac{P_{se}}{V_{dc}} \quad (3.9)$$

$$I_{dcsh} = \frac{P_{sh}}{V_{dc}} \quad (3.10)$$

よってコンデンサから流れ出る電流は次のようになる。

$$I_{dc} = I_{dcse} + I_{dcsh} \quad (3.11)$$

また、系統側との設置端から系統側へ注入される皮相電力は次のようになる。

$$S_s = P_s + jQ_s = V_s\overline{I_s} \quad (3.12)$$

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r\overline{I_r} \quad (3.13)$$

本研究では UPFC の注入皮相電力  $S_{inj}$  と通過皮相電力  $S_{sr}$  を次のように定義する<sup>\*1</sup>。

$$S_{inj} = P_{inj} + jQ_{inj} = S_s + S_r \quad (3.14)$$

$$S_{sr} = P_{sr} + jQ_{sr} = \frac{S_r - S_s}{2} \quad (3.15)$$

---

<sup>\*1</sup> 注入皮相電力の定義方法は研究によって異なるものがあるが、本研究では設置端両端から注入している皮相電力の和と定義する。

### 3.2.2 微分方程式と電流源モデル

UPFC 設置端の電圧  $V_s$  と  $V_r$ 、および電圧ゲイン  $\phi_{se}$ 、 $\phi_{sh}$ 、さらに DC コンデンサ電圧  $V_{dc}$  が与えられている場合の微分方程式の導出を行う。最初に  $E_{se}$  と  $E_{sh}$  を上と同様の手順で求めた上で、各変換器を流れる電流は次のように求められる。

$$I_{se} = \frac{E_{se} - V_r + V_s}{jX_{se}} \quad (3.16)$$

$$I_{sh} = \frac{E_{sh} - V_r}{jX_{sh}} \quad (3.17)$$

その後は上と同様の手順を繰り返し、 $I_{dc}$  まで求める。このとき、UPFC の DC コンデンサ電圧に関わる微分方程式は次のようになる。

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{I_{dc}}{C} \quad (3.18)$$

両変換器から注入される有効電力の和がゼロになる場合は DC コンデンサ電圧は一定に保たれる。

次に UPFC を電流源とアドミタンスに変換した場合の変数を導出する。各電圧源と漏れリアクタンスをノートンの定理を用いて電流源とアドミタンスに変換すると図 3.8 のようになる。各変換器を置換した場合のアドミタンスと電流源の電流は次のようになる。

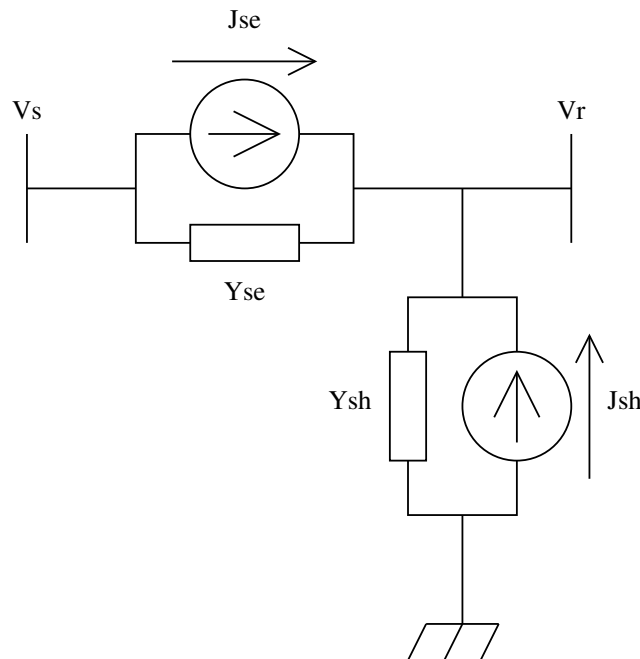


図 3.8 UPFC の各変換器ごとの等価電流源モデル

$$Y_{se} = \frac{1}{jX_{se}} \quad (3.19)$$

$$J_{se} = \frac{E_{se}}{jX_{se}} \quad (3.20)$$

$$Y_{sh} = \frac{1}{jX_{sh}} \quad (3.21)$$

$$J_{sh} = \frac{E_{sh}}{jX_{sh}} \quad (3.22)$$

UPFC を二端子回路と見たときの等価回路は図 3.9 のようになり、アドミタンス  $Y$  と注入電流  $I$  は次のようになる。

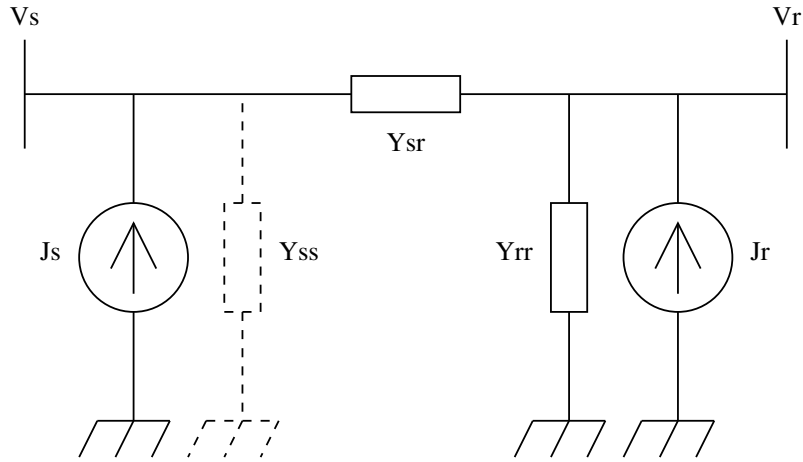


図 3.9 UPFC の系統から見た等価電流源モデル

$$Y = \begin{bmatrix} Y_s & Y_{sr} \\ Y_{sr} & Y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{se} & -Y_{se} \\ -Y_{se} & Y_{se} + Y_{sh} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_{se} \\ J_{se} + J_{sh} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

UPFC の変換器容量は次の式で定義される。

$$S_{upfc} = |S_{se}| + |S_{sh}| \quad (3.25)$$

この変換器容量は動的な解析のみならず、静的な解析においても重要な意味を持つ。

### 3.3 FACTS 機器の設置と制御パラメータ

#### 3.3.1 FACTS 機器の設置方法

何も設置されていない電力系統に FACTS 機器を設置する場合に、その設置方法は機器によって異なっている。本研究では特に断りがない限り、FACTS 機器は既存の母線の至近点に設置することとする。STATCOM は特定の 1 つの母線に対し設置する。STATCOM を母

線  $i$  に設置する場合は、設置ケース  $i$  と表記することと定義する。SSSC, UPFC, BTB は特定の母線とそこに接続されている送電線を分割する形で設置する。母線  $i$  と  $j$  の間の送電線の、母線  $i$  至近点に機器を設置する場合、設置ケース  $i-j$  と表記する。IPFC は特定の母線とそこに接続されている 2 本の送電線を分割して設置する。母線  $i$  から母線  $j$  と  $k$  の向きに対して IPFC を設置する場合、設置ケース  $i-j,k$  と表記する。

系統に複数の FACTS 機器を設置する場合、設置方法によっては制御自由度が低下する恐れがある。同一の母線や送電線に複数の FACTS 機器を設置する場合は正しい制御ができなくなる可能性がある。

### 3.3.2 初期状態の定義

今後、本文で議論を行う際に初期状態と制御後の状態を比較するケースがある。ここでいう初期状態は様々な定義方法があるが、本研究では次の 2 種類を主に用いることとする。

最初に FACTS 機器の設置前と設置後で系統の潮流状態を変えないようにする状態を初期状態と定義する方法である。特に断りのない限り、通常の初期状態といえはこの状態を指すこととする。この状態は動的な解析を行う際に、FACTS 機器を設置したケースと設置しないケースを比較する際に重要となる。UPFC の場合、設置前の母線の電圧を  $V_0$ 、設置送電線から母線に流れ込む電流を  $I_0$  とする。このとき、順方向に設置した UPFC の各電圧、電流は次のようになる。

$$V_s = V_r = V_0 \quad (3.26)$$

$$-I_s = I_r = I_0 \quad (3.27)$$

これをもとに、各変数を計算すればよい。UPFC 設置前後での電圧、電流のフェーザー図を図 3.10 に示す。設置後の図において、 $V_s$  と  $V_r$ 、 $E_{se}$  と  $jX_{se}I_{se}$  がぴったり重なっているのが特徴である。

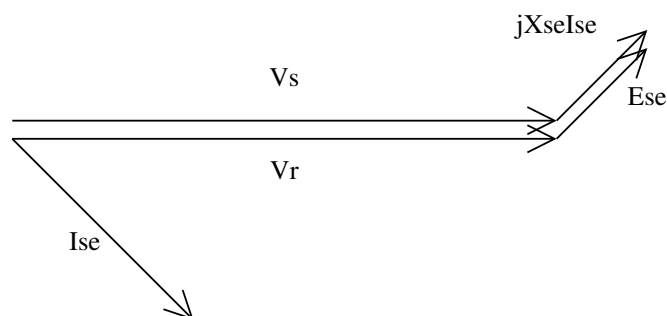


図 3.10 通常の初期状態の UPFC におけるフェーザー図

この手法で定義する初期状態では FACTS 機器の直列側変換器容量がゼロになるとは限らない。上の例では、並列側変換器の通過皮相電力は 0 になるが、直列側変換器の通過皮相電

力は次のようになり，ゼロにはならない。

$$S_{se} = E_{se} \overline{I_{se}} = jX_{se} |I_{se}|^2 = jX_{se} |I_0|^2 \quad (3.28)$$

すなわち並列側の漏れリアクタンスで消費している無効電力分だけ変換器が補償していることになる。

次に，最適潮流制御のための初期状態の定義である。これは変換器通過皮相電力を 0 になるようにした状態を定義したものである。先ほどの通常の初期状態では直列側変換器を皮相電力が通過しているが，変換器の制約条件が非常に厳しい場合はこれだけで制約違反になる可能性がある。最適潮流計算のための初期状態は変換器制約に関わりなく必ず制約を満たす状態となっているため，その後の計算が比較的収束しやすくなる。この手法でのフェーザー図を図 3.11 に示す。UPFC を設置ただけで両端の電圧が変化し，潮流状態も変化することになる。

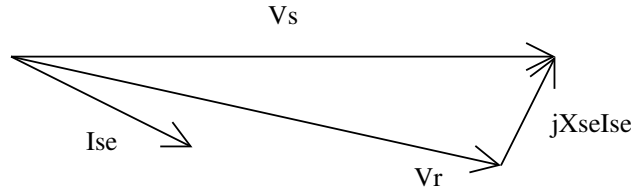


図 3.11 最適潮流計算の初期状態の UPFC におけるフェーザー図

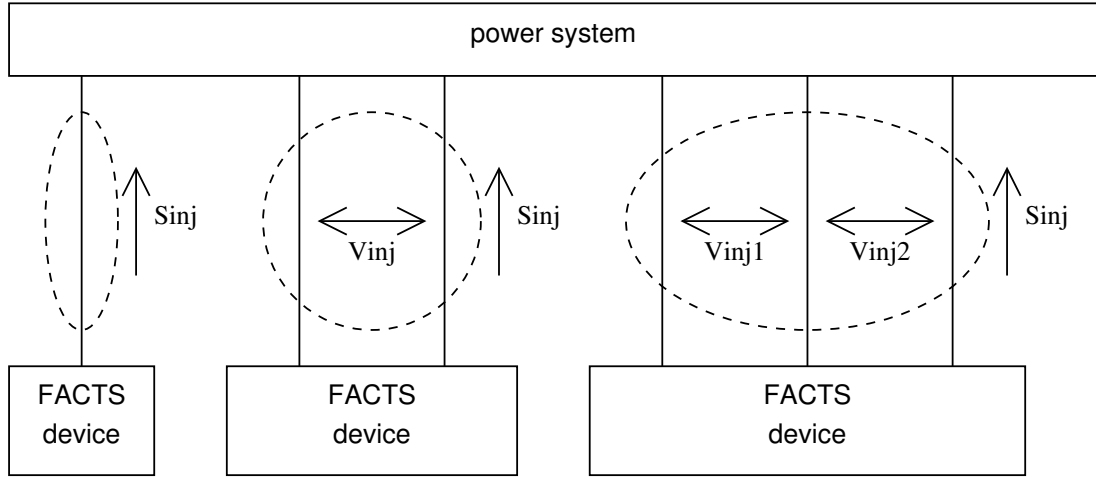
なお，本研究の動的な解析のように，潮流計算の結果をもとに機器の内部変数を計算する方式のシミュレーションでは，この最適潮流計算のための初期状態を使用すると正しい機器定数が得られなくなる。そのため絶対に使用してはならない。

### 3.3.3 パラメータ

母線を PV 指定とするのは最適潮流計算には適しているが，機器ごとの特性を必ずしも反映した形となっていない。そこで，FACTS 機器の制御対象のなかで，電圧安定性に効く成分と効かない成分に分解し，それぞれを独立に制御するモデルを考える。このようなモデルは何通りか考えられるが，本研究では  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  を独立に制御する方式を用いることとする。この方式がある程度妥当であることは後に説明する。

$S_{inj}$  と  $V_{inj}$  のイメージ図を図に示す。系統との接続点が 1 つから 3 つの機器を示したが，一般的にはどのような構成をした機器であっても同じように定義できる。

$S_{inj}$  は FACTS 機器の設置端から注入されている皮相電力の和と定義する。STATCOM の場合は注入皮相電力と等しくなる。SSSC, BTB, UPFC では設置している両端から注入される皮相電力の和で定義する。IPFC の場合は 3 つの母線からの注入和で定義する。ただし，静的なモデルでは FACTS 機器は有効電力を発生も消費もしないものとしている。そのため， $S_{inj}$  を実部  $P_{inj}$  と虚部  $Q_{inj}$  と分けたときに  $P_{inj}$  は必ず 0 になる。実質的には  $Q_{inj}$  を



制御していることになる。電圧安定性の観点から見ると、 $Q_{inj}$  は FACTS 機器で発生している無効電力量に等しく、これが大きい場合はより多くの無効電力補償を行っていることになる。

$V_{inj}$  は設置両端の電圧の差を表わす値であり、SSSC, BTB, UPFC の場合は次のように定義される。

$$V_{inj} = \phi_{inj} + j\theta_{inj} = \log \frac{V_r}{V_s} \quad (3.29)$$

ここで対数を用いているのは計算が楽になるためであり、数学的に意味があるわけではない。IPFC はそれぞれ両方で電圧の比を定義することができるが、それぞれを  $V_{inj1}$ ,  $V_{inj2}$  と定義することとする。STATCOM ではこの  $V_{inj}$  を定義することができない。 $V_{inj}$  は機器が設置端両端に対してどのように電圧を変化させているかを示すものである。 $\phi_{inj}$  は設置端電圧の大きさの比を表わす値であり、これを変えることにより系統の無効電力潮流に影響をもたらすことができる。一方で  $\theta_{inj}$  は設置端両端の位相の差を表わす値であり、これは有効電力潮流に影響をもたらす指標である。

SSSC と BTB の場合は対称な機器であるため、どちらを  $V_s$  または  $V_r$  に定義しても同じであるが、本研究では母線の至近点に設置する場合は母線側を  $V_r$  と定義する。UPFC の場合は母線の位置に関係なく、並列側を  $V_r$  と定義する。

この静的なモデルにおいて、各パラメータがゼロの状態は FACTS 機器を系統に設置していない状態と同じである。そのため、設置前後の制御効果を比較するのに都合のよいモデルであるといえる。

### 3.4 まとめ

本章では FACTS 機器の構成、モデル化、設置場所について議論した。この内容をベースに今後の様々な考察を行う予定である。

## 第 4 章

# 電圧安定性向上に対する FACTS 機器の貢献

### 4.1 概要

本研究の目的は FACTS 機器を用いて電圧安定性を向上させることにある。そのためには FACTS 機器が電圧安定性に対してどのように貢献するかを検証する必要がある。電圧安定性向上に対しての貢献として広く知られているものとしては無効電力注入が考えられる。しかし、本研究で扱う FACTS 機器は種類や特徴が様々であり、無効電力注入以外の制御が電圧安定性に対して貢献することもあれば、逆に FACTS 機器の持つ特徴が系統に対して悪影響を及ぼす恐れもある。また FACTS 機器には変換器に容量の制約があり、限られた変換器容量の範囲で制御をする場合は制限なしの場合と比較して異なる特徴を持つことが推測される。

電力系統で電圧安定性が問題となる状況は大きく分けると、負荷が増加して PV 曲線の Maximum Loading に達してしまうことによる不安定と、送電線が事故などにより開放されて送電能力が低下する場合に区別される。主にこの場合に分けて、それぞれに対し FACTS 機器が電圧安定性にどう貢献するかを検証する。本章では静的な特性に注目し、最適潮流制御によって安定性をどのように向上させるかを検討する。また STATCOM, SSSC, BTB, UPFC, IPFC の各機器に対してそれぞれのシミュレーションを行い、電圧安定性向上制御に向いている機器と向いていない機器について検討する。

### 4.2 最適潮流制御の定式化

#### 4.2.1 最適潮流制御の定式化

本研究の目的は電圧安定性の向上であり、そのために無効電力損失の最小化を行う。ここで最適潮流計算に必要な条件を述べる。本研究の最適潮流制御での制御変数は表 4.1 のよう

になっている。

表 4.1 最適潮流制御での制御変数

$V$	母線電圧
$I_f$	FACTS 機器注入電流

母線電圧は通常の潮流計算と同じ電圧  $|V|$  と位相  $\theta$  に関する変数である。 $I_f$  は後に説明する FACTS 機器の注入電流である。これらを用いて最適潮流制御の目的関数は次のように表わされる [14]。

$$Q_{loss}(V) \longrightarrow \text{minimize} \quad (4.1)$$

$Q_{loss}$  は送電線での無効電力損失和である。数式の中に  $I_f$  が含まれていないが、これは母線電圧  $V$  が決まれば  $I_f$  に関係なく  $Q_{loss}$  が求まるためである。

次に制約条件は次のようになる。

$$S_f(V, I_f) + S_g - S_l = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{Re}(S_{inj}(V, I_f)) = 0 \quad (4.3)$$

$$|S_*(V, I_f)| \leq S_{*max} \quad (4.4)$$

第一式は潮流方程式である。 $S_f$  は FACTS 機器が系統に注入している電力、 $S_g$  は発電機が系統に注入する電力、 $S_l$  は負荷が消費している電力である。第二式は FACTS 機器の注入有効電力に関する制約である。本研究で扱う FACTS 機器は内部で有効電力の発生や消費がないものとしているため、このような数式が成り立つ。第三式は FACTS 機器の変換器の制約に関する条件である。変換器の構成は機器によって異なるが、それぞれにこのような制約条件を設けて行う。

今後の解析によってはこれ以外のパラメータに関して制約を入れて解析を行うこともある。(例えば  $Q_{inj} = 0$  とした解析を行うことがある。) このような場合、この数式も制約条件に入れて計算すればよい。

なお、最適潮流計算の制約条件としては他に発電機出力の制約や母線電圧の制約なども考えられる。しかし、こうした制約を多く入れることで PV 曲線の先端付近での高め解への収束が悪化し、またこうした制約条件は電圧安定性条件よりも厳しい条件となり、本質的な解析が困難になる可能性がある。そのため、本研究では以上の制約のみを扱う。

## 4.2.2 最適潮流制御のための FACTS 機器モデル

各 FACTS 機器を解析する際の最適潮流計算のためのモデルを図 4.1 から図 4.3 に示す。STATCOM の場合は 1 母線、SSSC と UPFC と BTB は 2 母線、IPFC は 3 母線にわたって設置すればよい。各機器とも、機器内部からは有効電力を発生も消費もしていない ( $P_{inj} = 0$ )

ため，有効電力についてはそれぞれ制約がある。また SSSC と IPFC については電流についても制約がある。

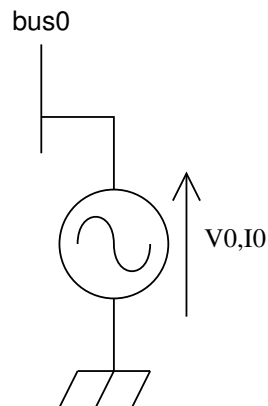


図 4.1 STATCOM の最適潮流計算に使用するモデル

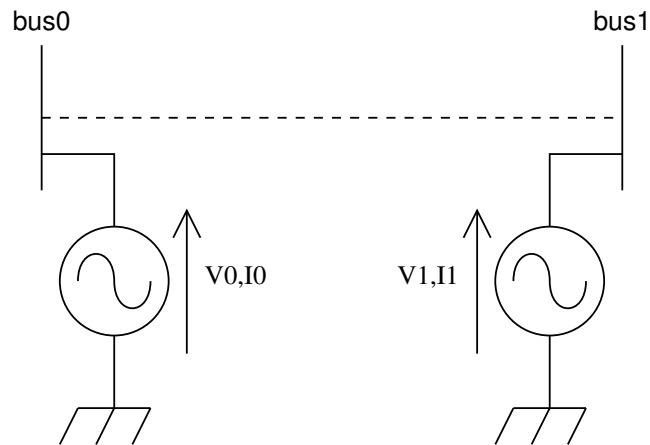


図 4.2 SSSC・BTB・UPFC の最適潮流計算に使用するモデル

各機器に共通して言えることであるが，FACTS 機器が母線  $i$  に注入している電流を  $I_i$ ，母線  $i$  の電圧を  $V_i$  とすると，母線  $i$  に注入している電力  $S_i$ ，およびトータルの注入量  $S_{inj}$  は次のようになる。

$$S_i = V_i \bar{I}_i \quad (4.5)$$

$$S_{inj} = \sum S_i \quad (4.6)$$

変換器通過電力は印加電圧と変換器を流れる電流の積から求められる。

SSSC の場合，両端に流れる電流には次の式が成り立つ。

$$I_r = -I_s \quad (4.7)$$

また，IPFC の場合も次の式が成り立つ。

$$I_r = -I_{s1} - I_{s2} \quad (4.8)$$

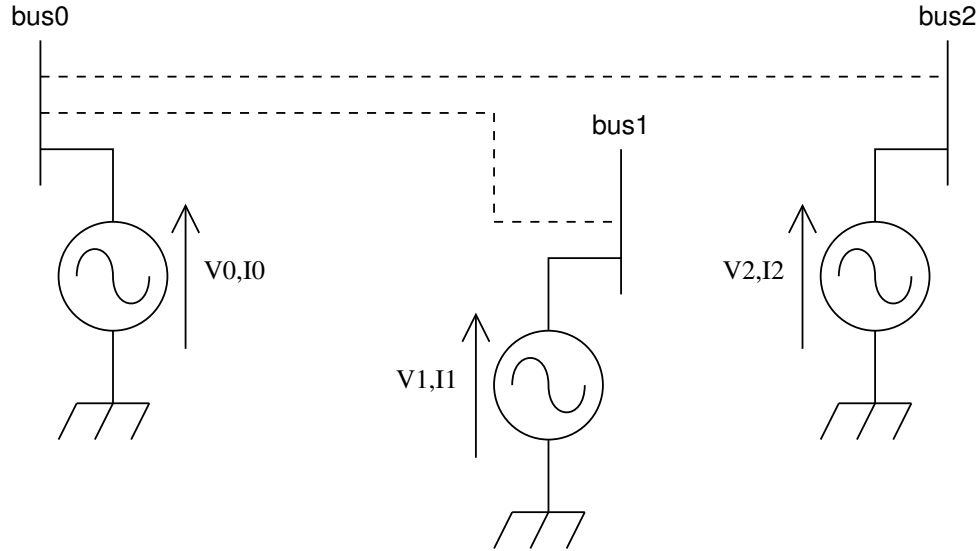


図 4.3 IPFC の最適潮流計算に使用するモデル

したがって、これらの機器を扱う場合には最適潮流計算の制御変数を一つ減らすことができる。

## 4.3 FACTS 機器の機能の電圧安定性向上への貢献

### 4.3.1 無効電力注入による安定性向上

最初に FACTS 機器の変換器制約に上限がなく、 $|S_{se}|$  と  $|S_{sh}|$  が自由な値をとれるようにした場合の制御を考える。本研究で扱う 7 機 23 母線系統において、FACTS 機器を母線 10 の至近点に設置するに設置することとする。具体的には図のように設置する。

このそれぞれにおいて変換器容量のことを考慮せずに系統全体の負荷を増加させ、それぞれの負荷断面において FACTS 機器による無効電力損失和最小化制御を行う。このときの母線 23 に接続されている負荷 L7 の電圧  $V_{L7}$  を図 4.4 に、FACTS 機器が注入している無効電力の大きさ  $Q_{inj}$  を図 4.5 に、系統全体の無効電力損失和  $Q_{loss}$  を図 4.6 に、FACTS 機器の変換器通過皮相電力の和  $|S_{se}| + |S_{sh}|$  を図 4.7 に示す。ただし系統の負荷の大きさは、系統に何も設置していない場合の Maximum Loading を 1[p.u.] として表示してある。(今後、系統全体の負荷を表わす際には全てこの表記法を用いることとする。)

さらに、負荷が 1[p.u.] の場合において、無効電力の各変換器での発生量と漏れリアクタンスでの消費量を表 4.2 に示す。 $Q_1$  は STATCOM, SSSC ではその変換器, BTB では母線 11 側の変換器, UPFC では直列側変換器, IPFC では母線 11 方向の変換器の注入無効電力をそれぞれ示している。 $Q_2$  は BTB では母線 10 側の変換器, UPFC では並列側変換器, IPFC では母線 17 方向の変換器の注入無効電力をそれぞれ示している。 $Q_x$  は FACTS 機器内部の漏れリアクタンスで消費されている無効電力である。 $Q_1$  と  $Q_2$  と  $Q_x$  と  $Q_{inj}$  は次の

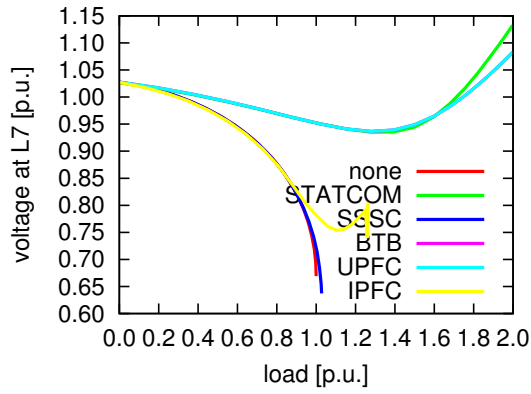


図 4.4 負荷 L7 電圧

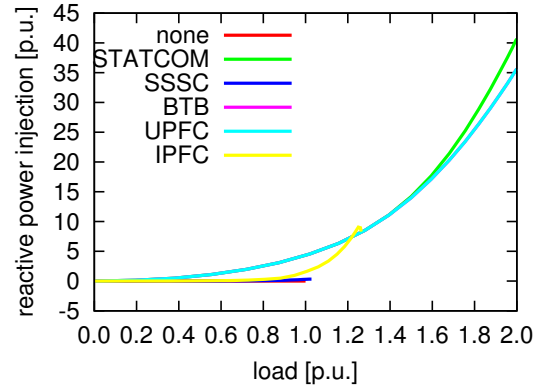


図 4.5 無効電力注入  $Q_{inj}$

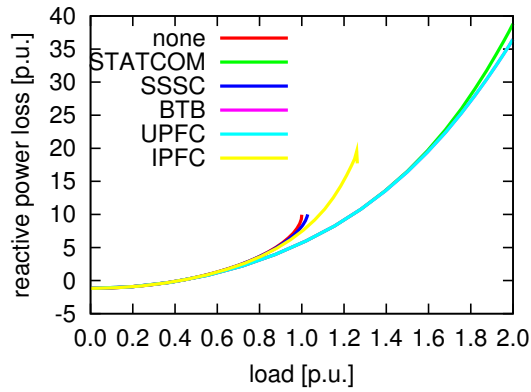


図 4.6 システム全体の無効電力損失  $Q_{loss}$

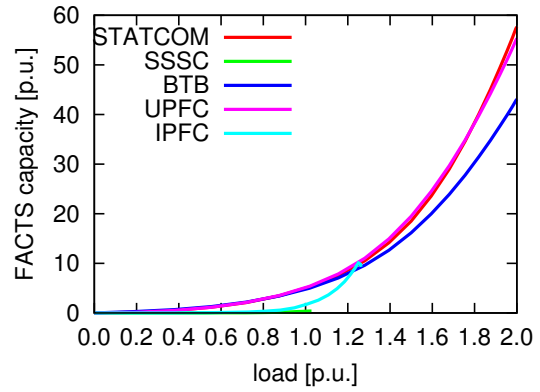


図 4.7 変換器通過皮相電力和  $|S_1| + |S_2|$

ような関係式で定義される。

$$Q_{inj} = Q_1 + Q_2 - Q_x \quad (4.9)$$

表 4.2 変換器容量を考慮しない場合の Maximum Loading と無効電力の発生消費状況

Device	Maximum Loading	$Q_1$	$Q_2$	$Q_x$	$Q_{inj}$
STATCOM	$\infty$	5.2529	—	0.7195	4.5334
SSSC	1.0277	0.3638	—	0.0684	0.2954
BTB	$\infty$	2.0212	2.8929	0.3844	4.5297
UPFC	$\infty$	0.1115	5.2733	0.8551	4.5297
IPFC	1.2627	0.7135	1.0537	0.1355	1.6317

最初に言えることとして STATCOM, BTB, UPFC のように並列型変換器を持つ機器はほぼ無限に Maximum Loading を拡大させることができる。もちろん、実際の電力系統では電圧安定性以外にも各種制約条件があるわけであるが、電圧不安定性が支配的な系統では、これらの機器を設置することでそれを除去することができる。その一方で SSSC や IPFC で

は変換器容量が無限にあるとしても **Maximum Loading** をある値までしか上昇させることができない。

いずれも大きく **Maximum Loading** が増加しているのが分かる。このままシミュレーションを続けた場合に **PV** 曲線がどこまで行くかは不明であるが、いずれにしても通常のシステムの運用状態から大きくかけ離れた状態になることは間違いない。また、系統の負荷が小さい状態では負荷母線電圧が通常より非常に大きい値になっており、これは機器の絶縁の問題などで課題がある。このような状態は現実的な系統状態ではないと言える。

先ほどのシミュレーションでは無効電力の注入によって電圧が上昇し、**Maximum Loading** が拡大するという結果が得られた。そこで各機器の無効電力注入  $Q_{inj}$  がゼロという条件を付け加えたときの各機器の **Maximum Loading** を図 4.8 から 4.10 と表 4.3 に示す。ただし、**FACTS** 機器の設置場所は同じであるとする。また、**STATCOM** と **SSSC** の場合は  $Q_{inj}$  の制約条件を入れることによって制御自由度がなくなり、何も設置していない状態と同じになるため、ここでは省略した。

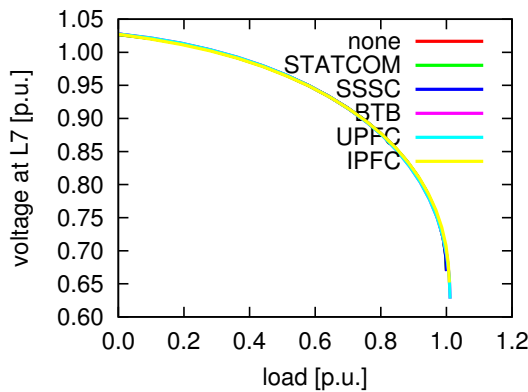


図 4.8 負荷 L7 電圧

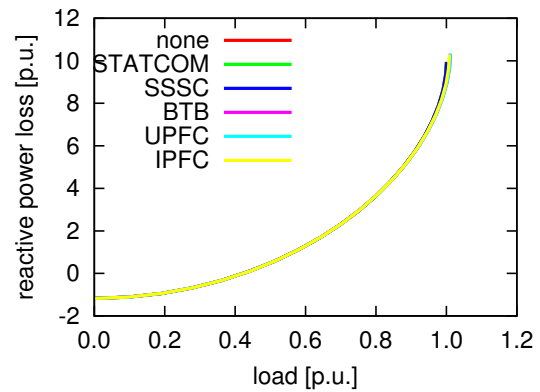


図 4.9 系統全体の無効電力損失  $Q_{loss}$

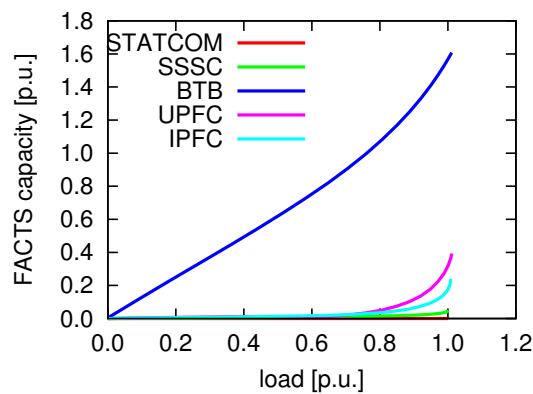


図 4.10 変換器通過皮相電力和  $|S_1| + |S_2|$

最も効果的であるのは **BTB** または **UPFC** であるが、いずれも 1 パーセント程度しか **Maximum Loading** が増加していない。これは変換器容量を無限にあると仮定して行っているにもかかわらず、この場合は無効電力注入がゼロであるとほとんど **Maximum Loading** が

表 4.3 変換器容量を考慮しない場合の Maximum Loading と無効電力の発生消費状況

Device	Maximum Loading	$Q_1$	$Q_2$	$Q_x$	$Q_{total}$
STATCOM	1	0	—	0	0
SSSC	1	0.0502	—	0.0502	0
BTB	1.0113	-0.5726	0.6784	0.1058	0
UPFC	1.0113	0.1883	-0.1264	0.0619	0
IPFC	1.0085	0.1182	-0.0210	0.0972	0

拡大しない。このことから変換器容量の問題に関わりなく、無効電力注入は電圧安定性向上に必要な不可欠であるということを再確認できた。

なお、BTB では他と比較して変換器通過皮相電力が突出して高い。これは、BTB の変換器が注入無効電力だけではなく、元々送電線を流れていたベース潮流をも変換器に通過させる必要があるためである。BTB は変換器容量を考慮しなければ理論上 UPFC を同等の効果を発揮することができるが、後に説明するように変換器容量の制約がある場合は BTB は不利になる。

#### 4.3.2 電圧印加による安定性向上

これまで FACTS 機器による制御は主に無効電力注入という観点で考察を行ってきた。しかし、FACTS 機器には電圧を印加するという機能もあり、これが制御に何らかの影響を与えている可能性も考えられる。印加電圧には厳密に言うと電圧の大きさを変える成分  $\phi$  と位相を変える成分  $\theta$  があり、これらを独立に制御した場合の特性を考える。

5 種類の FACTS 機器の中でここでは UPFC または BTB を用いた議論を行う。この際に、UPFC の制約条件の付き方を次のように変更する。

- 無効電力注入  $Q_{inj}$  の大きさを 0.3[p.u.] 以下とする。
- 個別の変換器については変換器制約を設けない。
- 有効電力注入  $P_{inj}$  は通常と同様にゼロとする。

先ほどの解析からわかるように、無効電力注入量に制約がある場合は Maximum Loading が無限に発散することはない。この解析を、制約条件の付き方が通常のモデルの機器（UPFC や BTB など）を使用すると、それぞれの機器の個別的な特性が表面に出ることになる。ここでは電圧の印加という個別の機器に依存しない部分の検討を行うために、このような特殊な条件を付け加えている。UPFC や BTB は自由度が高く比較を行いやすいために、これを用いた。

そこで表 4.4 に示すような 8 個の case について解析を行った。control というのは最適潮流制御によってその変数を自由に設定できるようにするということである。0 というの

は最適潮流制御を行う際に、その変数が 0 になるという制約条件を付け加えるということである。case1 は UPFC の自由度を全て活用した制御である。case4 は STATCOM と同じ、case8 は何も設置していない状態と同じである。ただし、 $\phi = \theta = 0$  の条件がある場合でも直列側の変換器の通過皮相電力はゼロにならないため、制御を行うのに必要な変換器容量は異なる。解析結果を図 4.11 に示した。

表 4.4 各ケースにおける Maximum Loading

case	$Q$	$V$	$\theta$	Maximum Loading
case1	control	control	control	1.0353
case2	control	control	0	1.0352
case3	control	0	control	1.0266
case4	control	0	0	1.0260
case5	0	control	control	1.0113
case6	0	control	0	1.0111
case7	0	0	control	1.0008
case8	0	0	0	1

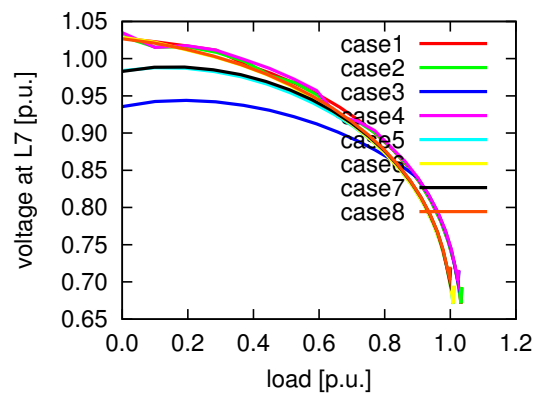


図 4.11 各パラメータを動かした時の有効電力潮流の変化

表から無効電力注入とともに  $\phi$  方向と  $\theta$  方向の電圧印加も Maximum Loading の向上に貢献するということが読み取れる。しかしこの貢献の大きさについては差があることが分かる。無効電力注入のあるものとなないものを比較する (case1 と 5, 2 と 6, 3 と 7, 4 と 8) と約 0.025[p.u.] 程度の Maximum Loading を向上する。 $\phi$  方向の電圧印加の有無の比較 (case1 と 3, 2 と 4, 5 と 7, 6 と 8) では約 0.01[p.u.] 程度、 $\theta$  方向の電圧印加の有無の比較 (case1 と 2, 3 と 4, 5 と 6, 7 と 8) では 0.001[p.u.] 以下程度の差しか出なかった。 $Q_{inj}$  の制約の大きさを変えるとこの結果にも違いが表れるものと考えられるが、基本的には電圧安定性向上に貢献するパラメータは次の順になる。

1. 無効電力注入
2. 電圧印加（電圧の大きさ方向）
3. 電圧印加（位相方向）

### 4.3.3 潮流制御と電圧安定性向上の関連

一般に電圧を印加することは系統全体の潮流状態にも何らかの影響を与える。通常の電力系統であれば、送電線両端の位相を変えることで有効電力潮流、送電線両端の電圧差を変えることで無効電力潮流が変化する。

先ほどの特殊な UPFC または BTB の場合において、印加電圧の各成分を動かした時の、通過する有効電力潮流の様子を図 4.12、無効電力潮流の様子を図 4.13 に示す。ただし通過電力は、両端の通過電力のそれぞれ平均値をとったものを表わしている。また、このとき無効電力は注入していない。

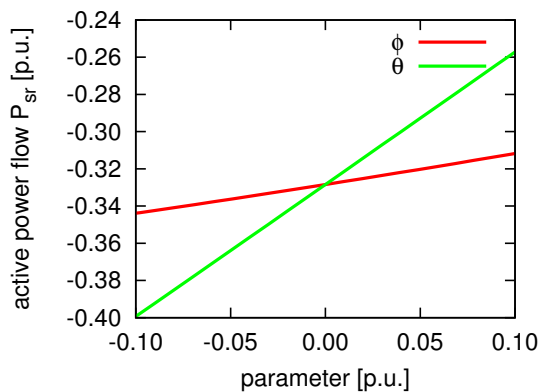


図 4.12 各パラメータを動かした時の有効電力潮流の変化

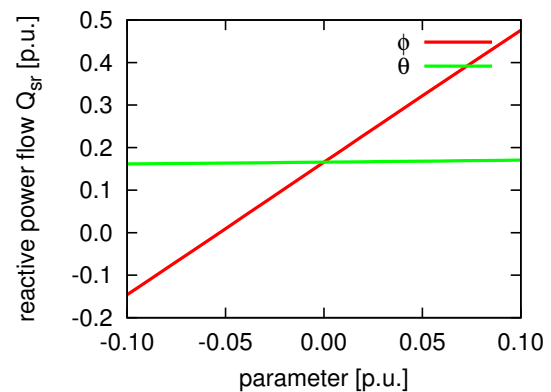


図 4.13 各パラメータを動かした時の無効電力潮流の変化

印加電圧の電圧の大きさ方向の成分は無効電力に、位相方向は有効電力にそれぞれ影響を与えていることが分かる。

潮流制御が電圧安定性向上にもたらす効果について検証する。母線 8 から母線 9 または母線 15 へ向かう二本の送電線について、それぞれに FACTS 機器を設置した場合と何も設置しない場合で、各送電線の潮流の変化を図 4.5 に示す。

UPFC を送電線 8 に設置した場合も、送電線 14 に設置した場合も、UPFC が設置された送電線に潮流を誘導することが無効電力損失和を削減できる。見方を変えれば、潮流をどちらの送電線に迂回させるのが良いかはいつも同じになるとは限らないと言える。一方で電圧の印加状況を見ると、UPFC をどこに設置する場合であっても受電側の電圧を上昇させる制御が良いことが分かる。この場合、UPFC は無効電力損失和を削減した最大の要因は、電圧を上昇させたことであり、潮流状態を変えたことに因るのではない。潮流の変化は印加電

表 4.5 FACTS 機器による制御による潮流の変化

case	$P_{sr8}$	$P_{sr14}$	$Q_{sr8}$	$Q_{sr14}$	$-\phi$	$-\theta$
非設置	2.209	0.565	0.463	0.128	—	—
UPFC 設置 (送電線 8)	2.283	0.491	0.676	0.053	0.0585	0.0422
UPFC 設置 (送電線 14)	2.082	0.692	0.308	0.373	0.1483	0.0357

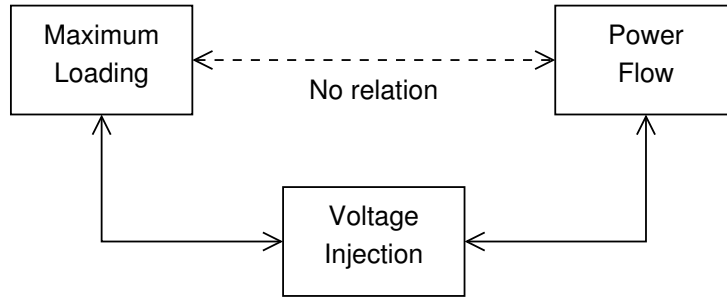


図 4.14 Maximum Loading 拡大・電圧印加制御・潮流制御の関連

圧を変えたことによる副次的な効果であり、潮流を変えること自体に Maximum Loading の拡大効果が認められるわけではない。この関係を図 4.14 に示す。

## 4.4 電圧安定性向上に対する FACTS 機器の比較

### 4.4.1 既存の FACTS 機器を活用する制御

最初に、系統内に既に FACTS 機器が設置されており、それぞれの変換器容量が明確に決定されている状況を考える。変換器容量はそれぞれの制約の範囲内で制御を行ったときの特性を図 4.15 から図 4.18 に示した。

最初に負荷が増加した時、最初に変換器容量が飽和するのは BTB である。これは送電線を通る潮流がすべて変換器を通過することとなり、これに容量を消費するためである。こういった理由から、BTB を Maximum Loading 向上に利用するのは効果的でないと考えられる。次に飽和するのは STATCOM, UPFC の順である。これらは無効電力注入量が多く、これに容量を割り当てていると考えられる。SSSC や IPFC は最後に飽和したが、これは無効電力注入量で見ると他の機器より少ないことが分かる。しかし、PV 曲線を見るとこれらの機器は他の機器に見劣りしない結果を残している。このことから、無効電力注入だけが Maximum Loading を向上させる要因ではないことが推測される。

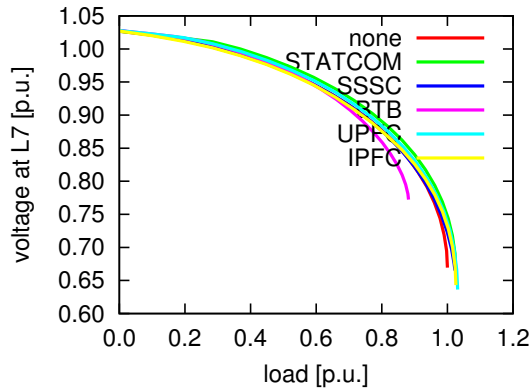


図 4.15 負荷 L7 電圧

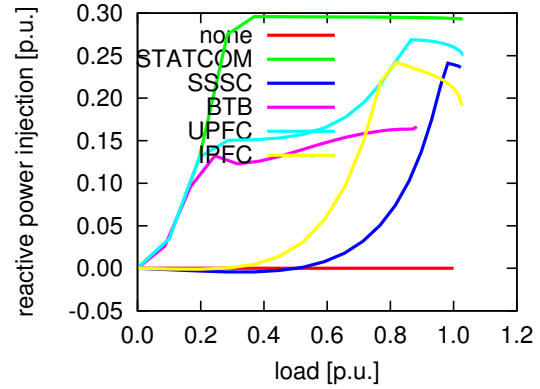


図 4.16 無効電力注入  $Q_{inj}$

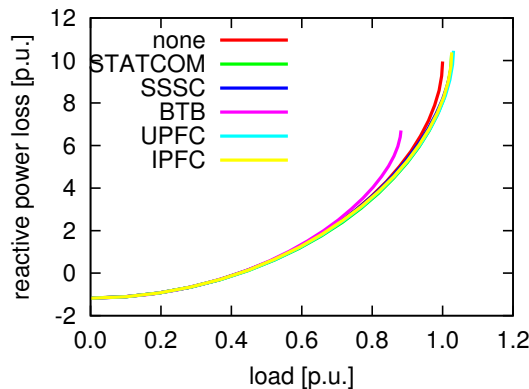


図 4.17 系統全体の無効電力損失  $Q_{loss}$

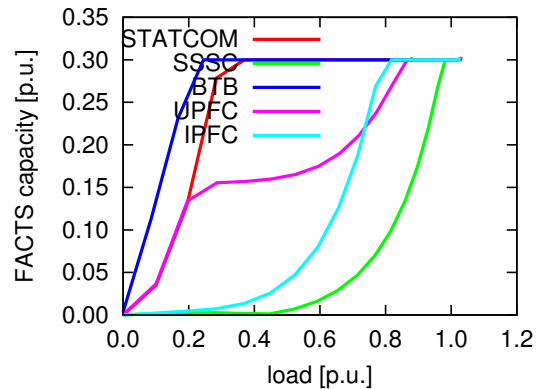


図 4.18 変換器通過皮相電力和  $|S_1| + |S_2|$

#### 4.4.2 複数変換器を持つ機器の容量配分

例えば UPFC 変換器容量の機器といっても、直列側と並列側にどれだけ配分があるかによって制御効果も変化してくる。2 台の変換器の容量の和を一定にしたままその構成比を変えた場合の **Maximum Loading** の変化を、BTB に関しては図 4.19, UPFC に関しては図 4.20, IPFC に関しては図 4.21,。一部、グラフの波形が乱れている部分があるが、これは最適潮流制御が低め解に収束した可能性が高いためである。

横軸は変換器容量和に占める、先ほどまでの解析で  $S_1$  と定義したほうの変換器の容量の割合である。変換器容量和が複数のパターンについて解析している。

変換器容量和が小さいときは単調増加（または単調減少）となり、どちらかの変換器だけに割り当てる使用法が効果的である。しかし、大きくなるにつれて **Maximum Loading** が極大になる点が存在することが分かる。特に UPFC の場合は変換器容量が小さいときは直列側変換器を、容量が大きくなるにつれて並列側変換器を使用するようになり、これを無限まで増加させると先ほど示したような結果になるのである。

既存の FACTS 機器を制御する場合は変換器の容量が固定されているので、その範囲内だ

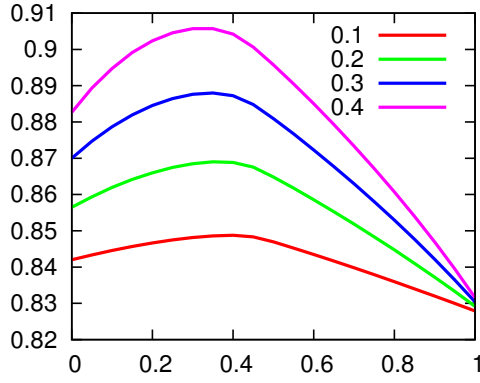


図 4.19 BTB 容量割り当ての割合と Maximum Loading

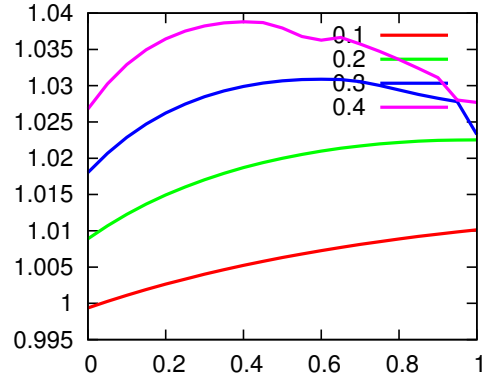


図 4.20 UPFC 容量割り当ての割合と Maximum Loading

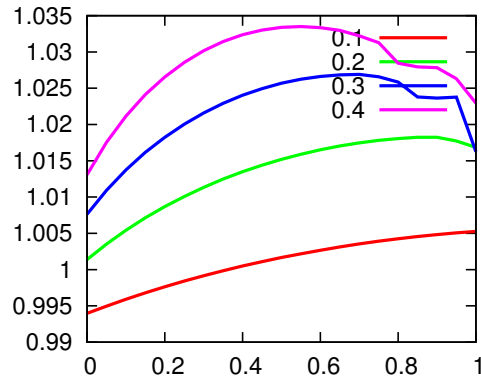


図 4.21 IPFC 容量割り当ての割合と Maximum Loading

けで最適潮流制御を行えばよいが、新規で設置する場合は最適潮流制御にこの変換器配分も含めて行うことでより良い結果を得ることができる。既に設置されている FACTS 機器の変換器を制御する場合の制約条件は次のようになる。

$$S_1(V, I_f) \leq S_{1max} \quad (4.10)$$

$$S_2(V, I_f) \leq S_{2max} \quad (4.11)$$

一方で、新規に FACTS を設置する場合の制約条件は次のようになる。

$$S_1(V, I_f) + S_2(V, I_f) \leq S_{1max} \quad (4.12)$$

今後は特に具体的に各変換器ごとの容量を示さずに、端に合計の値だけを示している場合は、最適配分も行っていると仮定する。

#### 4.4.3 変換器容量を増加させたときの Maximum Loading

変換器容量を増設すれば変換器で制御できる範囲が広がり、より Maximum Loading を拡大することが期待されている。その増加の仕方を解析したものを図 4.22 と図 4.23 に示

す。設置場所については 2 パターン解析を行った。

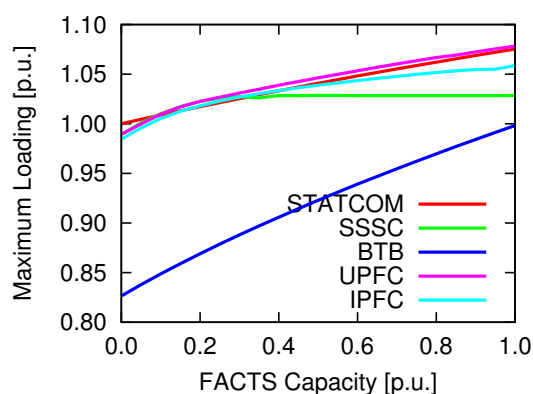


図 4.22 変換器容量和増加時の各機器の Maximum Loading

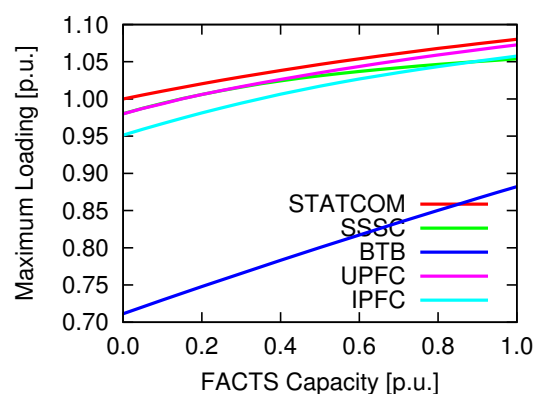


図 4.23 変換器容量和増加時の各機器の Maximum Loading

変換器容量和がゼロ付近では STATCOM が最もよく、次に SSSC または UPFC, IPFC, BTB の順になっている。STATCOM は並列変換器のみから構成されているため、変換器容量がゼロのときは変換器の電流がゼロになり、漏れリアクタンスでの無効電力損失がなくなる。一方で SSSC と UPFC は一本、IPFC は二本の送電線と直列に接続されており、電圧を印加していないときでも電流が流れていて無効電力損失が発生する。BTB で変換器容量が流れなくなるとベース潮流もゼロになる。これは送電線が開放された状態と等しくなるから、最も不安定になる。

変換器容量和が増加すると、STATCOM と比較して SSSC, UPFC, IPFC はより傾きの大きな増加をたどる。SSSC と UPFC の特性はこの段階では全く同じである。すなわち、ここでの UPFC は並列側変換器の容量がゼロで、全て直列側だけに割り当てられていることになる。(UPFC は SSSC と上位互換性があるため、SSSC で行うことができる制御は全て UPFC でも行うことができる。) 図 4.22 では 0.2[p.u.] 付近、図 4.23 では 0.4[p.u.] 付近まで増加すると、SSSC は飽和してそれ以上増加しなくなる。ここから先は UPFC と STATCOM はほぼ平行して増加することになるが、この段階では UPFC の並列側変換器の容量が増加していると考えられる。UPFC は STATCOM と SSSC の傾きの大きいほうと同じ増加率で増加すると考えられる。

このように考えると、5 種類の FACTS 機器のなかでどの FACTS 機器が優れているかは、変換器容量が小さいときの増加特性に基づいて決まることになる。基本的には STATCOM または UPFC が最適になる。変換器容量が小さい部分で図 4.22 のように UPFC が STATCOM を追い越すことができれば UPFC、図 4.23 のようにそれができなければ STATCOM が最適な機器ということになる。

## 4.5 送電線事故時の緊急制御

### 4.5.1 送電線事故時の Maximum Loading 低下

電圧が不安定になるケースは、系統の負荷が増加する場合の他に、送電線の事故等で Maximum Loading が低下するパターンがある。送電線の事故は発生する場所によって不安定の程度が変化する。図の電力系統の各場所で送電線事故が発生し、2 回線開放した場合の PV 曲線を図に示す。また、全設置場所で同様の解析を行った際の Maximum Loading を図に示す。また、事故前に事故が発生する送電線を流れている電流と、その送電線で事故が発生した場合の Maximum Loading の大きさの関係を図に示す。

結果を見るとほとんどの送電線では数パーセント程度 Maximum Loading が減少する。通常、電力系統が Maximum Loading 手前の状態で運用されることはほとんどないため、こうした事故が問題になることは少ない<sup>\*1</sup>。ただし、電流の多い送電線で事故が発生すると大きく Maximum Loading が低下し、これが電圧崩壊につながる可能性がある。

### 4.5.2 送電線事故時の FACTS 機器による制御

送電線 Line8 での事故時に制御を行った場合の Maximum Loading を図 4.24 に示す。事故は 2 回線ルート断とする。FACTS 機器の設置場所は従来と同じとする。変換器制約は 0.3[p.u.] とする。

また、事故直後の短時間であれば短時間変換器容量を適用できると考え、変換器容量制約を 1.0[p.u.] とした場合の Maximum Loading を図 4.25 に示す。

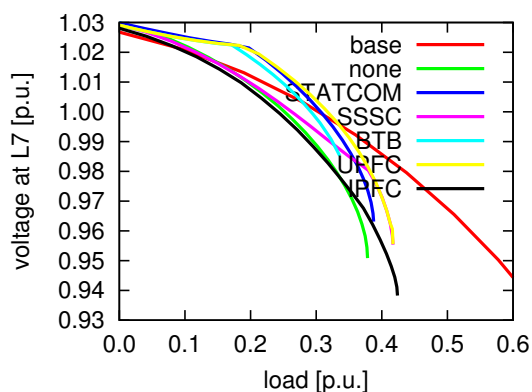


図 4.24 2 回線ルート断の状態での PV 曲線（変換器容量 0.3[p.u.]）

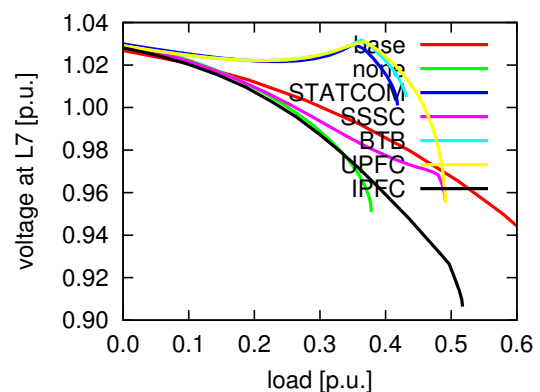


図 4.25 2 回線ルート断の状態での PV 曲線（変換器容量 1.0[p.u.]）

<sup>\*1</sup> 通常は電圧安定性の Maximum Loading より発電機の熱制約や電圧の低下の制約のほうがクリティカルである。

短時間変換器容量を考慮し、最も良い場合でも 0.5[p.u.] 程度までしか改善せず、元の状態まで上昇させることは困難である。制御によって電圧安定性が向上しているとは言い難い状況である。

### 4.5.3 制御遅延を考慮した制御

動的な系統において **Maximum Loading** を向上させるためには各時間断面での最適潮流計算が必要であるが、現実には物理量の観測遅延や計算の遅延などでリアルタイムで追従できないのが現実である。そこで負荷の増加時に最適潮流制御を行わない場合の特性について観測した。負荷増加時に **FACTS** 機器の特定のパラメータを一定の値に保ったまま増加させるという制御である。一定に保つパラメータ、変動するパラメータを表 4.6 に示す。後に動的な解析で行うような  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  を独立に制御する方式において、各 **FACTS** 機器で表に示すようなパラメータを制御した場合の **Maximum Loading** を図 4.26 に示す。

表 4.6 負荷変動の際に固定されるパラメータ

FACTS devices	$S_{inj}$	$Q_{inj}$	$\phi_{inj1}$	$\theta_{inj1}$	$\phi_{inj2}$	$\theta_{inj2}$
STATCOM	const	const	—	—	—	—
SSSC	const	const	variable	variable	—	—
BTB	const	const	const	const	—	—
UPFC	const	const	const	const	—	—
IPFC	const	const	const	variable	const	variable

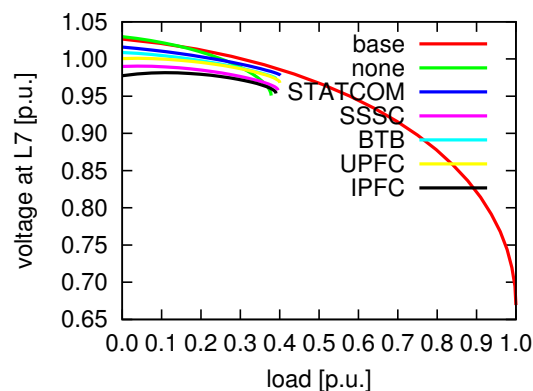


図 4.26  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  を一定とした場合の **Maximum Loading**

最適潮流制御が追従できない範囲においてはこの PV 曲線に沿って系統が動揺することになる。しかし、これも **Maximum Loading** を拡大したとは言えない。こういった結果から、**FACTS** 機器による制御は送電線事故のように急激に **Maximum Loading** が減少するような場合にはほとんど制御効果がないと考えられる。

表 4.7 送電線 8 が 2 回線ルート断した際の Maximum Loading の比較

Device	$S_{max} = 0.3$	$S_{max} = 1.0$	$S_{inj}, V_{inj} \text{ const}$
none	0.3783	0.3783	0.3783
STATCOM	0.3875	0.4184	0.4022
SSSC	0.4170	0.4915	0.3956
BTB	0.3358	0.4317	0.3904
UPFC	0.4170	0.4915	0.4005
IPFC	0.4240	0.5174	0.3906

## 4.6 まとめ

本章では電圧安定性向上のための最適潮流計算を行う際の考察を行った。最初に電力系統に対して FACTS 機器のこういった機能が貢献するのかを検討した。電圧安定性向上を行う上で最も支配的であつ効果的な手法は無効電力補償である。変換器の容量を考慮しない場合、送電線に直列に設置する変換器では Maximum Loading の向上にある程度限界があるが、並列に設置する変換器ではほぼ無限に Maximum Loading を向上させることが可能である。二番目に効果的な機能は変換器容量の大きさにもよるが、電圧の大きさ方向 ( $\phi$  方向) への電圧印加である。逆に位相方向 ( $\theta$  方向) への電圧印加はほとんど効果がないことが判明した。また、電圧を印加することによって系統の潮流状態が変化するが、潮流の変化は最適潮流制御の結果として生じるものであり、潮流の変化と Maximum Loading には直接的な因果関係がないことを明らかにした。

次に、5 種類の FACTS 機器間で性能の比較を行った。最初に BTB は潮流を全て変換器に通さなければならないため、変換器制約が厳しい条件では不利になる。また、直列変換器では変換器容量が小さい時でも漏れリアクタンスで無効電力が消費されているため、並列変換器より不利になる。ただし、直列変換器は変換器容量が増加した時の傾きが大きく、特定の変換器容量帯では並列変換器を上回ることがある。この点では UPFC は直並列の変換器の両者の利点を生かす制御ができるため、有利である。複数変換器を持つ機器は変換器容量の配分の仕方によって Maximum Loading が変化し、容量によっては最適な配分方法があることを示した。UPFC では上記のような理由から、変換器容量が小さいときは直列側だけに配分するのが良いことが判明した。

最後に、FACTS 機器を送電線事故時の緊急制御に応用することを試みた。しかし、FACTS 機器による Maximum Loading の改善が数パーセント程度なのに対し、送電線事故は大幅に Maximum Loading が低下するため、ほとんど効果がないことが明らかになった。FACTS 機器は負荷増加に伴う電圧不安定に対してのみ効果的であると考えられる。

## 第 5 章

# FACTS 機器の設置場所

### 5.1 概要

本章では FACTS 機器の設置場所に関する検討を行う。前章では固定して設置されている FACTS 機器について検討していた。しかし、現実の電力系統では STATCOM 以外の FACTS 機器は導入事例が少なく、むしろ新規に設置を検討するケースのほうが多いと考えられる。本研究で扱っているような縮約系統であれば全部の設置パターンを網羅して解析し、その中でどれが良いかを判定することによって設置場所を決定することも可能である。しかし、現実の系統は複雑な構成をしており、そのような場合には全パターンを網羅するのは非常に困難である。しかし、系統の電圧や電流などの物理量などからある程度有力と見込まれる場所を絞り込み、そこを中心に解析を行うことで FACTS 機器設置の指針を立てるのが容易になることが期待されている。

また、系統に設置する FACTS 機器は必ずしも 1 台とは限らず、複数の設置を検討することもある。そのようなケースに対して FACTS 機器を単独で使用する場合と複数で使用する場合で設置場所がどのように変化するか、あるいは複数台使用することの是非について議論する必要がある。本章ではこういった観点から FACTS 機器の設置に関する議論を行う。多機系統の議論を最初から議論するのは変数の数が多く、論点が曖昧になる恐れがあるため、本章では最初に仮想的な小規模系統で設置場所に関する議論を行い、その後多機系統に移行することとした。また、前章で FACTS 機器同士を比較し、それぞれの機器に特徴がありながらも電圧安定性の向上制御に関しては STATCOM と UPFC が有力であると判定した。そのため、本章でも主に STATCOM と UPFC に関する議論を中心に話を進めていくこととする。

## 5.2 小規模系統での最適設置場所

### 5.2.1 ループ系統の定式化

一機無限大母線系統において，インピーダンスを図 5.1 のように設定する。インピーダンスは変化させてもよいが，系統全体の等価的なインピーダンスは一定とする。本研究では 0.5[p.u.] とする。このとき，Maximum Loading が 1[p.u.] になるためである。

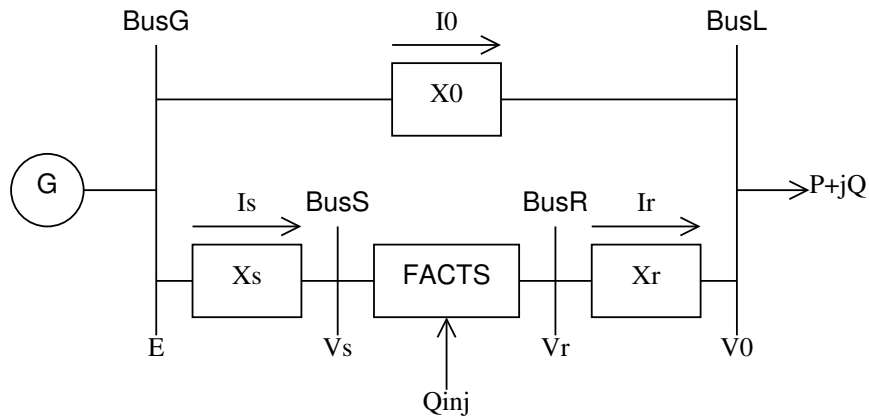


図 5.1 ループ型の小規模系統モデル

インピーダンスに関する制約条件は次のようになる。

$$\frac{1}{X_0} + \frac{1}{X_s + X_r} = \frac{1}{0.5} \quad (5.1)$$

この系統の BusC に FACTS 機器を設置することになる。

この系統の BusS と BusR の間に FACTS 機器を設置することになる。UPFC の場合は  $P_{inj} = 0$  のもとで  $V_s$  と  $V_r$  を自由に動かすことができる。STATCOM を設置する場合は  $V_s = V_r$  という制約条件をさらに付け加える必要がある。

### 5.2.2 負荷末端に設置時の Maximum Loading

最初に系統の負荷末端に FACTS 機器を設置する場合を考える。この場合， $X_r = 0$  となる。このときの Maximum Loading が最大になるような FACTS 機器の制御について考察する。ただし，FACTS 機器の変換器容量の制約は無視する。

発電機母線 G の電圧を  $E$ ，負荷母線 L の電圧を  $V_0 = e_0 + jf_0$ ，FACTS 機器の発電機方向の母線 S の電圧を  $V_s = e_s + jf_s$  とする。また，負荷での消費電力を  $S = P + jQ$ ，FACTS 機器の注入無効電力を  $S_{inj} = jQ_{inj}$  とする。このとき，発電機側から母線 S に注入される潮流に  $S_{inj}$  を加えたものが母線 L に注入される。よって潮流方程式は次のようになる。

$$S - S_{inj} = V_0 \bar{I}_0 + V_s \bar{I}_s \quad (5.2)$$

これを具体的に示すと次のようになる。

$$P = -\frac{E f_0}{X_0} - \frac{E f_s}{X_s} \quad (5.3)$$

$$Q - Q_{inj} = \frac{E e_0}{X_0} - \frac{e_0^2 + f_0^2}{X_0} + \frac{E e_s}{X_s} - \frac{e_s^2 + f_s^2}{X_s} \quad (5.4)$$

ここで、 $Q_{inj}$  は一定であるとする。第一式の右辺を  $F_p$ 、第二式の右辺を  $F_q$  とする。ここで  $F = F_p + \lambda F_q$  とおくと、 $P$  が最大になる条件は次のようになる。

$$\frac{\partial F}{\partial e_0} = \frac{\partial F}{\partial f_0} = \frac{\partial F}{\partial e_s} = \frac{\partial F}{\partial f_s} = \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \quad (5.5)$$

これを解いて  $e_0$ ,  $f_0$ ,  $e_s$ ,  $f_s$  を  $\lambda$  を用いて表わすと次のようになる。

$$e_0 = e_s = \frac{E}{2} \quad (5.6)$$

$$f_0 = f_s = \frac{E}{2\lambda} \quad (5.7)$$

ただし  $\lambda < 0$  である。この結果から FACTS 機器を負荷末端に設置する場合、FACTS 機器の両端の電圧が等しくなるように制御することが最適な状態となる。次にこの結果を  $F_q$  へ代入すると次のようになる。

$$Q - Q_{inj} = \left( \frac{1}{X_0} + \frac{1}{X_s} \right) \left( \frac{E^2}{4} - \frac{1}{\lambda^2} \frac{E^2}{4} \right) \quad (5.8)$$

リアクタンス  $X_0$  と  $X_s$  を合成したものを  $X$  とおいて、これを解くと次のようになる。

$$\frac{1}{\lambda} = -\sqrt{1 + \frac{4X(Q_{inj} - Q)}{E^2}} \quad (5.9)$$

よって  $f_0$  と  $f_s$  は次のように求められる。

$$f_0 = f_s = -\frac{E}{2} \sqrt{1 + \frac{4X(Q_{inj} - Q)}{E^2}} \quad (5.10)$$

よって  $Q_{inj}$  を増加させることによって  $f_0$  は減少（負の方向に増加）し、その結果  $P$  も増加する。FACTS 機器による無効電力注入量が大きければ、それに伴って Maximum Loading も大きくなることが示された。

FACTS 機器を末端に設置した場合の電圧フェーザー図を図 5.2 に示す。 $Q_{inj}$  を大きくするにつれて電圧が上昇する。

FACTS 機器を負荷末端に設置する場合は無効電力注入のみによって Maximum Loading が増加し、電圧印加（潮流制御）は全く効果がない。これを STATCOM と UPFC の場合に当てはめて考えると、理想的な UPFC を負荷末端に設置した場合には理想的な STATCOM と同じ効果しか得られないことがわかる。現実の UPFC には直列側変換器の漏れリアクタンスでの無効電力損失があり、それを補償する分の無効電力を注入するための変換器容量が余分に必要になる。

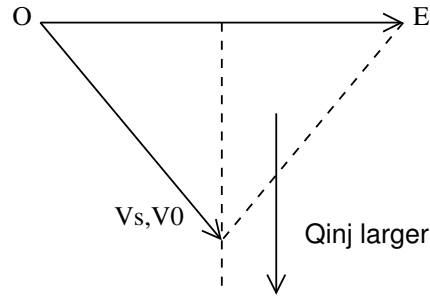


図 5.2 負荷末端に FACTS 機器を設置した場合の最大負荷時におけるフェーザー図

### 5.2.3 無効電力注入

次に FACTS が電圧印加を行わない ( $V_s = V_r$ ) 場合で、かつ無効電力を一定量注入する場合の各設置場所での **Maximum Loading** を検討した。説明の都合上、設置場所に関するパラメータ  $x$  と  $y$  を導入し、それぞれを変化させたときの **Maximum Loading** を求めることとする。

図 5.3 のように同一の非常に細い（リアクタンスが大きい）送電線が並列に多く接続されているものと解釈することとする。ここに FACTS 機器を設置する際に、細い送電線の一部だけが FACTS 機器を跨ぐように設置すると解釈する。この FACTS 機器の設置場所の発電機端からの距離を  $x$ 、FACTS 機器が跨いでいる送電線の本数を  $y$  とする。なお、送電線の本数は本来離散的なものであるが、送電線のリアクタンスと設置されている本数がともに  $\infty$  であると考えて  $y$  を連続量のように考えて差し支えないといえる。

設置場所については発電機母線に設置した場合を  $x = 0$ 、負荷母線に設置した場合  $x = 1$  とする。また、設置する送電線のアドミタンスについては、アドミタンスがゼロの送電線に設置する場合を  $y = 0$ 、全ての送電線に跨るように設置する場合を  $y = 1$  とする。図のケースは  $x = x_0$ 、 $y = y_0$  の場合を示している。 $x$  と  $y$ 、および送電線全体の合成アドミタンス  $X$  から各インピーダンスは次のように求められる。

$$X_0 = \frac{1}{1-y}X \quad (5.11)$$

$$X_s = \frac{x}{y}X \quad (5.12)$$

$$X_r = \frac{1-x}{y}X \quad (5.13)$$

最初に  $Q_{inj} = 0.3$  の場合と  $Q_{inj} = 1.0$  の各設置場所の **Maximum Loading** を図 5.4 に示す。 $x$  と  $y$  がともに大きいほど **Maximum Loading** が増加することが読み取れる。また、無効電力補償は主に設置場所の上流・下流（ $x$  軸方向）に依存し、設置する送電線のインピーダンスにはそれほど依存しないこともわかる。しかし、 $x$  が非常に小さい送電線では

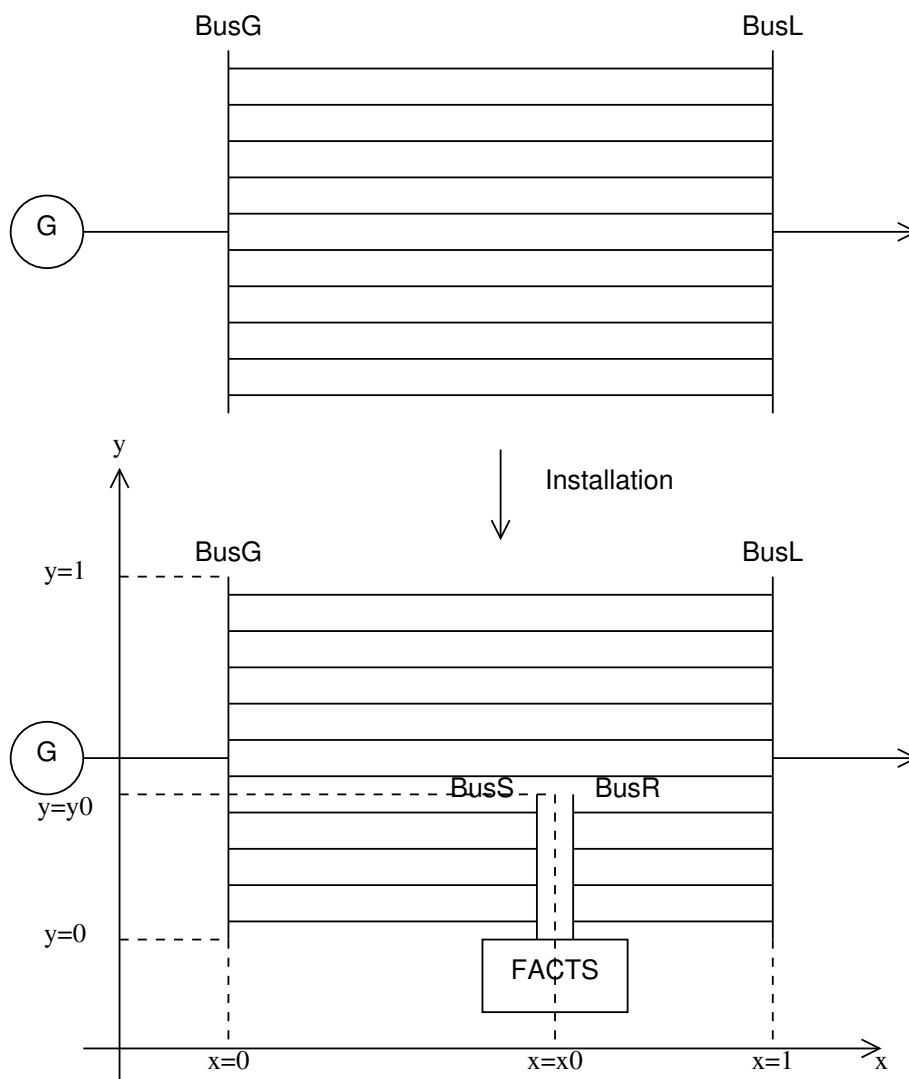


図 5.3 小規模系統における  $x$  と  $y$  の定義

**Maximum Loading** が小さくなる。これは注入した無効電力を周囲に伝達する送電線のインピーダンスが大きいと、そこだけで電圧降下が生じるためである。

次に設置されている **FACTS** 機器が **STATCOM** であると仮定し、 $x = 0.5$ ,  $y = 0.05, 0.95$  の場合における各電圧のフェーザー図を図 5.5 と図 5.6 に示す。このフェーザー図は **Maximum Loading** の負荷状態における実際の電圧の大きさに基づいて描いたものである。さて、**FACTS** 機器が **STATCOM** である場合はほぼこれと同様な結果が得られるが、**UPFC** の場合は直列側に大きな漏れリアクタンスがあり、そこでの無効電力損失を補うだけの直列側変換器容量が余分に必要になる。よって、無効電力注入だけでみると **UPFC** より **STATCOM** のほうが効果的であると推測される。

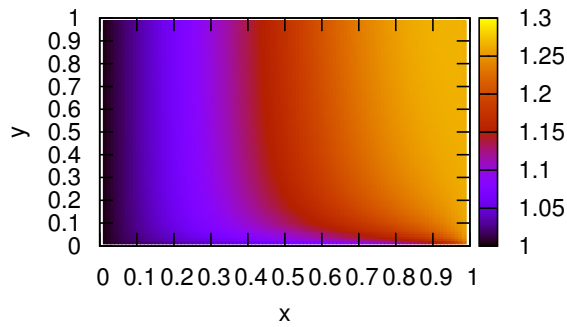


図 5.4 無効電力注入 ( $Q_{inj} = 0.3$ ) での各設置場所の Maximum Loading [p.u.]

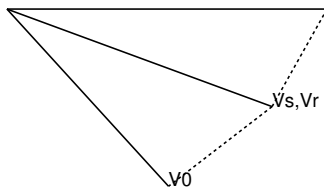


図 5.5  $x = 0.5$ ,  $y = 0.05$  での母線電圧フェーザー図

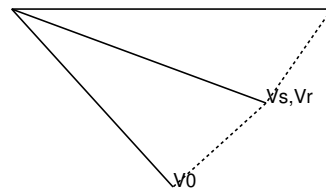


図 5.6  $x = 0.5$ ,  $y = 0.95$  での母線電圧フェーザー図

## 5.2.4 電圧印加

FACTS 機器が UPFC のように両端の電圧を変化させることができる機器であると仮定し、電圧印加に対する Maximum Loading の拡大を考察する。系統の設定条件は先ほどの無効電力注入のケースと同様とする。電圧印加の大きさ  $V_{inj}$  は Maximum Loading を最大にするように決定し、無効電力注入  $Q_{inj}$  は一定の値に保ったままにする。ここでは  $Q_{inj} = 0.0$  と  $Q_{inj} = 0.3$  のケースについて考察する。変換器容量は無視することとする。この条件で解析した結果を図 5.7 と図 5.8 に示す。

このグラフは Maximum Loading が 2.0[p.u.] 以下の範囲だけを表示しているが、実際の Maximum Loading はこれより大きい値になる場所もあり、特に  $x = 0$  付近では無限に大きくなる。グラフより  $Q_{inj}$  の値に関わりなく  $x$  が小さいほど、 $y$  が大きいほど Maximum Loading が向上することがわかる。先ほどの数式を用いた解析では、 $x = 1$  のときに Maximum Loading が増加しないということを導出したが、 $x$  方向に関しては、ほぼその特徴に合致した結果である。 $y$  方向に関しては無効電力注入の場合と同様に、 $y$  が大きい（インピーダンスが小さい）送電線に設置することで、電圧印加に対し多くの電流を変化させることができるために効果的であると推測される。

無効電力注入では  $y$  方向の変化があまり見られなかったが、電圧印加では  $x$  方向と同様に

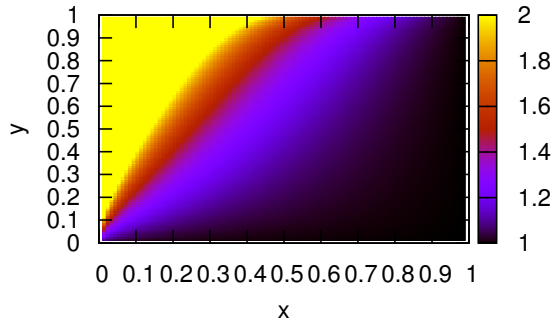


図 5.7 印加電圧制御時の各設置場所の Maximum Loading [p.u.] ( $Q_{inj} = 0.0$ )

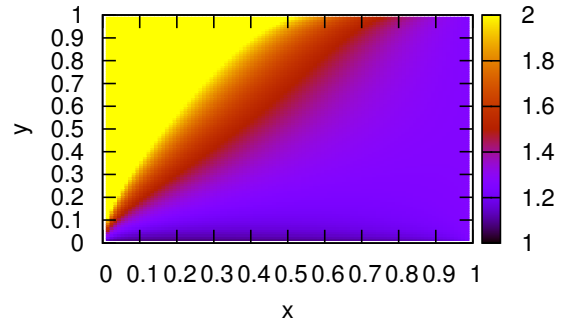


図 5.8 印加電圧制御時の各設置場所の Maximum Loading [p.u.] ( $Q_{inj} = 0.3$ )

y 方向にも Maximum Loading が変化する。このことから、UPFC のような機器を設置する場合は、設置送電線のインピーダンスによって大きく Maximum Loading が変わる可能性があることを示唆している。

次に、 $Q_{inj} = 0.0$  と  $Q_{inj} = 0.3$  での電圧フェーザー図を図 5.9 と図 5.10 に示す。ただし、設置されている FACTS 機器は UPFC であるとし、並列側変換器が発電機側を向くようにした。漏れリアクタンスは直列側、並列側ともに  $j0.05[\text{p.u.}]$  とした。フェーザー図には直列側変換器の印加電圧のみを示してある。

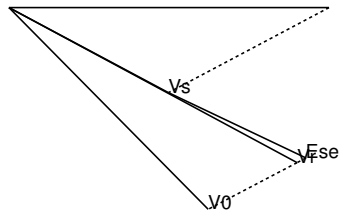


図 5.9  $x = 0.5, y = 0.5$  での母線電圧フェーザー図 ( $Q_{inj} = 0.0$ )

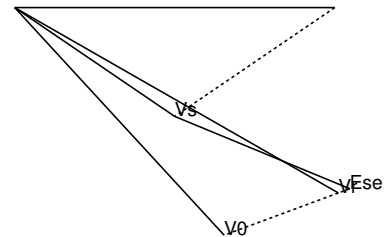


図 5.10  $x = 0.5, y = 0.5$  での母線電圧フェーザー図 ( $Q_{inj} = 0.3$ )

$Q_{inj} = 0.0$  の場合は電圧  $V_s$  と  $V_r$  が同一の方向を向いている。すなわち、FACTS 機器は系統に対し位相を変化させず電圧の大きさだけを変化させることによって Maximum Loading を拡大していることになる。 $Q_{inj} = 0.3$  の場合は位相方向にも若干の変化はあるが、やはり電圧の大きさ方向の電圧印加をしていることには変わりない。FACTS 機器は変圧器のタップ調整と同様の原理で安定性を制御していると考えられる。

### 5.2.5 電圧の大きさ方向・位相方向の個別制御

次に  $Q_{inj} = 0.3$  の場合を例に、電圧の大きさ方向、位相方向の制御を行ったときの解析を示す。母線電圧  $V_s$  と  $V_r$  を比較した場合に、その電圧の大きさ方向の差を  $\phi$ ，位相方向の差  $\theta$  と定義する。電圧の定義方法を図 5.11 に示す。通常，FACTS 機器を制御する際には  $\phi$  と  $\theta$  を両方動かすのが当然であるが，ここでは考察のために片方だけを独立に制御する場合を考える。解析パターンを case1 から case4 に分けて，それぞれの  $\phi$  と  $\theta$  を動きを表 5.1 に示す。なお，case4 は STATCOM の場合と同一である。

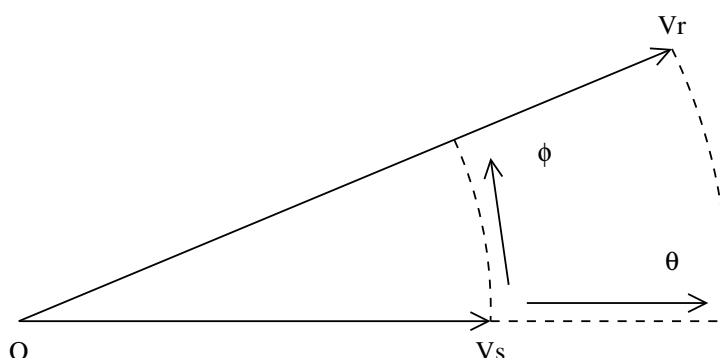


図 5.11 電圧の  $\phi$  と  $\theta$  の定義

表 5.1 各 case における制御可能な電圧の大きさと位相

case	$\phi$	$\theta$
case1	controllable	controllable
case2	controllable	0
case3	0	controllable
case4	0	0

この各ケースについて  $y = 0.5$  のときの  $x$  に対する Maximum Loading の関係を図 5.12 にしめた。このグラフでは case1 と case2，case3 と case4 の結果にほとんど変化がない。これを別の意味で言うと，FACTS 機器両端の位相を変化させても Maximum Loading はほとんど変わらないということである。

### 5.2.6 変換器制約を考慮した場合

次に設置されている機器が UPFC であるとし，その変換器容量の制約を考慮した場合の Maximum Loading を考察した。UPFC を系統に設置する場合にはその向きも検討する必要がある。送電線の  $y = 0.5$  において，UPFC の並列側変換器を発電機のほうにむけて設置す

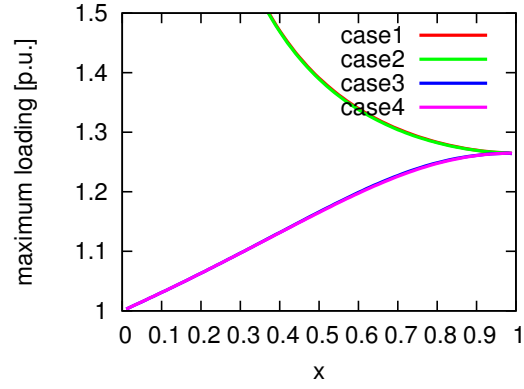


図 5.12  $\phi$  と  $\theta$  の各制御ケースでの Maximum Loading

表 5.2 UPFC 近傍の電圧・電流の値の大きさ

$ V_s $	0.565
$ V_r $	1.022
$ I_s $	1.135
$ I_r $	0.627

る場合を case1, 逆に並列側変換器を負荷のほうにむける場合を case2 とした。この両者の Maximum Loading を比較したものを図 5.13 に示す。 $Q_{inj} = 0$  としている。

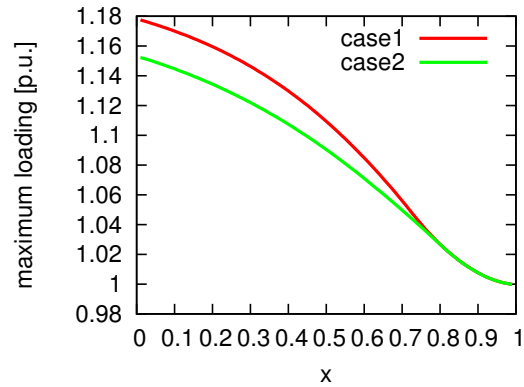


図 5.13  $\phi$  と  $\theta$  の各制御ケースでの Maximum Loading

結果から読み取れるように, UPFC を系統に設置する際は case1 のように発電機側に並列側変換器を向けることが良くなる。この理由を考えるために, 変換器制約がない場合の  $x = 0.5$ ,  $y = 0.5$  の解の状態での電圧と電流の大きさを表 5.2 に示す。

FACTS 機器は電圧を上昇させ, 電流を減少させる働きをする。図 5.13 のように case1 の場合は  $I_{se} = I_r$ ,  $V_{sh} = V_s$  となるため, 並列側変換器を電圧の低い発電機側, 直列側変換器を

電流の小さい負荷側に設置している。逆に、case2 の場合は  $I_{se} = I_s$ ,  $V_{sh} = V_r$  となるため、並列側変換器を電圧の高い負荷側、直列側変換器を電流の大きい発電機側に設置することになる。一般に直列側変換器はそこを通過する電流の減少に伴って変換器通過皮相電力が減少し、並列側変換器は電圧を印加する対象となる母線電圧の低下に伴って変換器通過皮相電力が減少する。こういった観点から case1 は case2 より少ない変換器容量で安定性を向上させることができると考えられる。

最後に、UPFC の場合で電圧印加制御を無効電力注入制御を両方行う場合の各設置場所での **Maximum Loading** を図 5.14 と図 5.15 に示した。変換器容量が 0.3 の場合と 1.0 の場合に分けて解析した。変換器容量が小さい場合には負荷に近い場所で **Maximum Loading** が最大になるが、容量が大きい場合には逆の結果が得られる。

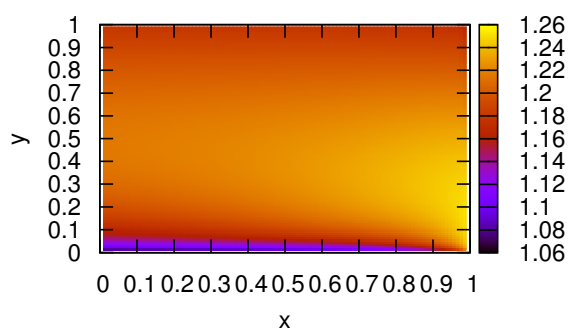


図 5.14 変換器容量和が 0.3[p.u.] のときの  
各設置場所での **Maximum Loading**

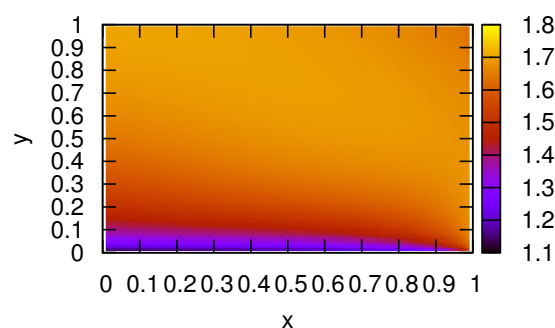


図 5.15 変換器容量和が 1.0[p.u.] のときの  
各設置場所での **Maximum Loading**

さらに、 $y = 0.5$  における各設置場所での **Maximum Loading** の比較を図 5.16 に示した。

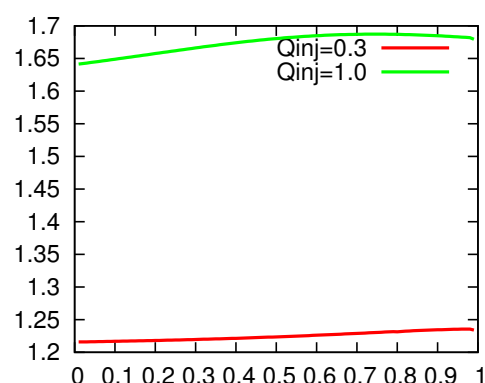


図 5.16 変換器容量を変えたときの **Maximum Loading**

実系統で考える場合、変換器容量の十分大きい UPFC を設置する場合や、容量の小さいものであっても将来的に増設する可能性のあるものは発電機付近に設置するのが良いと考

えられる。逆に変換器容量が小さいものを設置し、それ以上は容量を増設することがない場合は負荷付近に設置するのが良いと考えられる。

## 5.3 多機系統での解析

### 5.3.1 系統状態の把握

最初に解析対象とする多機系統の状態を把握するため、各母線の電圧の大きさ、位相と各送電線を通る電流の大きさ、送電線のリアクタンスを図 5.17 から図 5.20 に示した。これらは後の考察を行う際に使用する。

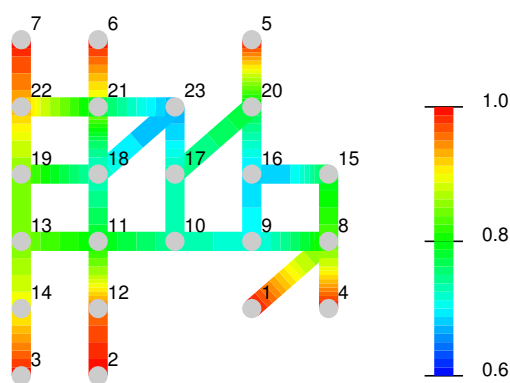


図 5.17 FACTS 機器非設置時の母線電圧  $|V|$  分布

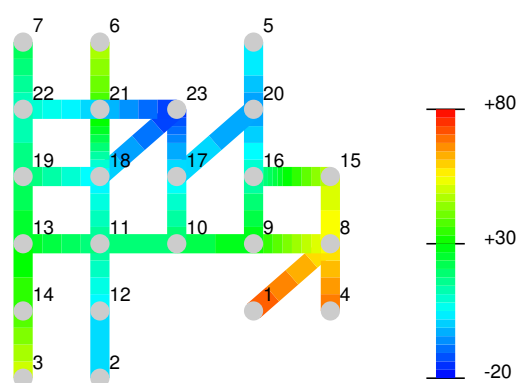


図 5.18 FACTS 機器非設置時の母線位相  $\theta$  分布

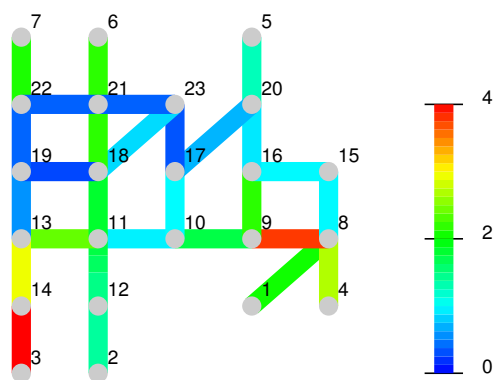


図 5.19 FACTS 機器非設置時の送電線電流  $|I|$  分布

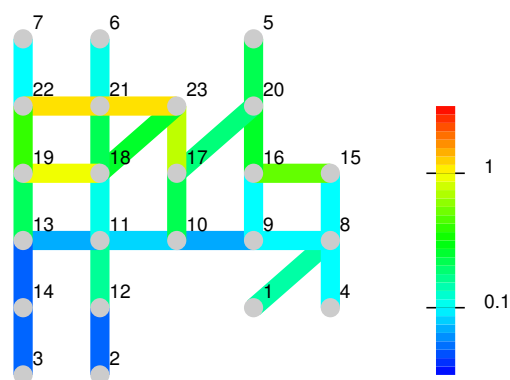


図 5.20 FACTS 機器非設置時の送電線リアクタンス  $X$  分布

### 5.3.2 FACTS 機器の比較

4 種類の FACTS 機器 (STATCOM, SSSC, BTB, UPFC) を系統内の各場所に設置した場合の Maximum Loading を図 5.21 から図 5.25 に示した。また、IPFC を設置して同様の

制御を行った場合の結果について、非設置時より 2% 以上 Maximum Loading が増加しているものについて表 5.3 に示した。

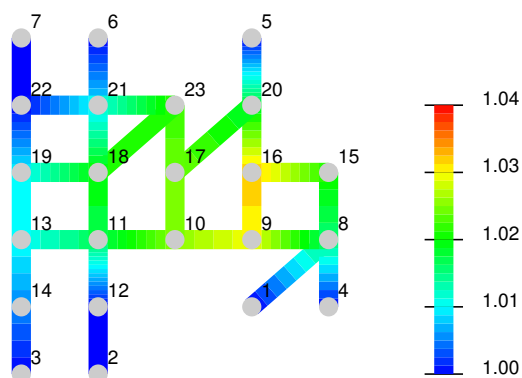


図 5.21 STATCOM を各場所に設置時の Maximum Loading

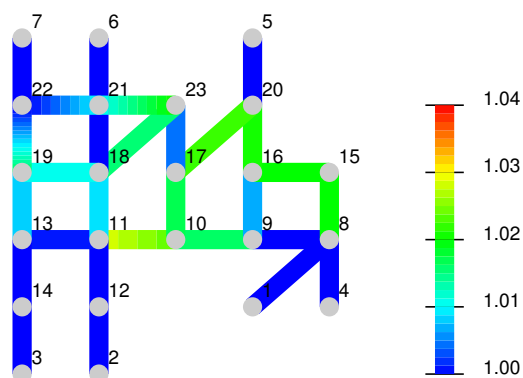


図 5.22 SSSC を各場所に設置時の Maximum Loading

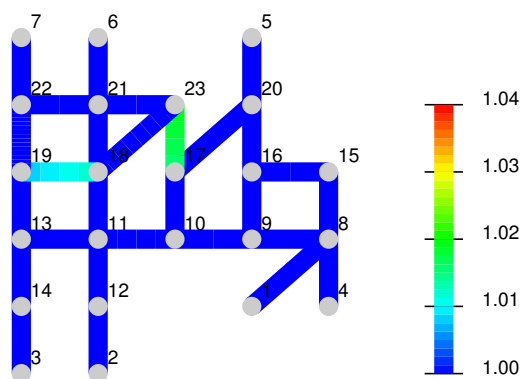


図 5.23 BTB を各場所に設置時の Maximum Loading

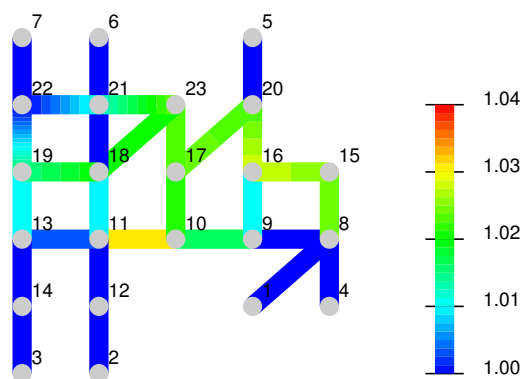


図 5.24 UPFC を各場所に設置時の Maximum Loading (case1)

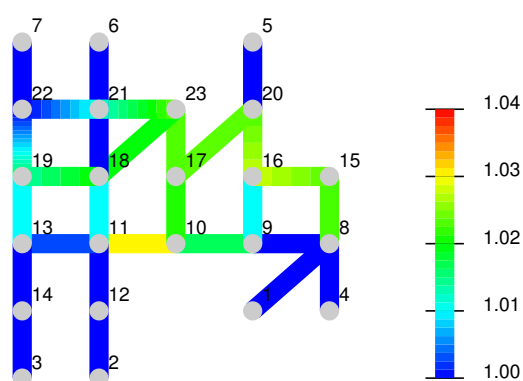


図 5.25 UPFC を各場所に設置時の Maximum Loading (case2)

最初に STATCOM は母線 16 付近に設置するのが良い。これは母線 16 には負荷が存在し、電圧が大きく低下する母線である点が挙げられる。この系統には母線 16 以外に母線 23

表 5.3 IPFC を各場所に設置時の Maximum Loading (上位解のみ)

10-11,17	1.0269
23-18,22	1.0226
23-17,22	1.0221
17-20,23	1.0219
11-10,18	1.0209

の負荷も大きく電圧が低下する母線であるが、母線 16 の場合は周囲の送電線のリアクタンスが小さく、この点が制御を行う上で有利に働くと考えられる。

次に BTB は設置前よりも安定になる場所が 2 箇所しか存在せず、それも他の機器と比較して低い水準にとどまっている。やはり BTB は潮流を直接変換器に通過させるため、変換器容量の制約が厳しい場合は Maximum Loading 向上につながらないと考えられる。

UPFC のように直列変換器を持つ機器は STATCOM の最適な場所に加えて送電線 10-11 や、母線 23 付近の送電線に設置するとよいことが分かる。これらの送電線は流れている電流が小さい送電線である。母線 23 の場合は大きな負荷の至近点であり、かつ電流が小さい水準にあるため、安定性が良くなると考えられる。送電線 10-11 の場合は特に周囲に負荷がない場所であるが、この送電線はリアクタンスが小さい割に流れている電流が少ない送電線であるといえる。このため、潮流制御による Maximum Loading 拡大効果が大きいといえる。

### 5.3.3 UPFC の変換器容量の分配

STATCOM や SSSC の結果と比較すると UPFC の設置場所の特徴は両者を足し合わせたような特徴になっている。例えば UPFC では設置場所 11-10 と 16-20 付近が効果的であるという結果が得られた。一方、STATCOM 設置の場合は母線 11 よりも母線 16 に設置したほうが良い結果となっている。このことから、UPFC を設置場所 11-10 と 16-20 に設置する場合では UPFC の動作の特徴に違いがあると考えられる。負荷の大きさが 1[p.u.] (FACTS 機器非設置時の Maximum Loading) のときにそれぞれに設置して無効電力損失最小化を行ったときの、各変数を表 5.4 に示す。

母線 16-20 に設置した場合は UPFC 変換器容量はほとんど並列側変換器のみに割り当てられ、設置端両端の電圧差が小さい代わりに無効電力注入量が 11-10 の場合より大きくなっている。すなわちこの 2 通りの UPFC 設置は、同じ Maximum Loading の拡大という制御に対して、全く異なる原理で動作していることになる。そして、このような違いが現れる要因は UPFC の設置場所に因ると考えられる。

表 5.4 特定の場所に設置された UPFC の各物理量

設置場所	11-10	16-20
無効電力損失和 $Q_{loss}$	8.013	7.981
無効電力注入量 $Q_{inj}$	0.252	0.263
母線電位差の大きさ $ V_r - V_s $	0.141	0.012
直列側変換器通過皮相電力 $ S_{se} $	0.180	0.027
並列側変換器通過皮相電力 $ S_{sh} $	0.120	0.273

表 5.5 各 FACTS 機器の複数設置の組み合わせ数

	STATCOM	SSSC	BTB	UPFC	IPFC
single	16	34	34	68	24
STATCOM	120	510	510	1020	360
SSSC	—	484	968	1936	552
BTB	—	—	484	1936	552
UPFC	—	—	—	1936	1104
IPFC	—	—	—	—	108

## 5.4 複数 FACTS 機器を設置する場合の設置場所

### 5.4.1 設置パターンの解析

FACTS 機器を設置する場所は基本的にはループの条件さえ満たしていればどこにでも設置できる。しかし、複数 FACTS 機器の設置だけでも設置パターンが無限にあり、それらを全て網羅することは不可能である。そこで本研究では複数 FACTS 機器の設置パターンを以下のものに限定して行う。

- 設置台数は 2 台とする。
- 発電機以外の母線の至近点に設置する。
- 同一の母線に複数の機器を設置しない。
- 同一のループに複数の直列変換器を持つ機器を設置しない。

この条件を満たす設置パターン数を計算した結果を表 5.5 に示す。ただし SSSC, BTB, IPFC は向きに依存せず同じ結果になるが、UPFC は直並列の変換器の向きによって結果が異なるため、それを考慮した値となっている。

設置パターンは減ったものの、これらの解析を全て行うのは困難である。そこで、本研究では STATCOM2 台と UPFC2 台の場合のみを解析する。

#### 5.4.2 STATCOM2 台の設置

系統内に STATCOM2 台を設置するケースを全て解析し、その結果の中で上位の解を表 5.6 に示す。

表 5.6 STATCOM を 2 台設置した時の Maximum Loading の上位解

STATCOM1	STATCOM2	Maximum Loading [p.u.]
16	*	1.0325
9	*	1.0296
10	*	1.0254
17	*	1.0243

表中の \* は系統内の他のどの場所に設置しても値が同じという意味である。このように同じ解が並ぶのは、2 台 STATCOM を設置してもどちらか一方の STATCOM に全ての変換器容量を割り当てるのが最適解となり、他方の STATCOM は系統に対して全く制御をしていないためである。無効電力注入による電圧安定性向上制御は基本的には無効電力注入が増加するにつれて Maximum Loading が増加し、ある値で飽和することがない。そのため、特定の母線に集中的に変換器を割り当てて、1 台の STATCOM として運転するほうが効果的であると考えられる。なお、3 台以上の STATCOM を設置する場合については解析しないが、上記のような趣旨から考えるとこの場合も特定の 1 台の変換器に集中されて容量を割り当てるのが最適になると推測される。

#### 5.4.3 UPFC2 台の設置

次に UPFC2 台を設置してすべての設置パターンを解析した結果を表 5.7 に示す。ただし、UPFC 設置の向きについては、有効電力の送電側に並列変換器を向けるケースのみを検討した。

得られた解は片方が送電線 10–11 間に設置するもので、他方を別の送電線に設置するものになっている。しかし、一台の UPFC を設置した時に 2 番目に良い解となった設置場所 16–20 は、複数 UPFC を設置する場合はそれほど最善の解とはなっていない。むしろ、19–22 や 19–13 のように単独では効果を発揮しなかったものが、他の UPFC を組み合わせることで効果的になるケースもあることが分かった。

表 5.7 UPFC を 2 台設置した時の Maximum Loading の上位解

UPFC1	UPFC2	Maximum Loading [p.u.]
11-10	17-20	1.0321
11-10	19-18	1.0317
11-10	19-22	1.0311
10-11	19-18	1.0308
10-11	17-20	1.0305
10-11	19-22	1.0302
11-10	19-13	1.0299
10-11	19-13	1.0299
10-11	13-19	1.0298
11-10	16-20	1.0299

## 5.5 まとめ

本章では FACTS 機器を設置する際に、電圧安定性向上に貢献させるための設置場所について検討した。ここでは小規模系統に対して詳細な解析を行い、そこで得た結論を多機系統に応用するというものであった。

最初に、FACTS 機器の制御を無効電力注入と電圧印加に分けた場合に、それぞれの制御を行う上で最適な設置場所があることを示した。両者を組み合わせた制御を行う場合、変換器容量に応じて設置場所が変わることを示した。さらに UPFC については、設置する向きによって必要な変換器容量が異なることを示した。

多機系統の解析では、5 種類の FACTS 機器を全ての設置場所に設置した場合の解析を行い、それと系統の電圧、電流等の各変数との比較を行った。特に UPFC では、系統全体の良い設置場所の中で無効電力制御が大きく関与する場所と、電圧印加が大きく関与する場所に分けることができることを示した。最後に、複数の FACTS 機器の導入に関して限られたケースではあるがシミュレーションし、特に電圧印加によって制御する機器は複数台設置することによってさらに安定性を向上させることができる可能性があることを示した。

## 第 6 章

# 動的な電圧安定性向上制御

### 6.1 概要

本章では FACTS 機器の電圧安定性を向上させるための動的な制御系設計の方法と、その動作について検証する。これまでの解析は全て静的な解析モデルを用いて行ってきた。これは発電機を PV 指定、負荷を PQ 指定として行う理想的な制御である。しかし、現実の電力系統の発電機や負荷はそのようなシンプルなものではなく、また制御遅れや観測遅れがあるために制御は容易ではない。また、現実の系統は負荷がランダムに変動し、非常に短い時間の範囲内で予測して制御するのは困難である。また、電力系統の安定性には電圧安定性だけではなく発電機の定態安定性や過渡安定性もあり、これらとの関連についても議論する必要がある。

本章では FACTS 機器の中で UPFC を取り上げ、最初に UPFC のパラメータの決定法や動かし方について議論する。系統運用者が FACTS 機器に期待する機能は、例えば「UPFC に無効電力を注入させる」といったようなマクロな機能であるが、本研究では FACTS 機器を電圧源として模擬することとしており、それらに対応させる制御系が必要である。本研究ではそれに対して非干渉系の制御系を使用して行うことを提唱する。それらを用いた場合の UPFC の動作について確認する。

その上で系統内の観測量を用いて、系統状態が変化したときでも UPFC が適切な制御を行うことができるような制御系を何種類か提唱し、その比較を行う。

### 6.2 制御系の構成

#### 6.2.1 制御系の全体像

一般に FACTS 機器はパワーエレクトロニクス機器である。したがって厳密な解析を行うには半導体素子の ON/OFF 動作を考慮して解析するのが望ましい。しかし、本研究では FACTS 機器を電圧源に置き換えて解析を行うこととしている。半導体素子の動作に関する

検討は容易ではなく、それだけでも検討に値するものであるが、本研究で扱っているような電圧安定性の話とはやや遠ざかることになるため、ここでは扱わないこととする。

FACTS 機器の電圧源モデルは動的な解析が容易なモデルであるが、印加電圧と系統運用側からみて実際に制御すべき物理量（無効電力注入など）は必ずしも 1 対 1 に対応するわけではない。特に皮相電力注入量を考える場合は、直列側と並列側の両方が関与するものであるため、相互干渉が発生しないような制御系を作成する必要がある。また、一般に UPFC の制御自由度は 3 であるがこれらのパラメータを仮に  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  とする。このパラメータは UPFC の近傍の変数を用いることとする。電圧源モデルでは制御変数が 4 つあり、DC コンデンサの電圧制御に割り当てる必要がある。

さらにこれより上位には、系統の安定性向上のために  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  を制御するということが必要になる。無効電力制御や電圧印加制御のパラメータを一定に保つこと自体は、電圧安定性の向上とは何ら関係がない。そこで例えば発電機出力や負荷量を観測し、系統内の状態変化に合わせてパラメータの指令値を動かす制御系が必要になる。

図のように FACTS 機器の制御系は主に 3 段階に分けることができる。このそれぞれについて順次説明していく。

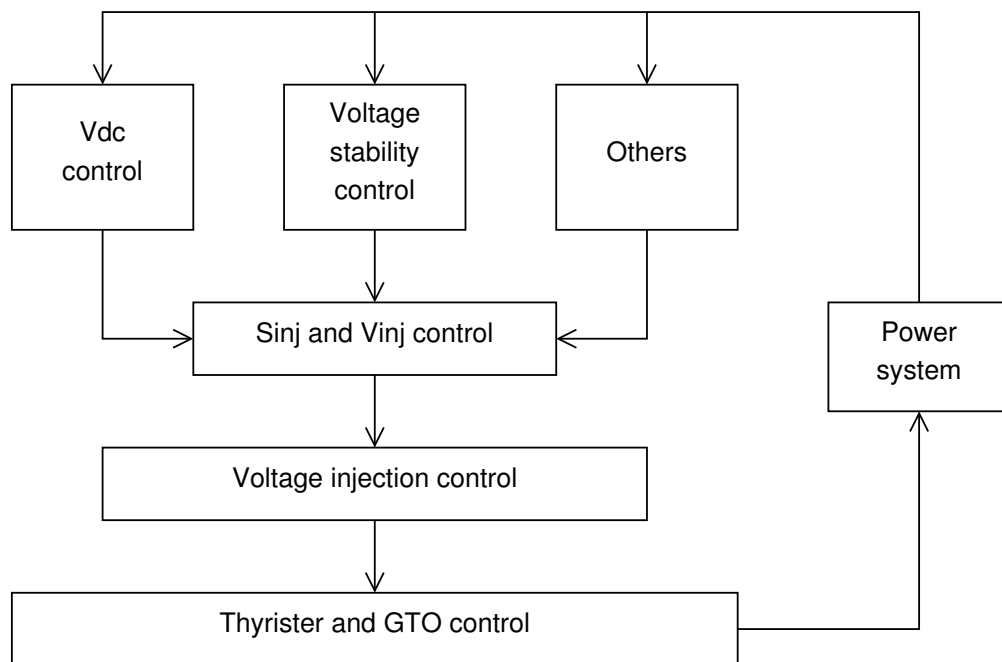


図 6.1 制御系の階層構造

本研究における UPFC の制御の最終的な目的は電圧安定性を向上させることであるが、実は後に説明するように、それだけでは不十分であり、次のような制御目的も必要である。

1. DC コンデンサの電圧を一定に保つ。
2. 系統のダンピングを悪化させないようにする。

これらの条件を満たせるような制御系にするために、いくつかのブロックに分割し、それぞれで説明を行っていく。

## 6.2.2 印加電圧の制御系

本研究で用いる印加電圧の制御系を図に示す。パラメータは **PI** 制御系を用いて制御を行う。  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  の観測遅れ時定数は  $0.2[s]$ ，変換器の動作遅れ時定数を  $0.5[s]$  とした。

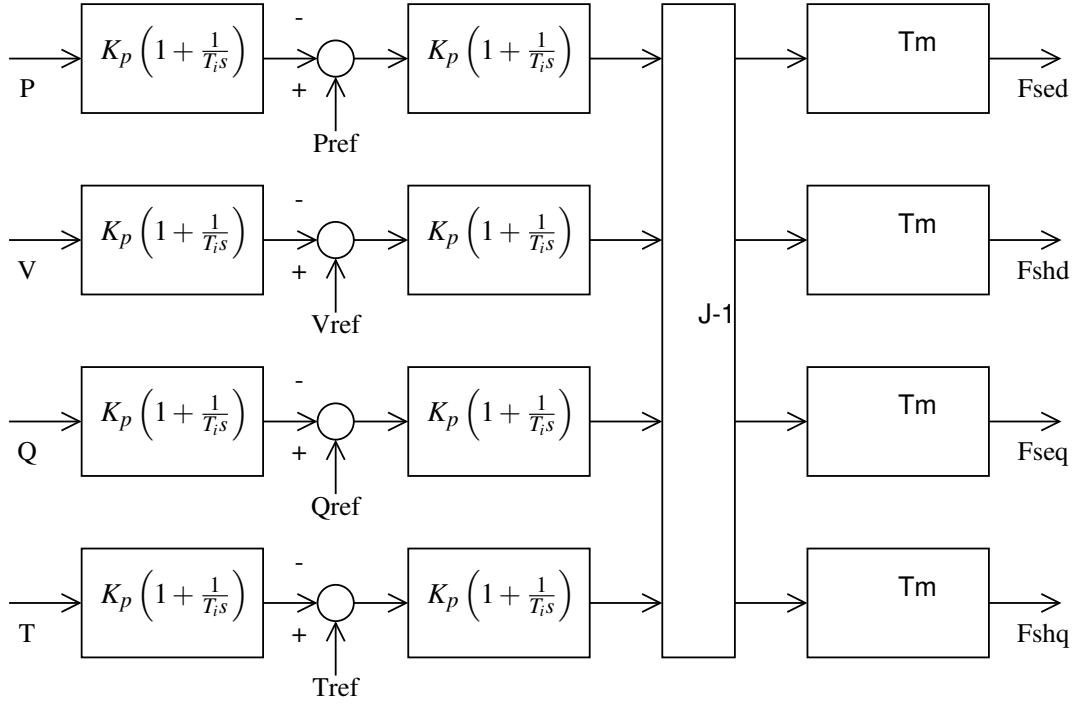


図 6.2 印加電圧制御系の構成

本研究の両制御系のパラメータは 1 対 1 に対応させるのではなく、行列の形で対応させる。これは、UPFC の設置場所や運用状態によってパラメータの感度に変化し、汎用性のある制御系として実現できなくなるためである。そこで感度行列  $J$  を用いてパラメータを変換する手法を用いる

感度行列を計算する際は FACTS 機器以外の機器（発電機、負荷など）は定インピーダンス，または定電流源として模擬する。ここではその感度行列の計算方法を説明する。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dS_{inj}}{d\phi} \\ \frac{dV_{inj}}{d\phi} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$\frac{dS_{inj}}{d\phi} = \text{diag} V \frac{d\bar{I}}{d\phi} + \text{diag} \bar{I} \frac{dV}{d\phi} \quad (6.2)$$

ある時間断面における電力系統は FACTS 機器による注入電力  $J_f$ ，それ以外の注入電力

$J_*$ , アドミタンス  $Y$  によって構成されている。その中で FACTS 機器が寄与する成分のアドミタンスを  $Y_f$  とする。最初に UPFC の場合の印加電圧  $\phi$  に対する  $J_f$  の感度を求める。

$$\frac{dJ_f}{d\phi} = \frac{dJ_f}{dj_f} \frac{dj_f}{d\phi} = \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{diag} -jX_{se}^{-1} & 0 \\ \text{diag} jX_{se}^{-1} & \text{diag} jX_{sh}^{-1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{diag} V_{dc} & 0 \\ 0 & \text{diag} V_{dc} \end{bmatrix}^T \quad (6.3)$$

感度行列を計算する際には,  $\phi$  から  $S_{inj}$  や  $V_{inj}$  を求めるときの数式を順に微分すればよい。具体的には次のようになる。

1. 印加電圧  $\phi_f$  から等価注入電流  $J_f$  を求める。
2. FACTS 機器の等価注入電流  $J_f$  と他の機器の注入電流, さらに各機器のアドミタンスから母線電圧  $V$  を求める。
3. 母線電圧  $V$  から FACTS 機器注入電流  $I_f$  を求める。
4. 母線電圧  $V$  から印加電圧  $V_{inj}$  を求める。
5. 母線電圧  $V$  と注入電流  $I_f$  から注入電力  $S_{inj}$  を求める。

最初に UPFC の場合の  $J_f$  は次のように求められる。

$$J_f = \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -I & 0 \\ I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{diag} jX_{se} & 0 \\ 0 & \text{diag} jX_{sh} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{dc} & 0 \\ 0 & V_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{se} \\ \phi_{sh} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial J_f}{\partial \phi_f} = \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -I & 0 \\ I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{diag} jX_{se} & 0 \\ 0 & \text{diag} jX_{sh} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{dc} & 0 \\ 0 & V_{dc} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

次に, 母線電圧を求める。発電機, 負荷の等価注入電流の和を系統ベースで  $J_m$ , 発電機, 負荷, 送電線の等価アドミタンスの和を  $Y_m$  とする。このとき  $V$  は次のようになる。

$$V = (Y_f + Y_m)^{-1} (J_f + J_m) \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial J_f} = (Y_f + Y_m)^{-1} \quad (6.7)$$

注入電流は次のようになる。

$$I_f = M_f Y_m V \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial I_f}{\partial V} = M_f Y_m \quad (6.9)$$

UPFC の場合の印加電圧  $V_{inj}$  は次のようになる。

$$V_{inj} = \log M_{ur} V - \log M_{us} V \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial V_{inj}}{\partial V} = \text{diag} M_{ur} V^{-1} M_{ur} - \text{diag} M_{us} V^{-1} M_{us} \quad (6.11)$$

UPFC の場合の注入電力  $S_{inj}$  は次のようになる。

$$S_{inj} = \Sigma \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix} V \times \begin{bmatrix} \overline{I_s} \\ \overline{I_r} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial S_{inj}}{\partial V} = \Sigma \text{diag} \left( \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix} V \right) \frac{\partial \overline{I_f}}{\partial I_f} + \text{diag} \left( \begin{bmatrix} \overline{I_s} \\ \overline{I_r} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} M_{us} \\ M_{ur} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

以上の結果をまとめると、印加電圧  $\phi$  と印加電力  $S_{inj}$ 、印加電圧  $V_{inj}$  に関する感度行列  $J$  は次のようになる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_{inj}}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \phi}{\partial V_{inj}} \\ \frac{\partial \phi}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial V}{\partial V_{inj}} \\ \frac{\partial V}{\partial V} \end{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial J_f} \frac{\partial J_f}{\partial \phi} \quad (6.14)$$

### 6.2.3 印加電圧制御系のパラメータ決定

制御系の変数  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  を観測するときの遅れ時定数を  $T_o$  とする。また印加電圧  $\phi$  の動作遅れ時定数を  $T_m$  とする。印加電圧から制御系の変数への伝達関数は系統の特性によって決まり、一般には単純な形には表わすことができないが、ここでは線形化して感度行列  $J$  で表わされたとする。このとき、変数の指令値から実際の変数の値までは図のような閉ループが成り立つ。このとき系統の特性の  $J$  と制御系の  $J^{-1}$  が打ち消しあう。このとき、パラメータの指令値と観測された値のオフセットは次のように求められる。

$$X_{off} = \frac{1}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(\frac{1}{1 + T_m s}\right) \left(\frac{1}{1 + T_o s}\right)} \quad (6.15)$$

$$\simeq \frac{1}{1 + \frac{K_p}{T_i s} \left(\frac{1 + T_i s}{1 + (T_m + T_o)s}\right)} \quad (6.16)$$

$$\simeq \frac{T_{m2}s}{T_{m2}s + 1} \quad (6.17)$$

ただし、 $T_{m2}$  はこの系全体の近似的な遅れ時定数である。これより、次の式が導かれる。

$$T_{m2} = \frac{T_i}{K_p} \quad (6.18)$$

$$T_i = T_m + T_o \quad (6.19)$$

さて、本研究では観測遅れ  $T_o$  は 0.2[s]、動作遅れ  $T_m$  は 0.5[s] を想定しているため、全体では 0.7[s] 程度の遅れがある。これに閉ループをかけて制御を行うとき、その全体の制御時定数  $T_{m2}$  は 0.7[s] より遅くしなければならない。本研究ではこれを  $T_{m2} = 0.8[s]$  として考える。このとき、 $K_p$  と  $T_i$  は次のように求められる。

$$K_p = 0.875 \quad (6.20)$$

$$T_i = 0.7 \quad (6.21)$$

このパラメータは FACTS 機器の種類、設置場所等に依存せず、常に一定の値を使用することとする。

### 6.2.4 DC コンデンサ電圧の制御系

DC コンデンサの制御は  $P_{inj}$  を用いて行う。これは、DC コンデンサの電圧が  $P_{inj}$  の積分によって決まるためである。制御系の構成を図 6.3 に示す。

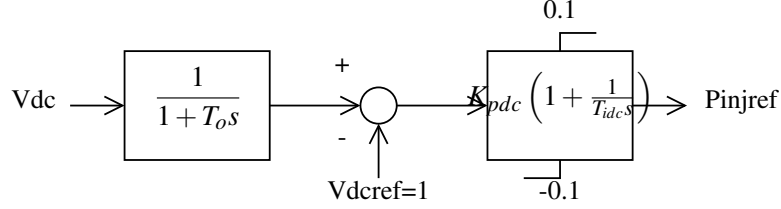


図 6.3 DC コンデンサ電圧制御系

この制御系の閉ループのオフセットは次のように求められる。ただし、DC コンデンサの電圧は実際はそれほど変動しないので、 $V_{dc} = 1$  とした。

$$V_{dcoff} = \frac{1}{1 + K_{pdc} \left(1 + \frac{1}{T_{idc}s}\right) \left(\frac{1 + T_o s}{1 + T_{m2}s}\right) \left(\frac{1}{Cs}\right)} \quad (6.22)$$

$$\simeq \frac{F(s)}{T_{idc}Cs^2 + K_{pdc}\{1 + (T_{idc} + T_o - T_{m2})s\}} \quad (6.23)$$

$$\simeq \frac{F(s)}{K_{pdc}\left(\frac{T_{mdc}}{2}s + 1\right)^2} \quad (6.24)$$

ここで、 $T_{mdc}$  をおよそ 1.0[s] と仮定する。このとき、PI 制御系の定数はおよそ次のようにする。

$$K_p = 64 \quad (6.25)$$

$$T_i = 1.6 \quad (6.26)$$

一般に FACTS 機器は DC コンデンサが大きく変動すると正しい制御ができなくなる。特に  $V_{dc} = 0$  となってしまうと電圧を印加できなくなる。そこで  $V_{dc}$  の制御には  $P_{inj}$  を用いると同時に、 $P_{inj}$  は  $V_{dc}$  の制御のみに使用し、他の制御には使用しないこととする。

### 6.2.5 変換器容量のリミッタ

UPFC を制御する際には変換器通過皮相電力が、その制限をできるだけ超えないように制御する必要がある。最初に直列側の制御は印加電圧の大きさにリミッタをかける形にする。リミッタをかける前の印加電圧を  $\phi_{sen}$ 、リミッタをかけた後の印加電圧を  $\phi_{sel}$  とする。このときリミッタゲイン  $K$  を用いて次のように表わされる。

$$\phi_{sel} = K_{se}\phi_{sen} \quad (6.27)$$

次に並列側であるが、こちらは電流にリミッタをかける。電流は  $E_{sh} - V_r$  に比例するので、リミッタは次のようにかける。

$$\phi_{shl} = \frac{K_{sh}(\phi_{shn}V_{dc} - V_r) + V_r}{V_{dc}} \quad (6.28)$$

次の図 6.4 のような制御系を用いたリミッタを設定した。観測した変換器容量が制限値を上回った部分を積分し、その大きさに応じてリミッタをかけるというものである。系統の母線 11-10 または母線 16-20 に UPFC を設置し、 $t = 1$  で  $Q_{inj}$  の指令値を 0 から 0.4 までステップ状に変化させる。UPFC の変換器容量を直列側と並列側ともに 0.15 としてシミュレーションを行ったときの各変換器通過皮相電力の大きさを図に示す。シミュレーションは 0.01[sec] 刻みでルンゲクッタ法を用いて行った [15]。

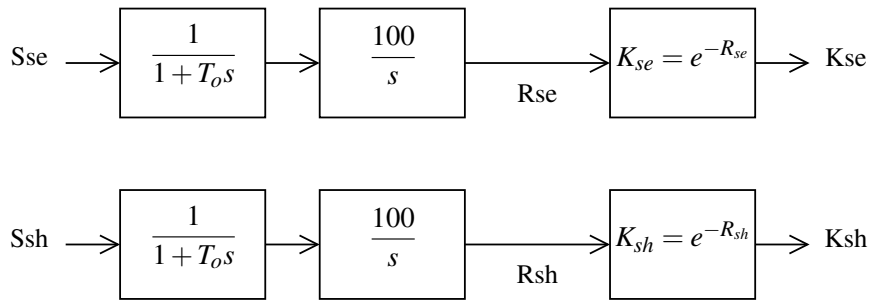


図 6.4 変換器容量リミッタ制御系

図のように 10 秒程度の非常に短い時間であればこの制御系は機能している。しかし、それより長い時間帯になると、系統のダンピングの悪化が影響して発散する。UPFC のダンピング制御系を何らかの形で設置することによってこの点は解決する可能性があるが、これは本研究の範囲外であるとする。本研究では指令値の  $S_{inj}$  と  $V_{inj}$  の側に制約条件を設けることとし、印加電圧の制御の部分にはリミッタを設けないこととする。これは定常値となりうるものだけに適用されるリミッタであり、動揺が収束してゼロになる成分についてはリミッタをかけないこととする。(例えば  $V_{dc}$  の制御のための  $P_{inj}$  は、定常状態で  $P_{inj}$  がゼロに収束するため、リミッタをかけない。)

## 6.3 無効電力損失和削減のための制御系

### 6.3.1 制御系の構成

無効電力損失和を削減する最も手っ取り早い方法は、各時間断面で最適潮流制御の計算を行うことである。しかし、最適潮流制御の計算はそれ単体でも膨大な計算時間を必要とし、これを時間断面に沿って反復的に行うことは実用上もシミュレーション上も現実的でない。また、最適潮流計算は高め解への収束計算が必要になるが、現状ではこれが 100% 成功する保障がない。特に、これまで行ってきた最適潮流制御は発電機や負荷を非常に単純なモデル

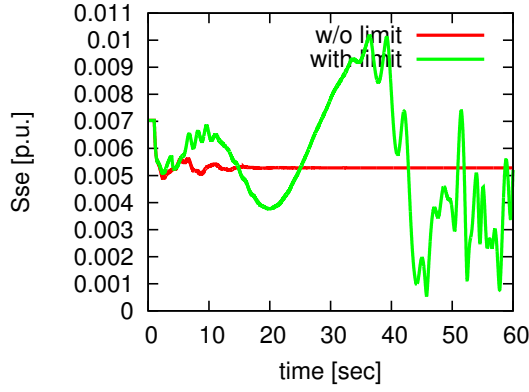


図 6.5 UPFC 直列側変換器通過皮相電力  
(UPFC 母線 11-10 設置ケース)

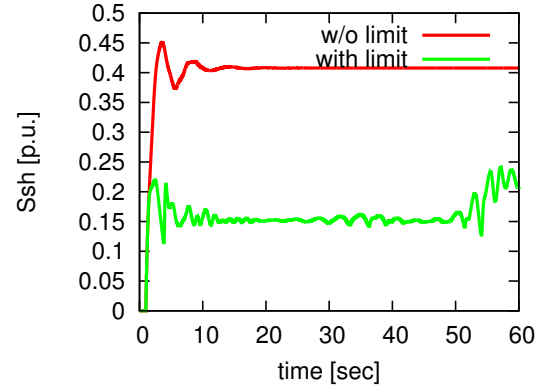


図 6.6 UPFC 並列側変換器通過皮相電力  
(UPFC 母線 11-10 設置ケース)

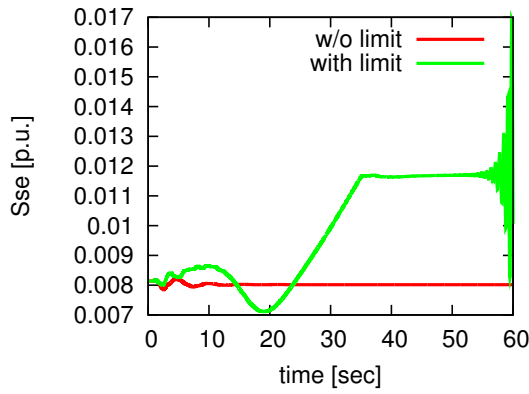


図 6.7 UPFC 直列側変換器通過皮相電力  
(UPFC 母線 16-20 設置ケース)

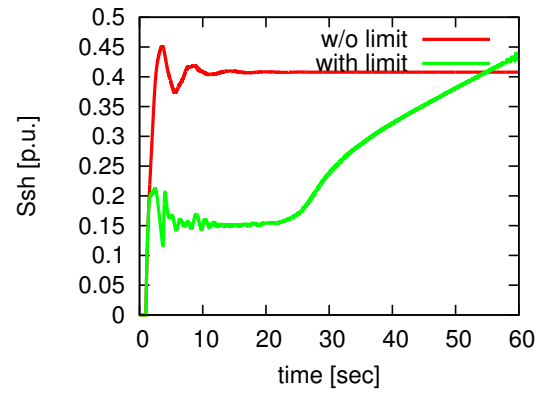


図 6.8 UPFC 並列側変換器通過皮相電力  
(UPFC 母線 16-20 設置ケース)

ルに近似するものであるが、実際の機器は複雑な構成をしており、それらを考慮した最適潮流計算は不可能に近い。そこで本章では最適潮流制御の代替となる動的な制御系を作成し、その効果を確認する。

いま、各変数  $Q_{inj}$ ,  $\phi_{inj}$ ,  $\theta_{inj}$  に対する無効電力損失和  $Q_{inj}$  の感度がそれぞれ観測できるとする。これを現実の系統で観測することが可能かどうかは課題が残るが、各ステップごとに最適潮流計算を行う方式であっても結局こうした感度に類するものを計算することになるので、その点では感度を観測すること自体が不適切というわけではない。この感度の計算方法は後に 2 種類の方法を比較する。

観測した感度に対して、図 6.9 のような制御系を構成してパラメータ  $Q_{injref}$ ,  $\phi_{injref}$ ,  $\theta_{injref}$  を動かす。制御系の中に開閉器があるが、これが開いたではパラメータにゼロが入力され、閉じた状態では感度の値が入力されるとする。制御ブロックの中に積分要素があるが、開閉器を閉じた状態でパラメータは一定の値に落ち着くためには、感度がゼロになる、またはリミッタに引っかかるという条件のいずれかを満たしていなければならない。感度がゼロになるというのは最適潮流制御での最適解の得られる条件に等しくなる。リミッタ

に引っかかるというのは、そのリミッタよりも大きな値にパラメータを動かすとさらに良い状態になる可能性があるものの、変換器制約などの条件からそれ以上動かせない状態ということである\*1。制御ブロックの中の遅れ要素は単なる遅れ要素だけではなく、パラメータ変化に対するダンピングの役割も果たしている。

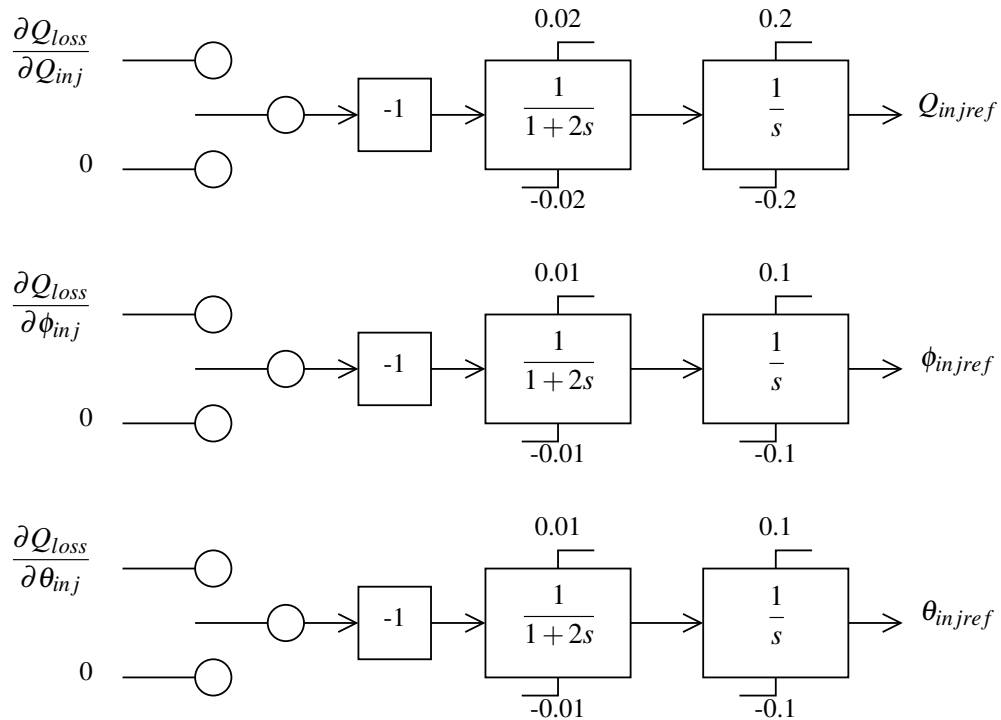


図 6.9 無効電力損失和最小化制御系

パラメータの制約、およびパラメータ変化率の制約を表 6.1 に示す。パラメータの変化率は先ほど出てきた値と同じである。

表 6.1 リミッタの上限と下限

control variable	min	max
$Q_{inj}$	-0.2	0.2
$\frac{dQ_{inj}}{dt}$	-0.02	0.02
$\phi_{inj}$	-0.1	0.1
$\frac{d\phi_{inj}}{dt}$	-0.01	0.01
$\theta_{inj}$	-0.1	0.1
$\frac{d\theta_{inj}}{dt}$	-0.01	0.01

\*1 このリミッタの制約と変換器の制約は必ずしも一致していない

### 6.3.2 厳密な感度を用いた計算

系統内の任意の機器は、ある時間断面において定インピーダンスと定電流を組み合わせたような特性を持つことになる。これらの値をもとにパラメータに対する感度を計算し、それを制御に利用する方式を考える。UPFC を 10–11 または 16–20 に設置する。最初は開閉器を開いた状態で各変数はゼロとする。 $t = 1$  で開閉器と閉じて無効電力損失和の削減が可能になるようにする。このときの特性を図に示した。比較のために、開閉器を開いたままにした場合の特性も示した。なお、開閉器を開いたままの状態は静的には UPFC を設置していない状態と等しくなる。UPFC を設置していない状態がダンピングが不安定になるため、代わりにこれを用いることとする。

最初にこの制御の無効電力和の削減が失敗していることが読み取れる。制御系を投入した直後、一時的に数秒間だけ無効電力損失が減少している。この無効電力損失の削減は計算した感度のおりにパラメータを動かした結果である。その後は増加し、最終的には制御前よりも大きな値になっている。系統の感度やパラメータは定常ではなく、常に変化し続けるものである。UPFC による各時間ごとの無効電力削減よりも、発電機や負荷の無効電力損失を増加させる効果が強いために、このような結果になると考えられる。

次に初期状態における各パラメータに対する無効電力損失和の感度を表に示す。この中で特に注目すべき点は無効電力注入  $Q_{inj}$  に対する感度である。無効電力の感度が正になっているということは、無効電力を注入することによって無効電力損失和が増加するということである。しかし、これまでの静的な解析を通じて明らかになっていることであるが、Maximum Loading の拡大のために UPFC はほぼ例外なく無効電力を注入しており、無効電力注入が無効電力損失和を削減するということが判明している。つまり、厳密な感度を計算して制御するのは、本来パラメータが動くべき方向と逆方向に動くことになり、それが無効電力損失和の増大を招くことになる。

表 6.2 無効電力損失和の感度

パラメータ	UPFC10–11	UPFC 16–20
$Q_{inj}$	0.0204	0.0204
$\phi_{inj}$	0.1274	-0.1443
$\theta_{inj}$	-0.4570	-0.0759

### 6.3.3 負荷増加に対する特性

先ほどの例で無効電力損失和が増加することを示したが、この状態で負荷が増加した時の特性を考える。シミュレーションの流れは次のようになる。最初に開閉器を閉じて系統の

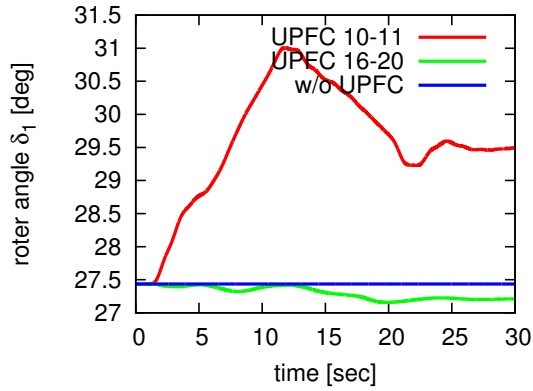


図 6.10 発電機 G1 動揺曲線

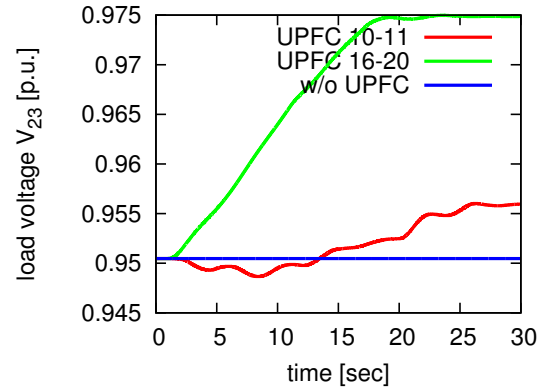


図 6.11 負荷 L7 電圧

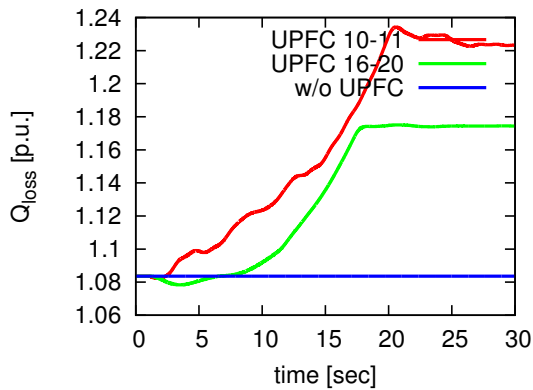


図 6.12 無効電力損失和

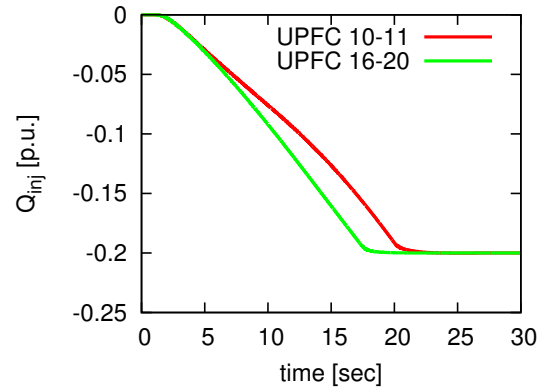


図 6.13 UPFC パラメータ  $Q_{inj}$

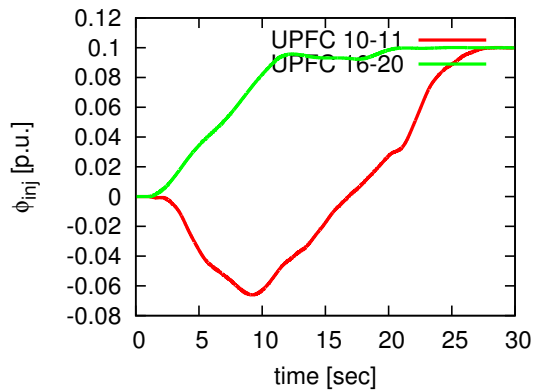


図 6.14 UPFC パラメータ  $\phi_{inj}$

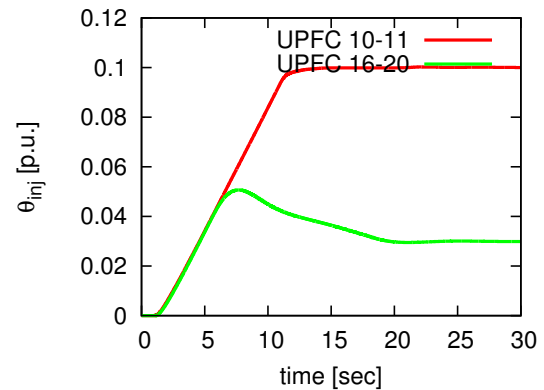


図 6.15 UPFC パラメータ  $\theta_{inj}$

動揺がおさまるまでシミュレーションを続ける。(ここでは 20[min] のシミュレーションを行う。) 次に、系統全体の負荷を 0.1[%/sec] の割合で徐々に増加させ、負荷が脱落するまで続ける。このときのシミュレーション結果を図に示す。

負荷 L7 の消費電力がゼロになる時間が負荷が脱落する時間である。これがより遅い時間で脱落するケースは、より安定であるといえる。静的な解析結果を参考にするると元の状態の約 73 パーセント (730[sec]) まで負荷を増加させることが可能であることになるが、動的

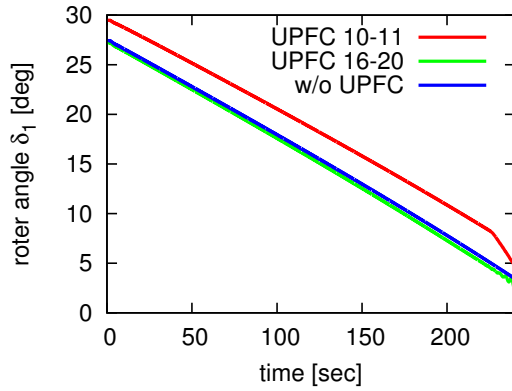


図 6.16 発電機 G1 動揺曲線

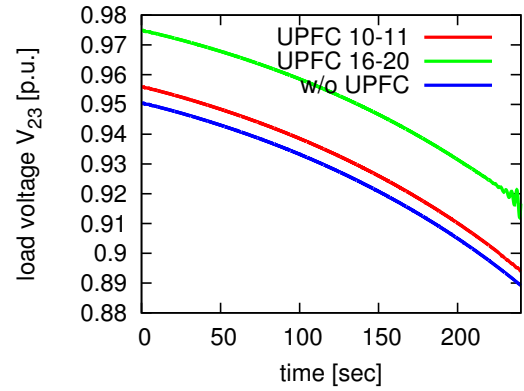


図 6.17 負荷 L7 電圧

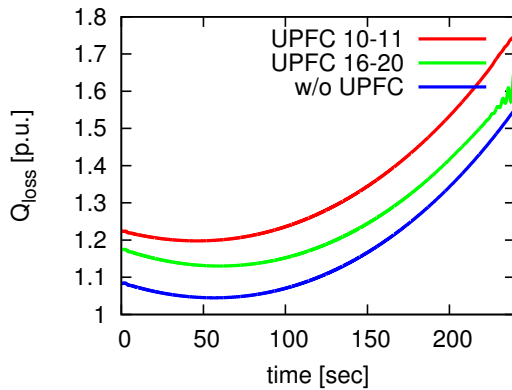


図 6.18 無効電力損失和

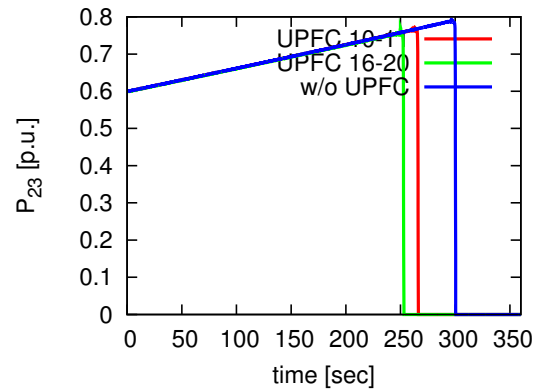


図 6.19 負荷 L7 消費有効電力

な解析の場合は発電機出力の制約や負荷特性の違いなどで約 30 パーセント程度までしか増加させることができない。

負荷母線電圧では制御を行わない時よりも上回っているものの、無効電力損失和は制御によって増加して負荷脱落も早くなっていることが分かる。これより、厳密な感度を使用することが電圧安定性向上に逆効果であることを明らかにした。

### 6.3.4 小規模モデルによる解析

小規模な回路を用いて説明する。この回路は直流回路であるが、本質的な部分は交流回路と変わらない。この回路の電源電圧を  $E$ 、可変負荷の抵抗を  $R$ 、送電線の抵抗を  $r$  とする。この電源電圧は制御可能なパラメータであると仮定する。可変抵抗を用いた負荷は、ある時間断面で見ると定インピーダンスであるが、時間とともにインピーダンスが変化し、最終的には定電力のように振る舞いことになる。

最初に厳密な感度を用いた計算を考える。各時間断面での抵抗は  $R$  で一定であるから、送電線を通る電流  $I$  は次のようになる。

$$I = \frac{E}{r + R} \quad (6.29)$$

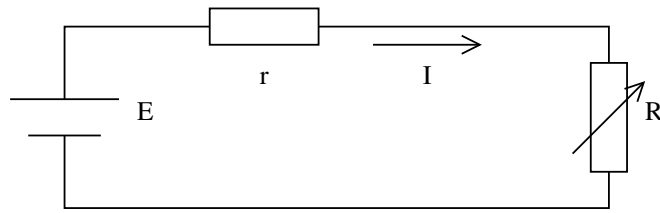


図 6.20 小規模モデル回路

送電線での損失は  $I^2$  に比例することから、 $E$  を減少させて電圧を低下させることによって損失を削減できるという結果が得られる。

次に負荷が定電力負荷であるとして計算する。負荷の電力を  $P$  としたときの、送電線を通る電流は計算すると次のようになる。ただし、 $r < R$  とする。

$$I = \frac{2P}{E + \sqrt{E^2 - 4rP}} \quad (6.30)$$

つまり、負荷が定電力負荷の場合は  $E$  を増加させて電圧を上昇させるほうが良いことになる。

これまで Maximum Loading の拡大には無効電力損失の最小化を用いてきたが、これを行うためには負荷が PQ 指定、発電機が PV 指定であることが必要条件であることが考えられる。この条件が極端に当てはまらない系統では、無効電力損失最小化の効果が薄れると考えられる。

## 6.4 近似モデルを用いた解析

### 6.4.1 感度の計算方法

ここではこれまで静的な解析で用いてきた手法を活用することを考える。感度を計算する際に発電機や負荷を定インピーダンス、定電流源とみなすのではなく PV 指定、PQ 指定とみなす方法を用いる。発電機が設置されている母線を PV 指定、それ以外の母線を PQ 指定とし、スラッグ母線を設けない。これは感度を求めるだけならスラッグ母線は必要ないためである。

なお、ここで PV 指定、PQ 指定としているのはあくまで近似的な特性であり、動的な解析において実際にこのような振る舞いをするわけではない。

### 6.4.2 シミュレーション

この条件のシミュレーションを行ったときの各動揺曲線を図に示す。また、初期状態での無効電力損失和に対する感度を表に示す。

図表から読み取れる通り、無効電力損失和を削減できていることが分かる。ただし、ダン

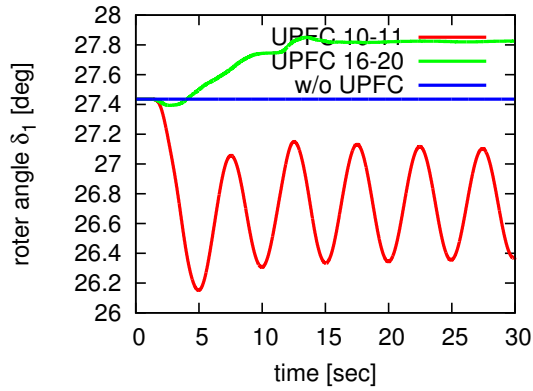


図 6.21 発電機 G1 動揺曲線

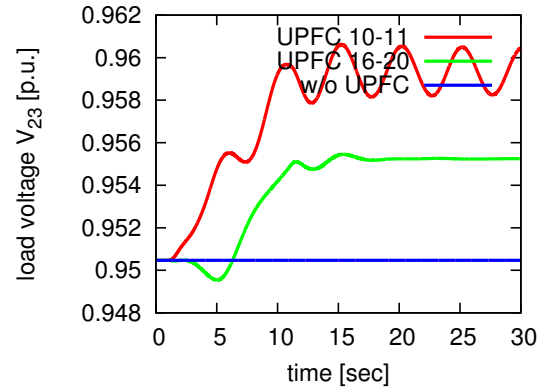


図 6.22 負荷 L7 電圧

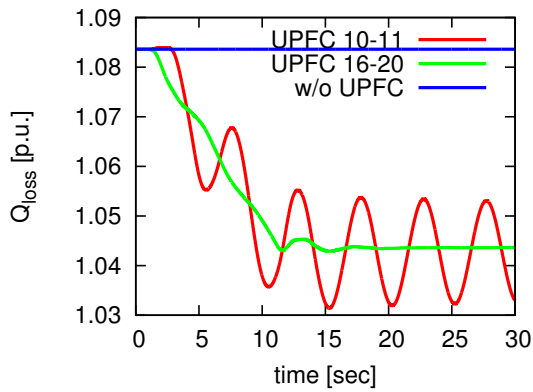


図 6.23 無効電力損失和

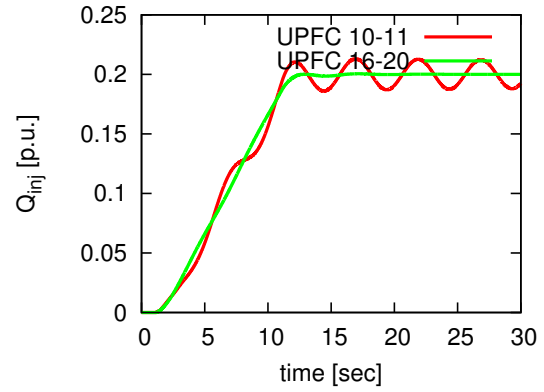


図 6.24 UPFC パラメータ  $Q_{inj}$

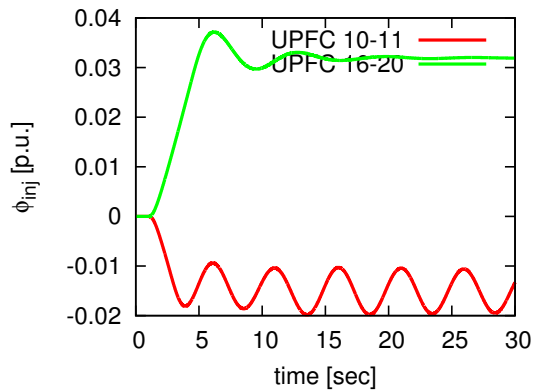


図 6.25 UPFC パラメータ  $\phi_{inj}$

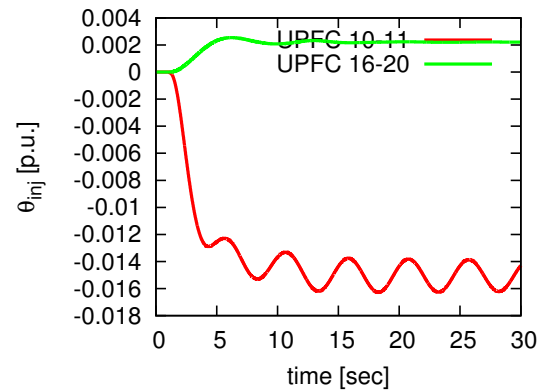


図 6.26 UPFC パラメータ  $\theta_{inj}$

ピングに関しては UPFC を母線 10-11 に設置した場合に設置前より悪化していることが読み取れるが、本来電圧安定性の制御は必ずしもダンピングに効くわけではない。いずれにせよ、無効電力を注入して無効電力損失和を削減できているということは確かである。感度の計算を見ても  $Q_{inj}$  に対する感度が負の値となっており、予定通りの制御ができていることが確認できた。

表 6.3 無効電力損失和の感度

パラメータ	UPFC10-11	UPFC 16-20
$Q_{inj}$	-0.0906	-0.0906
$\phi_{inj}$	0.0627	-0.0709
$\theta_{inj}$	0.0232	-0.0018

### 6.4.3 負荷変動

先ほどと同様に負荷を 0.1[%/sec] の割合で増加させたときの各特性を図に示す。負荷増加のいずれの時間帯においても無効電力損失和を削減できていることがわかる。一方、負荷の脱落については UPFC を 10-11 に設置したケースが最も不安定になっているが、これは電圧不安定であるためではなく、ダンピングが悪化し発電機が脱調したためである。発電機のダンピングが特に問題にならない 16-20 に設置したケースと非制御のケースを比較すると負荷脱落を遅らせていることが読み取れる。

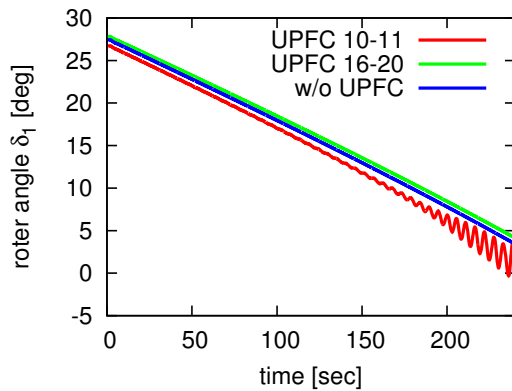


図 6.27 発電機 G1 動揺曲線

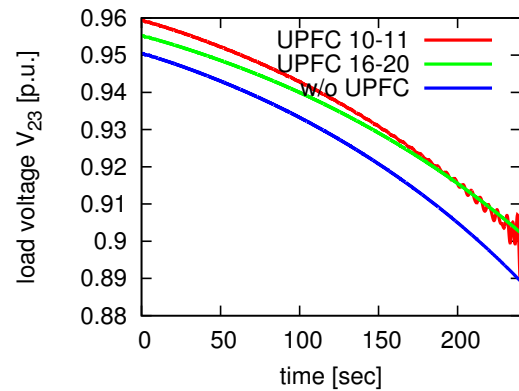


図 6.28 負荷 L7 電圧

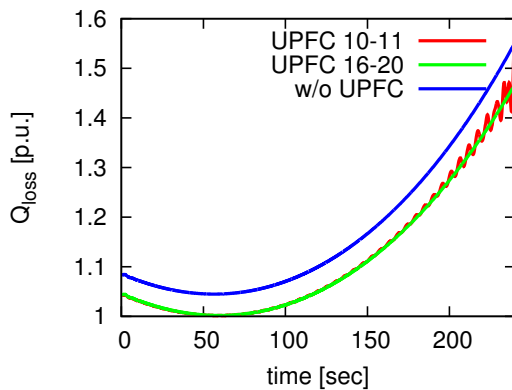


図 6.29 無効電力損失和

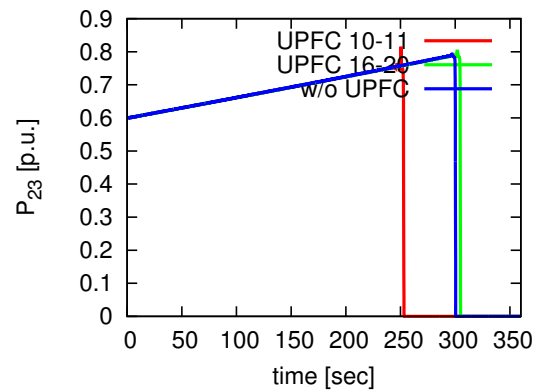


図 6.30 負荷 L7 消費有効電力

## 6.5 まとめ

本章では FACTS 機器の中で UPFC を取り上げ、その動的な制御系を設計し、電圧安定性の向上に対してどのような効果があるかを検証した。UPFC の制御系をいくつか分割し、そのそれぞれについてパラメータの設計の指針を示した。電圧安定性の制御はダンピングの向上制御とは必ずしも相乗効果があるわけではなく、その制御は容易ではないことが明らかになった。また、変換器容量に関する制約を厳しくするとダンピングの面でやはり不利になることも判明した。

無効電力損失和を削減するために、パラメータに対する感度を用いて制御する方法を提案した。この方法は各ステップごとに最適潮流制御の計算を行う必要がなく、より現実的な制御系である点が特徴である。この制御系の入力となる感度の計算には 2 種類の方法がある。一つ目は発電機や負荷といった機器の詳細な特性を考慮した感度である。しかしこの手法を用いると、UPFC が無効電力を吸収するという結果が得られる。もちろん、制御を開始した直後の非常に短い時間だけは無効電力損失和を削減できるのであるが、長い時間でみると失敗することになる。

もう一つの方法は通常の最適潮流計算と同じように、発電機を PV 指定、負荷を PQ 指定として感度を求める点である。ここで本来発電機や負荷はこのような特性を持つものではないが、このような仮定を置くことによって正しい制御ができるようになる。系統で負荷の増加や事故の発生などの状態変化が発生しても、このような制御系は適切に追従して動作することが判明した。ただし、系統の安定性は無効電力損失削減のみで決まるわけではなく、たとえ無効電力を注入してもダンピングの悪化によって系統が崩壊するケースが存在することを示すことができた。

## 第 7 章

# 結論

本研究では FACTS 機器を用いて電力系統の電圧安定性を向上させることを検討してきた。特に FACTS 機器の中で効果が高いと見込まれる UPFC について重点的に検討した。

本研究では電圧安定性向上のための最適潮流制御を行った。無効電力損失最小化による PV 曲線の Maximum Loading の拡大を行った。基本的には無効電力注入を行うことが効果的であるが、変換器容量に厳しい制約条件がある場合は潮流制御も効果があることが判明した。直列側変換器による制御は、変換器容量が小さい場合は並列側よりも効果が高く、選択肢として期待できることが判明した。また、直列側変換器を増設してもある値まで増加させると限界に達することも判明した。

最適潮流制御は事故発生時の緊急制御にも効果的である。送電線を開放するケースではほとんどの場合は数パーセント程度しか Maximum Loading が低下しないので、それを FACTS 機器を用いて補うことが可能である。しかし、事故のケースによってはほとんど効果が見られない場合もある。短時間容量を考慮しても通常の数十倍程度の変換器が必要であることが判明した。また、事故に対し最適潮流制御が追従できない場合はさらに効果が薄れることも判明した。

本研究では FACTS 機器の設置場所に関する研究を行った。一機無限大母線系統では直列変換器を負荷至近点、並列変換器は負荷至近点の潮流の少ない送電線に設置することが効果的であることが判明した。そして、多機系統に拡張した場合でもそれが当てはまる結果が得られることが分かった。

本研究では複数 UPFC の設置に関するシミュレーションも行った。並列変換器を持つ機器はできるだけ一か所に集中的に設置するのが効果的であるのに対し、直列変換器は分散して設置したほうが良くなるケースがあることを示した。

本研究では動的な解析において電圧安定性が維持されることを確認した。本研究ではより電圧安定性に悪影響を与える動的負荷モデルを用いた解析を行った。系統全体の無効電力損失和が判明しているとき、それを観測して安定性を向上させる制御系を設計した。その際に厳密に感度を計算して制御するのではなく、静的な解析で行ったような近似を動的な解析でも行うことにより効果が得られることが明らかになった。

動的な解析では静的な解析とは大きく異なる部分がある。動的な解析では静的な場合と比較して **Maximum Loading** が小さくなるが、これは発電機の各種制約条件や負荷の厳密な特性が考慮されているためである。また、動的な解析ではダンピングの向上という課題もあり、電圧安定性が向上してもダンピングが低下するために不安定になるケースがあることを示した。

今後の課題として次のようなことが考えられる。

第一に、本研究で行った内容を他系統でも制御可能かを確認する必要がある。特に設置場所の検討では、小規模系統と多機系統の二種類だけを用いた解析であった。しかし、これらは一般的な構成をした系統である。実系統ではそれぞれに応じて考慮しなければならない特殊な状況がある場合もあり、そのような特殊な場合での制御の指針を考慮する必要があると考えられる。

第二に、発電機のダンピング制御と電圧安定性向上制御を併用する制御系の設計が考えられる。本研究の動的な制御系の解析では、ダンピングの不安定があるために電圧安定性向上の効果を発揮できないケースがあることを紹介した。ダンピングのような発電機の安定性問題は、これまで様々な検討が行われてきているものの、依然として系統の不安定要因に占める割合が多く、今後も改善の余地があると考えられる。

第三に、自然エネルギーが導入された電力系統での電圧安定性向上制御を検討する必要がある。本研究は負荷が単純増加するだけのシミュレーションを中心に行っていた。しかし、序論でも述べたとおり今後は出力変動の大きな自然エネルギーが大量に導入されることが見込まれており、そのような条件下で **FACTS** 機器を有効に活用する手法を検討する必要があると考えられる。

最後に、**FACTS** 機器の経済的な側面から見た利用法を検討する必要がある。**FACTS** 機器の変換器は非常に高価であり、それに見合うだけの十分な利用価値がなければ、商用の電力系統への導入は難しくなる。本研究で考慮した条件は主に物理的な制約条件に基づいたものを行っていた。将来的には、経済的な観点から見た **FACTS** 機器のメリットを検討する必要があると考えられる。

# 参考文献

- [1] 経済産業省（編）．エネルギー白書 2009 年版. エネルギーフォーラム, 2009.
- [2] 電気事業連合会. 原子力・エネルギー図面集, 2009.
- [3] Brendan Kirby and Eric Hirst. Ancillary service details: voltage control, 1997.  
<http://www.ornl.gov/sci/btc/apps/Restructuring/con453.pdf>.
- [4] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, Goran Andersson, A. Bose, C. Cañizares, Nikos Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, Thierry Van Cutsem, and V. Vittal. Definition and classification of power system stability. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, pp. 1387–1401, 2004.
- [5] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Wiley-IEEE Press, 1999.
- [6] Venkataramana Ajjarapu. *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control (Power Electronics and Power Systems)*. Springer, 2006.
- [7] 横山明彦, 関根泰次. 電力系統の潮流多根問題と安定判別. 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) , Vol. 100, No. 9, pp. 509–516, 1980.
- [8] Available Transfer Capability Working Group. Available Transfer Capability Definitions and Determination, 1996.
- [9] Hiroshi Ohtsuki, Akihiko Yokoyama, and Yasuji Sekine. Transient P-V Curves Used for Analysis of Transient Voltage Stability. In *10th Power Systems Computation Conference*, pp. 1202–1209, 1990. Graz, Austria.
- [10] 大槻博司, 横山明彦, 関根泰次. 誘導機モデルを用いた電圧崩壊現象の過渡解析の検証と一般系統への拡張. 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) , Vol. 112, No. 8, pp. 677–684, 1992.
- [11] 吉田彰, 横山明彦. 可変インピーダンス型電力系統の静的電圧安定性向上に関する一考察. 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 1993. PE-93-164.
- [12] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, and Bikash Pal. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control (Power Systems)*. Springer, 2006.
- [13] Jun Zhang and Akihiko Yokoyama. Power System Transient Stability Improvement by the Interline Power Flow Controller (IPFC). *IEEE Transactions on Power and Energy*,

Vol. 128, No. 1, pp. 208–215, 2008.

- [14] Jun Zhang and Akihiko Yokoyama. Application of Interline Power Flow Controller to ATC Enhancement by Optimal Power Flow Control. In *Power Tech 2007*, 2007. Lausanne, Switzerland.
- [15] 関根泰次. 電力系統過渡解析論. オーム社, 1984.
- [16] 電力系統モデル標準化調査専門委員会. 電力系統の標準モデル, 1999.

# 発表文献

- [1] Yuta Wakabayashi and Akihiko Yokoyama. Assessment of Optimal Location of Unified Power Flow Controller Considering Steady-State Voltage Stability. In *15th The International Conference on Electrical Engineering*, 2009. I9FP0086, Shenyang, China.
- [2] 若林悠太, 横山明彦. 静的電圧安定性向上のための UPFC 制御系の設計法. 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2009. 43.
- [3] 若林悠太, 横山明彦. 潮流制御による電圧安定性向上のための UPFC 制御系の設計. 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2009. PE-09-113, PSE-09-121.
- [4] 若林悠太, 横山明彦. 電圧安定性を考慮した UPFC による最適潮流制御. 電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会, 2010. (発表予定) .
- [5] 若林悠太, 横山明彦. 電圧安定性向上に対する STATCOM と UPFC の比較. 電気学会全国大会, 2010. (発表予定) .

## 付録 A

# 電力系統モデル

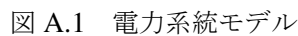
### A.1 7 機 23 母線系統

#### A.1.1 概要

本研究で解析に使用する系統の概要を表 A.1 に示す。また，系統図を図 A.1 に示す。母線，送電線，変圧器の番号も併記してある。

表 A.1 モデル系統の概要

項目	内容	備考
系統基準容量	1,000 [MVA]	
系統周波数	60 [Hz]	
発電機数	7 機	
ノード数（母線数）	23 ノード	
ブランチ数 （送電線数） （変圧器数）	27 ブランチ 15 12	送電線数は 2 回線分， 変圧器数は 1 回線分を 1 ブランチとしてカウント
発電機定格容量合計	7,300 [MVA]	
負荷合計	6,400 [MW]	
送電線モデル	$\pi$ 型等価回路	



### A.1.2 送電線・変圧器の詳細データ

1 から 7 は発電所にある変圧器を模擬している。8 から 13 は他系統と連系されている幹線送電線を模擬している。14 から 18 は系統内の変電所におけるタップつき変圧器を模擬している。19 から 27 はその他の小規模送電線を模擬している。

母線 1 の swing bus は連系先の全電力系統の発電機と負荷を縮約したものである。そのため、他と比較して値が非常に大きくなっている。それ以外の母線については、発電機が設置されている母線を PV 指定、発電機が設置されていない母線を PQ 指定とした。通常、PV 指定または swing 母線には必ず発電機が 1 母線に 1 機設置されており、電圧はすべて

表 A.2 送電線・変圧器のデータ

No.	From	To	Type	$R$ [p.u.]	$X$ [p.u.]	$C/2$ [p.u.]	Tap
1	1	12	Transformer	0.0001	0.0500	0.0001	1.0
2	2	8	Transformer	0.0001	0.1500	0.0001	1.0
3	3	8	Transformer	0.0001	0.1000	0.0001	1.0
4	4	14	Transformer	0.0001	0.0500	0.0001	1.0
5	5	20	Transformer	0.0001	0.2200	0.0001	1.0
6	6	21	Transformer	0.0001	0.1100	0.0001	1.0
7	7	22	Transformer	0.0001	0.1000	0.0001	1.0
8	8	9	Lines	0.0050	0.0980	0.0440	—
9	9	10	Lines	0.0040	0.0680	0.0300	—
10	10	11	Lines	0.0050	0.0830	0.0390	—
11	11	12	Lines	0.0080	0.1600	0.3560	—
12	11	13	Lines	0.0040	0.0690	0.0320	—
13	13	14	Lines	0.0030	0.0490	0.0230	—
14	8	15	Transformer	0.0001	0.1000	0.0001	1.0
15	9	16	Transformer	0.0001	0.1000	0.0001	1.0
16	10	17	Transformer	0.0001	0.2200	0.0001	1.0
17	11	18	Transformer	0.0001	0.1100	0.0001	1.0
18	13	19	Transformer	0.0001	0.2100	0.0001	1.0
19	15	16	Lines	0.0450	0.4950	0.0090	—
20	16	20	Lines	0.0360	0.2640	0.0080	—
21	17	20	Lines	0.0190	0.1830	0.0010	—
22	17	23	Lines	0.1140	0.7470	0.0050	—
23	18	23	Lines	0.0460	0.2620	0.0010	—
24	18	21	Lines	0.0380	0.2170	0.0060	—
25	22	23	Lines	0.2050	1.1450	0.0050	—
26	18	19	Lines	0.0630	0.9370	0.0080	—
27	19	22	Lines	0.0430	0.3980	0.0030	—

1[p.u.] とした。スラッグ母線の位相は 0 と定義する。負荷は系統内の各所に分散して設置されており、その力率はすべて 1 とした。負荷の電力がゼロになっている場所は浮遊母線であり、ここには何も設置されていない。

表 A.3 母線のデータ

No.	Type	$V$ [p.u.]	$P_L$ [MW]	$Q_L$ [MVar]	$P_G$ [MW]
1	Swing	1.0	190,900	0	—
2	PV	1.0	0	0	900
3	PV	1.0	0	0	1,100
4	PV	1.0	0	0	2,800
5	PV	1.0	0	0	400
6	PV	1.0	0	0	1,000
7	PV	1.0	0	0	1,100
8	PQ	—	0	0	—
9	PQ	—	0	0	—
10	PQ	—	0	0	—
11	PQ	—	0	0	—
12	PQ	—	0	0	—
13	PQ	—	0	0	—
14	PQ	—	1,400	0	—
15	PQ	—	0	0	—
16	PQ	—	900	0	—
17	PQ	—	0	0	—
18	PQ	—	1,400	0	—
19	PQ	—	0	0	—
20	PQ	—	1,000	0	—
21	PQ	—	0	0	—
22	PQ	—	1,100	0	—
23	PQ	—	600	0	—

## A.2 系統機器データ

### A.2.1 発電機データ

発電機は Park モデルのうち，一般円筒機とダンパーを有する突極機用として用いられている  $d$  軸と  $q$  軸に各々 1 個の制動回路を考慮したモデルを使用している。発電機の種類別の機器定数（自己容量換算）を表に示した。また，各発電機のデータを表に示した [16]。

本研究で用いる発電機は Type1 と Type2 に分類され，それぞれに対し定数を定義している。ただし，これらの値は自己容量ベースの値であるため，実際に計算に使用する際は系統

表 A.4 発電機機器定数

	Type1	Type2
$X_d$ [p.u.]	1.70	1.70
$X_q$ [p.u.]	1.70	1.70
$X'_d$ [p.u.]	0.35	0.35
$X''_d$ [p.u.]	0.25	0.25
$X''_q$ [p.u.]	0.25	0.25
$T'_d$ [p.u.]	1.50	1.00
$T''_d$ [p.u.]	0.03	0.03
$T''_q$ [p.u.]	0.03	0.03
$T_a$ [p.u.]	0.4	0.4
$X_l$ [p.u.]	0.252	0.225

表 A.5 発電機詳細

No.	Bus	定格容量 [MVA]	種類	慣性定数 $M$ [s]
G1	1	190,000	Type1	10.0
G2	2	900	Type1	10.0
G3	3	1,100	Type1	10.0
G4	4	2,800	Type2	10.0
G5	5	400	Type2	10.0
G6	6	1,000	Type2	10.0
G7	7	1,100	Type2	10.0

容量ベースの値に換算する必要がある。ある発電機の定格容量を  $S$ ，自己容量ベースでの各リアクタンスと慣性定数をそれぞれ  $X_*$ ， $M$ ，系統容量を  $S_0$  とするとき，系統容量ベースでの各リアクタンスと慣性定数  $X_{*0}$ ， $M_0$  はそれぞれ次のように求められる。発電機の容量が大きいものは，よりリアクタンスが小さくなり慣性定数が大きくなると解釈すればよい。

$$X_{*0} = \frac{S_0}{S} X_* \quad (\text{A.1})$$

$$M_0 = \frac{S}{S_0} M \quad (\text{A.2})$$

## A.2.2 励磁系データ

励磁系は，回転形励磁機用のモデルを使用した。励磁系のブロック線図を図 A.2 に示す。界磁電圧  $E_f$  は，無負荷，定格回転数，定格端子電圧時 ( $E_a = 1.0$  [p.u.]) を 1.0 [p.u.] とす

る値である [16]。

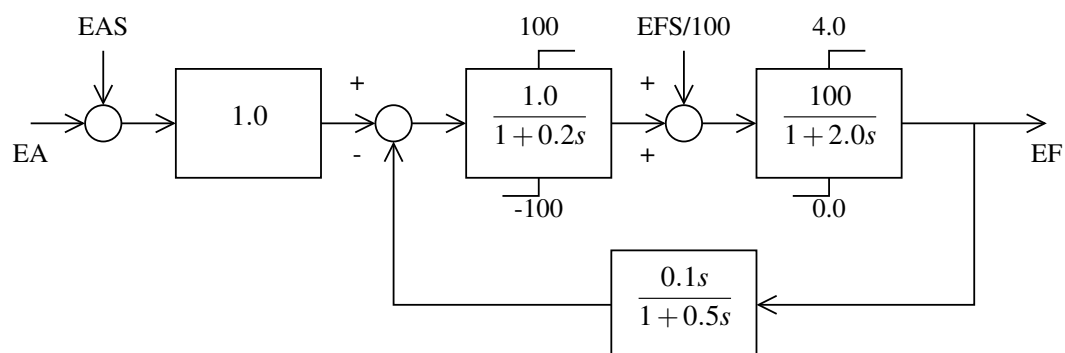


図 A.2 励磁モデル

### A.2.3 調速機系データ

調速機系のブロック線図を図 A.3 に示す。タービン出力の単位は発電機出力ベース（MW ベース：定格 MW を発生させるタービン出力を 1 [p.u.] とする）である。

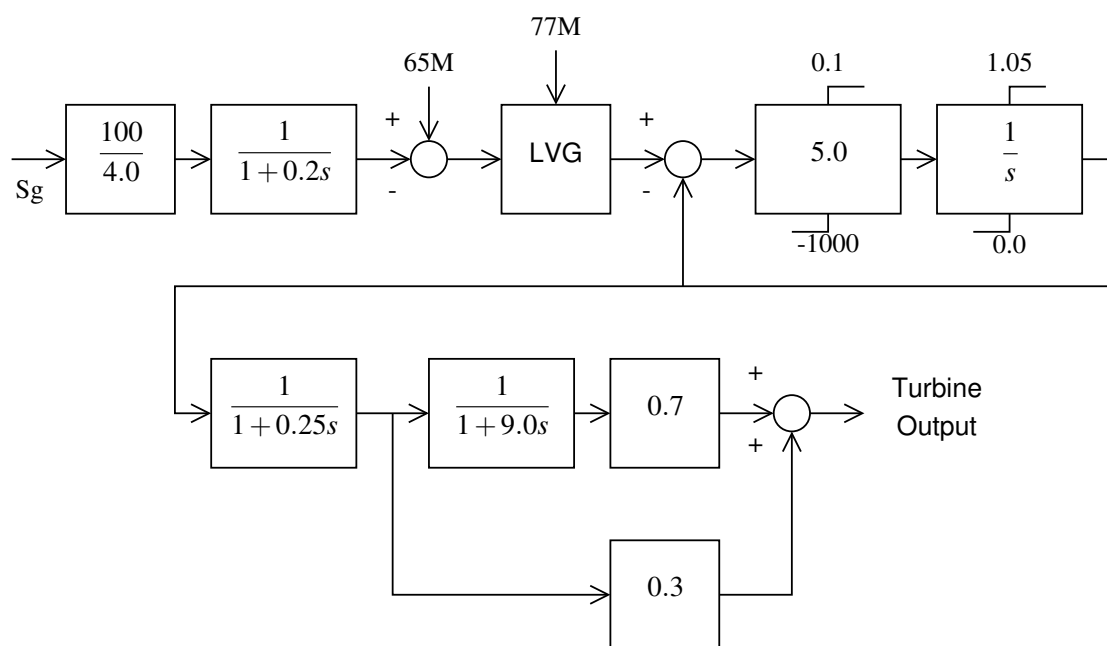


図 A.3 調速機モデル

### A.2.4 負荷データ

本研究で扱う負荷には誘導機負荷である。誘導機負荷の機器定数（自己容量換算）を表に示す。

表 A.6 負荷詳細

No.	Bus	定格容量 [MVA]	$R$ [p.u.]	$X$ [p.u.]	慣性定数 $H$ [s]
L1	1	190,900	0.02	0.1	1.0
L2	14	1,400	0.02	0.1	1.0
L3	16	900	0.02	0.1	1.0
L4	18	1,400	0.02	0.1	1.0
L5	20	1,000	0.02	0.1	1.0
L6	22	1,100	0.02	0.1	1.0
L7	23	600	0.02	0.1	1.0

負荷に関しても発電機と同様に物理量の系統容量ベースへの換算が必要である。換算の方法は発電機と同様に、抵抗  $R$  とリアクタンス  $X$  は負荷容量に反比例、慣性定数  $H$  は負荷容量に比例する。

# 謝辞

本研究を行うに当たり、横山明彦教授には終始懇切かつ熱心な御指導と貴重な御助言を頂き大変お世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。

技術専門職員の島田規人氏には研究を進める際の様々な便宜を図っていただき、日頃より深く感謝しております。

また先に御卒業されましたチャン・ジュン氏、リー・ヴィエット・ティエン氏、入江寛氏、梁田将志氏、研究員の佐久間寿人氏、鎌田剛史氏、研究生のチャイラーク・チャパタナジット氏、博士課程3年のクリサナ・タンパティパーン氏、博士課程2年のナッタウット・パンスワン氏、グエン・ホアン・ヴィエット氏、博士課程1年の河辺賢一氏、益田泰輔氏には研究を進める際に数多くの御助言を頂きましたことを心より感謝しております。修士課程1年の相原良太氏、清水浩一郎氏、宮原啓太氏、吉原徹氏、卒論生の木原寛之氏、郡司掛安俊氏、千貫智幸氏には、時にはご迷惑をおかけしたこともございましたが、楽しい研究生活を送ることができました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

最後に、私の研究生活を支えて下さった全ての皆様に改めて感謝の意を申し上げますと共に、皆様方の今後の御発展と御活躍を心よりお祈り申し上げます。