



修士論文

太陽光発電が大量に導入された  
電力系統の電圧安定性に関する基礎特性

Fundamental characteristics on voltage stability in power system  
with PV large penetration

平成25年2月6日提出

指導教員 谷口 治人 特任教授

東京大学大学院

工学系研究科 電気系工学専攻

37-116419

石川 幸一郎

# 内容梗概

昨今、二酸化炭素などの温室効果ガス排出問題やエネルギーセキュリティの観点から、太陽光や風などの自然エネルギーを利用した再生可能エネルギー電源への注目が高まっており、今後大量に導入されることが予想されている。日本においては、特に太陽光エネルギーを利用した太陽光発電が大量に電力系統へ連系されることが予想されている。太陽光発電の特性として、出力が気象状況に依存して不安定であること、回転型発電機のような慣性がないこと、系統の末端部分である配電系統に大量に導入されることが挙げられる。これらの特性は電力系統の安定性（周波数安定性、同期安定性、電圧安定性）に影響を与えるものと考えられる。周波数安定性や同期安定性への影響については検討が多くなされているが、電圧安定性への影響は検討がほとんど進められていない。このような背景から、本論文では太陽光発電の大量導入が電力系統の電圧安定性へ与える影響について基礎的な検討を行った。

太陽光発電は配電系統に大量に連系されると考えられ、系統内の潮流は軽潮流化、さらには逆潮流化すると予想される。系統内の潮流状態が変化すると、系統内の電圧分布が変化し、電圧特性も変化する。具体的には、太陽光発電の連系点付近の電圧が上昇して、系統内の電圧が許容値を逸脱してしまい、系統に連系している要素に様々な不具合を生じさせる。これまでの研究の多くは、このような電圧分布、及び電圧特性の変化について指摘するのみで、電圧安定性にまで検討した例は見受けられない。また配電系統のみを検討の対象としている。そこで本論文では、無限大母線より負荷に電力を供給する簡単な一負荷と無限大母線からなる系統モデルを参考とし、負荷近傍に太陽光発電が連系されることを想定した一負荷、一太陽光発電、無限大母線から構成される系統モデルを用いて、太陽光発電の大量導入により電圧特性が如何に変化するかを明らかにし、それが如何に電圧安定性へ影響を与えるか基礎的な検討を行った。

電圧特性の把握のため、負荷消費電力と負荷端電圧の関係である PV 曲線の導出を行った。それによれば、送電限界潮流を示すノーズ端が、一般的に知られている無限大母線から負荷への順潮流側である右側だけでなく、負荷から無限大母線への逆潮流側である左側にも存在することが明らかとなり、太陽光発電出力電力が大きくなれば、負荷消費電力が正の領域であっても左側ノーズ端が現れることが示された。また、左側ノーズ端付近では、一般的に知られる順潮流の減少や逆潮流の増加によって負荷端電圧が上昇するという特性とは異なる特性となることが明らかとなった。

系統内の動的要素の代表である誘導機負荷の動特性を考慮した解析によって、左側と右側ノーズ端によって生じうる不安定現象についても検討を行い、動的シミュレーションによって検証を行った。また太陽光発電の脱落及び復帰特性も考慮した解析を行なって、今後太陽光発電が系統内の主電源として求められると予想される運転継続性によって系統の安定性を損ねうることも明らかにした。さらに誘導機負荷の動特性のみでは十分解析できなかった点についても、太陽光発電の PCS の制御を考慮することによって解析を行っている。

# 目次

第 1 章	序論.....	1
1.1	本論文の背景 .....	1
1.2	本論文の構成 .....	1
第 2 章	電力系統の電圧安定性と太陽光発電 .....	2
2.1	電力系統の電圧安定性 .....	2
2.2	太陽光発電モデル .....	2
2.3	太陽光発電連系系統の電圧安定性 .....	4
2.4	負荷モデル .....	4
2.5	本研究で対象とする系統モデル .....	5
第 3 章	太陽光発電が連系された系統の静的な電圧特性 .....	7
3.1	PV 曲線の導出 .....	7
3.2	太陽光発電大量導入時の電圧特性 .....	8
3.3	左側ノーズ端付近の電圧特性のフェーザによる考察 .....	10
3.4	PCS の電流制限を考慮した特性 .....	13
第 4 章	誘導機負荷を考慮した準静的な電圧安定性 .....	17
4.1	誘導機負荷モデル .....	17
4.2	PV 曲線の導出 .....	18
4.3	系統状態と PV 曲線 .....	19
4.4	等すべり曲線 .....	24
4.5	誘導機負荷の動特性 .....	26
4.6	右側ノーズ端による電圧崩壊現象 .....	28
4.7	左側ノーズ端による系統崩壊現象 .....	29
4.8	PCS の電流制限を考慮した時の電圧安定性 .....	30
第 5 章	擾乱発生時の安定性解析 .....	33
5.1	擾乱発生時の不安定現象の解析例 1（負荷変動） .....	33
5.2	擾乱発生時の不安定現象の解析例 2（太陽光発電出力変動） .....	41
5.3	擾乱発生時の不安定現象の解析例 3（送電線事故） .....	46
5.4	太陽光発電の脱落及び復帰を考慮した安定性解析 .....	49
第 6 章	太陽光発電動的モデルによる検証 .....	54

6.1	太陽光発電動的モデル .....	54
6.2	太陽光発電出力特性の切り替えの検証 .....	56
6.3	太陽光発電の脱落及び復帰の検証 .....	59
第 7 章 結論.....		63
7.1	本論文の成果 .....	63
7.2	今後の課題 .....	64
謝辞.....		65
参考文献 .....		67
発表文献 .....		69
附録 A	誘導機負荷の動特性の導出 .....	71
附録 B	動的シミュレーション .....	72
附録 C	太陽光発電動的モデルの定数 .....	74
附録 D	記号と用語の定義 .....	75

# 第1章 序論

## 1.1 本論文の背景

昨今、二酸化炭素などの温室効果ガスに起因する地球温暖化問題への懸念から、太陽光発電や風力発電など自然エネルギーを利用した再生可能エネルギー電源への注目が高まっており、今後大量に導入されることが予想される。太陽光発電の特徴として、出力が日射量と気温に依存して不安定であるということ、これまでの回転機型の発電機と異なり慣性がないこと、系統の末端である配電系統に多数連系されることなどが挙げられる。これらの特徴は、それぞれ周波数、発電機の同期運転、電圧など、電力系統の安定性に影響を与えることが予想されている。太陽光発電が大量に電力系統に連系される今後も、安定的に電力系統を運用していくために、太陽光発電の安定性への影響を解析することは非常に重要なことである。

本論文は太陽光発電が電力系統の安定性に与える影響の中で電圧安定性について論じる。太陽光発電が大量に導入されると、電力の潮流状態が変化して系統内の電圧分布及び電圧特性が変化する。これにより電圧の安定性にも影響を与えると考えられる。太陽光発電の導入が系統電圧に与える影響に関する先行研究<sup>[1][2][3][4]</sup>では、電圧特性の変化について指摘するのみで、電圧安定性まで検討した例は見受けられない。また対象とする系統も配電系統のみである。本論文では配電系統より上位の系統まで考慮した簡単な系統モデルを用い、太陽光発電が大量に電力系統に連系された際の電圧特性の変化及び安定性について基礎的な検討を行った。

## 1.2 本論文の構成

本論文は全7章で構成される。

第2章では電圧安定性や太陽光発電について導入を行い、本論文で検討の対象とするモデルについても述べる。

第3章から第6章では太陽光発電が連系された系統の電圧安定性を解析する。第3章では太陽光発電連系系統のPV曲線を導出することで、定常状態の静的な電圧特性を明らかにする。第4章と第5章では誘導機負荷の動特性を考慮した電圧安定性について議論する。その内、第4章では誘導機負荷のモデル及び動特性について述べ、また誘導機負荷連系系統の電圧特性についても議論を行う。第5章では第4章を踏まえ、様々な擾乱が生じた際の安定性について解析を行う。第6章では、太陽光発電の動特性までも考慮することで、第5章の解析で十分に検討できなかった点について検証を行う。

最後に第7章が結論となる。

## 第2章 電力系統の電圧安定性と太陽光発電

本章では、電圧安定性と本論文で検討の対象とする太陽光発電モデルなどの概要について述べる。まず 2.1 では、電力系統における電圧の維持の重要性や電圧安定性の概念について述べる。2.2 では、我が国での太陽光発電の現状についてまとめ、本研究で用いる太陽光発電モデルを紹介する。次に 2.3 では太陽光発電連系系統の電圧安定性に関する研究の現状についてまとめ、本研究の目的を明確にする。2.4 では本研究で用いる負荷モデルを紹介する。最後に 2.5 では研究で対象とする系統モデルについて述べる。

### 2.1 電力系統の電圧安定性

電気事業者は法令によって低圧配電系統の電圧を定められた範囲に維持しなければならない。このため、電気事業者はそれより上位の系統の電圧についても運用目標範囲を定め、電力系統を運用している<sup>[5]</sup>。もし電圧がこの範囲よりも高くなる場合には機器の絶縁破壊等の危険を生じ、逆に電圧が不足する場合には本来の機能を十分に発揮できなくなる。また異常電圧によって機器が運転を停止（負荷脱落）すると系統周波数や同期発電機の同期運転にも影響を与える。したがって電力系統にとって電圧を維持することは非常に重要である。

電力系統内で擾乱が生じた際に系統内の電圧を維持することができるかどうかを示す度合いは電圧安定性と呼ばれる。電圧安定性を解析する際に、負荷消費有効電力（ $P$ ）と負荷端電圧（ $V$ ）の関係である  $PV$  曲線がしばしば用いられる。 $PV$  曲線は静的な動作点の集合を示しており、 $PV$  曲線から静的な電圧特性について議論することができる。第 3 章では  $PV$  曲線を導出して、太陽光発電連系系統の静的な電圧特性について論じる。これを静的な解析と呼ぶ。

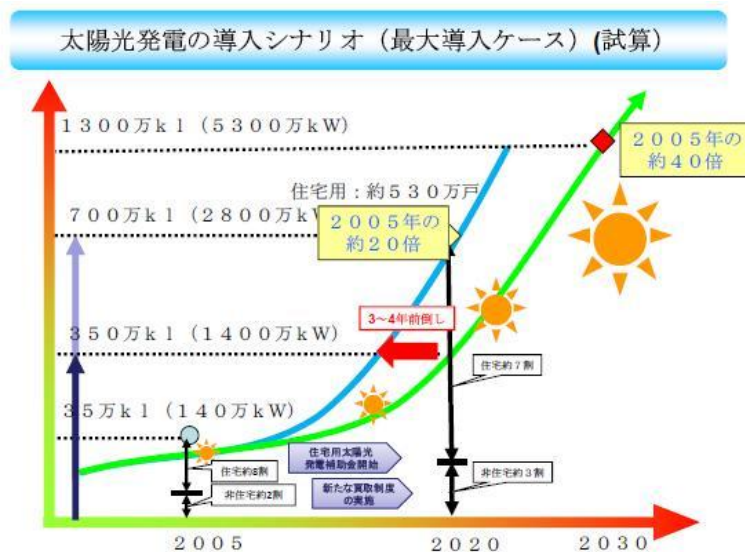
また一方で、電力系統内には動特性を持つ要素が多数存在し、これらの動特性によって動作点の安定性が決まる。このような動的な安定性は、動特性によって動作点が如何に推移するかを解析することによって判定することができる。電力系統内には動的要素が多数存在するが、その全てを考慮して検討を行うことは非常に困難である。そのため、それぞれの応答速度や解析目的から考慮の対象とする動的要素は絞られる<sup>[6]</sup>。

本論文では、系統内の動的要素の内、誘導機負荷と太陽光発電の動特性を考慮して、太陽光発電連系系統の安定性について議論する。ただし誘導機負荷の応答は数秒程度に対して、太陽光発電の応答は数十ミリ秒程度であるため、第 4 章、第 5 章では太陽光発電の応答は瞬時に行われるものと考え、誘導機負荷の動特性のみを考慮して解析を行う。これを準静的な解析と呼ぶ。第 6 章では太陽光発電の動特性までも考慮して解析を行う。これを動的な解析と区分する。

### 2.2 太陽光発電モデル

太陽光発電は太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する機器である。昨今、二酸化炭素などの温室効果ガスに起因する地球温暖化問題への懸念から太陽光発電や風力発電など、自然エネルギーを利用した再生可能エネルギー電源への注目が高まっており、今後大量に導入される予定である。特に太陽光発電について、2008 年のエネルギー計画では 2020 年に 14GW、2030 年に 53GW を導入する目標が掲げられ<sup>[7]</sup>、2009 年の再計算ではさらに導

入を加速する目標が掲げられていた<sup>[8]</sup>。(図 2.1)



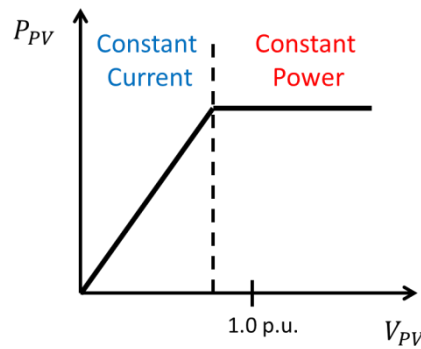


図 2.3 定P一定I切り替えモデル

PCS の過渡応答が数十ミリ秒程度であるため、本論文において静的、準静的な解析では太陽光発電は定電力特性として模擬される。ただし、PCS の電流制限を考慮する場合には定P一定I切り替えモデルとして模擬される。また動的な解析では 6.1 で述べる太陽光発電動的モデルを用いる。

5.4, 6.3 では太陽光発電の脱落や復帰が電圧安定性に与える影響についても検討する。太陽光発電が備えるべき脱落、復帰特性は FRT (Fault Ride Through) 要件によって規定される。今後、太陽光発電が大量に導入されると、主要電源としての信頼性を保つため、系統擾乱時も運転継続性、つまり事故に対して容易に脱落しないこと、そして脱落しても事故除去後に速やかに出力回復することが求められる。これらの要求を満たすため、系統へ連系される太陽光発電の脱落、復帰特性に一定の基準を持たせることが検討されており、その基準を FRT 要件という。FRT 要件の詳細については検討が進められている段階であり、本論文での脱落及び復帰特性の模擬は経済産業省の次世代送配電システム制度検討会で検討されている要件<sup>[9]</sup>を参考とする。具体的な模擬方法については、準静的な解析は 5.4、動的な解析では 6.1 で述べる。

## 2.3 太陽光発電連系系統の電圧安定性

太陽光発電は電力需要地近傍の配電系統に大量に連系されることが予想されており、これにより電力系統内の電力の潮流状態が大きく変化することが予想される。電力系統内の潮流状態が変化すると系統内の電圧分布、電圧特性が変化するため、電圧安定性に影響を与えるものと考えられる。

太陽光発電の連系が系統電圧に及ぼす影響について検討した昨今の研究を見ると、太陽光発電の連系される下位系統の電圧特性の変化について検討したもの<sup>[1][2]</sup>や、配電系統の電圧が上昇する問題を指摘し、これに対する有効な電圧制御手法が提案するもの<sup>[3][4]</sup>などが見られる。しかし、これらの検討では電圧特性の変化については指摘されているが、電圧安定性への影響まで検討されていない。また太陽光発電の主に連系される下位系統のみを対象とした検討が多く見受けられる。このような背景から、本研究では配電系統より上位の系統も考慮した簡単な系統モデルを用いて、太陽光発電の連系が系統の電圧特性と電圧安定性に与える影響について基礎的な議論する。

## 2.4 負荷モデル

電力系統内の負荷は様々な構成要素から成っており、時間や地域によっても構成要素が異なっているため、安定性解析の際にどのような負荷モデルを用いるかということは非常に難しい問題であり、現在も負荷のモデル化

について研究が進められている<sup>[10][11]</sup>。

本研究では太陽光発電連系系統の基礎的な電圧特性を議論するため、二次系統以下を集約したモデルを負荷モデルとする。二次系統以下を構成する主要素には、抵抗性負荷、誘導電動機、インバータを介して電力を供給される負荷、タップ付き変圧器、また小容量の発電設備などが挙げられる。小水力発電機などの小容量発電設備は数が少ないため、本論文ではその影響は小さいものとする。

抵抗性負荷は定インピーダンス特性を示す。誘導機負荷は動特性を持ち、電圧変化によって消費電力が変化してもほぼ元の電力に戻る。この動特性の応答速度は数秒程度であり、過渡応答の安定した定常状態では定電力特性と見なせる。インバータ負荷は省エネルギー化の目的のため昨今導入が進んでいる<sup>[12]</sup>。インバータ負荷も誘導機負荷と同様に元の電力に戻るような制御を行っており、定常的には定電力特性と見なせる。しかし応答速度が数十ミリ秒程度と高速な制御を行う点で誘導機負荷と異なる。タップ付き変圧器によるタップ制御は負荷側の電圧が定められた範囲に収まるような制御を行う。タップ制御の動作間隔は数分以上と非常に長い。

上述のように誘導機負荷、インバータ負荷は定常的には定電力特性と見なせる。また抵抗性負荷は定インピーダンス特性を示すが、タップ制御によって負荷端の電圧がほぼ一定に保たれることを考えれば定電力特性を示すものと見なせる。したがって定常状態の解析では負荷モデルは定電力特性を示すものとして扱う。

より短い時間領域の解析（準静的解析、動的解析）を行う際には負荷モデルの構成要素の動特性を考慮する必要がある。誘導機負荷は系統内の代表的な動的要素であり、その動特性は電圧不安定現象の原因であるとの報告がなされている<sup>[13][14]</sup>ため、本論文では誘導機負荷の動特性を主な考慮対象とする。負荷モデルの構成要素が全て誘導機負荷から成ることはないが、準静的及び動的解析では簡単のため負荷モデルは誘導機負荷のみで構成されるものとして扱う。本論文で用いる誘導機負荷のモデル及び動特性は 4.1 で述べる。

## 2.5 本研究で対象とする系統モデル

本論文で検討の対象とする系統モデルを図 2.4 に示す。図 2.4 に示すように無限大母線より需要地へ送電する系統を考えて負荷の近傍に太陽光発電が連系されている系統を考える。発電機は簡単のため無限大母線で表現している。無限大母線とは理想的な電圧源で、無限の電力を供給あるいは消費できる。送電線は集約して一本で表現されている。事故などによる送電線の一部の切り離しはインピーダンスの値を増加することで模擬できる。負荷と太陽光発電も集約モデルとして表現されており、簡単のため配電線のインピーダンスは無視している。2.2 で述べたように太陽光発電のモデルとして、解析の時間領域と PCS の電流制限の考慮の有無に応じて表 2.1 に示すモデルを用いる。また 2.4 で述べたように負荷モデルとしては誘導機負荷を主に考え、解析の時間領域に応じて表 2.2 に示すモデルを用いる。

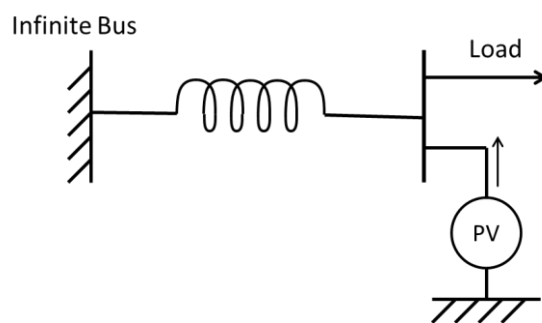


図 2.4 系統モデル

表 2.1 太陽光発電モデル

	時間領域	PCS の電流制限無し	PCS の電流制限有り
3 章	静的	定電力モデル	定 P－定 I 切り替えモデル
4, 5 章	準静的	定電力モデル	定 P－定 I 切り替えモデル
6 章	動的	太陽光発電動的モデル	

表 2.2 負荷モデル

	時間領域	負荷モデル
3 章	静的	定電力負荷モデル
4, 5 章	準静的	誘導機負荷モデル
6 章	動的	誘導機負荷モデル

## 第3章 太陽光発電が連系された系統の静的な電圧特性

本章では、太陽光発電の大量導入が系統の静的な電圧特性に与える影響について検討する。3.1 では、系統の送電特性を示す PV 曲線を導出する。3.2 では、3.1 で導出した PV 曲線を用いて、太陽光発電大量導入時の電圧特性の変化について解析する。3.3 では、太陽光発電大量導入時に生じる電圧特性の変化について、フェーザ図を用いて考察する。3.4 では、太陽光発電の PCS の電流制限を考慮した時の電圧特性について述べる。

### 3.1 PV 曲線の導出

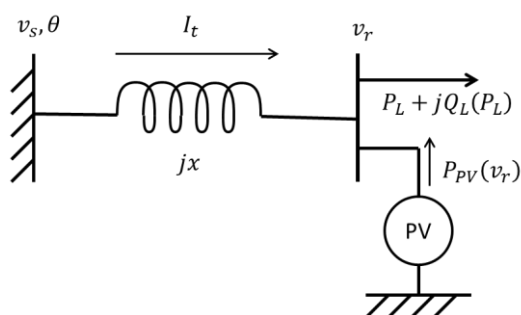


図 3.1 システムモデル

表 3.1 PV 曲線導出に用いる変数

$\theta$	受電端電圧を基準とした送電端電圧位相
$I_t$	送電線電流（受電端方向正、複素数）
$v_s$	送電端電圧の大きさ
$v_r$	受電端電圧の大きさ
$x$	送電線インピーダンス（リアクタンス成分のみ考慮）
$P_{all}$	受電端以下の総消費有効電力
$Q_{all}$	受電端以下の総消費無効電力
$P_L$	負荷消費有効電力
$Q_L$	負荷消費無効電力
$P_{PV}$	太陽光発電出力電力（力率 1.0 運転）
$\alpha$	負荷の有効電力と無効電力の比率（ $Q_L/P_L$ ）

PV 曲線導出の際に用いるシステムモデルを図 3.1 に、また変数を表 3.1 に示す。オームの法則及び負荷端以下の消費電力の関係式から(3.1)、(3.2)が得られる。 $I_t$ について2式をまとめて、複素数の大きさをとり、 $\theta$ を消去すると(3.3)が得られる。

$$v_s e^{j\theta} - v_r = jxI_t \quad (3.1)$$

$$P_{all} + jQ_{all} = v_r \bar{I}_t \quad (3.2)$$

$$v_s^2 v_r^2 = (v_r^2 + xQ_{all})^2 + x^2 P_{all}^2 \quad (3.3)$$

負荷端以下の総消費電力と負荷消費電力及び太陽光発電出力の関係から(3.4), (3.5)が得られる。太陽光発電出力の無効電力成分が0であるのは、太陽光発電が力率1.0運転を行うと仮定しているためである。負荷力率一定とすると(3.6)が成り立つ。また太陽光発電の定P一定I切り替え特性を考える時、(3.7)のように太陽光発電出力電力は受電端電圧の関数となる。

$$P_{all} = P_L - P_{PV} \quad (3.4)$$

$$Q_{all} = Q_L \quad (3.5)$$

$$Q_L = \alpha P_L \quad (3.6)$$

$$P_{PV} = P_{PV}(v_r) \quad (3.7)$$

(3.3)～(3.7)における変数は $v_s, v_r, x, P_{all}, Q_{all}, P_L, Q_L, P_{PV}, \alpha$ の9個で、そのうち $v_s, x, \alpha$ は定数である。 $P_{PV}$ は、太陽光発電が定電力特性と考える場合に定数で、定P一定I切り替え特性と考える場合は $v_r$ の関数となる。したがって $P_{all}, Q_{all}$ は $P_L, v_r$ の関数となるため、(3.3)は $P_L, v_r$ の関数となる。よって $v_r$ を決定すれば $P_L$ が求まり、これによりPV曲線を導出することができる。

(3.3)～(3.7)を $P_L, v_r$ の関数となるように整理し、 $P_L$ についてまとめると(3.8)～(3.11)のようになる。

$$aP_L^2 + bP_L + c = 0 \quad (3.8)$$

$$a = x^2(1 + \alpha^2) \quad (3.9)$$

$$b = 2(x\alpha v_r^2 - x^2 P_{PV}(v_r)) \quad (3.10)$$

$$c = v_r^4 - v_s^2 v_r^2 + x^2 (P_{PV}(v_r))^2 \quad (3.11)$$

## 3.2 太陽光発電大量導入時の電圧特性

本節では3.1で求めた太陽光発電連系系統のPV曲線を使って太陽光発電連系に伴う電圧特性の変化について述べる。

表3.2の条件のもとで導出したPV曲線を図3.2に示す。太陽光発電は定電力特性を示すものとして考える。Case1は太陽光発電が連系されていない系統、Case2は太陽光発電が大量に連系された系統のPV曲線である。Case1については負荷消費電力( $P_L$ )が負、つまり負荷より無限大母線への逆潮流が発生する特性についても示している。なお、Case2においては、太陽光発電の出力電力である1.6 p.u. より小さな負荷消費電力では、受電端より無限大母線へ向けて逆潮流が発生していることになる。

表 3.2 図 3.2 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$\alpha$	0.0	0.0
$P_{PV}$	0.0 p.u.	1.6 p.u.

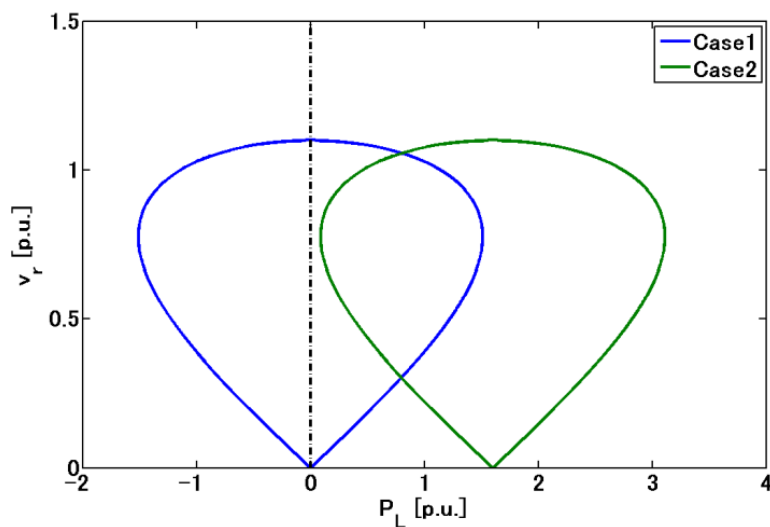


図 3.2 太陽光発電大量導入時の電圧特性

PV 曲線は定常状態の動作点を示したものである。PV 曲線の描かれていない領域は定常状態では動作点が存在し得ないことを示す。図 3.2 に示されるように、PV 曲線にはこれ以上送電できない安定限界潮流（ノーズ端）が存在する。一般的に、無限大母線から負荷への順潮流側（Case1 で負荷消費電力が正の領域）のノーズ端が知られている。Case1 を見ると順潮流側だけでなく逆潮流側（負荷消費電力が負の領域）にもノーズ端が存在することが示されている。太陽光発電出力が大きくなると PV 曲線は右へ推移していき、Case2 では左側のノーズ端は負荷消費電力が正の領域に表れる。

PV 曲線の形状に示されるように、ノーズ端付近では負荷消費電力の変化に対して電圧が大きく変動する。また負荷消費電力がノーズ端を超えると系統が維持できなくなる。このようなノーズ端付近の不安定性は右側ノーズ端と左側ノーズ端のどちらも持つものと考えられる。太陽光発電が連系されていない場合、左側ノーズ端は負荷消費電力が負の領域に存在し、右側ノーズ端による不安定現象しか起こり得ない。しかし太陽光発電が大量に系統に連系されると、左側ノーズ端は負荷消費電力が正の領域に表れるため、軽負荷時に左側ノーズ端による不安定現象が生じるようになる。

図 3.2 は負荷力率が 1.0 であるとして検討を行なっているが、負荷力率が悪い場合についてもここで触れる。表 3.3 の条件のもとで導出した PV 曲線を図 3.3 に示す。負荷力率が悪化すると PV 曲線は縮小する。また右側ノーズ端は大きく縮小するが、左側ノーズ端はほとんど縮小しない。また、負荷力率が 1.0 の場合は、逆潮流発生後は、逆潮流の増加に伴い受電端電圧は低下していく。これに対し、負荷力率が悪化すると、逆潮流発生後であっ

でも、その増加に伴いしばらく受電端電圧は上昇していき、その後低下に転じる。この転じる逆潮流の大きさは、負荷力率の悪化に伴って大きくなる。

表 3.3 図 3.3 の条件

	Case1	Case2	Case3
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$\alpha$	0.0	0.1	0.2
$P_{PV}$	1.6 p.u.	1.6 p.u.	1.6 p.u.

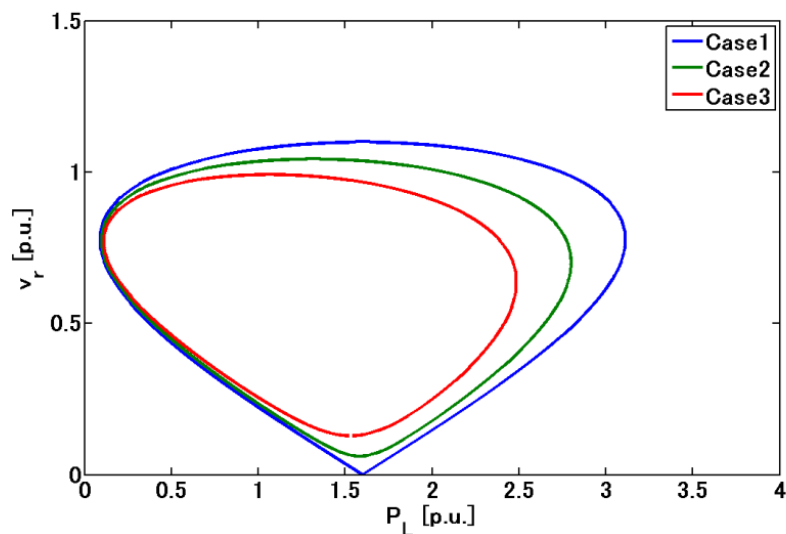


図 3.3 負荷力率の PV 曲線に与える影響

### 3.3 左側ノーズ端付近の電圧特性のフェーザによる考察

図 3.2 の PV 曲線の形状から、左側ノーズ端付近では、受電端より系統側への逆潮流が増加するにつれて受電端の電圧が低下することが解る。これは、逆潮流が増加すると受電端の電圧は増加するという一般的な直感と異なる結果である。本節ではこのことについてフェーザ図を使って、その傾向を概念的に示すこととする。ただし、単純化のために、受電端には太陽光発電と負荷を一括して見かけの負荷として扱うこととする。したがって、この節での負荷は発電もできることとし、その場合は負荷としては負の電力を消費していることとなる。また、その場合は逆潮流が発生していることとなる。

図 3.4 のような系統モデルを考え、太陽光発電と負荷を合成した見かけの負荷、つまり受電端以下の総消費電力の力率は一定とする。送電端電圧を $V_s$ ，受電端電圧を $V_r$ ，送電線インピーダンスを $x$ ，送電線電流を $I_t$ ，見かけの負荷の力率を $\cos \delta$ とおく。オームの法則から(3.12)が成り立つ。

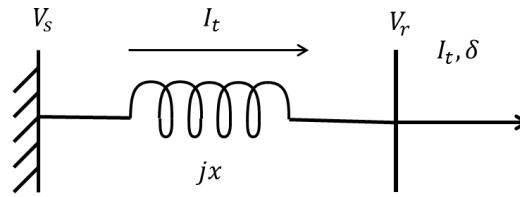


図 3.4 系統モデル

$$V_s - V_r = jxI_t \quad (3.12)$$

最初に簡単のため負荷力率 1.0 の場合，つまり  $\delta = 0$  となる場合について考察する。(3.12) のオームの法則に注意し， $V_s, V_r, I_t$  の関係をフェーザで表すと図 3.5，図 3.6 のようになる。図 3.5 は受電端電圧が送電端電圧に対して遅れているため順潮流状態の関係，図 3.6 は進んでいるため逆潮流状態の関係を示す。順潮流状態の関係において受電端電圧  $V_r$  と  $jxI_t$  のなす角は常に  $\pi/2$  である。逆潮流状態の関係においても受電端電圧  $V_r$  と  $jxI_t$  のなす角は常に  $\pi/2$  である。送電端電圧  $V_s$  の大きさを一定と考えると，図 3.7 に示すように送電端電圧を直径とする円周上に受電端電圧は存在する。また送電端電圧と受電端電圧の相差角が増大するにつれて送電線電流は大きくなり，潮流が増加すると考えることができる。このことから逆潮流が増加するにつれて受電端電圧の大きさは小さくなる。これは図 3.2 の PV 曲線が示す電圧特性と一致する。

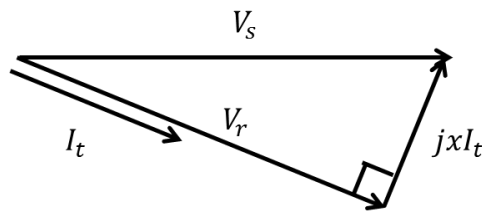


図 3.5 送電線各諸量のフェーザ関係（順潮流，見かけの負荷の力率 1.0）

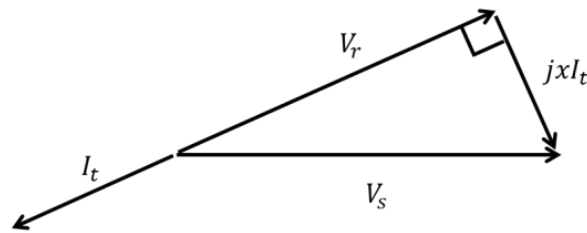


図 3.6 送電線各諸量のフェーザ関係（逆潮流，見かけの負荷の力率 1.0）

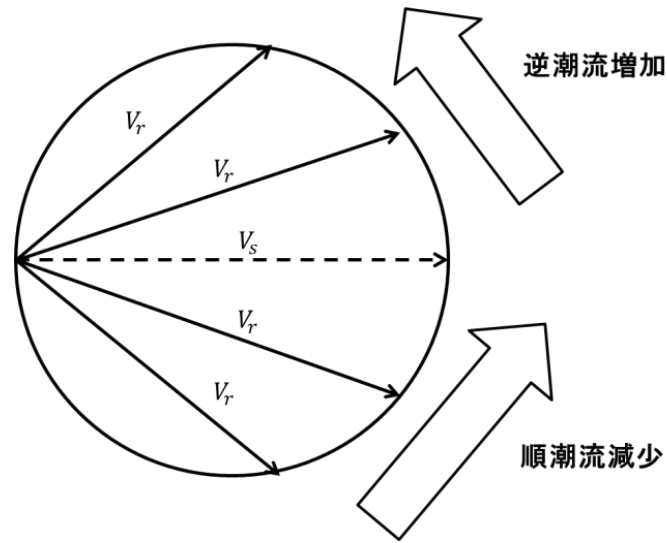


図 3.7 送電端電圧と受電端電圧のフェーザ関係（見かけの負荷の力率 1.0）

次に見かけの負荷の力率が 1.0 でない場合について検討する。(3.12) のオームの法則に注意して、 $V_s, V_r, I_t$  の関係をフェーザで表すと図 3.8, 図 3.9 のようになる。ただし、負荷状態では遅れ無効電力を消費し、発電状態になれば遅れ無効電力を発生しているものとしている。

図 3.8 は受電端電圧が送電端電圧に対して遅れているため順潮流状態の関係、図 3.9 は進んでいるため逆潮流状態の関係を示す。順潮流状態の関係において受電端電圧  $V_r$  と  $jxI_t$  のなす角は常に  $\pi/2 + \delta$  である。逆潮流状態の関係において受電端電圧  $V_r$  と  $jxI_t$  のなす角は常に  $\pi/2 - \delta$  である。負荷力率が一定の時、 $\delta$  が定数であり、送電端電圧  $V_s$  の大きさが一定と考えると、図 3.10 に示すように送電端電圧を弦とする円周上に受電端電圧は存在する。したがって逆潮流が増加すると、受電端電圧が図 3.10 に示す円の直径となるまで受電端電圧の大きさは大きくなり、それ以上逆潮流が増加すると受電端電圧の大きさは小さくなっていく。これは図 3.3 の PV 曲線が示す電圧特性と一致する。

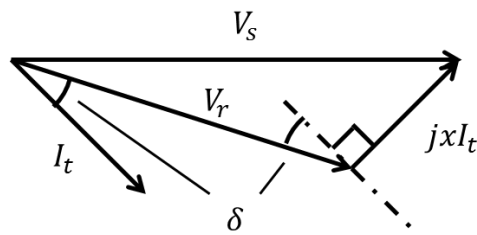


図 3.8 送電線各諸量のフェーザ関係（順潮流）

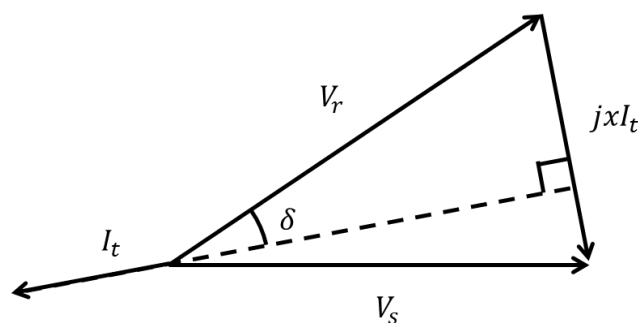


図 3.9 送電線各諸量のフェーザ関係（逆潮流）

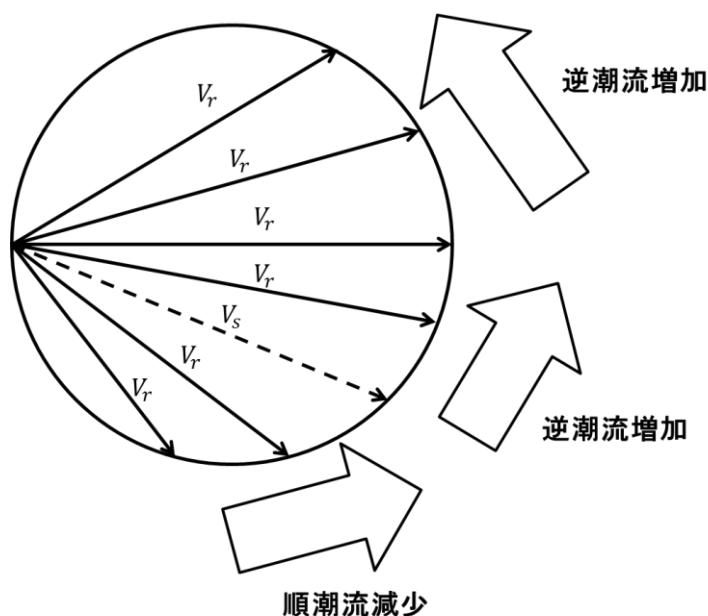


図 3.10 送電端電圧と受電端電圧のフェーザ関係

以上をまとめると、受電端に負荷と太陽光発電が接続され、両者の合計である見かけの負荷の力率が 1.0 でなく、遅れで一定であれば、見かけの負荷が小さくなるにつれて受電端電圧は増加するが、逆潮流が大きい時、逆潮流が増加するにつれて受電端電圧は低下していく。見かけの負荷の力率が 1.0 のときは逆潮流の多寡に関わらず、逆潮流が増加するにつれて受電端電圧は低下する。3.2 で導出された PV 曲線の形状も、この逆潮流と受電端電圧の関係によって説明されると考えられる。

### 3.4 PCS の電流制限を考慮した特性

太陽光発電が定電力特性であると仮定して導出した PV 曲線（図 3.2，図 3.3）は左側ノーズ端より負荷消費電力が小さい領域では動作点、曲線が存在せず、送電できないことを示している。これは太陽光発電を定電力特性と仮定しているためである。受電端電圧が低下した時、太陽光発電は出力電力を一定とするため出力電流を増加させる。左側ノーズ端より左の領域では、出力電流をいくら増加させても、さらに受電端電圧が低下してしまい、出力電力を元の値にすることができなくなっている。実際には、太陽光発電の PCS が機器保護のために電流制限

を行うため、出力電流が増加し続けることはない。本節では太陽光発電の PCS による電流制限を考慮した電圧特性について検討する。

太陽光発電の出力特性として 2.2 で述べた定 P－定 I 切り替え特性を考える。 $P_{PV,max}$  が定常状態(定格電圧 1.0p.u. 付近)における太陽光発電出力電力、また  $i_{PV,th}$  を電流制限値とし、電圧低下により太陽光発電出力電流が  $i_{PV,th}$  を超える場合に定電流特性に移行するものとする。太陽光発電出力電流及び電力は(3.13)、(3.14)で与えられる。

$$i_{PV} = \begin{cases} \frac{P_{PV,max}}{v_r}, & \frac{P_{PV,max}}{v_r} \leq i_{PV,th} \\ i_{PV,th}, & \frac{P_{PV,max}}{v_r} > i_{PV,th} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{PV,max}, & \frac{P_{PV,max}}{v_r} \leq i_{PV,th} \\ v_r i_{PV,th}, & \frac{P_{PV,max}}{v_r} > i_{PV,th} \end{cases} \quad (3.14)$$

表 3.4 の条件で導出した PV 曲線を図 3.11 に示す。Case1 は太陽光発電を定電力特性と考えた場合、Case2 は PCS の電流制限を考慮して定 P－定 I 切り替え特性として考えた場合を示す。図 3.11 に示されるように Case2 では電圧が低い領域で定電流特性の PV 曲線が描かれる。このため左側ノーズ端より負荷消費電力が小さい領域においても曲線が描かれる。しかしながら定電流特性を示す領域では、定電力特性を示す領域よりも受電端電圧が低くなっており、PCS の電流制限を考慮しても、やはり左側ノーズ端は電圧の不安定現象の原因となりうる。

表 3.4 図 3.11 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$\alpha$	0.0	0.0
$P_{PV,max}$	1.8 p.u.	1.8 p.u.
$i_{PV,th}$	—	2.4 p.u.

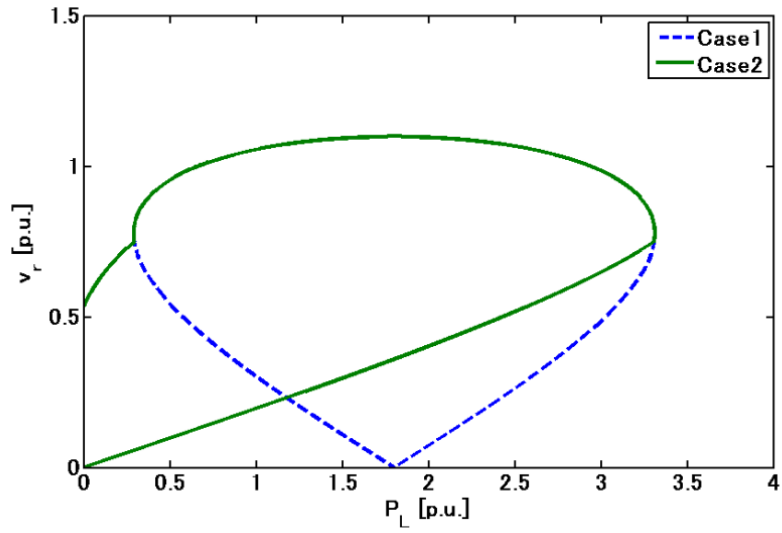


図 3.11 PCS の電流制限を考慮した PV 曲線

次に電流制限値が電圧特性に与える影響について検討する。表 3.5 の条件で導出した PV 曲線を図 3.12 に示す。同図に示されるように、電流制限値が大きくなるほど定電力特性と定電流特性の切り替わり電圧（以降，切替電圧）が低くなり，Case2，Case3，Case4 ではそれぞれ，0.9 p.u.，0.75 p.u.，0.64 p.u. となる。

表 3.5 図 3.12 の条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$\alpha$	0.0	0.0	0.0	0.0
$P_{PV,max}$	1.8 p.u.	1.8 p.u.	1.8 p.u.	1.8 p.u.
$i_{PV,th}$	—	2.0 p.u.	2.4 p.u.	2.8 p.u.

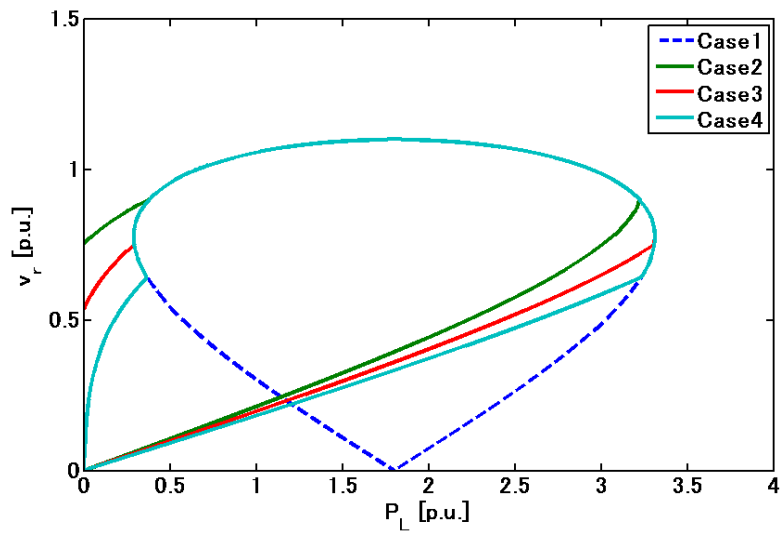


図 3.12 電流制限値の PV 曲線に与える影響

電流制限値は定格出力を基準として、制御保護上のマージン等を勘案して設定されるものと考えられる。図 3.13 に示すように、同じ容量の太陽光発電では、その出力が小さくなるにつれ、切替電圧は低くなり、出力電流の余裕は大きくなる。

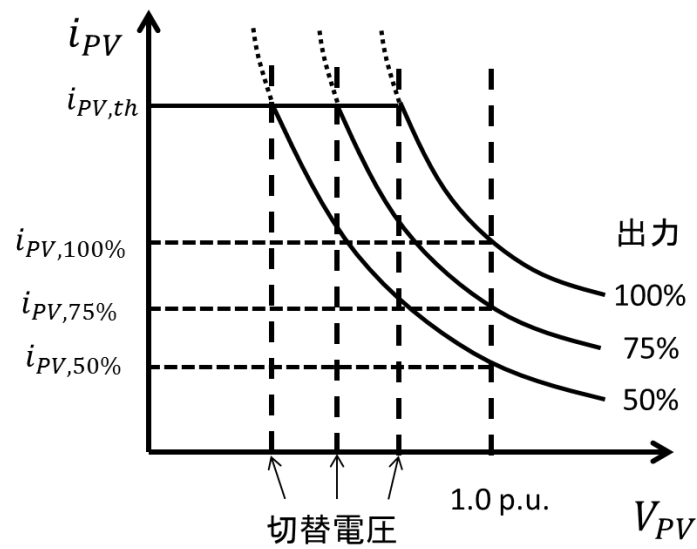


図 3.13 電流制限値と切替電圧

## 第4章 誘導機負荷を考慮した準静的な電圧安定性

本章では、負荷モデルとして誘導機負荷モデルを考慮した場合の、太陽光発電連系系統の準静的な電圧安定性について PV 曲線を用いて検討する。4.1 では、誘導機負荷のモデルの導入を行う。4.2 では、誘導機負荷モデルを考慮した場合の PV 曲線を導出する。4.3 では、太陽光発電の連系による静的な特性の変化を、PV 曲線を用いて考察する。また第 5 章の準備として、系統状態と PV 曲線の形状の関係について述べる。4.4 では、PV 曲線を用いた検討で用いる、等すべり曲線の導入を行う。4.5 では、PV 曲線を用いた検討で、誘導機負荷の動特性を如何に用いるか述べる。4.6 では、右側ノーズ端に起因する電圧崩壊現象について検討する。4.7 では、左側ノーズ端に起因する系統崩壊現象について検討する。4.8 では PCS の電流制限を考慮した時の PV 曲線を導出し、その時の特性について検討を行う。

### 4.1 誘導機負荷モデル

本節では誘導機負荷の動的モデルについて述べる。図 4.1 に本論文で用いる誘導機負荷のモデルを示す。ただし、 $V$  は負荷端電圧、 $s$  は誘導機負荷のすべり、 $P_m$  は機械的出力、 $P_e$  は電気的入力である。誘導機負荷は、負荷端電圧が変化して電気的入力に変化しても、すべりが変化する（回転子の回転速度が加減速する）ことで電気的入力が元の値に戻る動特性を持つ。ここで、 $H_{IM}$  は慣性定数である。(4.1)に誘導機負荷の動特性を表す式を示す。導出については附録 A を参照されたい。

$$H_{IM} \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{1-s} - P_e \quad (4.1)$$

図 4.1 は電力中央研究所の Y 法で用いられる誘導機負荷モデル<sup>[15]</sup>を簡易にしたものである。電力中央研究所のモデルの標準定数は昭和 55 年に 238 台分のデータを集めて統計を取った結果から導出している<sup>[12]</sup>。本論文では電力中央研究所モデルの標準定数を参考に、負荷として 1kW 級の誘導機負荷が多数台存在することを想定し、定数を表 4.1 のように設定する。負荷モデルは、多数台の誘導機負荷を集約して一つの誘導機モデルで表す。このため、負荷の定格容量の全体は系統容量と同じとし、表 4.1 の定数は系統容量基準でも同じとする。

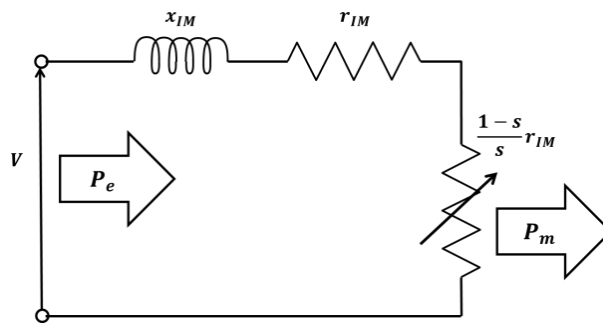


図 4.1 誘導機負荷モデル

表 4.1 誘導機負荷モデルの各定数（自己容量基準）

$r_{IM}$	0.061 p.u.
$x_{IM}$	0.2 p.u.
$H_{IM}$	0.4 s

## 4.2 PV 曲線の導出

本節では、PV 曲線を導出する。第 3 章では、表 2.2 に示すように負荷モデルとして定電力モデルを用いた場合の PV 曲線を導出したが、本節では負荷モデルとして誘導機負荷モデルを用いた場合の PV 曲線を導出する。

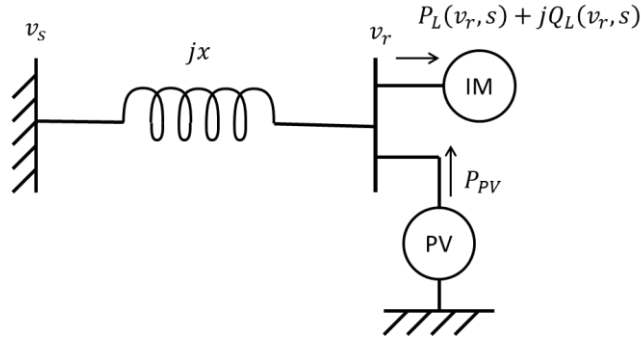


図 4.2 系統図

PV 曲線を導出する際に用いる変数は表 3.1 を参照されたい。図 4.2 の系統において成り立つ式を(4.2)～(4.6)に示す。(4.2)はオームの法則及び負荷端以下の消費電力の関係式から導かれるもので、(3.3)と同じ式である。(4.5)、(4.6)は誘導機負荷の消費電力である。(4.3)の右辺第二項に示される太陽光発電出力電力( $P_{PV}$ )は、定電力特性として扱う場合は定数であり、定 P一定 I 切り替え特性として扱う場合は  $v_r$  の関数となる。

$$v_s^2 v_r^2 = (v_r^2 + x Q_{all})^2 + x^2 P_{all}^2 \quad (4.2)$$

$$P_{all} = P_L - P_{PV} \quad (4.3)$$

$$Q_{all} = Q_L \quad (4.4)$$

$$P_L = \frac{s r_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2 x_{IM}^2} v_r^2 = \beta v_r^2 \quad (4.5)$$

$$Q_L = \frac{s^2 x_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2 x_{IM}^2} v_r^2 = \gamma v_r^2 \quad (4.6)$$

(4.2)～(4.6)において変数は  $v_s$ ,  $v_r$ ,  $x$ ,  $P_{all}$ ,  $Q_{all}$ ,  $P_L$ ,  $Q_L$ ,  $r_{IM}$ ,  $x_{IM}$ ,  $s$  の 10 個である。この内定数は  $v_s$ ,  $x$ ,  $r_{IM}$ ,  $x_{IM}$  の 4 個である。したがって条件式 5 個に対して未知変数が 6 個あるため、未知変数を一つ定数と考えると残りの未知変数を決定することができる。つまり  $P_L$  を決めると  $v_r$  が決まるため、ここから PV 曲線を導出するこ

とが可能である。

上述のように $P_L$ を与えて $v_r$ を求める方法も考えられるが、ここでは存在しうる解の数を明らかにするため、 $s$ を与えてPV曲線を導出する。 $s$ を定数と見なすと、 $P_L$ 、 $Q_L$ は $v_r$ の関数となる。したがって $P_{all}$ 、 $Q_{all}$ も $v_r$ の関数となり、(4.2)は $v_r$ の関数となる。太陽光発電が定電力特性の場合、(4.3)～(4.6)を(4.2)に代入し、 $v_r$ について整理すると(4.7)～(4.10)のように4次式となる。(4.7)から $v_r$ が電圧の大きさであり正の数であることに注意すると、解が最大2個得られることが解る。また $v_r$ が得られたので、(4.5)より $P_L$ を求めることができ、PV曲線を導出することができる。

$$av_r^4 + bv_r^2 + c = 0 \quad (4.7)$$

$$a = (1 + x\gamma)^2 + \beta^2 x^2 \quad (4.8)$$

$$b = -2\beta x^2 P_{PV} - v_s^2 \quad (4.9)$$

$$c = x^2 P_{PV}^2 \quad (4.10)$$

太陽光発電が定P一定I切り替え特性の場合について考える。定電力特性領域については定電力特性の場合と同様である。定電流特性領域について $v_r$ の方程式は(4.11)～(4.14)のように書ける。ただし、 $i_{PV,th}$ は電流制限値である。したがって0以外で解が最大2個得られることが解る。(4.11)～(4.14)より $v_r$ が得られたので、(4.5)より $P_L$ を求めることができ、PV曲線を導出することができる。

$$v_r^2(av_r^2 + bv_r + c) = 0 \quad (4.11)$$

$$a = (1 + x\gamma)^2 + \beta^2 x^2 \quad (4.12)$$

$$b = -2\beta x^2 i_{PV,th} \quad (4.13)$$

$$c = x^2 i_{PV,th}^2 - v_s^2 \quad (4.14)$$

### 4.3 系統状態とPV曲線

本節では、系統状態によってPV曲線が如何に変化するか検討し、太陽光発電が連系された際の特性の変化について考察する。また擾乱後の安定性を解析する第5章の準備として、系統状態の変化によるPV曲線の変化について紹介する。

太陽光発電導入時の特性の変化について検討する。図4.3のPV曲線は(4.2)～(4.6)及び表4.1と表4.2の条件で導出したものである。太陽光発電は定電力特性を考えている。Case1は太陽光発電が連系されていない条件、Case2は太陽光発電が大量に連系された条件である。3.2で述べた静的な特性と同様に、太陽光発電出力が大きくなるほどPV曲線は右へ推移する傾向があり、太陽光発電出力が大きいCase2では、負荷消費電力が正の領域に左側ノーズ端が表れる。

表 4.2 図 4.3 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$P_{PV}$	0.0 p.u.	1.6 p.u.

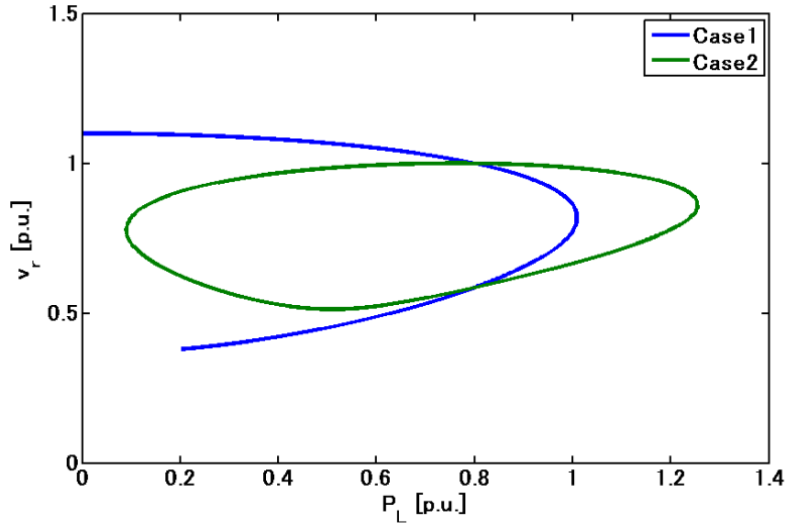


図 4.3 太陽光発電大量導入時の系統の PV 曲線

PCS の電流制限を考慮した時の PV 曲線について述べる。図 4.4 は、表 4.3 の条件で導出した PV 曲線である。Case1 は太陽光発電を定電力特性として考慮しており、Case2 では定 P-一定 I 切り替え特性として考慮している。PV 曲線の Case2 の電圧の高い領域は太陽光発電が定電力特性を示すため、Case1 と一致している。電圧の低い領域では太陽光発電は定電流特性を示している。左側ノーズ端付近では、太陽光発電の出力特性の切り替わりのため特性が大幅に変化するが、右側ノーズ端付近での特性の違いは大きくない。

表 4.3 図 4.4 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$P_{PV}$	1.6 p.u.	1.6 p.u.
$i_{PV,th}$	—	2.0 p.u.

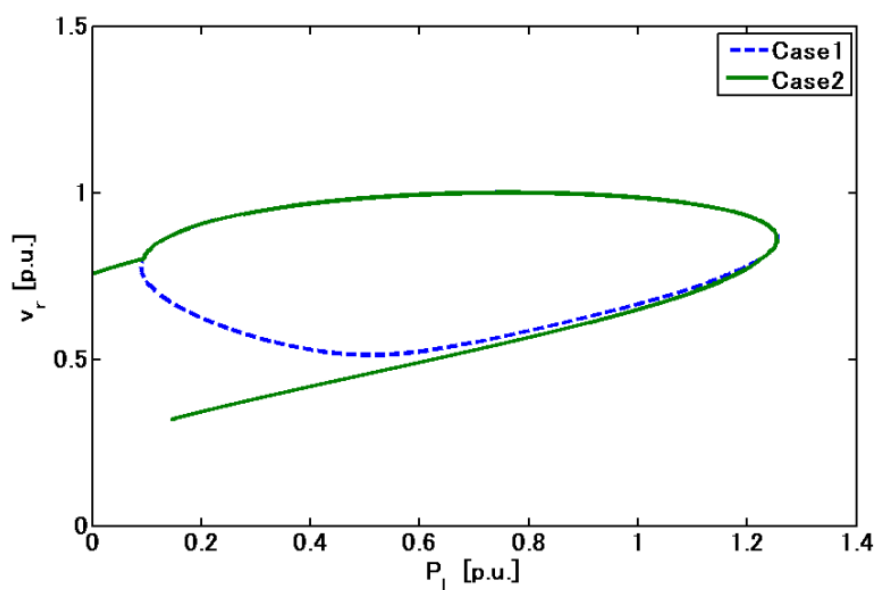


図 4.4 PCS の電流制限を考慮した PV 曲線

3.4 で述べたように、電流制限値が大きいほど定電力特性と定電流特性の切替電圧が低くなり、電流制限値が小さくなるほど切替電圧が高くなる。図 4.5 は、表 4.4 の条件で導出した PV 曲線である。図 4.5 においても、電流制限値が大きいほど切替電圧が低くなり、Case2～Case4 では、それぞれ 0.8 p.u. , 0.73p.u. , 0.67 p.u. となっている。また切替電圧が低くなるほど、定電流特性を示す領域の電圧は低くなる。

表 4.4 図 4.5 の条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.4 p.u.	0.4 p.u.	0.4 p.u.
$P_{PV}$	1.6 p.u.	1.6 p.u.	1.6 p.u.	1.6 p.u.
$i_{PV,th}$	—	2.0 p.u.	2.2 p.u.	2.4 p.u.

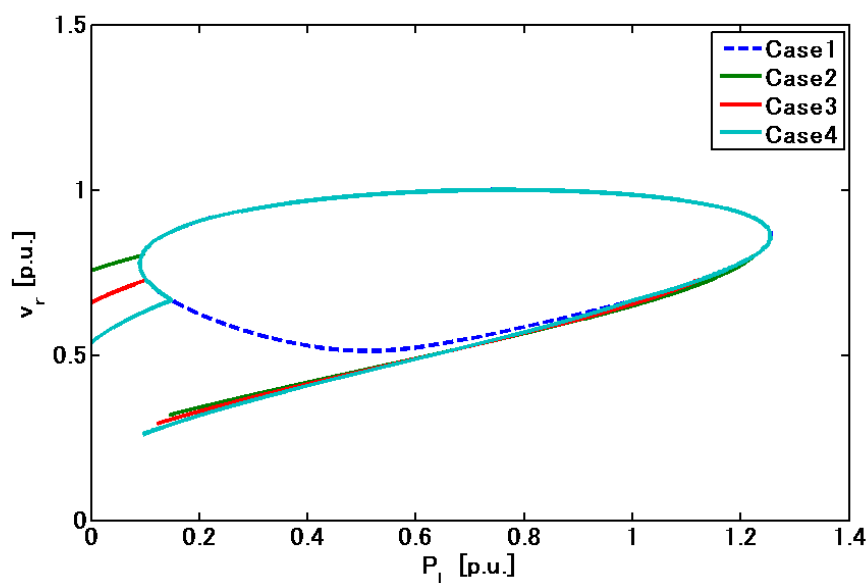


図 4.5 電流制限値と PV 曲線

第 5 章で想定する擾乱は、負荷変動、太陽光発電出力変動、送電線事故である。負荷変動は、誘導機負荷の機械的出力を変化させることで模擬することができる。太陽光発電出力変動は出力電力を変化させることで模擬する。上記のように、出力電力が増加すると PV 曲線は右へ推移し、出力電力が減少すると PV 曲線は左へ推移する傾向がある。

送電線事故が起こった際、事故の波及を防ぐため、事故点付近の送電線の一部を系統から解列させることがある。送電線の解列は送電線インピーダンスの増加によって表現できる。本論文では、送電線事故を送電線インピーダンスの増加によって模擬する。送電線インピーダンスの増加による PV 曲線の変化は以下の通りである。

図 4.6 の PV 曲線は、表 4.5 の条件で導出したものである。Case2 の方が Case1 よりも送電線インピーダンスが大きい。送電線インピーダンスが増加すると PV 曲線は縮小する傾向がある。Case1 では、太陽光発電を 1.2 p.u. と図 4.4 や図 4.5 での 1.6 p.u. より減少させているため、図 4.6 に示すように、インピーダンス増加前では負荷消費電力が正の領域に PV 曲線の左側ノーズ端が現れない。しかし、インピーダンスを 0.4 p.u. から 0.6 p.u. へ増加させると左側ノーズ端が現れる (Case2) 場合がある。

表 4.5 図 4.6 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.6 p.u.
$P_{PV}$	1.2 p.u.	1.2 p.u.

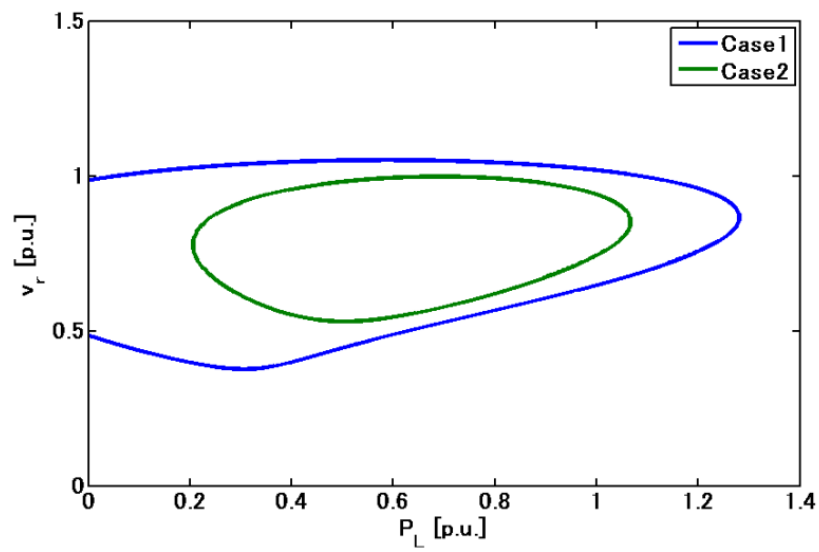


図 4.6 送電線インピーダンスが増加した時の PV 曲線の変化

図 4.7 に PCS の電流制限を考慮した場合を示す。図 4.7 は、表 4.6 の条件から導出した PV 曲線である。送電線インピーダンスが増加した時、PV 曲線が縮小する傾向があることは、PCS の電流制限を考慮しても変わらない。

表 4.6 図 4.7 の条件

	Case1	Case2
$v_s$	1.1 p.u.	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.	0.6 p.u.
$P_{PV}$	1.2 p.u.	1.2 p.u.
$i_{PV,th}$	1.6 p.u.	1.6 p.u.

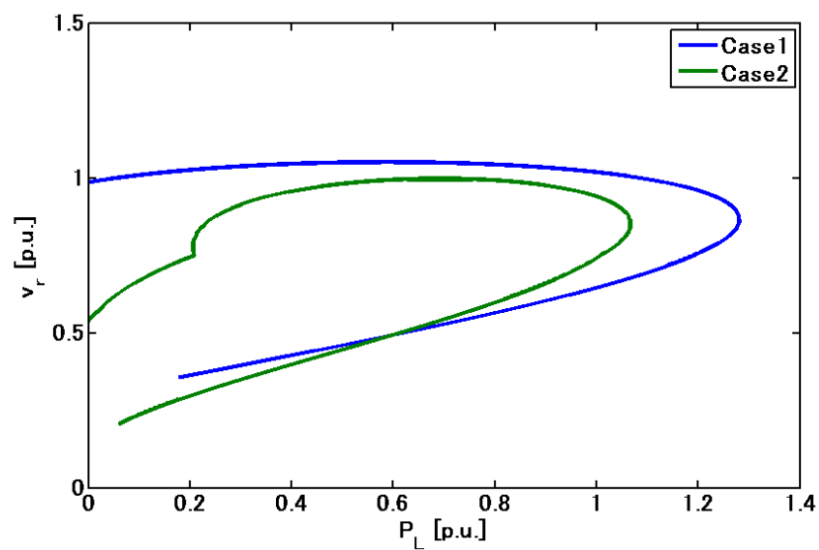


図 4.7 送電線インピーダンスが増加した時の PV 曲線 (PCS の電流制限を考慮した場合)

## 4.4 等すべり曲線

4.2 で導出した PV 曲線は図 4.2 の系統で静的に成り立つ(4.2)～(4.6)を解いて得られた動作点の集合であり、誘導機負荷の動特性である(4.1)については考慮されていない。PV 曲線上の動作点は、誘導機負荷の動特性によるすべりの変化によって、PV 曲線上を推移する。この動作点の推移に着目することで安定性を解析することができる。このような安定性の解析の際、動作点群の集合である PV 曲線だけでなく、あるすべりでの負荷消費電力と負荷端電圧の関係を示す曲線（等すべり曲線）を用いると、動作点の推移を把握しやすい。本節では等すべり曲線の導入を行う。

誘導機負荷の消費電力 $P_L$ は(4.5)のように負荷端電圧 $v_r$ の二次式で与えられ、例えば、すべりが 0.05 の場合の等すべり曲線は図 4.8 のように示すことができる。また、この等すべり曲線と PV 曲線の交点は、すべりが 0.05 の時の動作点となる。

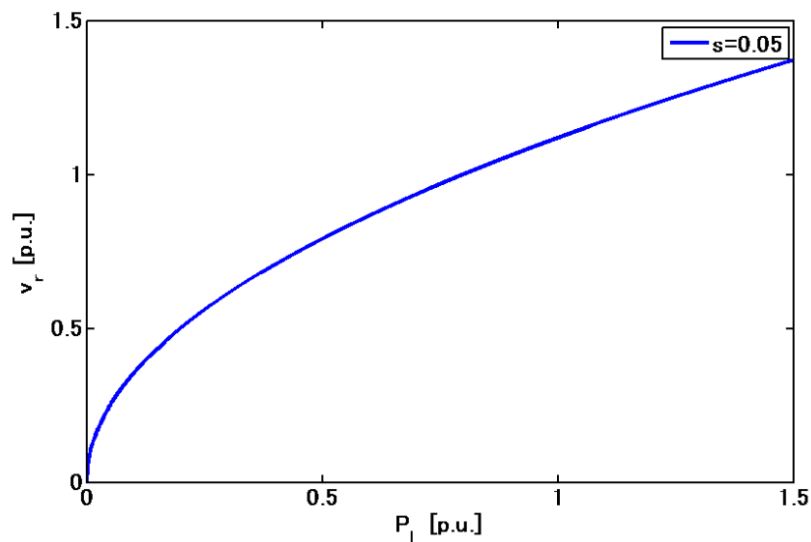


図 4.8  $s=0.05$  の時の等すべり曲線

すべりが変化すると $v_r^2$ の係数が変化して、等すべり曲線も変化する。すべりの変化と等すべり曲線の変化の対応関係について考察する。

負荷端電圧 $v_r$ を一定とし、(4.5)より導出したすべりと負荷消費電力の関係を図 4.9 に示す。破線より右の領域では、すべりが増加（減速）すると負荷消費電力が増加し、すべりが減少（加速）すると負荷消費電力が減少する。破線より左側の領域では、すべりが増加（減速）すると負荷消費電力が減少し、すべりが減少（加速）すると負荷消費電力が増加する。

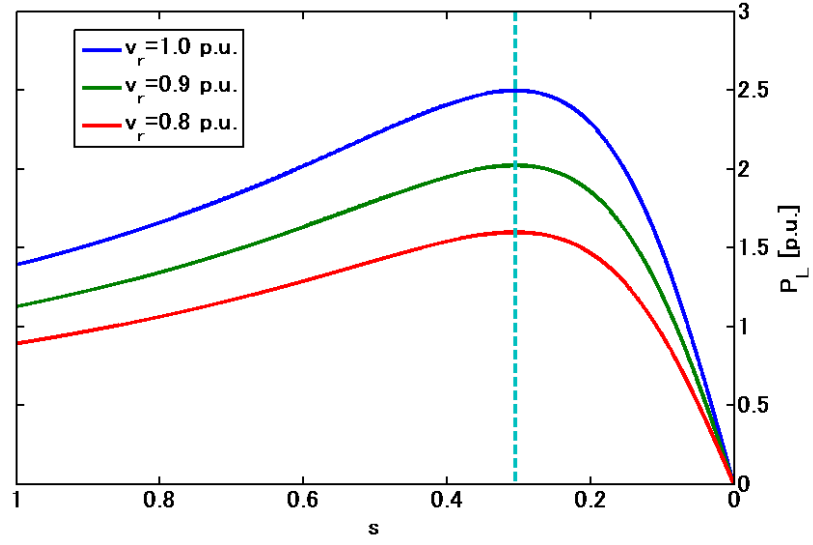


図 4.9 誘導機負荷のすべりと消費電力の関係

図 4.9 の破線で示された閾値は以下のようにして求められる。(4.5) の  $v_r^2$  の係数  $\beta$  を  $s$  について微分すると(4.15) が得られる。(4.15) から、すべりが  $\frac{r_{IM}}{x_{IM}}$  より大きくなる時  $\frac{d\beta}{ds}$  は負であり、図 4.9 の破線より左側の領域を示す。一方、 $\frac{r_{IM}}{x_{IM}}$  より小さくなる時  $\frac{d\beta}{ds}$  は正となり、破線より右側の領域を示す。

$$\frac{d\beta}{ds} = \frac{r_{IM}(r_{IM}^2 - s^2 x_{IM}^2)}{(r_{IM}^2 + s^2 x_{IM}^2)^2} \quad (4.15)$$

すべりが変化した時の等すべり曲線の推移について検討する。

すべりが  $\frac{r_{IM}}{x_{IM}}$  より小さい場合、すべりが増大（減速）すると(4.5) の  $v_r^2$  の係数が大きくなり、すべりが減少（加速）すると小さくなる。そのため、図 4.10 に示されるようにすべりが増大（減速）すれば、等すべり曲線は右下へ推移していき、すべりが減少（加速）すれば、負荷特性は左上へ推移する。

図 4.10 は図 4.9 の破線より右側の領域に対応している。つまり、すべりが増加すれば、負荷消費電力は増加し、すべりが減少すれば、負荷消費電力は減少する。

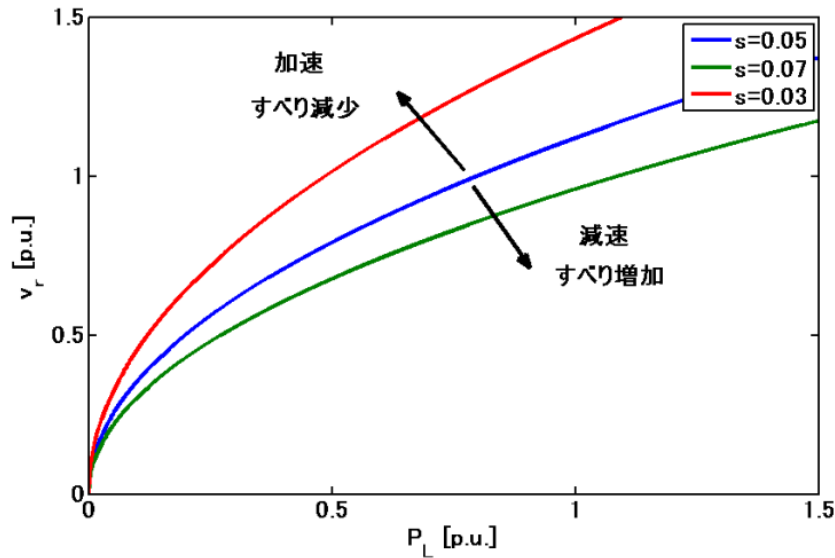


図 4.10 すべりと等すべり曲線の関係（すべりが $\frac{r_{IM}}{x_{IM}}$ より小さい場合）

すべりが $\frac{r_{IM}}{x_{IM}}$ より大きい場合、すべりが変化した時の等すべり曲線の推移は、図 4.10 と反対の特性となる。

## 4.5 誘導機負荷の動特性

誘導機負荷の動特性を示す(4.1)によると、右辺第一項( $P_m/(1-s)$ )（以降、見かけの機械的出力）が第二項( $P_e$ )よりも大きくなれば、すべりは増加する。逆に右辺第一項が第二項よりも小さくなれば、すべりは減少する。第二項は電氣的入力であり、例えば、電圧が低下すれば減少する。この時、すべりは増加し、図 4.9 に示すように電氣的入力も増大していく。このすべりの増加は、見かけの機械的出力と電氣的入力が等しくなって落ち着く。しかし、電圧の低下量が大きく、電氣的入力の最大値を見かけの機械的出力を超えると、すべりが増加（誘導機負荷が減速）し続け、誘導機負荷は運転を停止してしまう。

動作点及び等すべり曲線の推移は、すべりに依存するため、(4.1)の右辺第一項と第二項の大小関係によって決まる。図 4.11 に誘導機負荷の動特性により、動作点及び等すべり曲線が推移する様子を示す。PV 曲線と等すべり曲線の交点が動作点であり、負荷の消費電力はこの点で決まる。この負荷消費電力は誘導機負荷の電氣的入力と同じであり、(4.1)の右辺第二項とも同義である。

機械的出力( $P_m$ )を大きくして、右辺第一項を右辺第二項より大きくした直後の右辺第一項の値を破線で示すと図 4.11 のように動作点の右方向に位置する。これはすべりが変化する前の見かけの機械的出力である。この時、見かけの機械的出力が電氣的入力よりも大きいため、すべりが増加し、等すべり曲線は図 4.11 の緑色の実線の矢印で示されるように右下へ推移していく。動作点も、等すべり曲線の変化に伴って PV 曲線上を右へ推移していく。見かけの機械的出力もすべりに依存するが、すべりが小さい場合、その変化は小さい。

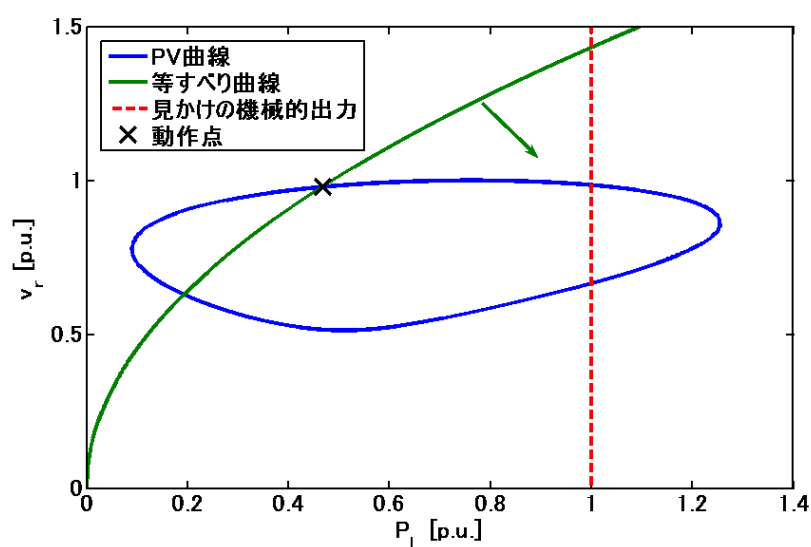


図 4.11 動作点及び等すべり曲線の推移

見かけの機械的出力と動作点が一致すると、すべりの変化が無くなり、動作点と等すべり曲線の推移も終わる。図 4.12 に動作点と等すべり曲線の推移が終了した後の様子を示す。PV 曲線，等すべり曲線，見かけの機械的出力の三線が交わった状態になると，誘導機負荷の動特性によるすべりの変化が無くなるため，動作点はこの点で安定となる。

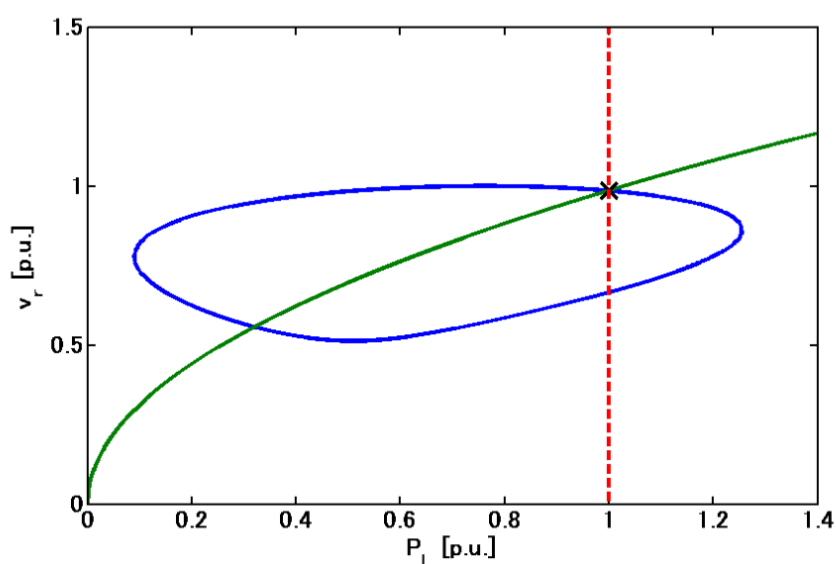


図 4.12 動作点の安定点

以降，PV 曲線，等すべり曲線，見かけの機械的出力を用いて安定性について解析する際，それぞれの曲線を，青色の実線，緑色の実線，赤色の破線で示す。

## 4.6 右側ノーズ端による電圧崩壊現象

本節では右側ノーズ端による電圧崩壊現象について PV 曲線を用いて検討する。

図 4.13 は表 4.7 の条件で導出した PV 曲線，すべりが 0.06 の時の等すべり曲線，機械的出力が 1.2 p.u. ですべりが 0.06 の時  $s$  の見かけの機械的出力を示している。図 4.13 のように，見かけの機械的出力が PV 曲線の右側に位置する場合，右側ノーズ端による電圧崩壊現象が生じる。

電圧崩壊に至る過程について述べる。見かけの機械的出力が動作点の右側にあるため，すべりは増加し，等すべり曲線は緑色の実線の矢印の方向である右下へ推移していき，最終的に誘導機負荷は運転停止に至る。等すべり曲線の推移につれて，動作点は黒色の実線の矢印に示すように，はじめ右へ推移し，右側ノーズ端を推移した後，左下へと推移していく。右側ノーズ端付近にすべりがある場合，すべりは大きいため，赤色の破線の矢印で示すように，すべりの増加に伴って見かけの機械的出力は右へ推移する。動作点の推移から，電圧崩壊に至る過程で，負荷端電圧は減少を続け，負荷消費電力は一度増加した後に減少に転じることが解る。

表 4.7 図 4.13, 図 4.14 の PV 曲線の条件

$v_s$	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.
$P_{PV}$	1.6 p.u.

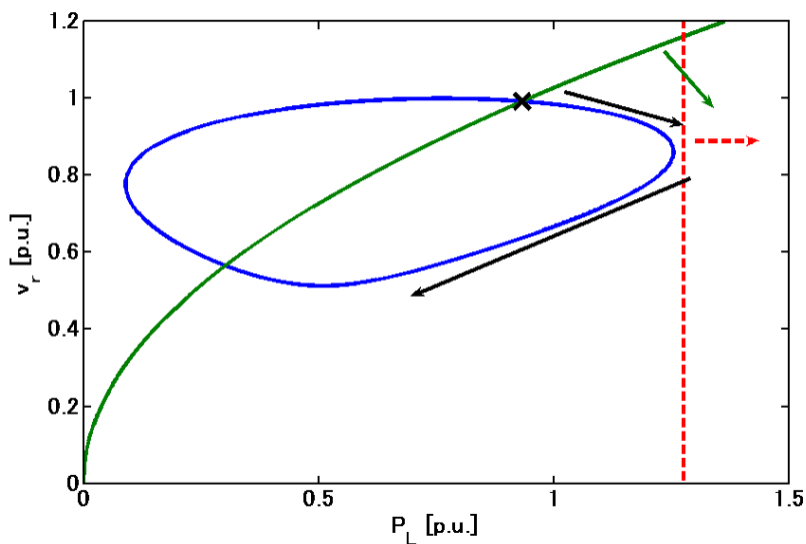


図 4.13 右側ノーズ端の電圧不安定現象

右側ノーズ端による電圧崩壊現象は負荷（見かけの機械的出力）が PV 曲線の右側ノーズ端より右側に位置する時生じる。したがって負荷消費電力が大きい時に生じやすい。このような現象の対処方法として負荷の上限に制限を設けることが考えられる。

## 4.7 左側ノーズ端による系統崩壊現象

本節では左側ノーズ端による系統崩壊現象について検討する。

表 4.7 の条件で導出した PV 曲線，すべりが 0.03 の時の等すべり曲線，機械的出力が 0.05 p.u. ですべりが 0.03 の時の見かけの機械的出力を図 4.14 に示す。図 4.14 のように見かけの機械的出力が PV 曲線の左側に位置するとき左側ノーズ端による系統崩壊現象が生じる。

系統崩壊に至る過程について述べる。見かけの機械的出力が動作点の左側にあるため，すべりは減少し，等すべり曲線は緑色の実線の矢印の方向である左上へ推移していく。等すべり曲線の推移につれて，動作点は黒色の実線の矢印に示すように，左へ推移していき，PV 曲線と等すべり曲線の交点（動作点）が無くなる時，系統崩壊に至る。見かけの機械的出力は，すべりが小さいため，ほとんど変化しない。

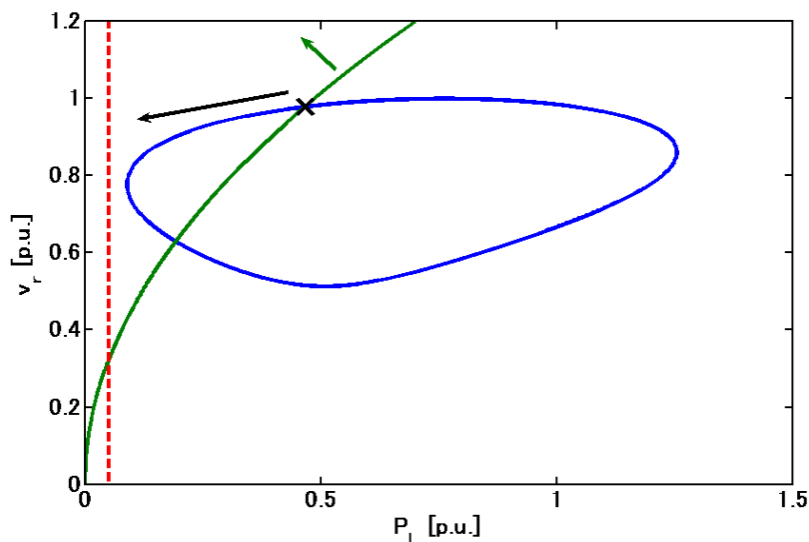


図 4.14 PV 曲線（左側ノーズ端の系統崩壊現象）

ここで，右側ノーズ端の不安定現象は「電圧崩壊現象」，左側ノーズ端の不安定現象は「系統崩壊現象」と区別した。電圧崩壊現象は，動作点が推移していき，その結果として電圧が低下し続ける現象である。系統崩壊現象は，動作点を持たなくなったことにより，系統を維持できなくなる現象である。

系統崩壊現象において，動作点を持たなくなった時の振る舞いについて考察する。太陽光発電の出力特性を定電力特性と考えているため，出力電力を一定とする制御が行われる。左側ノーズ端付近の動作点が左へ推移すると，負荷端電圧が低下して，太陽光発電は出力電流を増加させる。出力電流が増加すると，送電線電流も増加する。左側ノーズ端付近では逆潮流が大きい状態であるため，3.3 から，送電線電流が増加して逆潮流が増加すると負荷端電圧はさらに降下する。

負荷端電圧の低下と太陽光発電出力電流の増加の結果，元出力電力に回復すれば，動作点は安定となる。この安定となった動作点は PV 曲線上に存在することになる。一方，元出力電力に回復することなく，負荷端電圧の低下と太陽光発電出力電流の増加が進捗すれば，系統崩壊に至る。このことは動作点を持たなくなったことに

相当する。太陽光発電の定電力制御によって系統崩壊に至る過程については、太陽光発電の動特性を考慮する必要があるため、第 6 章において検証する。

最後に左側ノーズ端による系統崩壊現象が生じる条件について考える。負荷消費電力が正の領域に PV 曲線の左側ノーズ端が現れるのは、図 4.3 で示したように太陽光発電出力が大きい時である。負荷消費電力が正の領域に左側ノーズ端が現れない時であっても、図 4.6 で示したように送電線の開放による送電線インピーダンスの増加などで、左側ノーズ端が現れる可能性がある。この場合も太陽光発電出力が大きい時に生じやすい。また左側ノーズ端による系統崩壊現象は見かけの機械的出力が PV 曲線の左側ノーズ端より左側に位置する時に生じる。したがって、左側ノーズ端による系統崩壊現象は、太陽光発電出力が大きく、負荷消費電力が小さく、全体としての逆潮流が大きい時に生じやすい。このような現象の対処方法として、太陽光発電の出力抑制や負荷の下限に制約を設けることが考えられる。

## 4.8 PCS の電流制限を考慮した時の電圧安定性

4.7 では、左側ノーズ端によって系統崩壊が生じうることが示された。系統崩壊に至る過程で、太陽光発電出力電流が増加していくが、実際には PCS によって電流制限が行われると考えられる。本節では 3.4 と同様に電圧低下時に過電流防止を目的として PCS が電流制限を行うことを考慮した場合の安定性について検討する。

図 4.15 は表 4.8 で導出した PV 曲線である。太陽光発電は定 P 一定 I 切り替え特性である。3.4 で述べたように電圧が高い領域では太陽光発電は定電力特性で図 4.13、図 4.14 の PV 曲線と一致し、電圧が低い領域では定電流特性の PV 曲線が描かれる。左側ノーズ端について、太陽光発電が定電力特性の場合、左側ノーズ端より見かけの機械的出力が小さくなると系統崩壊に至るが、定 P 一定 I 切り替え特性の場合、安定な動作点を持つ。しかしながら、動作点が左側ノーズ端より左に推移すると負荷端電圧は低下してしまう。

表 4.8 図 4.15 の条件

$v_s$	1.1 p.u.
$x$	0.4 p.u.
$P_{PV}$	1.6 p.u.
$i_{PV,th}$	2.0 p.u.

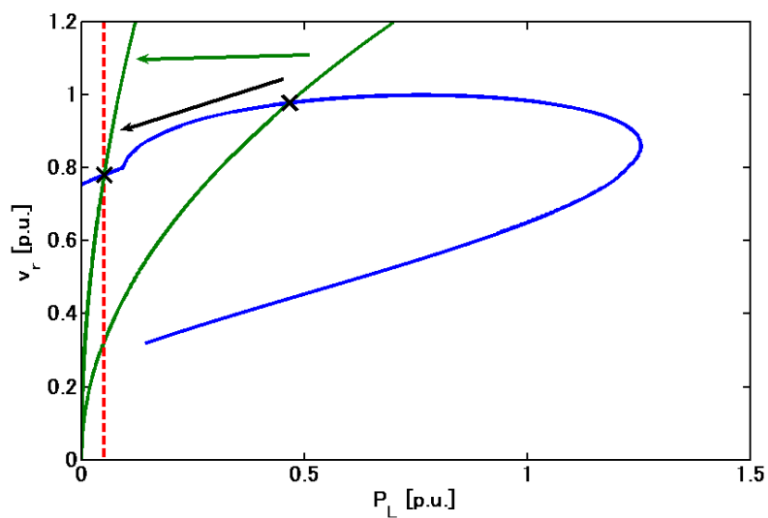


図 4.15 PV 曲線 (PCS の電流制御を考慮した場合の安定性)

4.3 で述べたように電流制限値を大きくするほど、定電力特性と定電流特性の切替電圧が低くなり、PV 曲線の太陽光発電が定電流特性を示す領域で電圧が低くなる。したがって図 4.16 に示すように、電流制限値が大きい場合、左側ノーズ端より右から左へと動作点が移る際、電圧が大きく低下する。電流制限値が小さいほど左側ノーズ端を推移するときの電圧低下は抑えられる。

電流制限値が大きいということは、電流制限値までの出力電流の余裕が大きいことと同義である。出力電流の余裕が大きい時とはすなわち、出力電力が定格電力に比べて小さい時である。したがって、太陽光発電が大量に導入されていて、曇りなどで出力電力が小さい時に、動作点が左側ノーズ端を推移すれば、大きな電圧低下を起こしやすくなる。

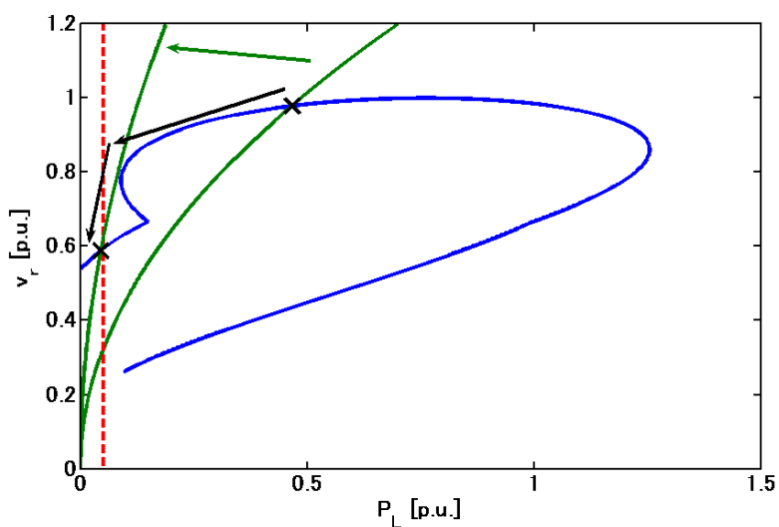


図 4.16 PV 曲線 (太陽光発電が定電流特性に移行後、電圧が急激に低下する例)

PCS の電流制限を考慮すれば、左側ノーズ端による系統崩壊現象は生じないが、動作点が **PV** 曲線の左側ノーズ端を右から左へ推移するとき負荷端電圧は低下する。特に電流制限値が大きい場合、電圧の低下は大きくなる傾向がある。

## 第5章 擾乱発生時の安定性解析

本章では、第4章での議論を踏まえ、動的シミュレーションを用いて安定性解析を行う。動的シミュレーションの方法については附録Bを参照されたい。5.1では、負荷が変動した時に発生しうる不安定現象について解析した。5.2では、太陽光発電出力が変化した際に生じうる不安定現象について解析した。5.3では、送電線事故によって系統の送電能力が低下した際に起こりうる不安定現象について解析した。5.4では、系統の擾乱によって太陽光発電が脱落、及び復帰することが、安定性へどのような影響を与えるか解析した。

### 5.1 擾乱発生時の不安定現象の解析例1（負荷変動）

#### (1) 右側ノーズ端付近での負荷増加による電圧崩壊現象

右側ノーズ端付近で負荷変動がある場合を想定する。太陽光発電は定P一定I切り替え特性を考える。表5.1のように初期条件があり、時間time=1.0[s]で誘導機負荷の機械的出力 $P_m$ が1.1 p.u.に増加することを想定し、動的シミュレーションを行った。負荷端電圧、負荷消費電力、太陽光発電出力電力、太陽光発電出力電流の時間推移を図5.1に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図5.2に示す。また動作点の推移を図5.3に示す。動作点は黒丸で示しているが、図5.6では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

4.6で述べたように負荷が増加する、つまり誘導機負荷の機械的出力が増加すると見かけの機械的出力( $P_m/(1-s)$ )が右へ推移し（図5.3の赤色の破線の矢印）、すべりが増大する。すべりの増大により等すべり曲線が右下へ推移し（図5.3の緑色の実線の矢印）、それに伴って動作点は右下へ推移していく（図5.3の黒色の実線の矢印）。結果として、見かけの機械的出力と電氣的入力等しくなる点で安定となり、等すべり曲線と動作点の推移は落ち着く。なお、すべりの増加に伴って、見かけの機械的出力は右へ推移するが、図5.3では、すべりの増加が小さいため区別はつかない。

図5.1を見ると、負荷端電圧は若干低下するが、太陽光発電の出力電力は一定である。太陽光発電出力電流は負荷端電圧が低下しているため、若干増加する。図5.2を見ると、誘導機負荷のすべりは若干増加して落ち着く。

表 5.1 初期条件（右側ノーズ端付近での負荷増加）

$v_s$	1.1 p.u.	$P_{PV}$	1.6 p.u.
$v_r$	0.9851 p.u.	$i_{PV}$	1.6242 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0658
$P_L$	1.0 p.u.	$P_m$	0.9342 p.u.
$Q_L$	0.2157 p.u.	$i_{PV,th}$	2.0 p.u.

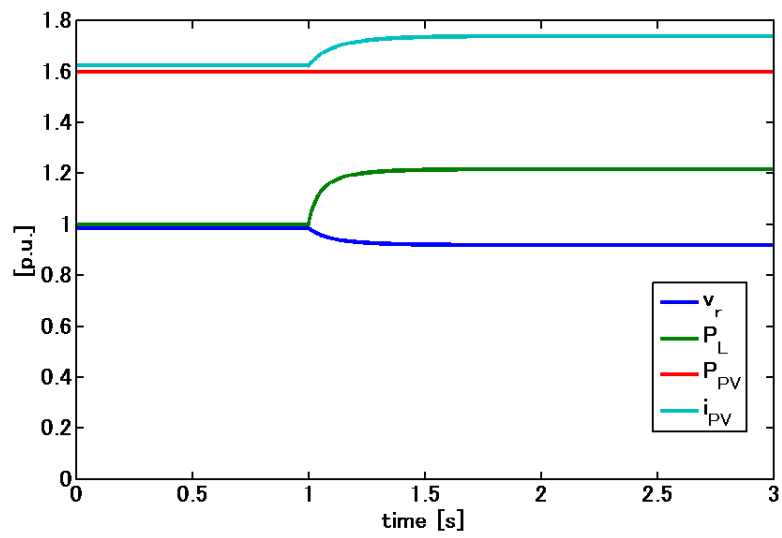


図 5.1 各諸量の時間推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：安定な場合）

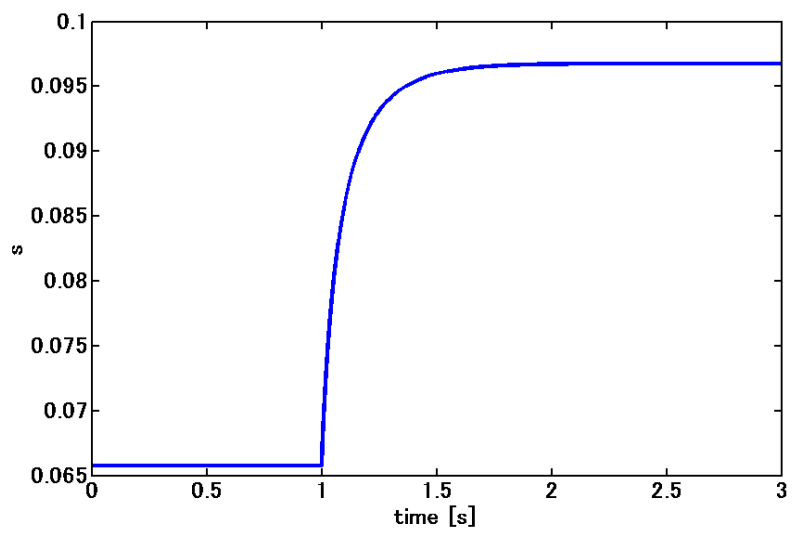


図 5.2 すべりの時間推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：安定な場合）

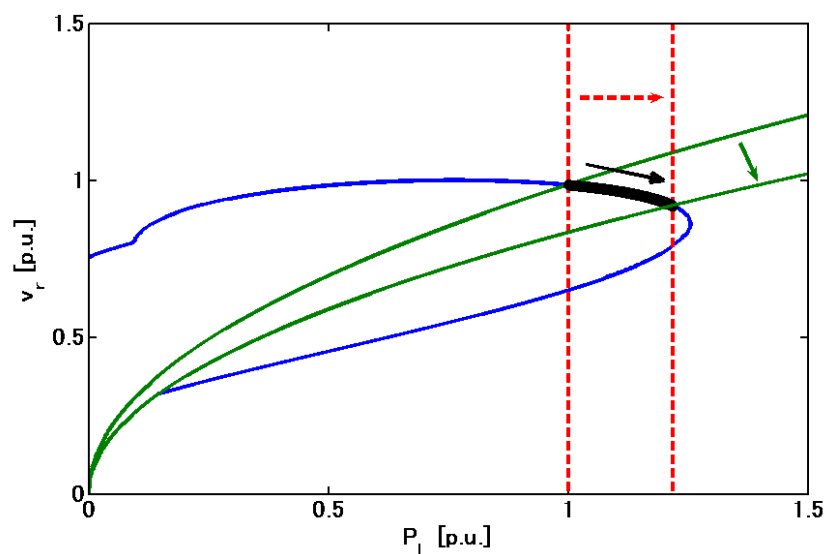


図 5.3 動作点の推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：安定な場合）

次に、機械的出力を 1.2 p.u. まで増加させた結果を、図 5.4、図 5.5、図 5.6 に示す。図 5.6 では、機械的出力が増加したので、すべりが増加し、等すべり曲線は右下へ推移するのは安定な場合と同じである。しかし、機械的出力の増加が大きいと、見かけの機械的出力が PV 曲線の右側ノーズ端より右へ位置し、すべりの増加が止まらない。このため、動作点は右下へ推移した後、PV 曲線の右側ノーズ端を推移して左下へと推移していき、電圧崩壊に至る。なお、このようにすべりが大きくなると、見かけの機械的出力 ( $P_m/(1-s)$ ) は右へ推移していくが、図 5.6 では機械的出力の変更による見かけの機械的出力の推移のみを示している。

各諸量の推移（図 5.4）を見ると、負荷端電圧は低下し続ける。負荷消費電力（誘導機負荷の電氣的入力）は一度増加した後、減少に転じる。これは、動作点が右側ノーズ端を推移したことに対応している。太陽光発電電流は増加した後に、2.0 p.u. で電流制限される。出力電力は電流制限されるまで一定であり、電流制限後は負荷端電圧が減少しているため減少する。すべり（図 5.5）は、増加し続ける。

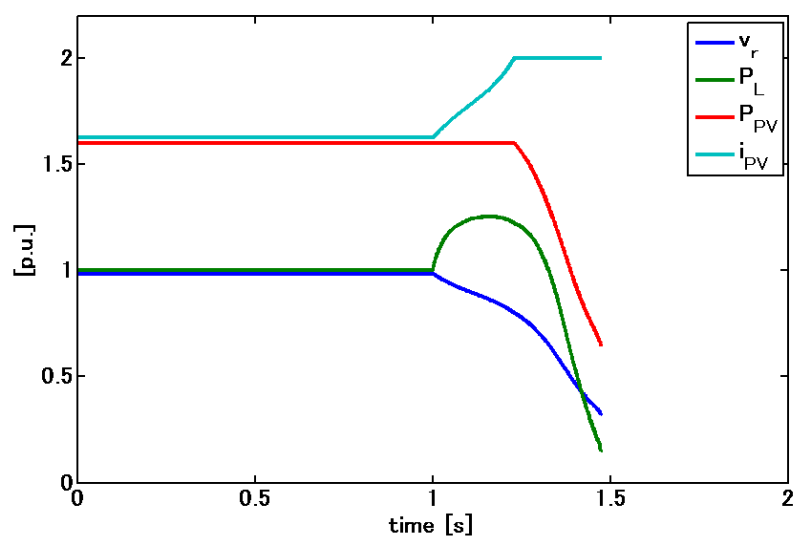


図 5.4 各諸量の時間推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：不安定な場合）

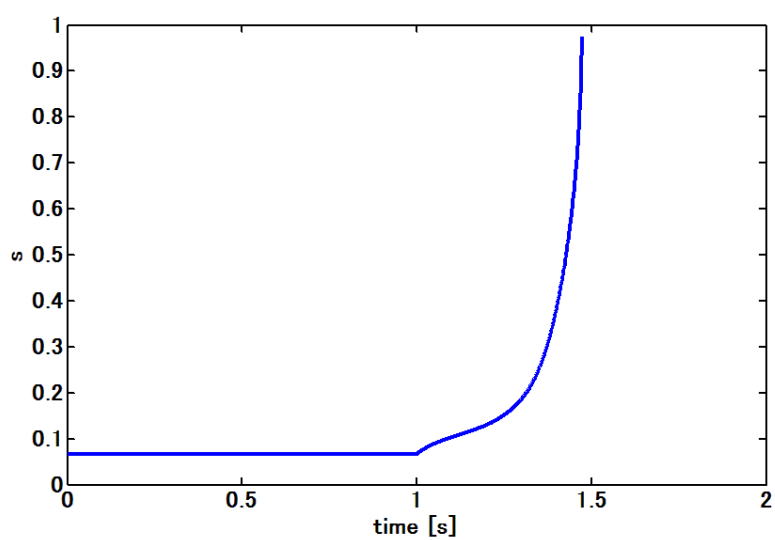


図 5.5 すべりの時間推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：不安定な場合）

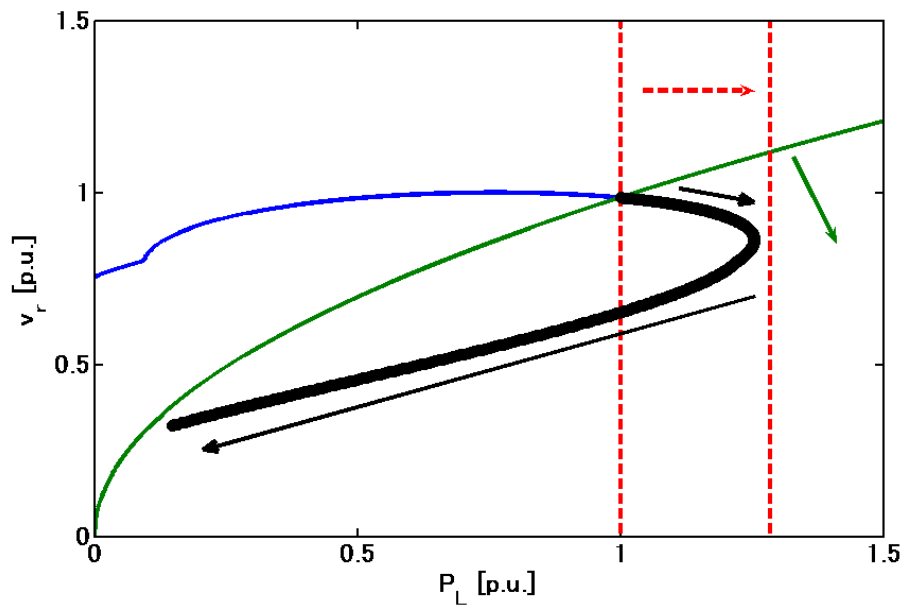


図 5.6 動作点の推移（右側ノーズ端付近での負荷増加：不安定な場合）

## (2) 左側ノーズ端付近での負荷減少

次に左側ノーズ端付近で負荷変動がある場合を想定する。太陽光発電は定  $P$  一定  $I$  切り替え特性を考える。表 5.2 のように初期条件があり，時間  $\text{time}=1.0$  [s] で誘導機負荷の機械的出力  $P_m$  を  $0.05$  p.u. に減少させた条件で動的シミュレーションを行った。各諸量の時間推移を図 5.7 に，すべりの時間推移を図 5.8 に示す。また動作点の推移を図 5.9 に示す。動作点は黒丸で示しているが，図 5.9 では多数の黒丸が重なっており，太い曲線のように示されていることに注意されたい。

4.8 で述べたように負荷が減少する，つまり誘導機負荷の機械的出力が減少すると見かけの機械的出力が左へ推移し（図 5.9 の赤色の破線の矢印），すべりが減少する。すべりの減少により等すべり曲線は左上へと推移し（図 5.9 の緑色の実線の矢印），それに伴って動作点は左へ推移していく（図 5.9 の黒色の実線の矢印）。見かけの機械的出力が，左側ノーズ端よりも左に位置するため，動作点は左側ノーズ端を右から左へ推移する。この時，太陽光発電は定電力特性から定電流特性に移行する。すべりの減少は，動作点と見かけの機械的出力が一致するまで続き，この時安定となる。

各諸量の推移（図 5.7）を見ると，負荷端電圧はやや減少する。負荷消費電力も減少する。太陽光発電出力電流は増加した後， $2.0$  p.u. で電流制限される。出力電力は，電流制限されるまで一定で，電流制限後は減少する。すべり（図 5.8）は，減少した後，約  $1.2$  s で減少が止まる。

表 5.2 初期条件（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値小）

$v_s$	1.175 p.u.	$P_{PV}$	1.8 p.u.
$v_r$	0.9676 p.u.	$i_{PV}$	1.8602 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0131
$P_L$	0.2 p.u.	$P_m$	0.1974 p.u.
$Q_L$	0.0086 p.u.	$i_{PV,th}$	2.0 p.u.

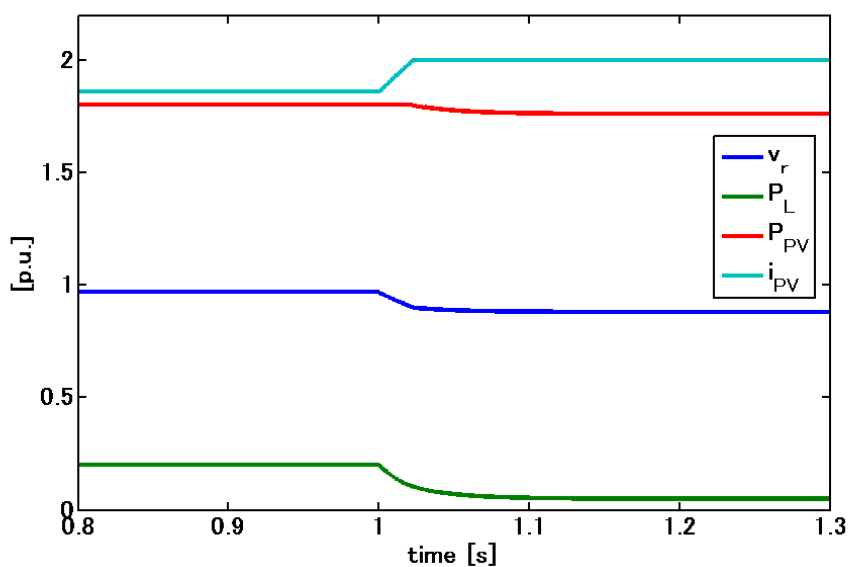


図 5.7 各諸量の時間推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値小）

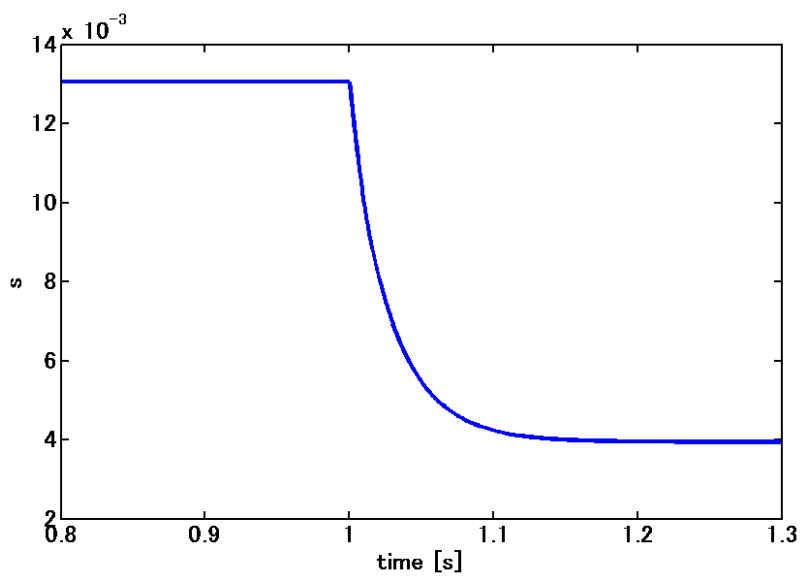


図 5.8 すべりの時間推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値小）

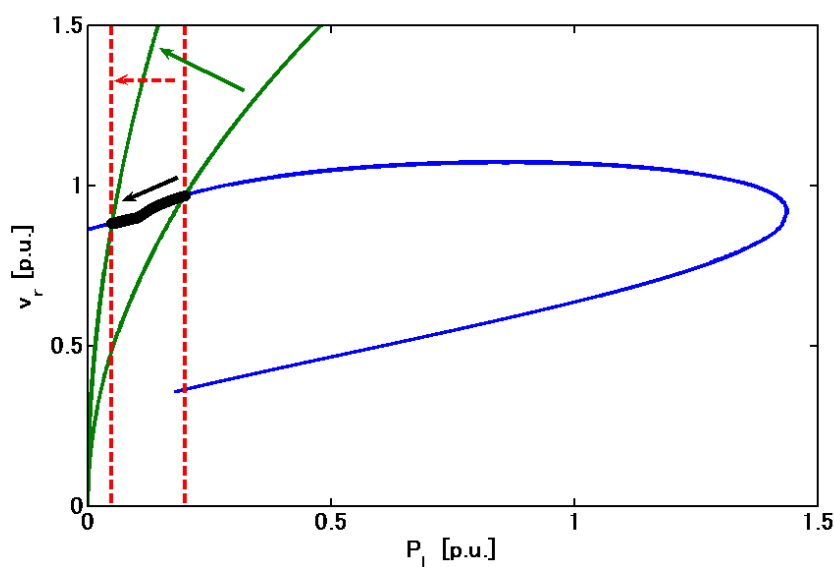


図 5.9 動作点の推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値小：切替電圧 0.9 p.u.）

次に、電流制限値が大きくなった場合についても検討する。4.8 で述べたように、電流制限値を大きくするほど、太陽光発電の定電力特性と定電流特性の切替電圧が低くなり、太陽光発電が定電流特性を示す領域、つまり左側ノーズ端より左の領域の負荷端電圧が低くなる。このため、図 4.5 で示されたように、電流制限値が大きくなるほど、動作点が左側ノーズ端を右から左へ推移する時、負荷端電圧の低下が大きくなる。このことを動的シミュレーションにより確認する。

上記の左側ノーズ端による不安定現象の解析条件の内、電流制限値 $i_{PV,th}$ を 2.4 p.u. に増やして、動的シミュレーションを行った。これは切替電圧が、図 5.7～図 5.9 のケースの 0.9 p.u. から 0.75 p.u. に低下したことになる。シミュレーション結果の、各諸量の時間推移を図 5.10 に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図 5.11 に示す。また動作点の推移を図 5.12 に示す。動作点は黒丸で示しているが、図 5.12 では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

図 5.9 と図 5.12 の PV 曲線を比べると図 5.12 では左側ノーズ端より左側の領域の負荷端電圧が低く、左側ノーズ端を右から左へ推移する際に動作点が大きく左下に推移する。各諸量の時間推移（図 5.10）を見ると、負荷端電圧が緩やかに減少した後、大きく減少する。これは太陽光発電が定電力特性から定電流特性へ移行したことに対応しており、出力電力は一定に推移した後、急激に減少し、出力電流は緩やかに増加した後、急激に増加し、2.4 p.u. で電流制限される。

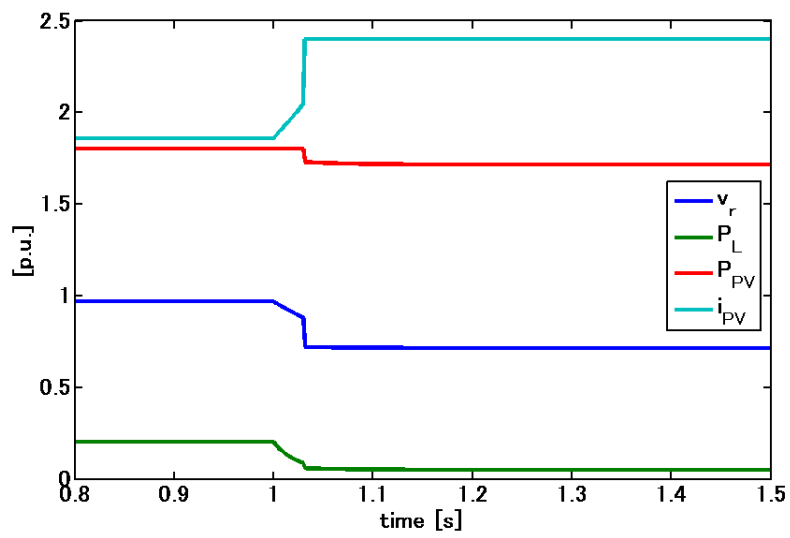


図 5.10 各諸量の時間推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値大）

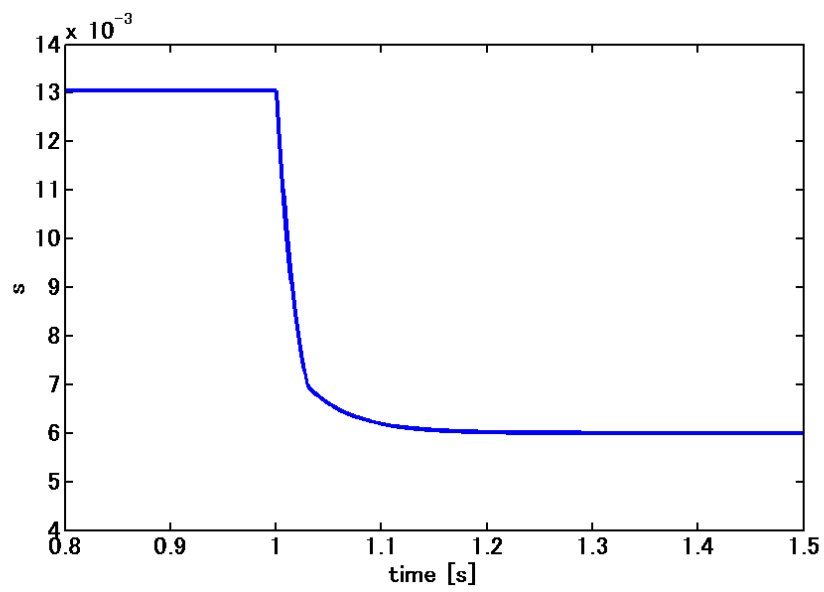


図 5.11 すべりの時間推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値大）

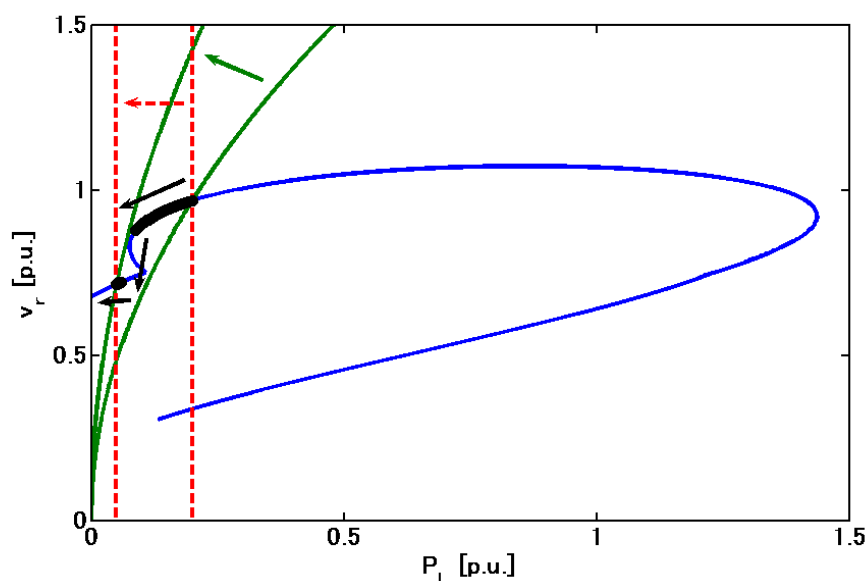


図 5.12 動作点の推移（左側ノーズ端付近での負荷減少：電流制限値大：切替電圧 0.75 p.u.）

## 5.2 擾乱発生時の不安定現象の解析例 2（太陽光発電出力変動）

### (1) 太陽光発電出力減少による電圧崩壊現象

右側ノーズ端付近に動作点がある時、太陽光発電出力が急減する場合について検討する。太陽光発電の出力急減は、太陽光パネルへ雲がかかる場合や、太陽光発電の内部事故時の保護動作の他に、連系系統の電圧や位相の急変などでも引き起こされ、後述の出力増大と比べて短時間に応答することが知られている<sup>[16]</sup>。

表 5.3 のように初期条件があり、時間  $\text{time}=1.0$  [s] で太陽光発電出力電力  $P_{PV}$  を 0.0 p.u. に急減させた条件で動的シミュレーションを行った。太陽光発電として定 P-定 I 切り替え特性を考える。各諸量の時間推移を図 5.13 に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図 5.14 に示す。また動作点の推移を図 5.15 に示す。動作点は黒丸で示しているが、図 5.15 では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

太陽光発電出力が減少すると、PV 曲線は左へ推移する（図 5.15 の青色の実線の矢印）。動作点は、等すべり曲線にそって、縮小した PV 曲線へと推移する（図 5.15 の黒色の実線の矢印 1）。動作点が見かけの機械的出力よりも左に位置するため、すべりは増加して、等すべり曲線は右下へ推移していき（図 5.15 の緑色の実線の矢印）、動作点は右下へ推移していく（図 5.15 の黒色の実線の矢印 2）。右側ノーズ端付近に動作点がある時、すべりの増加に伴って見かけの機械的出力は右へ推移する（図 5.15 の赤色の破線の矢印）。図 5.15 では、動作点が右側ノーズ端を推移するときのすべりの見かけの機械的出力を示している。動作点が右側ノーズ端を推移するときも、見かけの機械的出力よりも左に位置するため、すべりは増加し続け、動作点は左下へと推移し（図 5.15 の黒色の実線の矢印 3）、電圧崩壊に至る。

各諸量の時間推移（図 5.13）について見ると、負荷端電圧は減少を続ける。負荷消費電力は一度増加した後、減少に転じる。これは動作点が右側ノーズ端を推移したことに対応する。太陽光発電は出力電力が 0.0 p.u. となるため、出力電流も 0.0 p.u. となっている。すべり（図 5.14）は増加し続ける。

表 5.3 初期条件 (太陽光発電出力減少)

$v_s$	1.1 p.u.	$P_{PV}$	0.2 p.u.
$v_r$	0.9477 p.u.	$i_{PV}$	0.2110 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0717
$P_L$	1.0 p.u.	$P_m$	0.9283 p.u.
$Q_L$	0.2350 p.u.	$i_{PV,th}$	2.0 p.u.

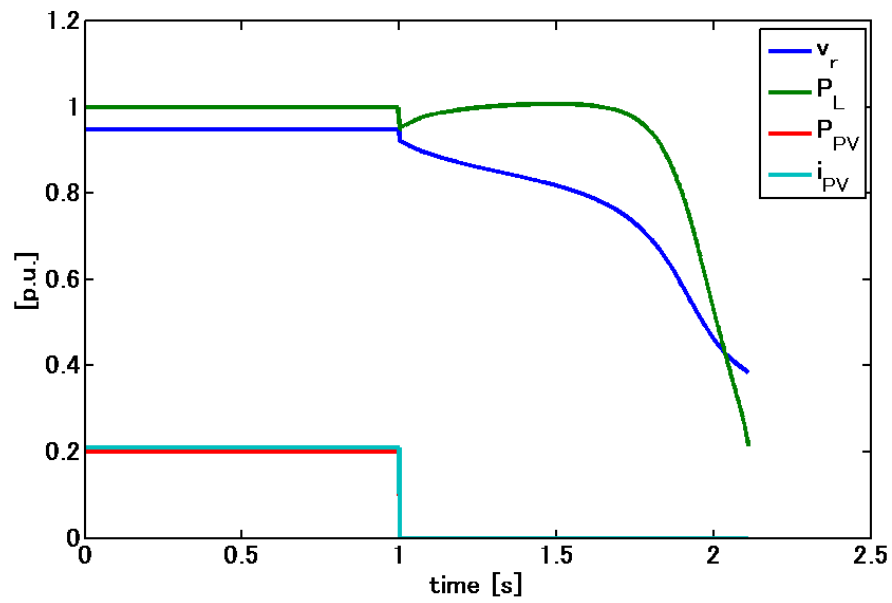


図 5.13 各諸量の時間推移 (太陽光発電出力減少)

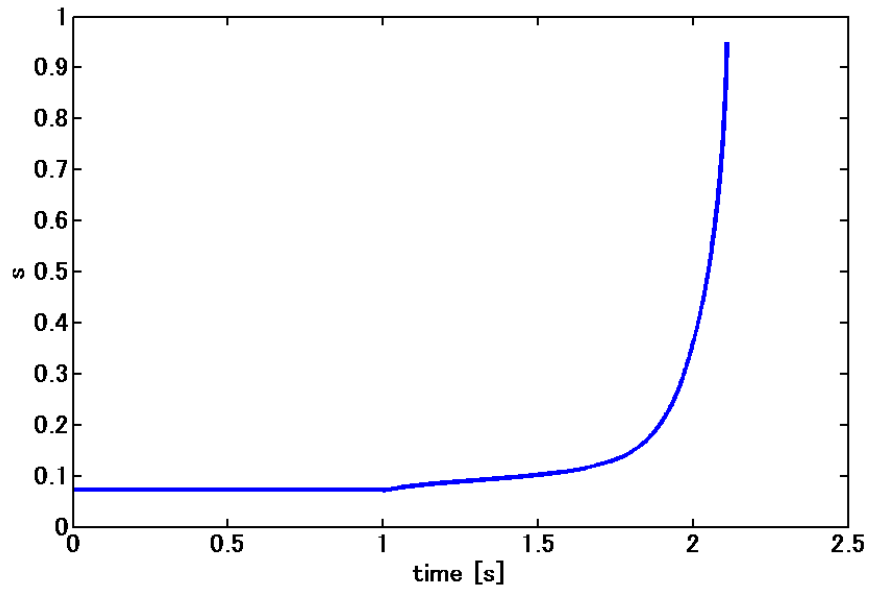


図 5.14 すべりの時間推移（太陽光発電出力減少）

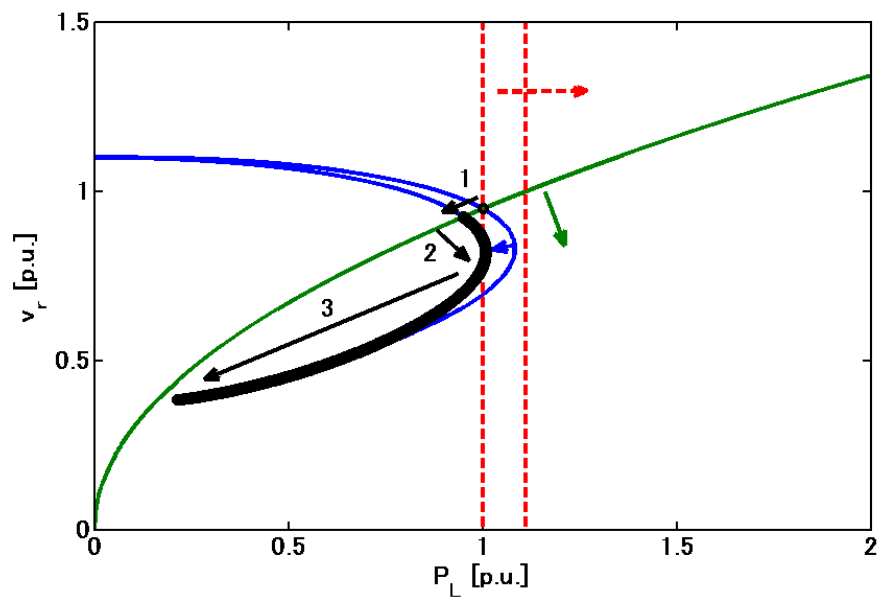


図 5.15 動作点の推移（太陽光発電出力減少）

## (2) 太陽光発電出力増加

次に太陽光発電出力電力が増加していく時に起こる不安定現象について検討する。太陽光発電出力電力の増加は、減少する場合と異なり、緩やかに出力変化すると考えられる。これは太陽光発電出力電力が最大となる運転点に追従させる制御である MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御によって出力が増加すると考えられるから

である。太陽光発電出力が最大となる運転点は日射量や温度によって常に変化するため、MPPT 制御には速い制御は求められず、数分程度で安定する緩やかな制御を行うものと考えられる。

表 5.4 のように初期条件があり、時間  $\text{time}=1.0$  [s] で太陽光発電出力電力  $P_{PV}$  を  $0.01$  p.u./s の割合で  $1.6$  p.u. ままで増加させる条件で動的シミュレーションを行った。太陽光発電は定 P 一定 I 切り替え特性を考えている。各諸量の時間推移を図 5.16 に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図 5.17 に示す。また動作点の推移を図 5.18 に、その動作点の推移する範囲の拡大図を図 5.19 に示す。動作点は黒丸で示しているが、図 5.18 と図 5.19 では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

太陽光発電出力が増加するにつれて PV 曲線は右へ推移していく（図 5.18 の青色の実線の矢印）。PV 曲線の推移につれて、等すべり曲線は右下へ推移し（図 5.19 の緑色の実線の矢印 1）、動作点は見かけの機械的出力上（図 5.19 の赤色の破線）をほぼ真下へ推移する（図 5.19 の黒色の実線の矢印 1）。これは太陽光発電出力電力の増加が遅く、誘導機負荷の動特性が相対的に速く働き、負荷消費電力がほぼ一定のまま動作点が推移するためである。

動作点が左側ノーズ端に達し、PV 曲線が右へ推移すると、動作点は PV 曲線上の太陽光発電が定電力特性を示す領域から定電流特性を示す領域へと推移する（図 5.19 の黒色の実線の矢印 2）。動作点が PV 曲線上の定電流特性を示す領域に移ると、見かけの機械的出力より左に位置するため、すべりが増加して、等すべり曲線は右下へ推移し（図 5.19 の緑色の実線の矢印 2）、動作点は右へ推移する（図 5.19 の黒色の実線の矢印 3）。動作点が見かけの機械的出力と同じになると安定となる。見かけの機械的出力は、すべりが小さいため、ほとんど変わらない。

なお図 5.19 の PV 曲線（青い曲線）の推移を見ると、PV 曲線上の定電流特性を示す領域は太陽光発電出力電力に関わらず共通である。これは PV 曲線の定電流特性を示す領域が同じ電流制限値により導出されるためである。また定電力特性と定電流特性の切替電圧は太陽光発電出力の増加に伴って上昇している。これは、図 3.13 に示されるように電流制限値が一定の時、出力電力が増加すると切替電圧が高くなるためである。

各諸量の時間推移（図 5.16）について見ると、負荷端電圧は緩やかに低下して、約  $27$  s で急激に低下する。これは、動作点が PV 曲線上の太陽光発電が定電力特性を示す領域から定電流特性を示す領域へと推移したことに対応する。負荷消費電力はほぼ一定で推移し、こちらも約  $27$  s でやや減少した後、ほぼもとの電力に戻る。太陽光発電出力電力は  $0.01$  p.u./s の割合で増加するが、約  $27$  s で定電流特性へ移行するため、出力電力はやや減少する。出力電流はゆるやかに増加して、約  $27$  s で急激に増加した後、 $2.2$  p.u. で電流制限される。すべり（図 5.17）は緩やかに増加し、約  $27$  s で急激に増加した後、増加が止まる。

表 5.4 初期条件（太陽光発電出力増加）

$v_s$	1.1 p.u.	$P_{PV}$	1.3 p.u.
$v_r$	0.9721 p.u.	$i_{PV}$	1.3373 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0032
$P_L$	0.05 p.u.	$P_m$	0.0498 p.u.
$Q_L$	0.0005 p.u.	$i_{PV,th}$	2.2 p.u.

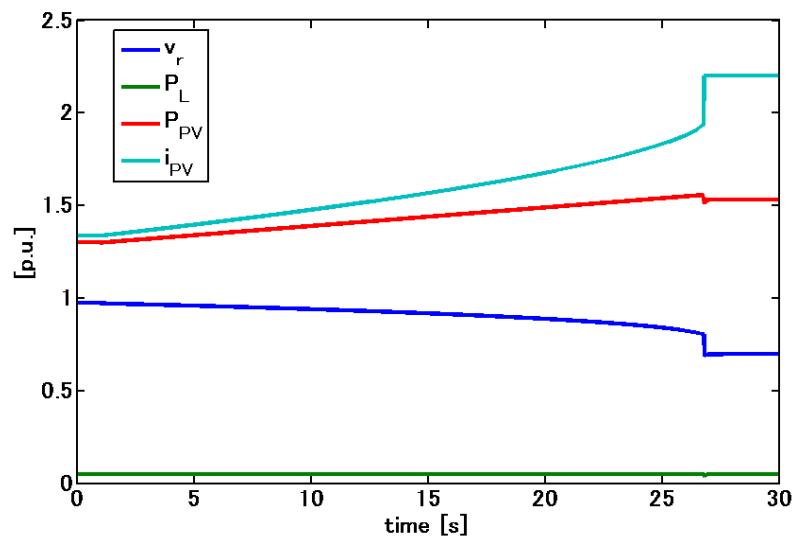


図 5.16 各諸量の時間推移（太陽光発電出力増加）

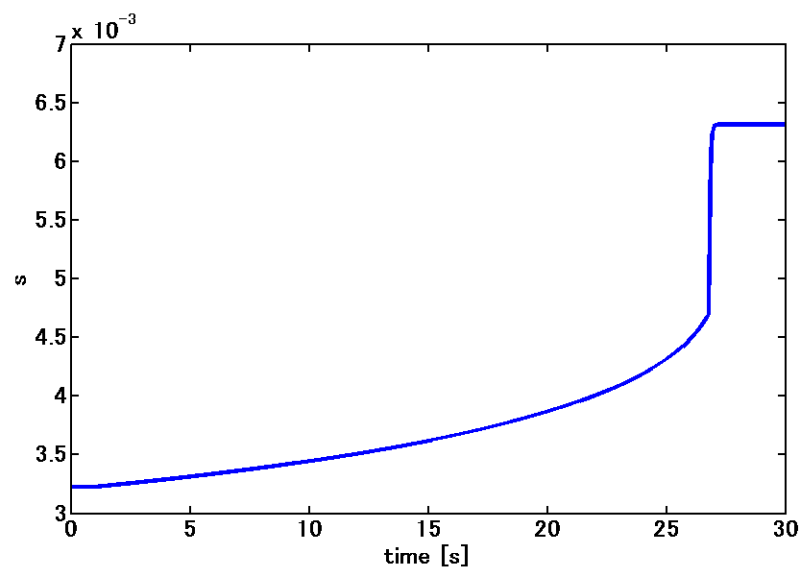


図 5.17 すべりの時間推移（太陽光発電出力増加）

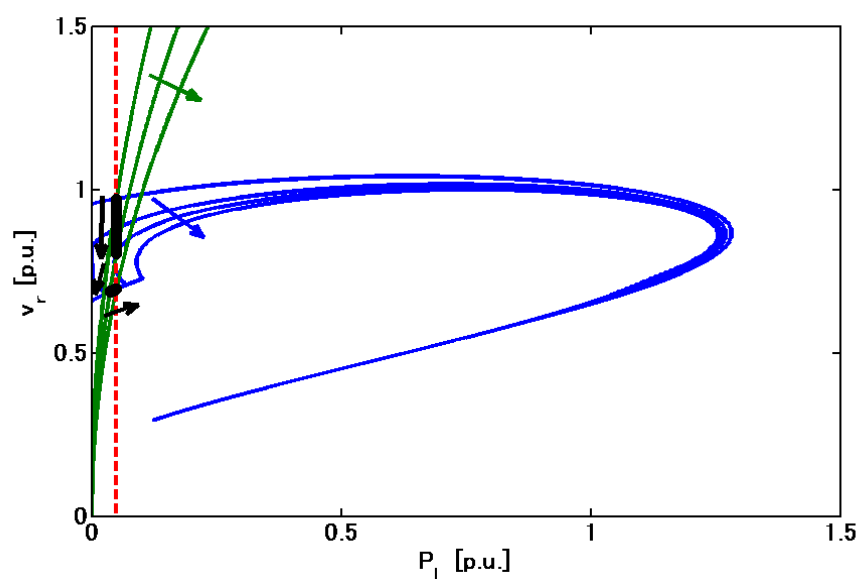


図 5.18 動作点の時間推移（太陽光発電出力増加）

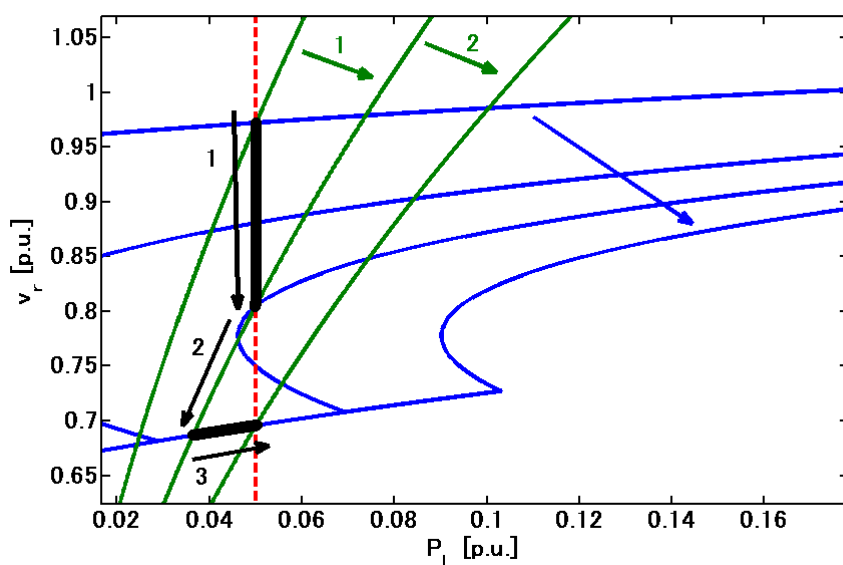


図 5.19 動作点の時間推移（太陽光発電出力増加：動作点周辺の拡大図）

### 5.3 擾乱発生時の不安定現象の解析例 3（送電線事故）

本節では送電線事故によって生じうる不安定現象について扱う。落雷等により送電線内に事故が起こると、事故が波及しないように事故地点近傍の送電線の一部を系統から切り離す。送電線の一部が系統から切り離されると系統の送電能力が低下するため安定性にも影響を与える。

4.3 で述べたように送電線インピーダンスが増加すると PV 曲線は縮小する。そのため、右側ノーズ端の電圧崩

壊現象は 5.2 の(1)とほぼ同様の現象になるため、ここでは述べない。

左側ノーズ端の不安定現象について解析を行う。表 5.5 のように初期条件があり、時間  $\text{time}=1.0$  [s] で送電線インピーダンス  $x$  を  $0.6$  p.u. に増加させる条件で動的シミュレーションを行った。太陽光発電は定 P一定 I 切り替え特性を考えている。各諸量の時間推移を図 5.20 に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図 5.21 に示す。また動作点の推移を図 5.22 に示す。動作点は黒丸で示しているが、図 5.22 では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

送電線インピーダンスが増加すると PV 曲線は縮小する（図 5.22 の青色の実線の矢印）。この解析条件では等すべり曲線と PV 曲線は、PV 曲線上で太陽光発電が定電力特性を示す領域では交点を持たず、定電流特性を示す領域で交点を持つため、動作点は左下へと推移する（図 5.22 の黒色の実線 1）。動作点は見かけの機械的出力より左にあるため、すべりは増加し、等すべり曲線は右下へ推移して（図 5.22 の緑色の実線の矢印 1）、動作点は右上へ推移する（図 5.22 の黒色の実線の矢印 2）。

動作点が PV 曲線上で太陽光発電が定電流特性を示す領域の右端に達しても、見かけの機械的出力より左に位置する。このため、すべりが増加し、等すべり曲線は右下へ推移して、動作点は PV 曲線上の定電流特性を示す領域から定電力特性を示す領域へと推移する（図 5.22 の黒色の実線の矢印の内 3）。動作点が PV 曲線上の定電力特性を示す領域へと推移すると、見かけの機械的出力より右に位置するため、すべりは減少し、等すべり曲線は左上に推移する（図 5.22 の緑色の実線の矢印 2）。等すべり曲線の推移に伴って動作点は左へ推移する（図 5.22 の黒色の実線の矢印 4）。動作点が見かけの機械的出力と一致すると、すべりの変化は止まり、安定となる。

各諸量の時間推移（図 5.20）を見ると、負荷端電圧は急低下した後、緩やかに上昇する。その後、急上昇した後、緩やかに低下して安定となる。負荷消費電力は急減した後、緩やかに増加し、その後急激に初期値よりも増加した後、緩やかに減少して、ほぼ元の電力に戻る。太陽光発電出力電力は急減した後、電圧の回復とともに出力電力も回復し、元の電力に戻る。出力電流は急増した後に、 $1.8$  p.u. で電流制限され、その後急減した後、緩やかに増加して安定となる。負荷端電圧、負荷消費電力、太陽光発電出力電流の急激な変化の際には、太陽光発電の出力特性が変化している。

表 5.5 初期条件（送電線事故）

$v_s$	1.1 p.u.	$P_{PV}$	1.2 p.u.
$v_r$	1.0374 p.u.	$i_{PV}$	1.1568 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0171
$P_L$	0.3 p.u.	$P_m$	0.2949 p.u.
$Q_L$	0.0168 p.u.	$i_{PV,th}$	1.8 p.u.

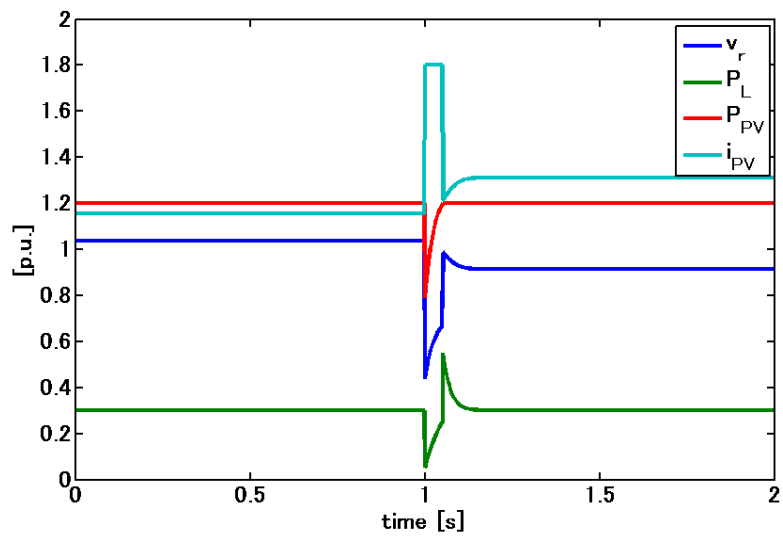


図 5.20 各諸量の時間推移（送電線事故）

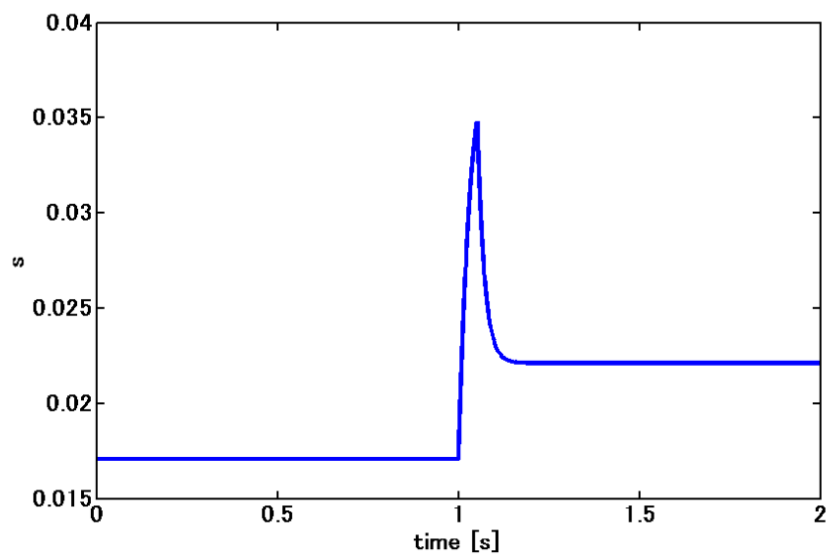


図 5.21 すべりの時間推移（送電線事故）

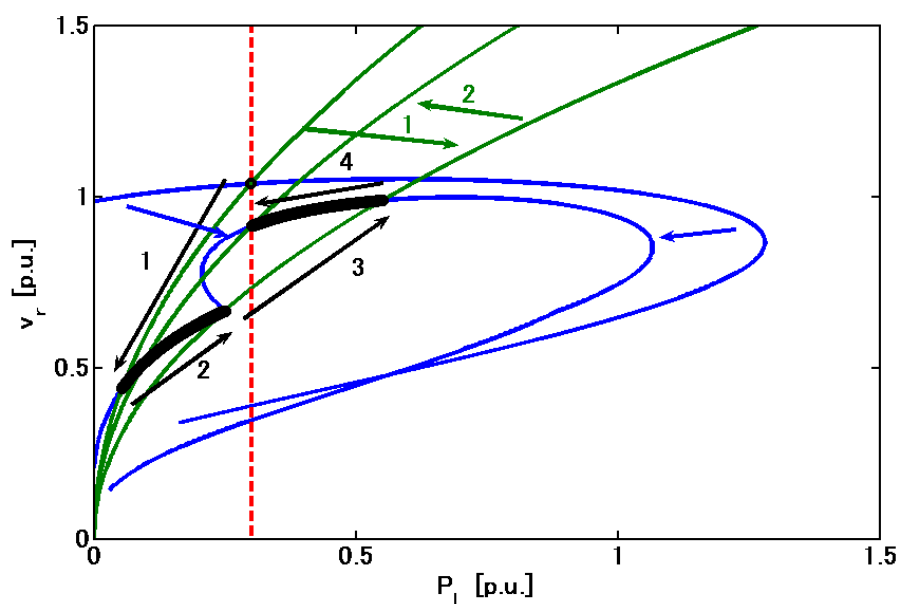


図 5.22 動作点の推移（送電線事故）

## 5.4 太陽光発電の脱落及び復帰を考慮した安定性解析

本節では太陽光発電の脱落及び復帰が安定性にどのような影響を与えるか解析する。

5.3 と同様に送電線事故による左側ノーズ端の不安定現象を想定する。主な相違点は、本節では太陽光発電出力が電圧低下で脱落し、その後出力を増加させていく点である。表 5.6 のように初期条件があり、送電線インピーダンス $x$ を 0.6 p.u. に増加させることを考える。図 5.23 と図 5.24 では動作点の推移を示しているが、これは動的シミュレーションにより得られた動作点である。動作点は黒丸で示しているが、図 5.24 では多数の黒丸が重なっており、太い曲線のように示されていることに注意されたい。

表 5.6 初期条件（太陽光発電の脱落及び復帰の考慮）

$v_s$	1.1 p.u.	$P_{PV}$	1.4 p.u.
$v_r$	0.9821 p.u.	$i_{PV}$	1.4256 p.u.
$x$	0.4 p.u.	$s$	0.0127
$P_L$	0.2 p.u.	$P_m$	0.1975 p.u.
$Q_L$	0.0083 p.u.	$i_{PV,th}$	1.8 p.u.

図 5.23 は太陽光発電が脱落するまでの動作点の推移を示している。送電線インピーダンスが増加すると PV 曲線は縮小する（図 5.23 の青色の実線の矢印 1）。この条件の場合、等すべり曲線は PV 曲線の太陽光発電が定電力特性を示す領域で交点を持たず、定電流特性を示す領域で交点を持つ。したがって、動作点は大きく左下へ推移して、PV 曲線の定電流特性を示す領域に推移する（図 5.23 の黒色の実線の矢印 1）。この時、負荷端電圧が大き

く低下するため、この時点で太陽光発電が脱落するものとする。

太陽光発電の脱落は、出力電力 $P_{PV}$ を0 p.u. とすることで模擬する。したがって、PV 曲線は左へ推移する(図 5.23 の青色の実線の矢印 2)。誘導機負荷については、回転子が回転エネルギーを持つため、運転継続すると考える。太陽光発電の脱落は瞬時に行われるため、誘導機負荷の動特性によるすべりの変化は生じないと考えられ、等すべり曲線は変化しない。したがって、動作点は右上へ大きく推移して(図 5.23 の黒色の実線の矢印 2)、負荷端電圧は上昇する。

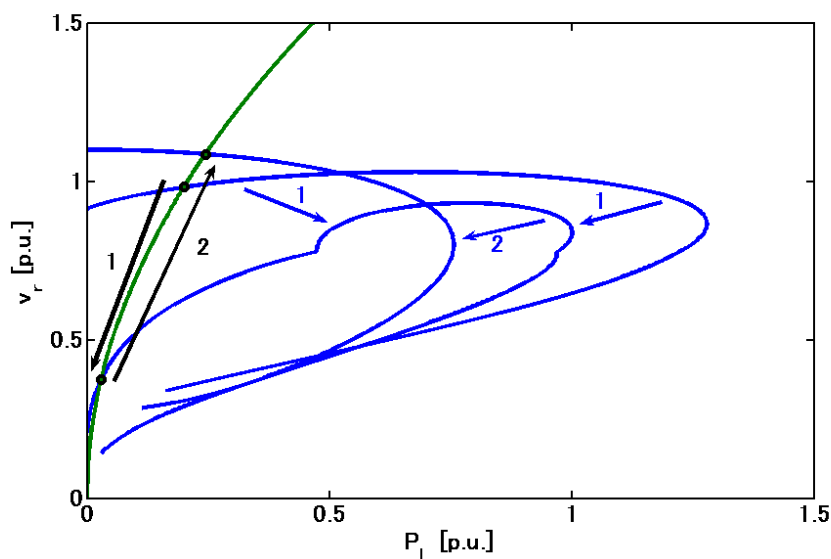


図 5.23 動作点の推移(太陽光発電の脱落及び復帰の考慮：送電線事故発生から太陽光発電の脱落まで)

FRT 要件<sup>[9]</sup>により送電線事故が除去せられ、電圧が復帰すれば、太陽光発電は速やかに出力を回復させなければならない。本検討では、太陽光発電が脱落して負荷端電圧が上昇すると、太陽光発電は事故除去を感知して復帰を開始するものとする。

太陽光発電の復帰開始以降の PV 曲線と動作点の推移を図 5.24 に示す。太陽光発電出力の増加に伴い PV 曲線は右へ推移する(図 5.24 の青い実線の矢印)。しかしながら、太陽光発電の出力回復より誘導機負荷の動特性の動作が速いため、すべりの変化が先に生じる。太陽光発電脱落直後は、動作点が見かけの機械的出力(図 5.24 の赤い破線)より右に位置するため、すべりが減少し、等すべり曲線は左上に推移して(図 5.24 の緑色の実線の矢印 1)、動作点は左へ推移する(図 5.24 の黒色の実線の矢印 1)。動作点と見かけの機械的出力が一致すると、すべりの減少が止まる。その後、動作点はほぼ見かけの機械的出力(図 5.24 の赤い破線)を真下に推移する(図 5.24 の黒い実線の矢印 2)。動作点が PV 曲線の左側ノーズ端に達すると、PV 曲線の太陽光発電が定電流特性を示す領域へと動作点は移行する(図 5.24 の黒い実線の矢印 3)。この時、負荷端電圧が大きく低下するため、太陽光発電は再び脱落する。

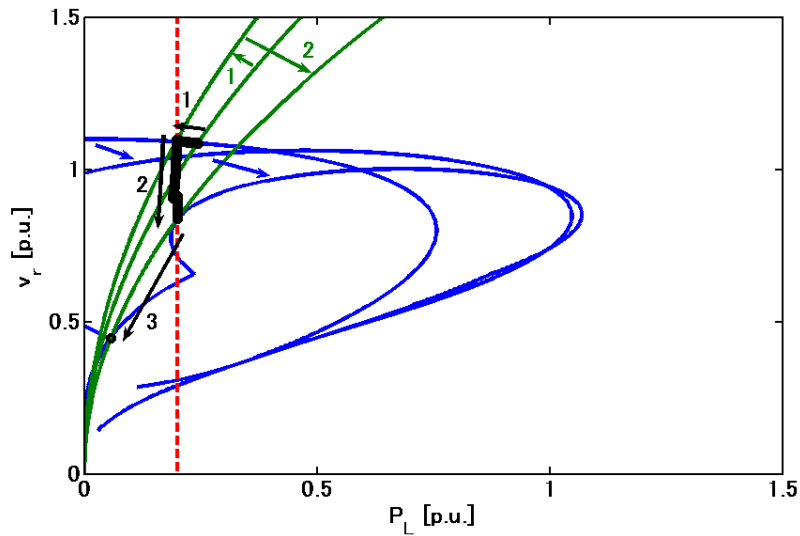


図 5.24 動作点の推移（太陽光発電の脱落及び復帰の考慮：太陽光発電復帰開始から再脱落まで）

再び太陽光発電が脱落した後は、太陽光発電の復帰開始により出力が回復していき、上記に述べた過程を経て再び太陽光発電は脱落する。以降も同様に太陽光発電は脱落と復帰を繰り返す。今後の太陽光発電は主電源としてシステムの安定性を確保するために系統擾乱時も運転継続性を求められるが、本検討で示されたように、運転継続をしようとして逆に系統擾乱の原因となってしまう可能性がある。

上記の現象を確認するため、表 5.6 を初期条件とし、時間  $\text{time}=1.0$  [s] に送電インピーダンス  $x$  が  $0.6$  p.u. に増加する条件のもと動的シミュレーションを行った。太陽光発電は定  $P$ —定  $I$  切り替えモデルを用い、負荷端電圧  $v_r$  が  $0.5$  p.u. 以下の時脱落する。出力回復過程<sup>[9]</sup>については、図 5.25 に示すように、元の出力電力  $1.4$  p.u. の  $80\%$  である  $1.12$  p.u. までは  $1$  s で高速に回復できるように、 $1.12$  p.u./s の割合で比例的に出力電力  $P_{PV}$  を増加させる。 $1.12$  p.u. 以上では PCS の MPPT 制御によるゆっくりとした出力回復を想定し、 $0.01$  p.u./s の割合で比例的に出力電力  $P_{PV}$  を増加させる。各諸量の時間推移を図 5.26 に、誘導機負荷のすべりの時間推移を図 5.27 に示す。

図 5.23、図 5.24 で考察したように、送電線インピーダンス増加後、太陽光発電は脱落し、負荷端電圧が増加する。その後、太陽光発電出力電力の増加に伴って、負荷端電圧は次第に低下していき、時間  $\text{time}=8$  [s] 付近で再び太陽光発電は脱落する。再脱落後も太陽光発電は出力を回復しようとするが、出力電力が  $1.18$  p.u. 付近になると再び脱落する。以降も同様に太陽光発電は脱落と復帰を繰り返す。

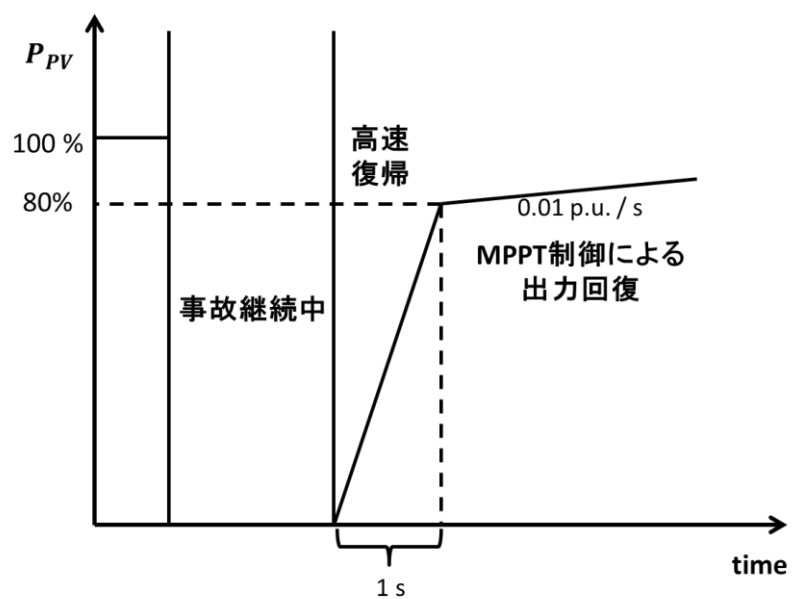


図 5.25 出力回復過程

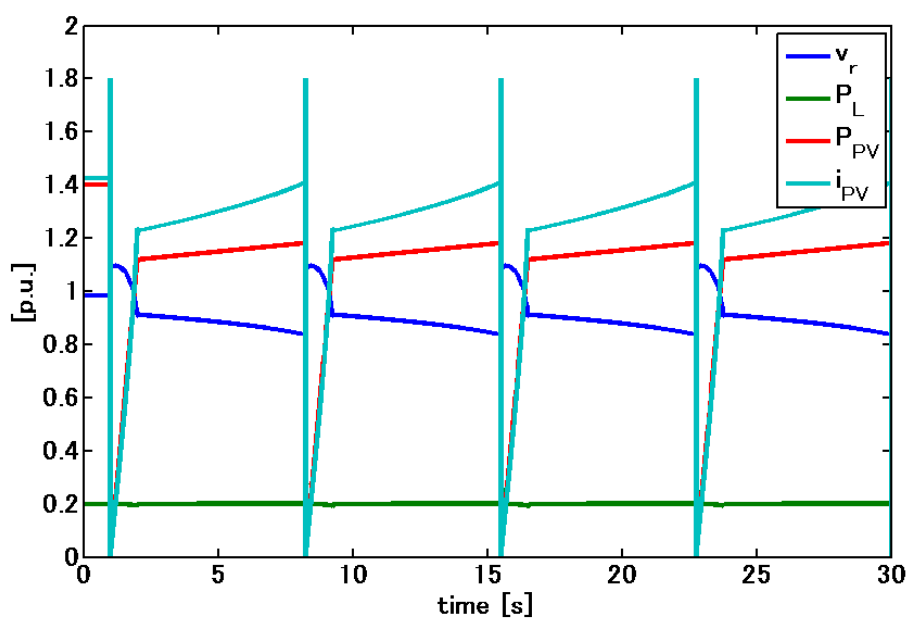


図 5.26 各諸量の時間推移 (太陽光発電の脱落及び復帰の考慮)

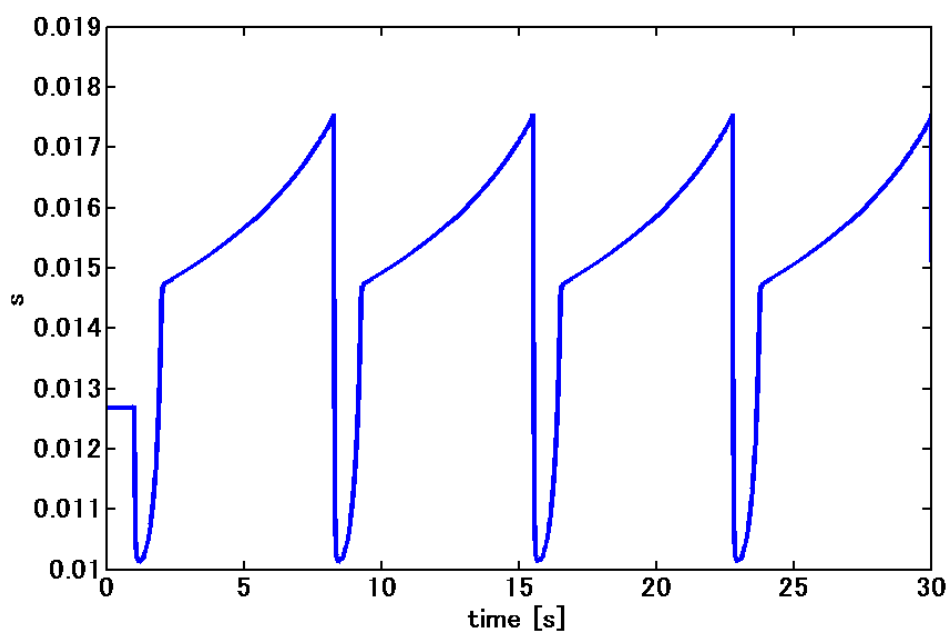


図 5.27 すべりの時間推移 (太陽光発電の脱落及び復帰の考慮)

## 第6章 太陽光発電動的モデルによる検証

本章では、第 5 章の準静的な解析で十分に解析できなかった点について解析を行う。第 5 章では太陽光発電の動特性を考慮していなかったが、本章ではこれも考慮に入れて動的な解析を行う。6.1 では、本章で用いる太陽光発電動的モデルについて導入を行う。6.2 では、太陽光発電の出力特性が変化する点について動的解析を行った。6.3 では、太陽光発電の脱落、及び復帰特性も考慮した動的解析を行った。

### 6.1 太陽光発電動的モデル

本節では太陽光発電動的モデルについて説明する。図 6.1 に太陽光発電の動的モデルを示す。太陽光発電の PCS は出力電力が一定で、力率が 1.0 となるような制御を行う。また電圧低下時には機器に過電流が流れることを防止するため、電流制限を行う。本論文では力率制御は瞬時に行われるものとして、有効電力制御のみを考慮の対象とする。また PCS の直流側電圧は、図 2.2 に示す Boost Chopper などにより一定に保たれていると仮定する。出力電力一定制御は PI 制御を考え、電流制限は電流リミッタにより模擬される。電流リミッタを用いたことによって積分器に不要な偏差が足し込まれるリセットウィンドアップ現象が生じる場合がある。これを防ぐため積分器の入力に電流リミッタの入出力の偏差を補正している。

図 6.1 から導出される式は (6.1), (6.2) である。 $i_{PV}^*$  は電流リミッタの入力、 $y_I$  は PI 制御系の積分器の出力を示す。定数は表 6.1 を用いる。定数の決定方法については附録 C を参照されたい。

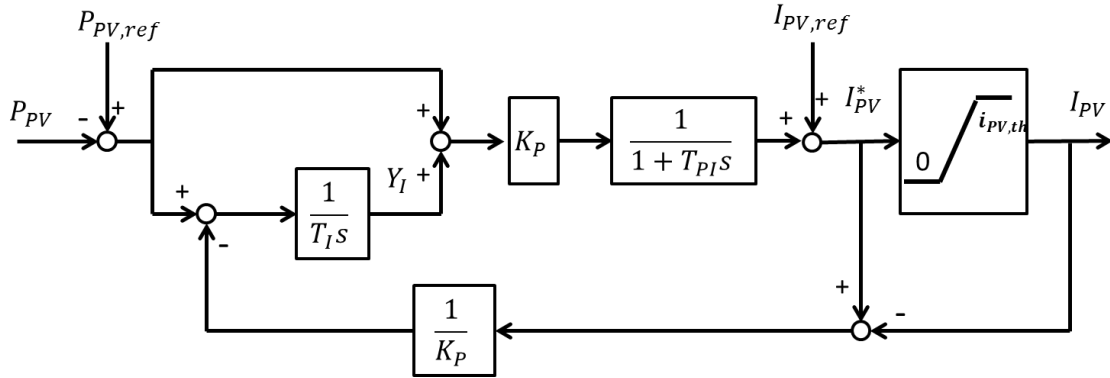


図 6.1 太陽光発電動的モデル

$$\frac{dy_I}{dt} = \frac{1}{T_I} (P_{PV,ref} - P_{PV}) - \frac{1}{K_P T_I} (i_{PV}^* - i_{PV}) - y_I(0) \quad (6.1)$$

$$\frac{di_{PV}^*}{dt} = \frac{1}{T_{PI}} \{ K_P (P_{PV,ref} - P_{PV} + y_I) - (i_{PV}^* - I_{PV,ref}) \} - (i_{PV}^*(0) - I_{PV,ref}) \quad (6.2)$$

表 6.1 太陽光発電動的モデルの定数値

$K_p$	20
$T_I$	0.01 s
$T_{PI}$	0.01 s

6.3 では太陽光発電の脱落、復帰が安定性に及ぼす影響についても検討する。脱落と復帰は $P_{PV,ref}$ を変化させることで模擬する。本論文において太陽光発電モデルは多数台の太陽光発電を集約したものであるため、図 6.2 に示すように $P_{PV,ref}$ の変化は一次遅れで表現する。また $P_{PV,ref}$ の変化の速さは運転状態によって異なるが、これについては時定数 $T_{PV}$ を表 6.2 のように変化させることで調整する。脱落と復帰の判定については、表 6.3 に示すように検出遅れを考慮した電圧値 $v_r^*$ で行う。電圧の検出遅れも図 6.3 に示すように一次遅れで模擬し、時定数 $T_{DV}$ の値は 0.05 s を用いる。図 6.2、図 6.3 からは(6.3)、(6.4)が導出される。

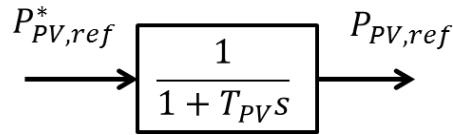


図 6.2 脱落、復帰の模擬

表 6.2  $T_{PV}$  の値

運転状態		$T_{PV}$
定常運転時		60 s
脱落時		0.01 s
復帰時	元の出力電力の 80 % まで（高速回復）	0.5 s
	元の出力電力の 80 % 以上（MPPT 制御による回復）	50 s

表 6.3 脱落、復帰の判定条件

$v_r^* < 0.7$	脱落
脱落状態 かつ $v_r^* \geq 1.0$	復帰開始

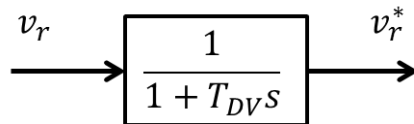


図 6.3 電圧検出遅れ

$$\frac{dP_{PV,ref}}{dt} = \frac{1}{T_{PV}}(P_{PV,ref}^* - P_{PV,ref}) \quad (6.3)$$

$$\frac{dv_r^*}{dt} = \frac{1}{T_{DV}}(v_r - v_r^*) \quad (6.4)$$

## 6.2 太陽光発電出力特性の切り替えの検証

準静的な解析である 5.1～5.3 の左側ノーズ端の不安定現象では、動作点が左側ノーズ端の右から左へ推移する時、つまり PV 曲線上の太陽光発電が定電力特性を示す領域から定電流特性を示す領域へ推移する時、前後での動作点の推移が大きい。また同様に 5.3 において動作点が PV 曲線上の太陽光発電が定電流特性を示す領域から定電力特性を示す領域へ推移する時にも動作点は大きく推移する。このような動作点の大きな推移は、太陽光発電の PCS の制御が瞬時に行われると考えて、その動特性を無視し、出力特性を静的なモデルで模擬しているために起こる。実際に出力特性の切り替えにより動作点がこのように推移するか否かを検証する必要がある。本節では 6.1 で述べた太陽光発電動的モデルを用いて、この動作点の推移を検討する。

5.3 の左側ノーズ端による不安定現象について、太陽光発電動的モデルを用いて検証する。太陽光発電動的モデル以外の各変数の初期条件は表 5.5 を、太陽光発電動的モデル内の各変数の初期条件は表 6.4 を用い、時間  $\text{time}=1.0$  [s] で送電線インピーダンス  $x$  を  $0.6$  p.u. に増加させた条件で動的シミュレーションを行った。各諸量の時間推移を図 6.4 に、過渡応答時間帯を拡大したものを図 6.5 に示す。また誘導機負荷のすべりの時間推移を図 6.6 に示す。また動作点の推移を図 6.7 に示す。動作点は黒丸で示しているが、図 6.7 では多数の黒丸が重なっており、一部太い曲線のように示されていることに注意されたい。

図 6.7 を見ると、図 5.22 に現れなかった太陽光発電の出力特性が変化する時の過渡的な動作点の推移の様子が示されている。各諸量の時間推移についても、図 5.20 と図 6.4 はほぼ一致している。

まず、太陽光発電出力が定電力特性から定電流特性へ移行する過程（ $1.0 \sim 1.02$  s 程度）について述べる。送電線インピーダンスが増加すると負荷端電圧は低下する。負荷端電圧が低下すると太陽光発電の PCS の出力電力一定制御の遅れにより出力電力がいったん減少し、その後 PCS の制御によって出力電流が増加していく。一方、数十ミリ秒では誘導機負荷の動特性はほとんど働かず、負荷消費電力は減少する。図 6.5 を見ると事故直後  $1.01$  s までは、負荷消費電力は大きく減少し、太陽光発電出力電力はほとんど減少せず、逆潮流が増加すると言える。初期状態で  $0.9$  p.u. の有効電力の大きな逆潮流があり、事故によりさらに逆潮流が増加するため、3.3 の議論からさらに負荷端電圧が低下していく。図 6.5 では太陽光発電出力電力は事故後一旦減少し、その後若干増加した後に減少に転じている。この若干の増加は PCS の定電力制御の効果であるが、その後は負荷端電圧の低下速度が速いため出力電流は増加するが出力電力は減少していく。太陽光発電出力電流が電流制限値に達すると負荷端電圧の低下は止まり、定電流特性への移行が完了する。その後は誘導機負荷のすべりの増加に伴って 5.3 の議論から負荷端電圧は上昇していく。

次に太陽光発電出力が定電流特性から定電力特性へ移行する過程（ $1.05 \sim 1.06$  s 程度）について述べる。誘導機負荷のすべりの増加に伴って負荷端電圧が上昇し、太陽光発電出力電力も増加する。太陽光発電出力電力が目標値  $P_{PV,ref}$  より大きくなると出力電力一定制御に復帰し、出力電流は電流制限値から急速に減少する。一方で、誘

導機負荷の動特性は短時間では働かないため、負荷端電圧が上昇すると負荷消費電力は増加する。図 6.5 を見ると、太陽光発電が定電流特性から定電力特性へ移行するとき、負荷消費電力は増加し、太陽光発電出力電力は負荷消費電力ほど増加せず、逆潮流は減少している。逆潮流が大きい状態であるため、3.3 の議論から逆潮流が減少すると負荷端電圧が上昇する。負荷端電圧が上昇した後、5.3 のすべりの変化を伴いながら安定となる。

表 6.4 太陽光発電動的モデル内部変数の初期条件（太陽光発電出力特性切り替えの検証）

$i_{PV}^*$	1.1568 p.u.
$y_I$	0.0 p.u.
$P_{PV,ref}$	1.2 p.u.
$I_{PV,ref}$	1.1568 p.u.

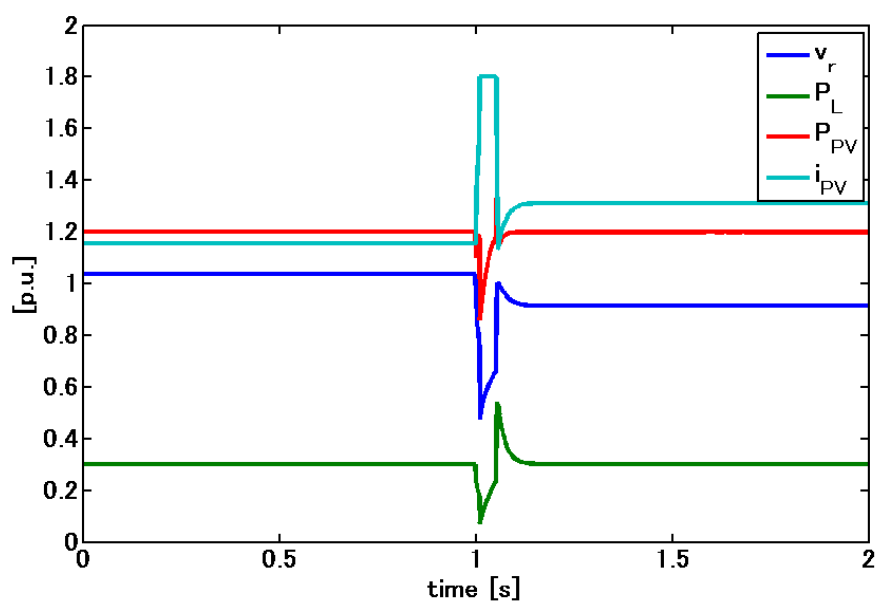


図 6.4 各諸量の時間推移（太陽光発電出力特性切り替えの検証）

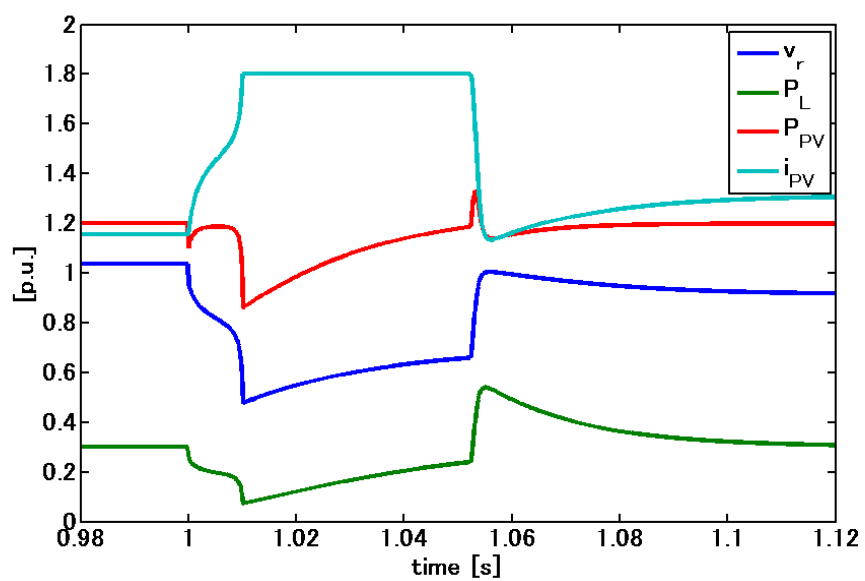


図 6.5 各諸量の時間推移（太陽光発電出力特性切り替えの検証：過渡応答時間帯の拡大）

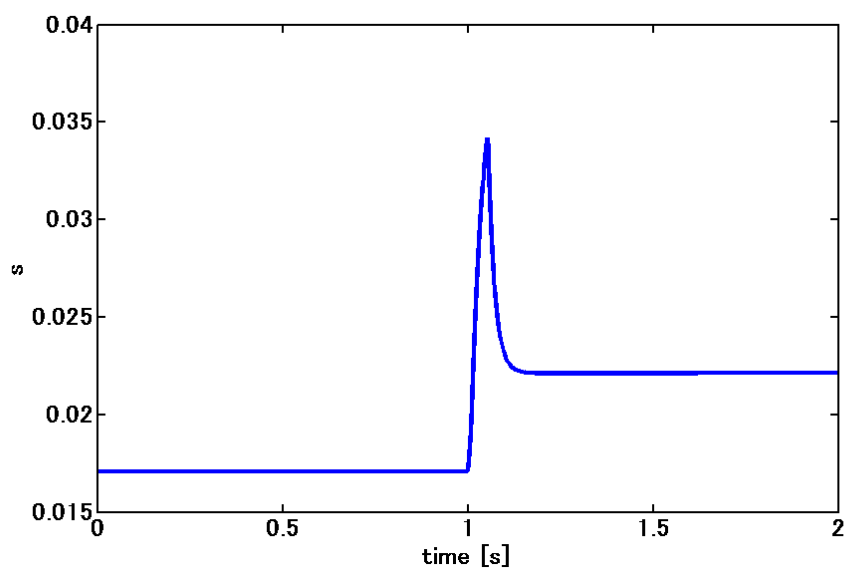


図 6.6 すべりの時間推移（太陽光発電出力特性切り替えの検証）

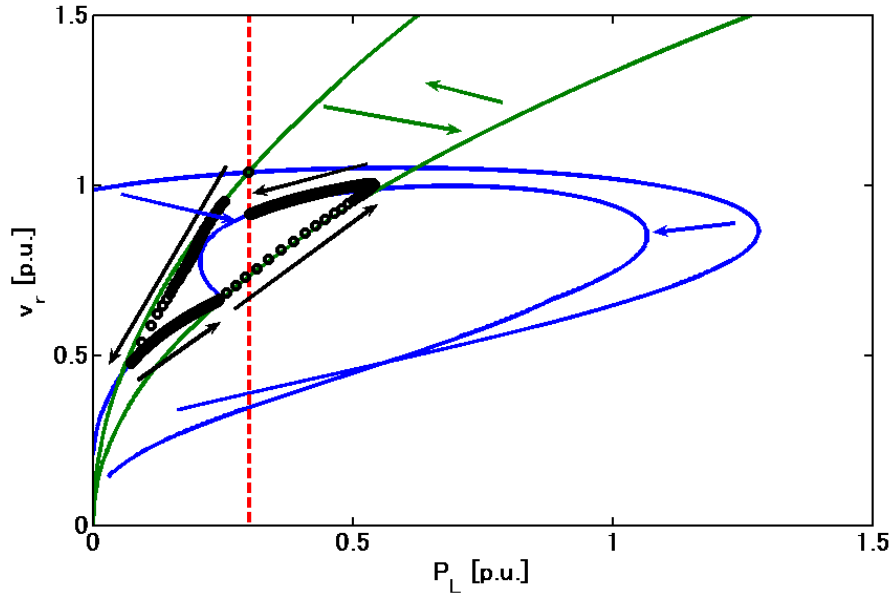


図 6.7 動作点の推移（太陽光発電出力特性切り替えの検証）

### 6.3 太陽光発電の脱落及び復帰の検証

5.4 では太陽光発電静的モデルを用いて太陽光発電の脱落と復帰が安定性に与える影響を検討した。送電線事故直後に動作点が PV 曲線上の太陽光発電が定電流特性を示す領域に推移する際、太陽光発電が脱落して太陽光発電出力電力が 0 p.u. の PV 曲線へ動作点が移行する際、及び太陽光発電が再脱落する際、動作点は大きく推移する。これは太陽光発電の PCS の制御の動特性を無視しているためである。本節では PCS の制御と脱落、復帰特性の動特性を考慮して、動作点が実際に大きく推移するか検討する。

太陽光発電動的モデル以外の各変数の初期値は表 5.6 を、太陽光発電動的モデル内の各変数及び電圧検出値の初期値は表 6.5 を用い、時間 time=1.0 [s] で送電線インピーダンス $x$ を 0.6 p.u. に増加させて、動的シミュレーションを行った。各諸量の時間推移を図 6.8 に示す。太陽光発電が脱落する時間帯について拡大した図を図 6.9 に示す。また誘導機負荷のすべりの時間推移を図 6.10 に示す。また初めて太陽光発電が脱落するまでの動作点の推移を図 6.11 に示す。

図 6.11 を見ると動作点が推移した結果、図 5.23 とほぼ同様な動作点の推移となることが確認された。

太陽光発電が初めて脱落する時点周辺の各諸量の時間推移（図 6.9）について見ると、負荷端電圧の低下に伴って、負荷消費電力と太陽光発電出力電力が減少し、太陽光発電出力電流は増加する。太陽光発電出力電流が 1.8 p.u. で制限されると、負荷端電圧の低下が止まり、誘導機負荷のすべりの増大に伴って、負荷端電圧は緩やかに上昇し、負荷消費電力、太陽光発電出力電力は緩やかに増加する。約 1.05 s 付近になると太陽光発電は電圧 ( $v_r^*$ : 図 6.3 参照) の低下を検出して脱落を始め、出力電力と電流は急激に減少し、負荷端電圧は急激に上昇する。負荷端電圧が低下してから太陽光発電が脱落するまでに時間差があるのは、電圧検出遅れ(約 0.05 s)を考慮したためである。また出力電力と電流がステップ状に減少しないのは、太陽光発電モデルが多数台の太陽光発電から構成されている

ことを考慮して、一次遅れでその脱落を表現したから（図 6.2 参照）である。

約 1.14 s 付近になると、太陽光発電は復帰を開始し、出力電力と電流は増加を始める。約 1.05 s 付近で負荷端電圧が回復しているにも関わらず、復帰開始時間が約 1.14 s であるのは、電圧検出遅れを考慮しているためである。

図 6.8 の約 1 s から約 16 s を見ると、太陽光発電が復帰開始して、出力電力及び電流を増加させるにつれて負荷端電圧が低下していき、約 16 s では再び太陽光発電が脱落していることが解る。その後も太陽光発電は脱落と復帰を繰り返すことが確認できる。準静的な解析の結果である図 5.26 と比較すると、太陽光発電の出力回復の速度は異なるが同様の結果が得られている。

表 6.5 太陽光発電動的モデル内部変数の初期状態（太陽光発電脱落及び復帰の検証）

$i_{PV}^*$	1.4256 p.u.	$I_{PV,ref}$	1.4256 p.u.
$y_I$	0.0 p.u.	$P_{PV,ref}^*$	1.4 p.u.
$P_{PV,ref}$	1.4 p.u.	$v_r^*$	0.9821 p.u.

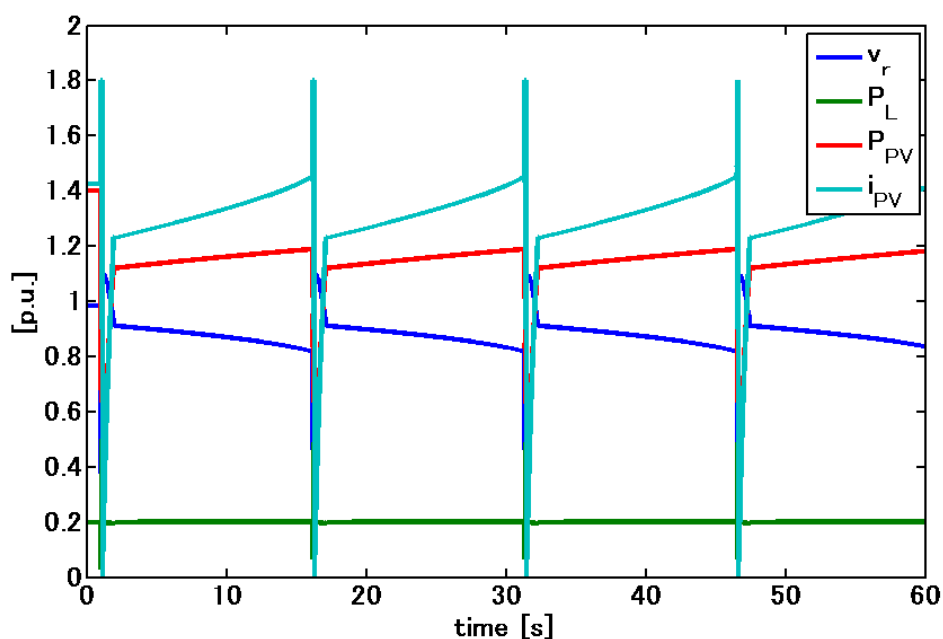


図 6.8 各諸量の時間推移（太陽光発電脱落及び復帰の検証）

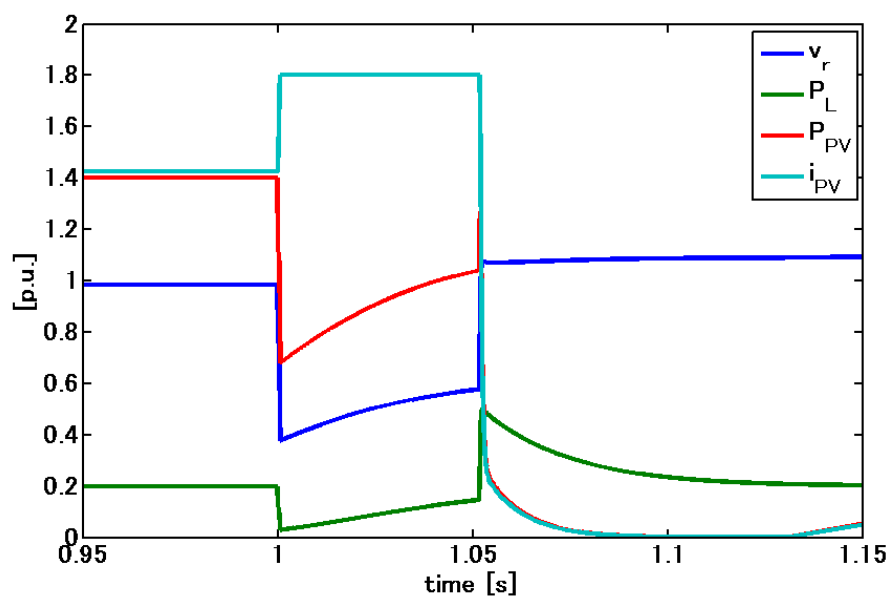


図 6.9 各諸量の時間推移（太陽光発電脱落及び復帰の検証：太陽光発電の脱落周辺）

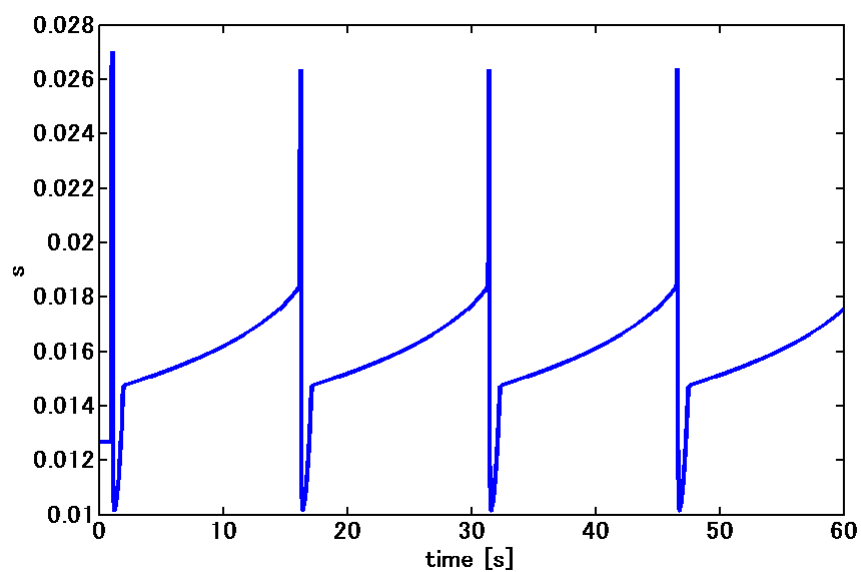


図 6.10 すべりの時間推移（太陽光発電脱落及び復帰の検証）

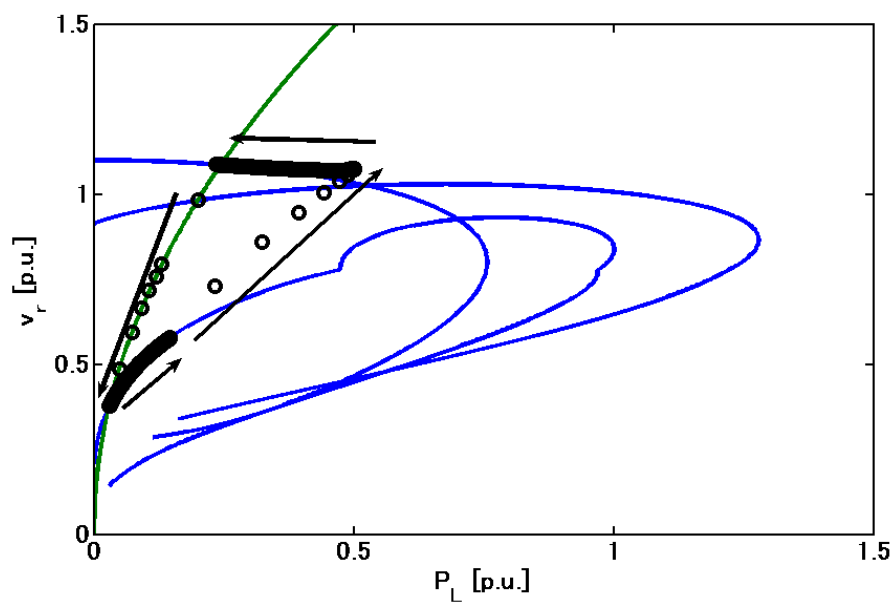


図 6.11 動作点の推移（太陽光発電脱落及び復帰の検証）

## 第7章 結論

### 7.1 本論文の成果

本論文では、太陽光発電が大量に導入された系統の電圧安定性について基礎的な検討を行った。以下にそれぞれの章で得られた結論についてまとめる。

第3章では、静的な解析を行なって、定常状態における電圧特性を明らかにした。PV 曲線には右側だけでなく左側にもノーズ端が存在し、太陽光発電が大量に連系された系統では、負荷消費電力が正の領域であっても左側ノーズ端が現れうることが明らかとなった。このため、太陽光発電が大量に連系された系統では、重負荷時だけでなく、軽負荷時にも不安定現象が生じうることが示された。また PCS の電流制限を考慮した場合も、左側ノーズ端より左の領域では電圧が大きく低下することも示された。さらに一般的な電圧特性として、順潮流の減少や逆潮流の増加によって負荷端電圧が上昇することが知られるが、PV 曲線の形状から逆潮流が大きい場合、逆潮流の増加によって負荷端電圧が低下することがあることが示された。

第4章、第5章では、誘導機負荷の動特性を考慮した準静的な電圧特性を明らかにした。PV 曲線の右側、及び左側ノーズ端付近では、それぞれ電圧崩壊現象と系統崩壊現象が生じうることが示された。右側ノーズ端による電圧崩壊現象は、PV 曲線の右側に見かけの機械的出力が位置しようとするときに生じ、誘導機負荷の減速、負荷端電圧の低下が止まることなく進捗する。右側ノーズ端による電圧崩壊現象は重負荷時に生じやすく、負荷の増加時、太陽光発電出力の急減時、一部の送電線の開放などによる送電能力の低下時に生じることが示された。左側ノーズ端による系統崩壊現象は、PV 曲線の左側に見かけの機械的出力が位置しようとするときに生じ、動作点が PV 曲線より左に推移しようとして、PV 曲線との動作点を持たなくなることによって生じる。動作点を持たなくなることの意味は、太陽光発電出力電流を増加させてもさらに負荷端電圧が低下して出力電力を維持できないためであり、PCS の電流制限を考慮する必要がある。しかし、PCS の電流制限を考慮しても、やはり PV 曲線の左側ノーズ端より左の領域では電圧が大きく低下することが明らかとなった。左側ノーズ端付近の不安定現象は軽負荷時に生じやすく、負荷の減少時、太陽光発電出力の増加時、送電能力の低下時に生じることが示された。また太陽光発電の脱落及び復帰特性を考慮した解析で、太陽光発電が出力を回復しようとして何度も脱落と復帰を繰り返す現象が示され、擾乱発生時に系統の安定性を保つために期待される太陽光発電の運転継続性が逆に系統の安定性を損ねる可能性についても明らかとなった。

第6章では、太陽光発電にその動的モデルを導入することで、準静的な電圧特性では十分解析できなかった点について検証を行った。その結果、太陽光発電の出力特性の変化時の動作点の大きな推移について準静的な解析と同様に推移することが確認された。また太陽光発電の脱落及び復帰時の動作点の推移についても同様な推移が確認され、準静的な解析で検討された不安定現象が太陽光発電の PCS の動的な出力制御を考慮しても生じうることが示された。

## 7.2 今後の課題

本研究の今後の課題の内、特に主要と思われるものを以下に三点述べる。

### (1) 負荷のモデル化

2.4 で述べたように、実際には負荷モデルは特性の異なる様々な要素から構成されるが、本論文では解析目的から特徴的な特性を抽出してモデル化を行った。具体的には、静的な解析では電力系統内の動特性の安定した定常状態の解析を目的として負荷モデルを定電力負荷モデルとして模擬した。準静的及び動的な解析では系統内の動的要素の影響を解析するため、代表的な動的要素である誘導機負荷の動特性に注目して負荷モデルを誘導機負荷モデルとして模擬した。

したがって本論文で負荷モデルに考慮されていない特性が、太陽光発電連系系統の電圧特性や電圧安定性に与える影響については解析されておらず、検討の必要がある。また誘導機負荷モデルでは、負荷モデル中の負荷が全て誘導機負荷であるとして考慮されているが、実際には誘導機負荷は負荷モデルの一部であるため、負荷全体に対する誘導機負荷の比率についても検討する必要がある。

### (2) 電圧制御系の考慮

電力系統内には、電力用コンデンサ、変圧器タップ、SVC (Static Var Compensator)、STATCOM (Static Compensator) など系統電圧を維持する制御系が設置されている。本論文においては、これらの電圧制御系は考慮されていない。また太陽光発電は力率 1.0 運転を行うものとして取り扱っているが、系統電圧維持のため進相運転等を行うことも考えられる<sup>[4]</sup>。太陽光発電の導入による電圧特性の変化により電圧制御系が誤動作することも考えられるため、電圧制御系を考慮した太陽光発電連系系統の電圧特性及び電圧安定性を明らかにすることは重要である。

### (3) 詳細な系統モデルでの検討

本論文では基礎的な検討として、一負荷、一太陽光発電、無限大母線から成る系統モデルを対象に解析を行った。負荷モデルは、(1)で述べたように、多数の要素から構成された集約モデルである。太陽光発電モデルも、多数台の太陽光発電を一台に集約してモデル化されている。送電端についても、理想的に電圧が一定である無限大母線として考慮されている。複数の送電線も一本の送電線として模擬されており、配電線のインピーダンスも考慮されていない。

本論文では上記の影響は小さいものと考えて、非常に単純化された系統を対象とした。今後は詳細な系統モデルを用いて、その影響がどの程度であるか検討する必要がある。また本論文で得られた成果が詳細な系統モデルにおいても成り立つか検証する必要がある。

# 謝辞

本論文を執筆するにあたり、私の研究生活を支えてくださった方々に、この場を借りて感謝の意を表したい。

谷口治人特任教授には終始、私の研究活動を温かく見守って下さり、懇切丁寧なご指導と、多くの貴重なご助言を頂きました。谷口特任教授の電力系統、研究への姿勢は私にとって大変大きな刺激となり、いつしか私も研究者を志すようになりました。二年間と短い期間でしたが、充実した修士課程を過ごせたのは谷口特任教授に依る所が大きく、感謝の意を表し尽くすことはできません。

鈴木宏和特任研究員には、谷口特任教授とは異なった視点から多くの貴重なご助言を頂き、研究を進めていく上で大変お世話になりました。また、日頃より細かな気遣いで助けて頂く場面が多々ありました。ここに深く感謝致します。

太田豊特任助教には、最近の研究や実証試験などの動向等、大変興味深い話をよくして頂きました。視野の狭い私に、常に新鮮な情報を与えて下さいました。

石下美奈子氏には、事務手続き等、研究生活を送っていく上で様々な便宜をはかって頂きました。また学業以外に関する相談も気軽に聴いてくださり、精神面からも支えて頂きました。

水野陽二郎氏には、私の修士課程最後の一年間、共に谷口研究室の学生としてお世話になりました。真面目な水野氏の研究が実を結ぶことを祈念しております。

東京電力株式会社 中島達人氏に直接ご指導いただいたのは半年程でしたが、難解な事柄を理解しやすく教えて頂き、未熟者であった私をしばしば助けて頂きました。また時には厳しい助言で、激励して下さいました。

三菱電機株式会社 千貫智幸氏は谷口研究室の先輩であり、卒業後も私の研究を見守って下さいました。非常に優秀で、何事にも熱心に取り組む千貫氏には尊敬の念を抱いており、共に学んだ一年間は私にとって生涯の宝です。

谷口研究室の皆様には、各々お忙しい中、毎週研究の進捗状況を見て頂きました。また勉強会の後のお酒の場では、電力・エネルギーを始め様々な事柄に対する皆様の考えを聞け、これも私にとって大きな刺激となっていました。また研究だけでなく私生活の悩みも聞いて頂き、精神面での支えの場となっていました。このように非常に充実した研究活動の場を与えて下さった谷口研究室に、重ねて厚く御礼申し上げます。

馬場旬平准教授を始め、馬場研究室の皆様にも大変お世話になりました。

馬場旬平准教授は博聞強識であり、私が学部生の時代より貴重な助言を多数頂き、また普段より興味深い話を多くして頂きました。馬場准教授の近くで研究に励めて、大変幸せに感じております。

玉岡徳子氏には、谷口・馬場研究室の会を始め日頃より温かな気遣いを頂きました。同郷ということもあり、研究室では親しく接して頂き、感謝しております。

修士課程を修了された恩田祐輔氏、萩原裕人氏、服部圭佑氏、森昭斗氏には、ご迷惑をお掛けしたことも多々あったかと思いますが、そんな私を温かく馬場研究室に受け入れてくれ、感謝しております。

博士3年の下田英介氏、博士2年の今中政輝氏、河内駿介氏にも、学部時代より研究活動・研究生活で大変お

世話になりました。特に河内氏には様々な面で面倒を見て頂き、感謝しております。

同期である修士2年の Mufaris Mohamed 氏、手操亮裕氏、中谷将志氏は優秀な学生ばかりで、切磋琢磨し合える良き仲間でした。Mohamed 氏は秋入学のため半年後となりますが、卒業後各々が社会で活躍することを祈念しております。

後輩である修士1年の奥谷和也氏、慶本裕史氏、佐々本英紀氏、田崎祐作氏、林祐希氏、学部4年の小野里航平氏、山本康裕氏、渡邊宏之氏にも大変お世話になりました。未熟な先輩で、様々な形でサポートして頂いたことを感謝しております。

横山明彦教授を始め、横山研究室の皆様にも学部生の時代よりお世話になりました。

横山明彦教授には、学部時代の研究だけでなく、修士課程の研究や東京ガス株式会社との共同研究においても、懇切丁寧なご指導と、多くの貴重なご助言を頂きました。大変感謝しております。

事務職員である兼近直美氏、岡田とも子氏には、研究を進めていく上での便宜をはかって頂きました。

共同研究者である東京ガス株式会社 進士誉夫氏、辻田伸介氏、渡部洋介氏、須澤健太郎氏には、3年間に亘り共同研究に関わらせて頂いたこと、また議論を重ねていくうちに様々な事をご教授頂いたこと、非常に感謝しております。

博士課程を修了された Nattawut Paensuwan 氏、益田泰輔氏、河辺賢一氏、修士課程を修了された入江寛氏、清水浩一郎氏、宮原啓太氏、吉原徹氏、井上孝弘氏、木原寛之氏、高崎研究室の修士課程を修了された吉住大介氏、元研究生の Chairerg Jakkattanajit 氏には、当時ただ一人しかいなかった卒論生である私を大切にして頂き、また電力系統工学の基礎や研究に対する姿勢を教えて頂きました。ここまで至れたのは先輩方のおかげです。

先輩である博士5年の Nguhen Hoang Viet 氏、博士2年の相原良太氏、博士1年 Tran Ngoc Huynh 氏には、研究や私生活について気軽に相談に乗って頂きました。

同期の修士2年の上田知広氏、佐藤江里子氏、Chatupromwong Phichian 氏とは楽しい研究生活を送ることができました。

後輩である修士1年の小川耕平氏、岡佑太郎氏、坪田亮氏、Kitakkarakosin Primpat 氏、高崎研究室の修士1年の木村諒太氏、学部4年の和田康平氏、三ツ木康晃氏、橋本篤尚氏には、大変お世話になりました。先輩としての助言を求められる度、頼られる喜びと身の引き締まる思いを感じ、私を大きく成長させて下さいました。

最後に、両親である石川広光氏、石川朝美氏には、修士課程まで学を付けさせて頂いたことに感謝しております。まだまだ未熟者ですが、これまで得た力を存分に社会で発揮していきたいと考えています。

私の研究生活を支えてくださった全ての方々に多大なる感謝の意を表するとともに、今後歩まれる道に幸多からんことを願い、謝辞を締め括る。

## 参考文献

- [1] Y.Xue, M.Manjrekar, C.Lin, M.Tamayo, J. N.Jiang : ‘Voltage Stability and Sensitivity Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems’, Proc. IEEE Conf. on Power and Energy Society General Meeting (2011)
- [2] R.Yan, T.K.Saha : ‘Investigation of Voltage Stability for Residential Customers Due to High Photovoltaic Penetrations’, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.27, No.2, pp.651-662 (2012)
- [3] 飯岡大輔, 榊原邦晃, 横水康伸, 松村年郎, 出原範久 : 「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による制御」, 電気学会論文誌 B, vol.126, No.2, pp153-158 (2006)
- [4] 川崎章司, 金本憲明, 田岡久雄, 松木純也, 林泰弘 : 「太陽光発電システム群の力率制御と LRT による協調型電圧制御法」, 電気学会論文誌 B, vol.132, No.4, pp309-316 (2012)
- [5] 電力系統の利用を支える解析・運用技術調査専門委員会 : 「電力系統の利用を支える解析・運用技術」, 電気学会技術報告, 第 1100 号 (B 部門) (2007)
- [6] 餘利野直人 : 「電力系統の電圧安定性とその解析技術の動向」, 電気学会論文誌 B, vol.123, No.7, pp803-807 (2003)
- [7] 資源エネルギー庁 : 「長期エネルギー需給見通し」, <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/080523b.pdf> (2008)
- [8] 資源エネルギー庁 : 「長期エネルギー需給見通し (再計算)」, <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90902a01j.pdf> (2009)
- [9] 経済産業省 次世代送配電システム制度検討会第 1 ワーキンググループ (第 1 回) 配布資料 8 「単独運転検出および FRT への取り組みについて」, <http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004671/index01.html> (2010)
- [10] 富山勝幸 : 「系統解析のための「動的負荷モデル」の検討」, 電気学会論文誌 B, vol.119, No.6, pp697-703 (1999)
- [11] 上田智之, 駒見慎太郎 : 「物理的構造と観測データに基づく電力系統の動的負荷モデル」, 電気学会論文誌 B, vol.126, No.6, pp635-641 (2006)
- [12] 山下光司, 北内義弘, 葛城啓介, 赤間康平 : 「瞬時電圧低下がインバータ負荷を含む電力系統に与える影響ー負荷機器のインバータ化がもたらす電圧上昇現象と電圧回復遅延現象の変化ー」, 電力中央研究所報告, R10024, 電力中央研究所 (2011)
- [13] 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, vol.112, No.8, pp677-684 (1992)
- [14] 前田龍己, 大西徳生, 鈴木茂行 : 「電力系統の動的電圧安定性に関する基礎実験と考察」, 電気学会論文誌 B, vol.114, No.2, pp145-151 (2008)
- [15] 電力中央研究所 システム技術研究所, 電力計算センター : 「一電中研 電力系安定度解析システムーL 法・Y 法・S 法プログラム解説書 (H19 公開バージョン)」, 電力中央研究所 (2008)
- [16] 小林広武, 伊藤正幸 : 「系統連系形太陽光発電用パワーコンディショナの過渡特性解析モデルの開発」, 電力中央研究所報告, R07027, 電力中央研究所 (2008)
- [17] 大槻博司 : 「電力系統における電圧崩壊現象の動的解析」, 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専

攻 博士論文 (1992)

## 発表文献

### ➤ 本論文に関する内容の発表

- [1] 石川幸一郎, 谷口治人, 鈴木宏和, 太田豊 : 「太陽光発電大量導入時の電圧安定性に関する基礎特性」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-12-069, PSE-12-086, 東京 (2012)
- [2] 石川幸一郎, 谷口治人, 鈴木宏和, 太田豊, 千貫智幸 : 「太陽光発電が導入された系統の電圧安定性についての基礎的な考察」, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, No.27, 北海道 (2012)
- [3] K.Ishikawa, H.Taniguchi, H.Suzuki, Y.Ota, Y.Mizuno : ‘Study on voltage characteristics and voltage stability in power system with large penetration’, Proc. IEEE Joint Technical Meeting on Static Apparatus, Switching and Protecting Engineering, Frontier Technology and Engineering, Power Engineering, High Voltage Engineering, and Power System Engineering, SA-13-033, SP-13-005, FTE-13-005, PE-13-005, HV-13-065, PSE-13-021, Bangkok, Thailand (2013) (発表予定)
- [4] 石川幸一郎, 谷口治人, 鈴木宏和, 太田豊, 水野陽二郎 : 「動特性を考慮した太陽光発電連系系統の電圧安定性に関する基礎特性」, 電気学会 全国大会, 6-020, 名古屋 (2013) (発表予定)

### ➤ 本論文の内容以外の発表文献 (第一著者)

- [1] 石川幸一郎, 横山明彦, 進士誉夫, 辻田伸介 : 「地域冷暖房システムによる電力系統の PV 大量導入時の余剰電力問題への貢献に関する基礎検討」, 電気学会 電力系統技術研究会, PSE-11-003, 北海道 (2011)
- [2] K.Ishikawa, A.Yokoyama, T.Shinji, S.Tsujita : ‘A Fundamental Study on effective operation of District Heating and Cooling system (DHC) as a solution to surplus power issue in power system with a large penetration of PV generation’, The International Conference on Electric Engineering (ICEE) 2011, ICEE-A073, HongKong (2011)
- [3] K.Ishikawa, A.Yokoyama, T.Shinji, S.Tsujita : ‘Study on the contribution to Electric Demand-Supply Control by District heating and Cooling System with electric Heat Pumps’, CIGRE International Symposium 2011, No.183, Bologna, Italy (2011)

### ➤ 本論文の内容以外の発表文献 (非第一著者)

- [1] 谷口治人, 千貫智幸, 太田豊, 石川幸一郎, 鈴木宏和 : 「太陽光発電導入時の過渡安定度に関する一考察」, 電気学会 全国大会, 6-076, 広島 (2012)
- [2] 小川耕平, 石川幸一郎, 横山明彦, 進士誉夫, 辻田伸介 : 「設備の最適化を考慮した地域冷暖房システムによる余剰電力問題への貢献に関する基礎的検討」, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, No.8, 北海道 (2012)

- [3] K.Ogawa, K.Ishikawa, A.Yokoyama, T.Shinji, S.Tsujita : ‘A study on the contribution to surplus power issue by District Heating and Cooling system considering the initial cost of equipment’, Proc. IEEE International Conf. on Power System Technology (POWERCON), 2012POWERCON-402, Auckland, New Zealand (2012)
- [4] 小川耕平, 石川幸一郎, 横山明彦, 進士誉夫, 渡部洋介, 須澤健太郎 : 「LFC 調整容量確保のための地域冷暖房システムの最適な設備容量および運用」, 電気学会 全国大会, 6-067, 名古屋 (2013) (発表予定)

## 附録A 誘導機負荷の動特性の導出

誘導機負荷の動特性を示す式を導出する。導出には文献[17]を参考とした。

回転運動の運動方程式は( A.1 )のように示される。ただし、 $I$  は回転子の慣性モーメント、 $\omega$  は回転子の角回転速度、 $T_e$  は電氣的入力加速トルク、 $T_m$  は機械的出力減速トルクを示す。また回転子の標準角速度を $\omega_0$  とおくと、すべりは( A.2 )のように書ける。電氣的入力のトルクは( A.3 )のように変形することができる。また機械的出力のトルクは( A.4 )のように変形できる。( A.2 )を時間微分すると( A.5 )が得られる。( A.3 )から( A.5 )を( A.1 )に代入すると( A.6 )が得られる。これが誘導機負荷の動特性を示す式である。

$$I \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m \quad (\text{A.1})$$

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \quad (\text{A.2})$$

$$T_e = \frac{P_e(1-s)}{\omega} = \frac{P_e(1-s)}{\omega_0(1-s)} = \frac{P_e}{\omega_0} \quad (\text{A.3})$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{\omega_0(1-s)} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{A.5})$$

$$I\omega_0^2 \frac{ds}{dt} = H \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{1-s} - P_e \quad (\text{A.6})$$

## 附録B 動的シミュレーション

本節では 5.1 以降に行う動的シミュレーションの方法について述べる。

電力系統内で満たされる関係式及び動特性は( B.1 ), ( B.2 )の形で示される。 $\mathbf{C}$  は定数を示す。例えば, 誘導機負荷の動特性である( A.6 )は  $\mathbf{f}$ , 系統内で満たされる関係式である( 4.2 )～( 4.6 )は  $\mathbf{g}$  である。常微分方程式( B.1 )に初期値を与えて解けば時間領域でのシミュレーション (動的シミュレーション) になる。

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{C}) \quad (\text{B.1})$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{C}) = 0 \quad (\text{B.2})$$

常微分方程式の解法としてはオイラー法,  $2 \cdot 3 \cdot 4$  次のルンゲクッタ法, トライペゾイダル法など様々な方法が考えられるが, 本論文ではオイラー法, または 4 次のルンゲクッタ法を用いる。計算精度, モデルの組み込みやすさなどの理由から 4 次のルンゲクッタ法を主として用いる。しかし 4 次のルンゲクッタ法では, 不連続性など強い非線形性を持つ方程式を解く際, 正しく積分計算を行えない場合が生じる。したがってこのような場合にはオイラー法を用いて計算を行う。

常微分方程式を解く際に  $\mathbf{x}$  だけでなく, それに対応する  $\mathbf{y}$  の値を求める必要がある。これを決定するのに必要な関係式が  $\mathbf{g}$  であり, この  $\mathbf{y}$  を求める計算を系統計算と呼ぶ。関数  $\mathbf{g}$  は非線形な連立方程式である。系統状態が 1 ステップ前から大きく変化しないものとして, 系統計算は 1 ステップ前の  $\mathbf{y}$  を初期値として準ニュートン法を用いて求めた。

図 B.1 に具体的な計算手順を示す。まず動的シミュレーションの初期値を設定する。繰り返し計算の初めに, 送電線の切り替えや指令値の変更などの系統状態の変更があれば, それに応じて  $\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{C}$  を変更する。次に系統計算, つまり  $\mathbf{x}_t$ ,  $\mathbf{C}$  を与えて  $\mathbf{g}$  を解くことで  $\mathbf{y}_t$  が得られる。次に  $\mathbf{y}_t$ ,  $\mathbf{C}$  を与え,  $\mathbf{x}_t$  を初期値として常微分方程式  $\mathbf{f}$  を解いて,  $\mathbf{x}_{t+\Delta t}$  を計算する。次の時間ステップも計算を続ける場合, 系統状態の変更に戻り, これを繰り返すことで時間領域でのシミュレーションを行うことができる。

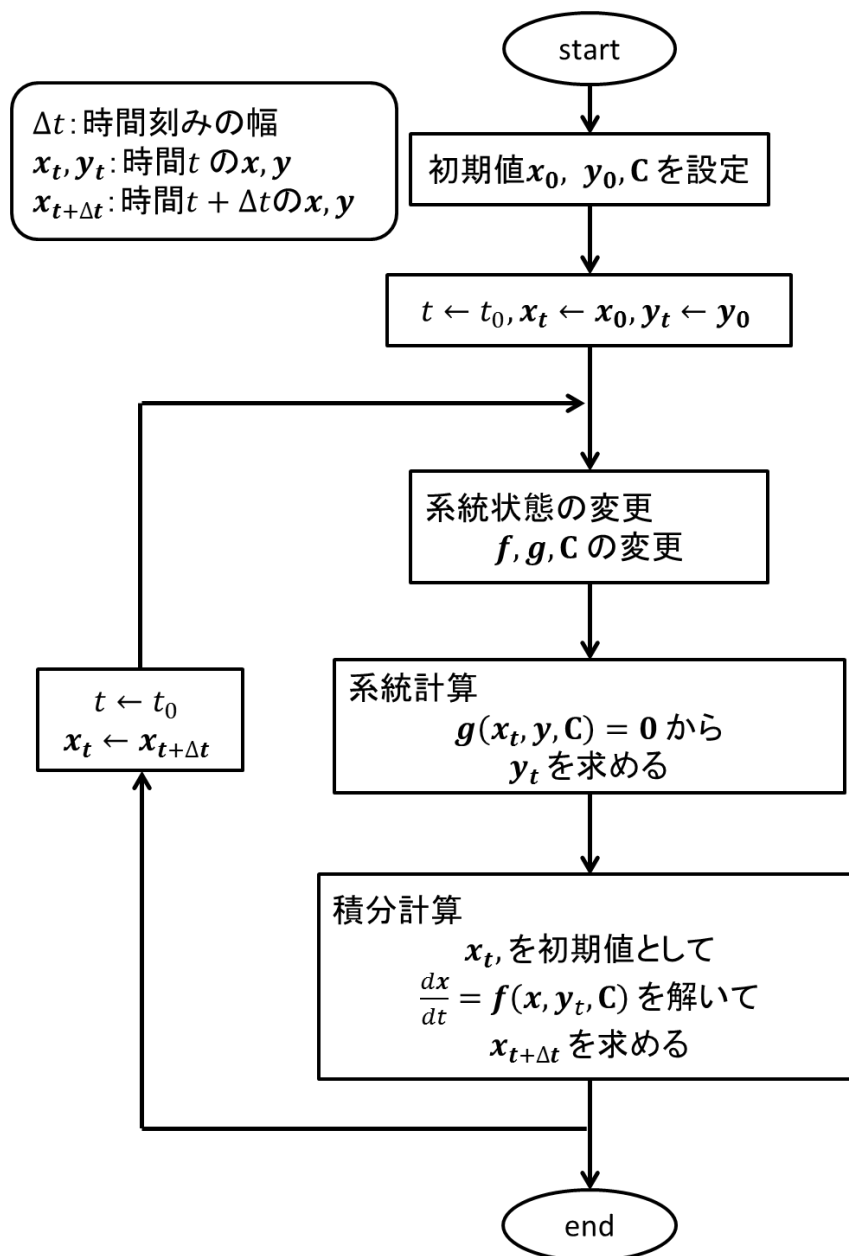


図 B.1 動的シミュレーションの手順

## 附録C 太陽光発電動的モデルの定数

6.1 で述べた太陽光発電動的モデルの定数の決定方法について述べる。

PI 制御系の入力は太陽光発電出力電力  $P_{PV}$  の偏差で、出力は出力電流  $I_{PV}$  の偏差である。太陽光発電の単位容量に対して系統の容量が非常に大きいと仮定し、連系点の電圧  $V_r$  が 1.0 p.u. で固定と考えると、太陽光発電の制御システムは図 C.1 のように示される。ただし、ここでは PCS の電流制限を考えない。

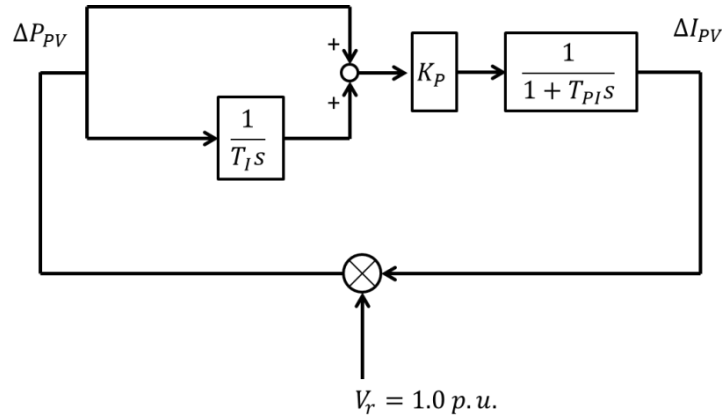


図 C.1 太陽光発電動的モデルの定数の決定

図 C.1 のシステムの安定性について考察する。PI 制御系の入出力の伝達関数は( C.1 )のように示される。また伝達関数の極は( C.2 )のように書ける。極が虚数部を持たなければ、システムは振動せず、極の実部が二つとも負であるならば、システムは安定となる。

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta P_{PV}} = \frac{K_P(1 + T_I s)}{K_P + (1 + K_P)T_I s + T_{PI}T_I s^2} \quad (C.1)$$

$$s = \frac{-(1 + K_P) \pm \sqrt{(1 + K_P)^2 - 4K_P \frac{T_{PI}}{T_I}}}{2T_{PI}} \quad (C.2)$$

太陽光発電の PCS の応答は数十ミリ秒であるので、本論文では  $T_{PI}$  を 0.01 s とした。( C.2 )から、 $T_I$  を 0.01 s とすれば、システムは振動しない。 $T_I$  を 0.01 s と設定すれば、極は( C.3 )のように書ける。( C.3 )から、システムが安定となるためには、 $K_P$  が正となればよい。PI 制御の応答が速い方が好ましいため、 $K_P$  はなるべく大きくとるものと考えられる。本論文では、動的シミュレーションの系統計算の収束性を損ねない値である 10 を  $K_P$  の値として設定した。

$$s = -\frac{K_P}{T_{PI}}, -\frac{1}{T_{PI}} \quad (C.3)$$

## 附録D 記号と用語の定義

本論文で用いた記号を表 D.1 にまとめる。また本論文に特有な語句や一般的に用いられても定義が曖昧な語句について表 D.2 にその定義をまとめた。

表 D.1 本論文中で用いた記号

$V_s$	送電端電圧（複素数）
$V_r$	受電端電圧（複素数）
$v_s$	送電端電圧の大きさ
$v_r$	受電端電圧の大きさ
$\theta$	受電端電圧を基準とした送電端電圧位相
$I_t$	送電線電流（受電端方向正，複素数）
$x$	送電線インピーダンス（リアクタンス成分）
$P_{all}$	受電端以下の総消費有効電力
$Q_{all}$	受電端以下の総消費無効電力
$\cos \delta$	受電端以下の総消費電力の力率
$P_L$	負荷消費有効電力
$Q_L$	負荷消費無効電力
$\alpha$	負荷の有効電力と無効電力の比率（ $Q_L/P_L$ ）
$P_{PV}$	太陽光発電出力電力（力率 1.0 運転）
$i_{PV}$	太陽光発電出力電流（力率 1.0 運転）
$P_{PV,max}$	定常状態における太陽光発電出力電力
$i_{PV,th}$	PCS による電流制限値
$r_{IM}$	誘導機負荷モデル内部レジスタンス
$x_{IM}$	誘導機負荷モデル内部リアクタンス
$H_{IM}$	誘導機負荷慣性定数
$s$	誘導機負荷すべり
$P_m$	誘導機負荷機械的出力
$P_e$	誘導機負荷電氣的入力（ $P_L$ と同義）
$\beta$	(4.5) の $v_r^2$ の係数
$\gamma$	(4.6) の $v_r^2$ の係数
$K_P$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の比例ゲイン
$T_I$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の積分時定数
$T_{PI}$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の遅れ時定数

$P_{PV,ref}$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の $P_{PV}$ 目標値
$I_{PV,ref}$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の $I_{PV}$ 基準値
$i_{PV}^*$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の出力電流値
$y_I$	太陽光発電動的モデル PI 制御系の積分器出力値
$P_{PV,ref}^*$	$P_{PV,ref}$ 目標値（脱落，復帰特性の模擬用）
$T_{PV}$	$P_{PV,ref}$ 変化の遅れ時定数
$v_r^*$	PCS の電圧検出値
$T_{DV}$	PCS の電圧検出遅れ時定数

表 D.2 語句の定義

電圧安定性	電力系統内で擾乱が生じた際に系統内の電圧を維持することができるかどうかを示す指標
PV 曲線	負荷消費有効電力（P）と負荷端電圧（V）の関係を示す曲線
静的な解析	系統内の動特性が安定した定常状態を対象とした解析
準静的な解析	系統内の動特性の内，誘導機負荷の動特性を考慮した解析
動的な解析	系統内の動特性の内，誘導機負荷と太陽光発電の動特性を考慮した解析
定 P—定 I 切り替えモデル	PCS の電流制限を考慮した太陽光発電の静的モデル（図 2.3）
ノーズ端	PV 曲線の左右に存在する安定限界潮流を示す特性
切替電圧	定 P—定 I 切り替えモデルにおいて太陽光発電出力特性が切り替わる電圧
負荷変動	誘導機負荷の機械的出力が変化する擾乱
送電線事故	雷などにより一部送電線が切り離されることで送電線インピーダンスが増加する擾乱
等すべり曲線	あるすべりでの負荷消費電力と負荷端電圧の関係を示す曲線
見かけの機械的出力	(4.1) の右辺第一項 ( $P_m/(1-s)$ )
電圧崩壊現象	準静的な解析において動作点が推移した結果電圧が低下し続ける現象
系統崩壊現象	準静的な解析において動作点が存在しなくなるにより系統が維持できなくなる現象