



修士論文

太陽光発電大量導入時における
電力系統の基礎的電圧特性へ与える
負荷特性と電圧制御の影響

Fundamental Characteristics on Voltage Stability
by Load Characteristics and Voltage Control
in Power System with PV Large Penetration

平成 26 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

37-126484

水野陽二郎

目次

第1章 序論

- 1.1 本論文の背景
- 1.2 本論文の目的
- 1.3 本論文の構成

第2章 電圧安定性検討手法

- 2.1 PVカーブを用いた電圧安定性検討手法
- 2.2 誘導機負荷の動特性を考慮した場合の電圧安定性検討手法
 - 2.2.1 誘導機負荷の特性を考慮したPVカーブ
 - 2.2.2 誘導機負荷の動特性
- 2.3 本研究で扱う電力系統モデル
- 2.4 本研究で扱う擾乱

第3章 定電力負荷が混在する場合

- 3.1 負荷が混在することの表現
- 3.2 負荷増大時の電圧安定性
 - 3.2.1 誘導機負荷のみの場合
 - 3.2.2 誘導負荷と定電力負荷が混在する場合
- 3.3 負荷減少時の電圧安定性
 - 3.3.1 誘導機負荷のみの場合
 - 3.3.2 誘導負荷と定電力負荷が混在する場合
- 3.4 太陽光出力急減時の電圧安定性
 - 3.4.1 誘導機負荷のみの場合
 - 3.4.2 誘導負荷と定電力負荷が混在する場合
- 3.5 太陽光出力急増時の電圧安定性
 - 3.5.1 誘導機負荷のみの場合
 - 3.5.2 誘導負荷と定電力負荷が混在する場合
- 3.6 送電線インピーダンス増加時の電圧安定性
 - 3.6.1 誘導機負荷のみの場合
 - 3.6.2 誘導負荷と定電力負荷が混在する場合
- 3.7 誘導機負荷が電圧安定性に与える影響の考察

第4章 タップ付き変圧器が動作する場合

- 4.1 タップ付き変圧器
- 4.2 タップ付き変圧器を含むシステムのモデル化
- 4.3 タップ比と PV カーブ
- 4.4 送電線インピーダンス増加時のタップ動作による電圧回復
 - 4.4.1 タップが有効に動作する場合
 - 4.4.2 タップ動作が追従できない場合
- 4.5 太陽光発電出力ランプ状増加時のタップによる電圧回復
 - 4.5.1 タップなしでも電圧崩壊には至らない場合-
 - 4.5.2 タップなしでは電圧崩壊に至る場合-
- 4.6 タップ付き変圧器の有効性

第5章 太陽光発電出力の無効電力制御を行う場合

- 5.1 PV の無効電力出力
- 5.2 PV の無効電力出力と PV カーブ
- 5.3 PV の無効電力出力による電圧回復
- 5.4 PV 無効電力制御による電圧回復
- 5.5 PV 無効電力制御の有効性

第6章 結論

- 6.1 まとめ
- 6.2 今後の課題

謝辞

参考文献

発表文献

第 1 章 序論

1.1 本論文の背景

近年、地球温暖化問題への懸念が高まるにつれ、二酸化炭素などの温室効果ガス削減の観点から、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いる。中でも、太陽光発電は設置が比較的容易であることから、家庭レベルでも導入が進んでいる。また、経済産業省による 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、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る^{[1][2]}。2012 年 7 月には、固定価格買取制度も導入され、太陽光発電の設備認定数もかなり伸びている。さらに NEDO の太陽光ロードマップによれば、太陽光発電の発電コストの目標を下表 1.1 のように設定しており、発電コストの低下は今後の太陽光発電の導入を促進させ、大量導入につながると考えられる^[3]。

表 1.1 NEDO による発電コスト目標

達成時期	2020	2030	2050
発電コスト	14 円/kWh 程度	7 円/kWh 程度	<7 円/kWh

太陽光発電には以下のような特徴がある。

- ・出力が日射量に依存し、不安定である。
- ・回転機型の発電機と異なり、慣性がない。
- ・系統の末端である配電系統に連系される。

このような特徴から、太陽光発電が大量に連系された場合には、電力系統の周波数、発電機の同期運転、電圧などの安定性に影響を与えることが考えられ、検討が必要である。

先行研究では実際に電圧安定性に問題が生じるケースとして負荷変動、太陽光発電出力変動、送電線事故が検討されている^[4]。また、当該研究では、太陽光発電大量導入時には、この電圧安定性の問題が一般的に知られている PV カーブの右側ノーズ端だけでなく、左側のノーズ端でも起こりうることを示されている。電圧不安定を起こしうる事象とその特徴を以下の表 1.2 にまとめる。

表 1.2 電圧不安定を起こしうる事象と問題となるノーズ端

電圧不安定を起こす事象	問題となるノーズ端
負荷増加	右側
負荷減少	左側
太陽光発電出力増加	左側
太陽光発電出力減少	右側

このような、太陽光発電が大量導入された場合の電圧安定性についての研究はほとんどなされていないが、先に述べたような、太陽光発電の大量導入が予期される現状では検討しておく必要のある事項である。

1.2 本論文の目的

本論文では、太陽光発電が大量に連系された系統における電圧安定性について論じる。太陽光発電が大量に連系されると、電力の潮流状態は変化し、系統の電圧特性が変化し、電圧安定性にも影響が出る。その際の電圧安定性に関する問題を、PV カーブを用いた検討により、未然に発見することを目的としている。

太陽光発電大量導入時の電圧安定性について議論した先行研究では系統の負荷として誘導機負荷のみを想定していた^[4]。本研究では、より実際に近い形のモデルを扱う。また、電圧安定性に大きな影響を与える問題に対して、タップ付き変圧器（LTC）や、PCS を用いた PV の無効電力制御の有効性についても検討する。このような研究は今後太陽光発電を大量導入していく際の、電圧安定性を損なわないような計画立案に役立つと考えている。

1.3 本論文の構成

まず、第 2 章で PV カーブを用いた電圧安定性検討手法と本研究で扱うモデルについて述べる。次に第 3 章で、定電力負荷が混在する場合の電圧安定性について議論し、様々な負荷特性が電圧安定性に与える影響について考察する。第 4 章ではタップ付き変圧器を含む系統においてそのモデル化について詳述し、PV カーブと関連付けて、その有効性を検討する。第 5 章では、PV の無効電力制御とその有効性について、これも PV カーブと関連付けて説明をする。最後に第 6 章で結論を述べる。

第 2 章 電圧安定性検討手法

2.1 PV カーブを用いた電圧安定性検討手法

PV カーブ導出の際に用いる電力系統モデルを図 2.1 に、また、変数を表 2.1 に示す。

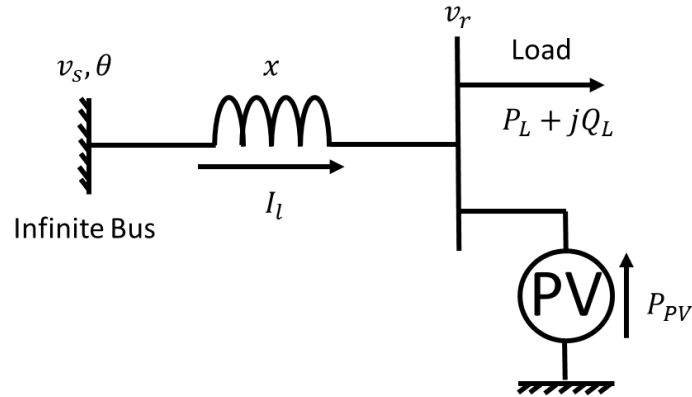


図 2.1 PV カーブ導出のための電力系統モデル

表 2.1 各変数の説明

θ	受電端電圧を基準とした送電端電圧位相
I_l	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）
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）
α	負荷の有効電力と無効電力の比率（ Q_L/P_L ）

このモデルにおいて、オームの法則および負荷端以下の消費電力の関係から以下の式 (2.1) (2.2) が得られる。

$$v_s e^{j\theta} - v_r = jxI_l \quad (2.1)$$

$$P_{all} + jQ_{all} = v_r \bar{I}_l \quad (2.2)$$

これらから I_l を消去すると以下の式 (2.3) のようになる。

$$v_s^2 v_r^2 = (v_r^2 + x Q_{all})^2 + x^2 P_{all}^2 \quad (2.3)$$

ここで太陽光発電が力率一定運転を行うと仮定すると以下の式(2.4)～(2.6)が成り立つ。

$$P_{all} = P_L - P_{PV} \quad (2.4)$$

$$Q_{all} = Q_L \quad (2.5)$$

$$Q_L = \alpha P_L \quad (2.6)$$

これを式(2.3)に代入して

$$v_r^4 + a v_r^2 + b = 0 \quad (2.7)$$

$$a = 2x\alpha P_L - v_s^2 \quad (2.8)$$

$$b = x^2 \left((1 + \alpha^2) P_L^2 - 2P_{PV} P_L + P_{PV}^2 \right) \quad (2.9)$$

式(2.7)によれば、 P_L を決定すれば v_r が求まる。すなわち、 P_L と v_r の関係を図示した PV カーブを描くことができる。例として図 2.2 に表 2.2 のような条件で描いた二種類の PV カーブを示す。この PV カーブと負荷特性を表す曲線との交点が動作点となる。例えば、負荷条件が $0.1[p.u.]$ の定電力負荷の場合、負荷特性は図 2.2 中の実直線のようになる。この直線は Case1 の直線とは交点をもつが Case2 の場合、交点を持っていない。このことは $P_{PV} = 1.8[p.u.]$ である Case2 においては電圧値が解を持たず、不安定な状態であることを示している。一方で、図 2.2 中破直線で示すように負荷条件が $1.05[p.u.]$ の場合はどちらのケースでも交点を持つ。このように PV カーブと負荷特性を表す曲線との交点から、電圧安定性を論ずることができる。

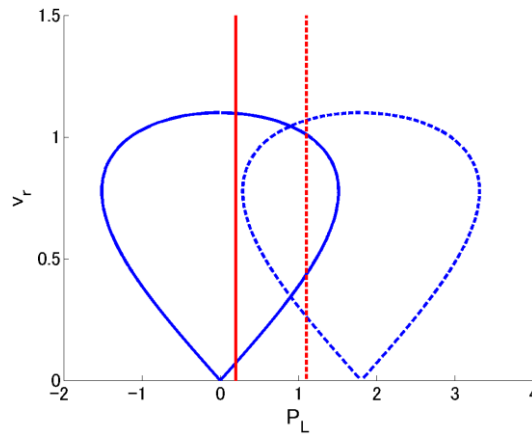


図 2.2 PV カーブの例

表 2.2 各 PV カーブのパラメータ

	v_s	x	P_{PV}
Case1 (実線)	1.1 [p. u.]	0.4 [p. u.]	0 [p. u.]
Case2 (破線)	1.1 [p. u.]	0.4 [p. u.]	1.8 [p. u.]

2.2 誘導機負荷の動特性を考慮した場合の電圧安定性検討手法

ここでは、負荷が誘導機である場合に PV カーブを用いて電圧安定性を検討する方法を述べる。まず、誘導機の負荷特性を考慮した PV カーブの定式化を行い、次に、その動特性について説明する。

2.2.1 誘導機負荷の特性を考慮した PV カーブ

誘導機負荷を含む系統においては、その電圧安定性を PV カーブと負荷特性を表す曲線との交点から論ずることができない。これは誘導機負荷の負荷特性にすべりという動的な要素が含まれるために、 P_L の値を決めても PV カーブと負荷特性の曲線が一意に決まらないためである。さらに、誘導機負荷では電圧が変化することで、すべりが変化し無効電力が大幅に変化するので、負荷力率一定での PV カーブをそのまま用いることができない。以下に、誘導機負荷を含む系統の電圧安定性を、PV カーブを用いて議論する方法を示す。

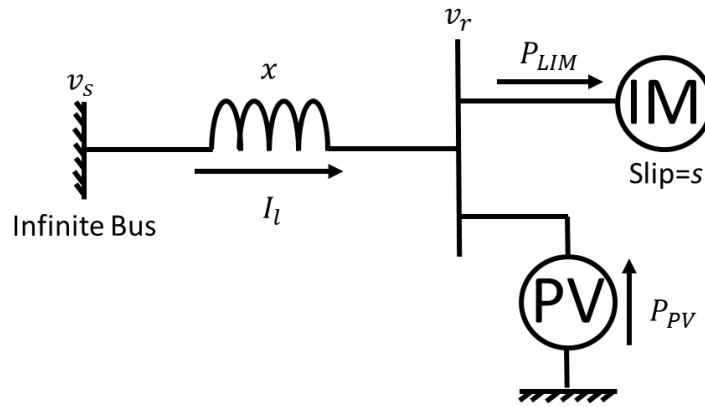


図 2.3 誘導機負荷を含む電力系統モデル

誘導機を含む電力系統のモデルを図 2.3 に示す。誘導機負荷の消費有効電力を P_{LIM} 、消費負荷無効電力を Q_{LIM} と表せば、この系統において以下の式 (2.10) ～ (2.12) が成り立つ。

$$v_s^2 v_r^2 = (v_r^2 + x Q_{all})^2 + x^2 P_{all}^2 \quad (2.10)$$

$$P_{all} = P_{LIM} - P_{PV} \quad (2.11)$$

$$Q_{all} = Q_{LIM} \quad (2.12)$$

次に、本研究で扱う誘導機負荷モデルを図 2.4 に示す。このモデルは、電力中央研究所の Y 法で用いられるモデルを簡易にしたものである^[5]。誘導機負荷は 1 kW 級のものが多数台並列に連系されていることを想定し、これを集約して 1 台の誘導機負荷として模擬する。 r_{IM} と x_{IM} の値は自己容量ベースでそれぞれ、0.061[p.u.]、0.2[p.u.]としている。この値は電力中央研究所が昭和 55 年に内外の文献などから 238 台分のデータを集め、誘導機の等価回路の各種パラメータについて統計を取った結果を標準定数として用いているものを参考に決定している^[6]。

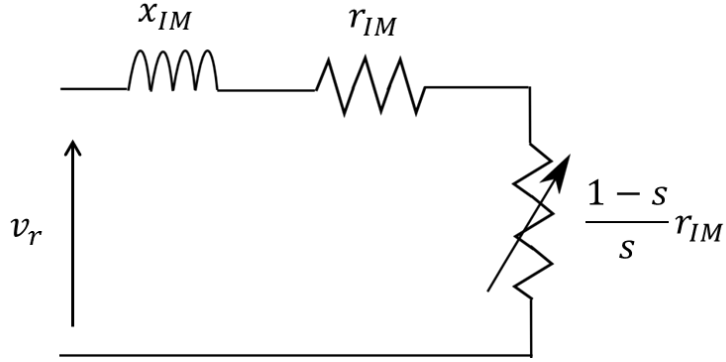


図 2.4 誘導機モデル

このモデルにおいて、誘導機負荷の消費する有効電力 P_{LIM} 、無効電力 Q_{LIM} はすべり s 、端子電圧 v_r を用いて以下の式(2.13)(2.14)のように表される。

$$P_{LIM} = \frac{s r_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2 x_{IM}^2} v_r^2 = \beta v_r^2 \quad (2.13)$$

$$Q_{LIM} = \frac{s^2 x_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2 x_{IM}^2} v_r^2 = \gamma v_r^2 \quad (2.14)$$

これを用いて、式(2.10)より P_{LIM} 、 Q_{LIM} を消去すると、以下の式(2.15)～(2.18)が得られる。

$$a v_r^4 + b v_r^2 + c = 0 \quad (2.15)$$

$$a = (1 + x\gamma)^2 + \beta^2 x^2 \quad (2.16)$$

$$b = -2\beta x^2 P_{PV} - v_s^2 \quad (2.17)$$

$$c = x^2 P_{PV}^2 \quad (2.18)$$

式(2.15)によれば、誘導機のすべり s を与えれば v_r が求まり、式(2.13)に v_r を代入することで P_{LIM} が得られる。すなわち、 s をパラメータとして振ることで、PVカーブを描くことができる。例として以下の図2.5、図2.6に P_{PV} が0[p.u.]と1.5[p.u.]の場合の誘導機負荷を含む電力系統のPVカーブを示す。

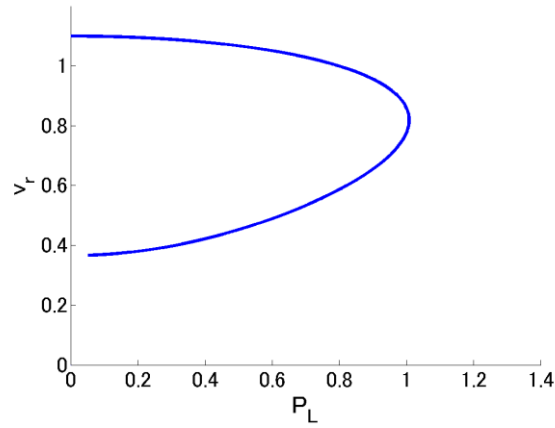


図 2.5 誘導機負荷を含む系統の PV カーブ ($P_{PV} = 0$ の場合)

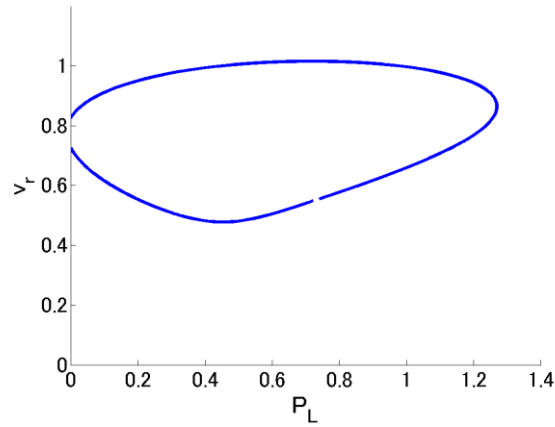


図 2.6 誘導機負荷を含む系統の PV カーブ ($P_{PV} = 1.5$ の場合)

この PV カーブと 2.1 項で導出した PV カーブとの違いは負荷消費電力を式(2.11)のように表した点にある。つまり本節で導出した PV カーブは誘導機の負荷特性までも考慮している。 s を与えて連立方程式を解くことは、このすべりでの誘導機負荷の負荷力率で描かれる PV カーブと 2.1 項で述べた負荷特性を表す曲線との交点を求めることに相当する。言い換えれば、本節で導出した PV カーブは、すべりを変化させて得られた、動作点の集合である。下図 2.7, 2.8 はすべり s を 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 と変化させた場合の PV カーブと負荷特性を表す曲線の変化を表したものである。これを見ると、交点の軌跡が誘導機の動特性を考慮した場合の PV カーブとなっており、図 2.7 と図 2.5 が、図 2.8 と図 2.6 がそれぞれ対応していることがわかる。

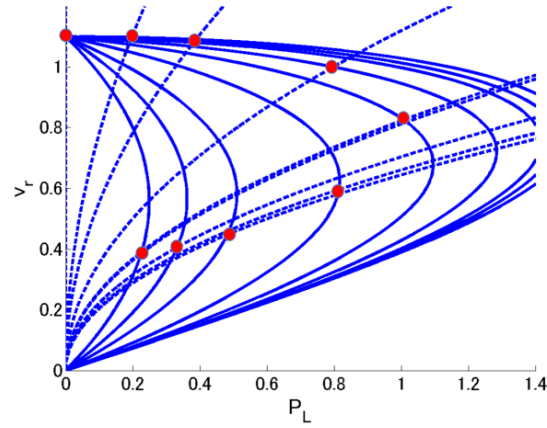


図 2.7 すべりが変化した場合の PV カーブと負荷特性曲線との交点 ($P_{PV} = 0$ の場合)

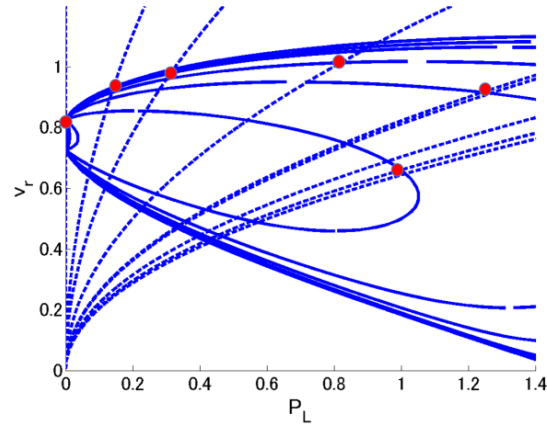


図 2.8 すべりが変化した場合の PV カーブと負荷特性曲線との交点 ($P_{PV} = 1.5$ の場合)

2.2.2 誘導機負荷の動特性

こうして導出した誘導機負荷の特性を考慮した PV 曲線は、図 2.3 の系統で、誘導機負荷が、あるすべりの値 s をとる場合に静的に成り立つ式(2.15)から得られた誘導機の負荷の動作点の集合であり、誘導機負荷の動特性については考慮されていない。ここでは以降で PV カーブを用いて電圧安定性の議論をする準備として、誘導機負荷の動特性について述べる。

誘導機負荷の動特性は以下の式(2.19)で表される^[7]。

$$H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM} \quad (2.19)$$

ここで P_{LIMm} は誘導機の機械的出力を表す。PV カーブ上の動作点は、誘導機負荷の動特性によるすべりの変化によって、PV カーブ上を推移する。この動作点の推移を追うことで、電圧安定性について検討することが出来る。

誘導機負荷の消費電力 P_{LIM} は式(2.13)で与えられる。具体例としてすべりが 0.03 の場合について図示すると図 2.9 のようになっている。

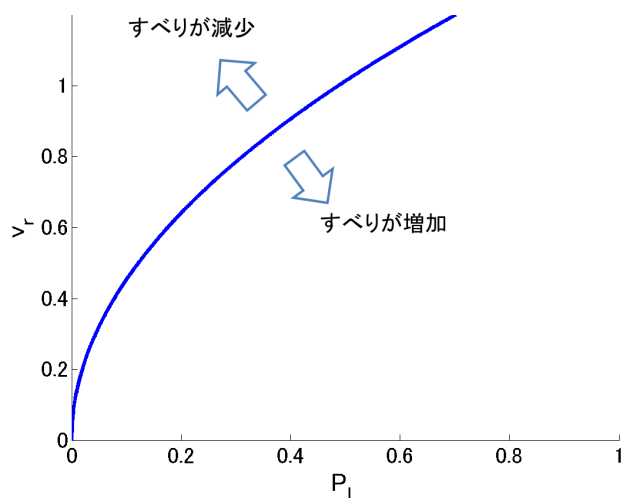


図 2.9 等すべり曲線($s = 0.03$)

この曲線を、曲線上の点が同じすべりの値を取ることから等すべり曲線と呼称する。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。具体的には、誘導機負荷が動作するような、すべりの小さい領域では、すべりが増加すると、等すべり曲線は右下方方向に、すべりが減少すると左上方方向に推移する。このようにすべりが変化した時の等すべり曲線と PV カーブの交点の軌跡を追うことで、誘導機負荷を含む電力系統の電圧安定性を議論することができる。

また、本論文において、誘導機の軸負荷は一定とする。一般に誘導機の軸負荷は誘導機の負荷の種類によって異なるものの、回転数の 1 ～ 3 乗に比例するが、本研究では最も厳しい典型例として、軸負荷一定の条件で解析を行う。

このような誘導機負荷の動特性を考慮して PV カーブを用いて電圧安定性を議論した先行研究はあるが[8]、誘導機負荷のみを負荷として想定したものであり、他の負荷が混在した場合を扱った研究はない。次章では本研究で扱うモデルとして他の負荷を含む電力系統モデルを示す。

2.3 本論文で扱う電力系統モデル

本論文で扱う電力系統モデルについて説明する。図 2.10 に示すように、負荷として誘導機負荷と定電力負荷が混在することを考慮し、また、負荷側の電圧を制御する機構としてタップ付き変圧器(LTC)やPVの無効電力制御についても考察する。

混在する負荷を定電力特性とした理由としては、後に 3 章で述べるように、電圧安定性の議論で主に用いられる静的な負荷である、定電力負荷、定電流負荷、定インピーダンス負荷の中で、定電力負荷が最も電圧安定性に対して厳しい振る舞いをするという点がある。

送電線リアクタンスはケースに応じて 0.4~0.52 までの値を用い、送電線潮流がこのリアクタンスから $\frac{\text{送電端電圧} \times \text{受電端電圧}}{\text{送電線リアクタンス}}$ で概算される 1.9[p.u.]程度に収まるような場合を扱う。

負荷の範囲としては軽負荷である 0.4[p.u.]程度から重負荷である 1.3[p.u.]程度の範囲でシミュレーションを行う。これに対し、PV 出力は 0[p.u.]~1.5[p.u.]までの値を用いる。主に PV 出力が負荷よりも大きい場合、すなわち、太陽光発電が大量導入され、逆潮流が発生しているようなケースを扱う。

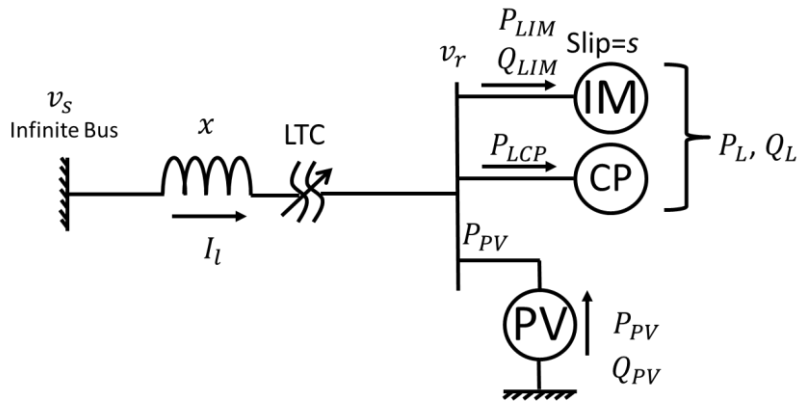


図 2.10 本論文で扱う電力系統モデル

2.4 本研究で扱う擾乱

表 1.2 に電圧不安定をもたらす事象を示したが、これらは、電圧不安定を起こす、代表的な事象であり、本研究でもこれらの擾乱を扱う。表 2.3 にそれぞれの擾乱の特徴を示す。

表 2.3 本研究で扱う擾乱

擾乱の種類	機構
負荷増大	誘導機の機械的出力が増加することにより、すべりが増加することで等すべり曲線が、右下方向に推移。右側ノーズ端の存在により、 $H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM}$ を満足する平衡点がなければ電圧崩壊が起こりうる。
負荷減少	誘導機の機械的出力が減少することにより、すべりが減少することで等すべり曲線が、左上方向に推移。左側ノーズ端の存在により、 $H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM}$ を満足する平衡点がなければ電圧崩壊が起こりうる。

太陽光発電 出力減少	PV カーブが縮小し、動作点が変化することで、 $H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM}$ に従い、すべりが変化していく。右側ノーズ端の存在により、電圧崩壊が起こりうる。
太陽光発電 出力増加	逆潮流が大きくなるほど太陽光発電出力が増加すると、PV カーブは縮小する。このとき、軽負荷状態であれば左側ノーズ端の存在により電圧崩壊が起こりうる。
送電線インピーダンス増加	PV カーブが縮小する。軽負荷状態であれば左側ノーズ端の存在により、重負荷状態であれば右側ノーズ端の存在により、電圧崩壊が起こりうる。

次章ではこれらの擾乱が発生した場合の電圧安定性について、誘導機の場合と誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合の2パターンを想定し議論する。

第3章 定電力負荷が混在する場合

3.1 負荷が混在することの表現

誘導機負荷が混在するモデルを表現するために、誘導機比率(**ratio**)という概念を導入する。誘導機比率は負荷として存在する誘導機の台数が変化したことを表現するパラメータで、誘導機負荷のみが存在し、それぞれが定格運転状態のもと、 $P_{LIM} = 1.0[\text{p.u.}]$ となるという条件での誘導機の台数を、 $\text{ratio} = 1$ と表現し、この場合を基準として、 ratio が変わった場合は、誘導機の台数が ratio 倍になり P_{LIM} も ratio 倍になるとする。このとき、 P_L として減った $1.0 \times (1 - \text{ratio})[\text{p.u.}]$ 分の定電力負荷が入ってくると考える。つまり $P_{LCP} = 1 - \text{ratio}[\text{p.u.}]$ となる。例えば $\text{ratio} = 0.75$ のときでは、図 3.1 のような状態を想定していることになる。この場合は基準となる負荷状態 $1.0[\text{p.u.}]$ の 25% である $0.25[\text{p.u.}]$ の定電力負荷が存在するものとし、誘導機負荷の容量が誘導機負荷のみの場合の 0.75 倍に減ったことを誘導機負荷のパラメータ、 r_{IM} と x_{IM} を変化させることで表現する。具体的には並列接続されている誘導機負荷の台数が減ると考えればよいので、 $\text{ratio}=1$ の場合の $r_{IM}=0.061$ と $x_{IM}=0.2$ を、以下の式(3.1), (3.2) を用いて修正する。

$$r_{IM} = 0.061 \times \frac{1}{\text{ratio}} \quad (3.1)$$

$$x_{IM} = 0.2 \times \frac{1}{\text{ratio}} \quad (3.2)$$

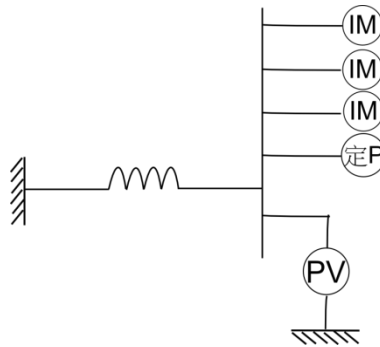


図 3.1 $\text{ratio} = 0.75$ の時の概念図

電力系統において、電圧変動時の過渡特性について誘導機の比率を考慮した議論を行っている論文はこれまでもある^[9]が、誘導機比率を考慮した PV カーブについて研究しているものはない。次項以降では、2.4 節で紹介した電圧不安定を引き起こす可能性がある 5 種類の擾乱に対して、誘導機比率の異なる電力系統で、電圧安定性がどう変わってくるか

を明らかにする。

3.2 負荷増大時の電圧安定性

はじめに、負荷が増大する場合を考える。時間 $t = 1[s]$ の時点で誘導機負荷が過負荷となつて、機械的出力 P_{LIMm} が 1.2 倍に増加するとする。 P_{LIMm} が増加すると $H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM}$ により、すべりが増加し、動作点が変化していく。また、定電力負荷が混在する場合は P_{LCP} も 1.2 倍になるとする。

3.2.1 誘導機負荷のみの場合

まず、誘導機負荷のみの場合について検討する。各パラメータを表 3.1 に示す。

表 3.1 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.989	1.05	0.064	0.4	1.5	0.0689

この時の PV カーブ上の動作点の動きを以下の図 3.2 を用いて追ってみる。

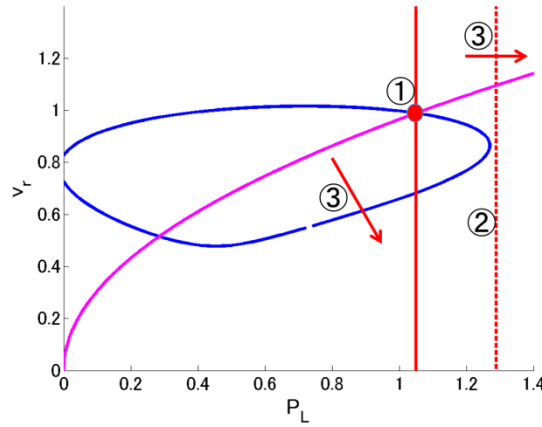


図 3.2 負荷増加時の PV カーブと等すべり曲線 (ratio = 1.0)

まず、図 3.2 中の①は初期の動作点である。この時、誘導機負荷の動特性を支配する式 (2.19) の右辺第一項は P_{LIM} に等しく 1.05 であり、赤実線で示されている。

$$H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM} \quad (2.19: \text{再掲})$$

$t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} が 1.2 倍に増加した直後を考えると、式 (2.19) の右辺第一項も 1.29 へと増加し、図中②の赤破線で示される。結果、式 (2.19) の右辺は正の値を取り、すべりは増加していく。③ではすべりが増加することにより、式 (2.19) の右辺第一項を示す赤破線が右へと移動していき、同時に等すべり曲線が右下方向に移動していく。等

すべり曲線の移動に伴い、はじめは、消費有効電力 P_L は増加していく。しかし、ノーズに達しても動作点は赤点線の左側にあり、つまり、式(2.19)の右辺は正であるため、すべりは増加し続け、等すべり曲線は右下方向への推移を続け、 P_L は減少に転ずる。PVカーブと等すべり曲線の交点の推移を見れば明らかなように、この間、 v_r は減少し続ける。

図3.3にすべりの時間推移を、図3.4に消費電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

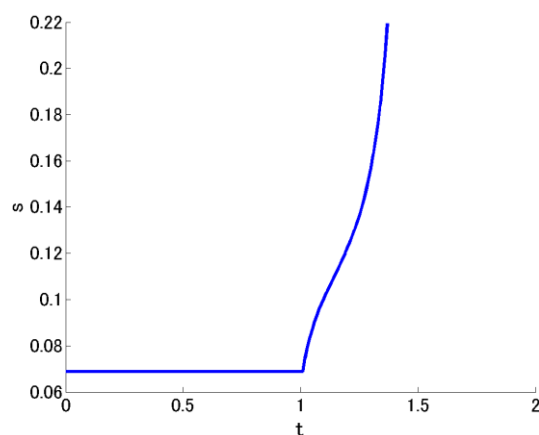


図 3.3 すべりの時間推移 (ratio = 1.0, 負荷増大により電圧崩壊に至る)

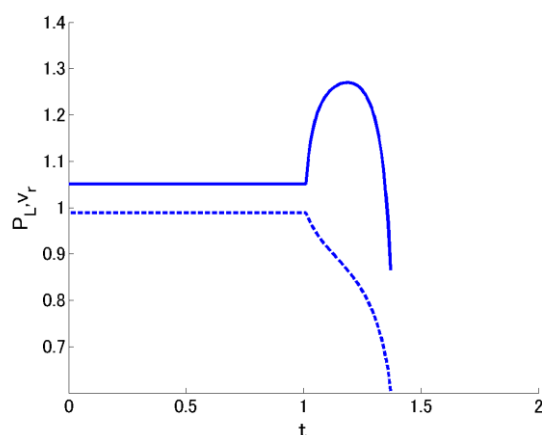


図 3.4 消費電力 P_L , 電端電圧 v_r の時間推移 (ratio = 1.0, 負荷増大により電圧崩壊に至る)

このように、この場合は負荷増大により電圧崩壊が起こる。ここで特に注目すべきは、送電線潮流でみると、初期状態での無限大母線への向けての有効電力潮流である0.45[p.u.]から約0.24[p.u.]へと減少させる方向への負荷増加時に、電圧不安定が発生していることである。これは、誘導機の軸負荷が増加したことにより、誘導機の無効電力消費が増大したことが大きな要因であると考えられる。

3.2.2 誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合

次に、誘導機負荷と定電力負荷が $ratio = 0.5$ で混在する場合について 3.2.1 と同様の負荷増大が起こることを考える。時間 $t = 1[s]$ の時点で誘導機負荷が過負荷となって、機械的出力 P_{LIMm} と定電力負荷 P_{LCP} が 1.2 倍に増加する。初期条件は誘導機出力 $P_{LIM} = 0.55$ と定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5$ とし、これらの和である負荷消費電力 P_L が 1.05[p. u.]となる。また、定電力負荷の力率は 1 とする。各パラメータを表 3.2 に示す。

この場合は、負荷増大後、過渡的な変化を経て安定な動作点に至る。負荷増大の前後で、 $P_{LIM}[p. u.]$ は $0.55 \rightarrow 0.67$ 、 $P_{LCP}[p. u.]$ は $0.5 \rightarrow 0.6$ 、 $Q_L[p. u.] = Q_{LIM}[p. u.]$ は $0.014 \rightarrow 0.023$ へと増加し、 $v_r[p. u.]$ は $1.04 \rightarrow 1.02$ と減少する。また、すべり s は $0.0647 \rightarrow 0.0858$ と増加する。

表 3.2 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	1.04	1.05	0.014	0.4	1.5	0.0647
安定化後		1.02	1.27	0.023			0.0858

この時の PV カーブ上の動作点の動きを以下の図 3.5 を用いて追ってみる。

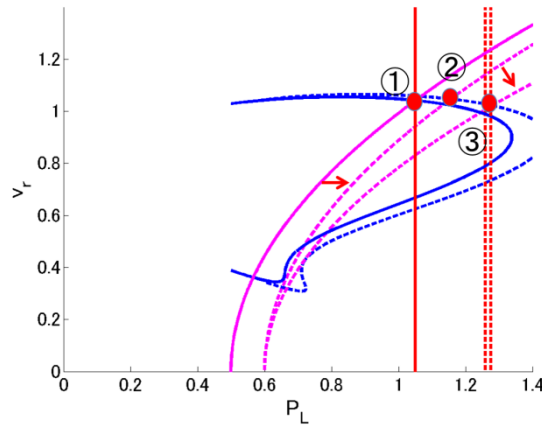


図 3.5 負荷増加時の PV カーブと等すべり曲線 (ratio = 0.5)

まず、図 3.5 中の①は初期の動作点である。この時、誘導機負荷の動特性を支配する式 (2.19) の右辺第一項は誘導機負荷 P_{LIM} に等しく 0.55[p. u.]であり、定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5[p. u.]$ との和である $P_L = 1.05[p. u.]$ が、赤実線で示されている。

$$H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM} \quad (2.19: \text{再掲})$$

$t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} が 1.2 倍に増加し、 P_{LCP} も 0.5[p. u.]から 0.6[p. u.]へ増加した直後を考えると、動作点は増加後の PV カーブと初期のすべり 0.0647 での等すべり曲線との交点である図中②に移り、 P_L 、 v_r はステップ上に変化する。この時、式 (2.19) の

右辺第一項は 0.66 へと増加し、 $P_{LCP} = 0.6$ との和が図中の赤破線($P_L = 1.26$)で示される。結果、式(2.19)の右辺は正の値を取り、すべりは増加していく。すべりが増加することにより、式(2.19)の右辺第一項を示す赤破線が右へと移動していき、同時に等すべり曲線が右下方向に移動していく。等すべり曲線の移動に伴い、消費有効電力 P_L は増加していき、 P_L が赤破線を追いかける形になる。 P_L は 1.27 となる③の位置で赤破線に追いつき、式(2.19)の右辺は 0 となり、安定となる。 v_r は減少した後、安定となる。

図 3.6 にすべりの時間推移を、図 3.7 に消費電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

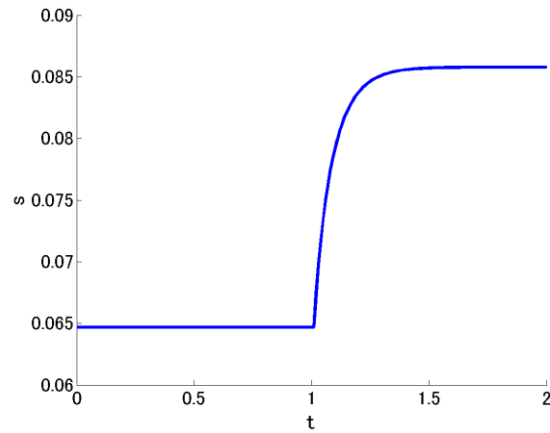


図 3.6 すべりの時間推移 (ratio = 0.5, 負荷増大後も電圧崩壊に至らない)

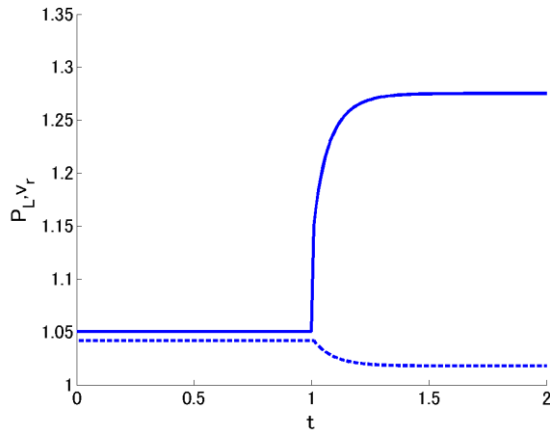


図 3.7 P_L , v_r の時間推移 (ratio = 0.5, 負荷増大後も電圧崩壊に至らない)

このように同規模の負荷増大に対しても、定電力負荷が混在する場合は電圧崩壊に至っていない。

3.3 負荷減少時の電圧安定性

次に、負荷が減少する場合を考える。時間 $t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} が 0.7 倍に減少するとする。 P_{LIMm} が減少すると $H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM}$ により、すべりが減少し、動作点が変わ化していく。また、定電力負荷が混在する場合は P_{LCP} も 0.7 倍になるとする。

3.3.1 誘導機負荷のみの場合

まず、誘導機負荷のみの場合について検討する。各パラメータを表 3.3 に示す。

表 3.3 各パラメータ 単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.913	0.70	0.081	0.4	1.9	0.0528

この時の PV カーブ上の動作点の動きを以下の図 3.8 を用いて追ってみる。

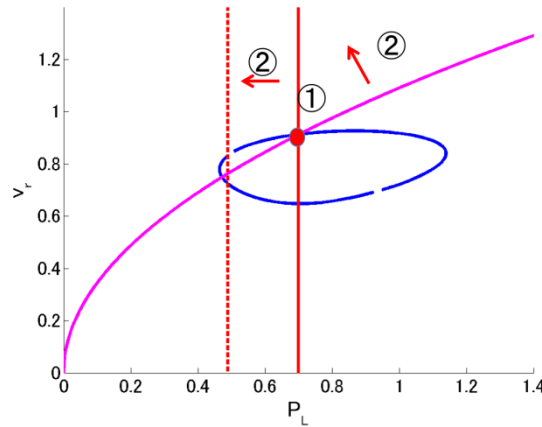


図 3.8 負荷減少時の PV カーブと等すべり曲線 (ratio = 1.0)

まず、図 3.8 中の①は初期の動作点である。この時、誘導機負荷の動特性を支配する式 (2.19) の右辺第一項は P_{LIM} に等しく、0.70[p. u.]であり、赤実線で示されている。

$$H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM} \quad (2.19: \text{再掲})$$

$t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} が 0.7 倍に減少した直後を考えると、式 (2.19) の右辺第一項も 0.49 へと減少し、図中の赤破線で示される。結果、式 (2.19) の右辺は負の値を取り、すべりは減少していく。②ではすべりが減少することにより、式 (2.19) の右辺第一項を示す赤破線が左へと移動していき、同時に等すべり曲線が左上方向に移動していく。等すべり曲線の移動に伴い、消費有効電力 P_L は減少していき、動作点は、赤破線で示される式 (2.19) の右辺第一項を追いかける形になるが、追いつく前に PV カーブと等すべり曲線は交点を持

たなくなり、電圧崩壊に至る。

以下の図 3.9 にすべりの時間推移を、図 3.10 に消費電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

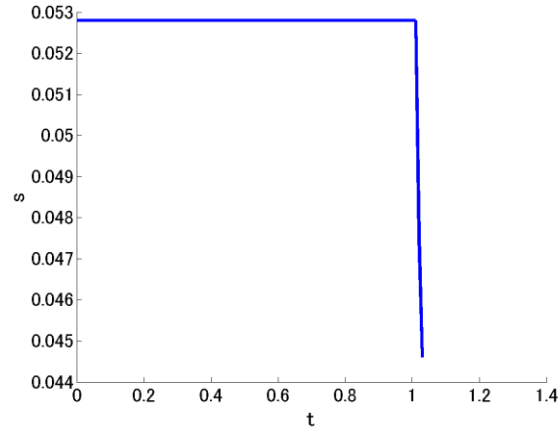


図 3.9 すべりの時間推移 (ratio = 1.0, 負荷減少により電圧崩壊に至る)

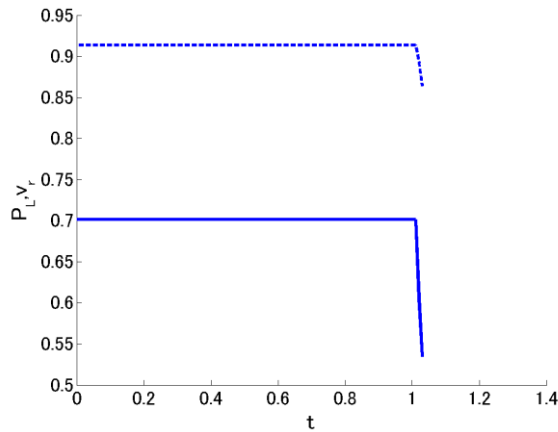


図 3.10 消費電力 P_L , 電端電圧 v_r の時間推移 (ratio = 1.0, 負荷減少により電圧崩壊に至る)

3.3.2 誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合

誘導機負荷と定電力負荷が ratio=0.5 で混在する場合について考える。時間 $t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} と定電力負荷 P_{LCP} が 0.7 倍に減少するとする。初期条件は誘導機出力 $P_{LIMm} = 0.20$ と定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5$ とし、これらの和である負荷消費電力 P_L が 0.7[p. u.]となる。また、定電力負荷の力率は 1 とする。各パラメータを表 3.4 に示す。

この場合は、負荷減少後、過渡的な変化を経て安定な動作点に至る。負荷減少の前後で、 $P_{LIM}[p. u.]$ は 0.2→0.14、 $P_{LCP}[p. u.]$ は 0.5→0.35、 $Q_L[p. u.] = Q_{LIM}[p. u.]$ は 0.0057→0.0056 へと減少し、 $v_r[p. u.]$ は 0.977→0.899 と減少する。また、すべり s は 0.0258→0.0211 と減少する。

表 3.4 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.977	0.70	0.0057	0.4	1.9	0.0258
安定化後		0.899	0.49	0.0056			0.0211

この時の PV カーブ上の動作点の動きを以下の図 3.11 を用いて追ってみる。

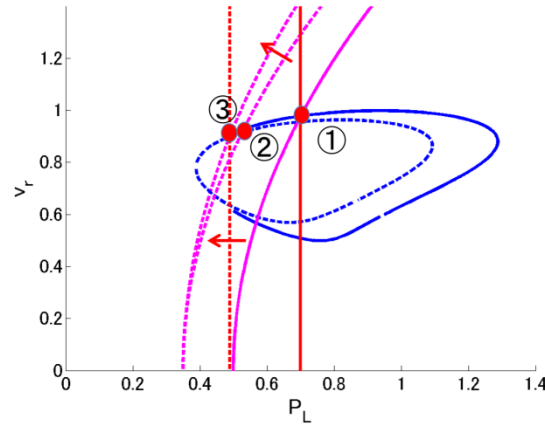


図 3.11 負荷減少時の PV カーブと等すべり曲線

まず、図 3.11 中の①は初期の動作点である。この時、誘導機負荷の動特性を支配する式 (2.19) の右辺第一項は P_{LIM} に等しく 0.2[p. u.] であり、定電力負荷 P_{LCP} との和 0.70[p. u.] が赤実線で示されている。

$$H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM} \quad (2.19: \text{再掲})$$

$t = 1[s]$ の時点で機械的出力 P_{LIMm} と定電力負荷 P_{LCP} が 0.7 倍に減少した直後を考えると、動作点は減少後の PV カーブと初期のすべり 0.0258 での等すべり曲線との交点である②に移り、 P_L 、 v_r はステップ上に減少する。その後、式 (2.19) の右辺は負の値であるので、すべりは減少していく。すべりが減少することにより、式 (2.19) の右辺第一項と P_{LCP} の和を示す赤線が左へと移動していき、同時に等すべり曲線が左上方向に移動していく。等すべり曲線の移動に伴い、消費有効電力 P_L は減少していき、赤破線で示される式 (2.19) の右辺第一項を追いかける形になり、③の $P_L = 0.49$ の時点で追いつき、安定となる。この間、 P_L と v_r はわずかながら減少し続ける。

以下の図 3.12 にすべりの時間推移を、図 3.13 に消費電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

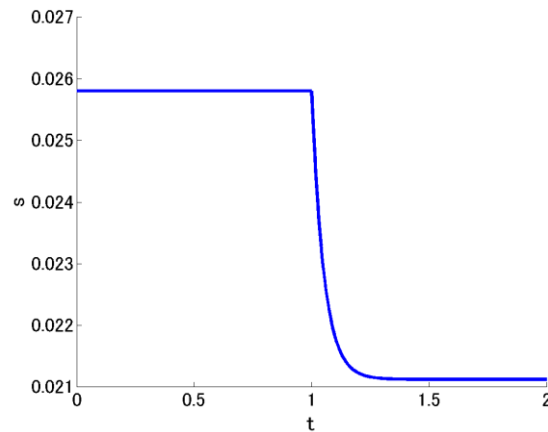


図 3.12 すべりの時間推移 (ratio = 0.5, 負荷減少後も電圧崩壊に至らない)

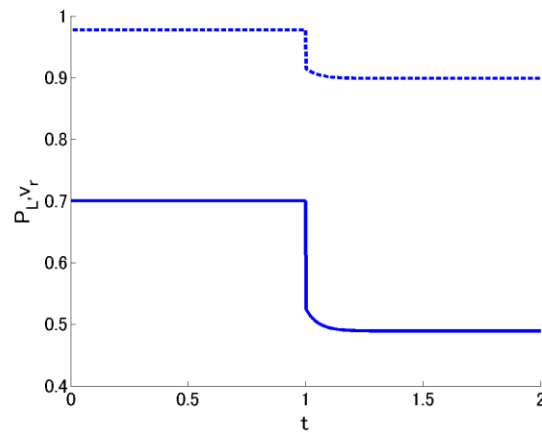


図 3.13 P_L , v_r の時間推移 (ratio = 0.5, 負荷減少後も電圧崩壊に至らない)

このように同規模の負荷減少に対しても、定電力負荷が混在する場合は電圧崩壊に至っていない。

3.4 太陽光出力急減時の電圧安定性

ここでは、太陽光発電が大量導入されている系統で、その出力が急減した場合の電圧安定性について検討する。具体的には、初め、1.5[p.u.]あった太陽光発電出力が、時間 $t = 1[s]$ の時点でステップ上に 0[p.u.]になる場合を想定する。また、初期の負荷は誘導機負荷、定電力負荷を合わせて 1.05[p.u.]であるとする。

3.4.1 誘導機負荷のみの場合

まずは負荷が誘導機負荷のみである場合、つまり ratio=1.0 の場合について検討する。この場合の太陽光発電急減前後の PV カーブをそれぞれ図 3.14 に、各パラメータを表 3.5 に

示す。

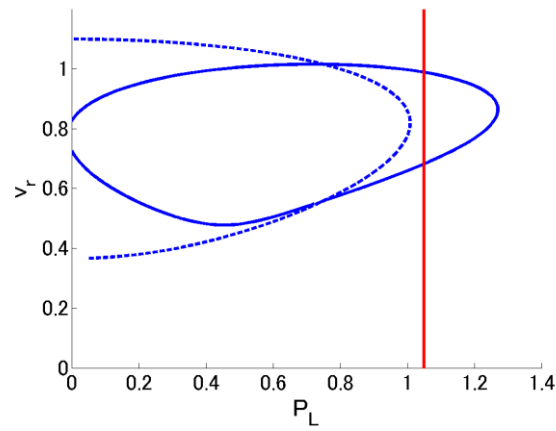


図 3.14 太陽光発電出力急減前後の PV カーブ ($ratio = 1$)

表 3.5 各パラメータ ($ratio = 1$)

単位は [p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.989	1.05	0.064	0.4	1.5	0.0689

図中赤実線は初期の負荷を表している。以下 PV カーブを用いてこの擾乱に対する系統の電圧安定性を検討していく。図 3.14 の PV カーブ上に初期のすべり $s = 0.0689$ での等すべり曲線を表すと図 3.15 のようになる。図 3.16 は図 3.15 を拡大したものである。

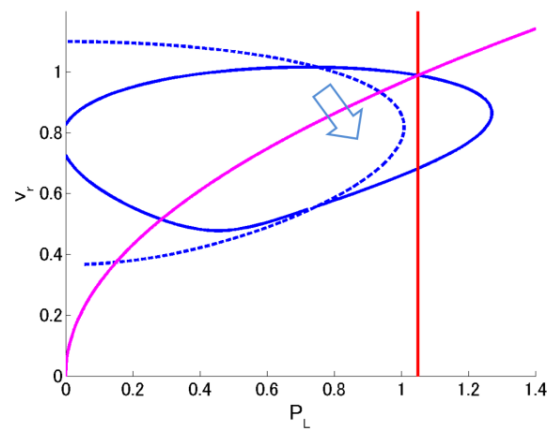


図 3.15 PV カーブと等すべり曲線 ($ratio = 1$)

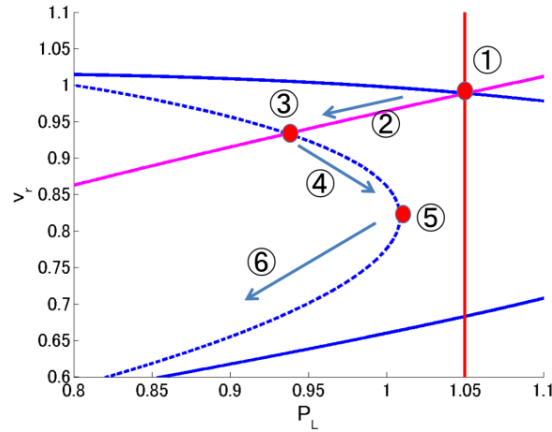


図 3.16 PV カーブと等すべり曲線（拡大図）（ $ratio = 1$ ）

まず図中①の点は初期の動作点である。初期の負荷消費電力を $1.05[\text{p.u.}]$ としているので、これを表す図中赤実線と急減前の PV カーブである青線との交点が初期の動作点となっている。このときのすべりは 0.0689 である。

次に②では太陽光出力急減が発生し、それでもすべりは不変であるので、すべりが 0.0689 の等すべり曲線上を推移し、太陽光急減後の PV カーブである青破線との交点である③の点まで推移する。

③の点では電氣的出力 P_{LIM} は初期の値よりも低下しているが、機械的出力 P_{LIMm} は不変である。

そのため、式(2.19) $(H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM})$ の右辺が正となり、すべりは増加し、等すべり

曲線は右下方向へと推移していく。④では、これに伴い、等すべり曲線と PV カーブの交点である動作点も PV カーブ上を右下に推移していつている。

⑤では動作点はノーズ端に達し、ここで P_{LIM} の値は極大値をとるが、未だ式(2.19)の右辺は正であるため、すべりは増大し、等すべり曲線は右下方向へ推移していき、電圧崩壊に至る。

次に、動的なシミュレーションで各パラメータの推移を見てみる。図 3.17 にすべり s の時間推移を、図 3.18 に負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。1[s]の時点で太陽光発電出力が $1.5[\text{p.u.}]$ から、 $0[\text{p.u.}]$ に変化している。

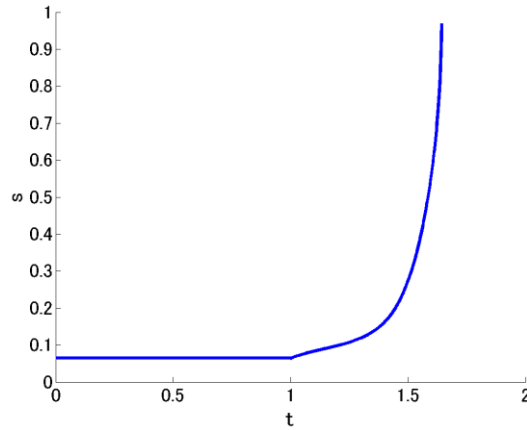


図 3.17 すべりの時間推移 (ratio = 1.0, PV 急減により電圧崩壊に至る)

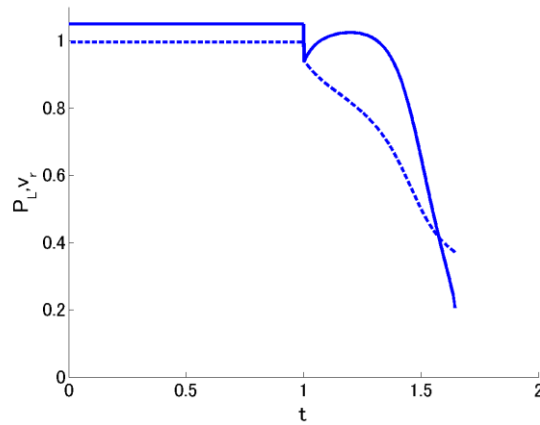


図 3.18 P_L と v_r の時間推移 (ratio = 1.0, PV 急減により電圧崩壊に至る)

図 3.17 で確認できる通り、すべりは擾乱発生時から単調に増加し続ける。また、負荷有効電力 P_L は擾乱発生時に急減した後、増加していき、減少に転じている。受電端電圧 v_r は擾乱発生時に急減し、その後も単調に減少していく。このようにこの場合、系統の電圧安定性は保たれない。

3.4.2 誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合

次に負荷として誘導機負荷と定電力負荷が混在している場合で ratio=0.5 の場合について検討する。初期条件は誘導機出力 $P_{LIMm} = 0.55$ と定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5$ とし、これらの和である負荷消費電力 P_L が 1.05[p.u.] となる。また、定電力負荷の力率は 1 とする。この場合の太陽光急減前後の PV カーブと等すべり曲線をそれぞれ図 3.19, 図 3.20 に、各パラメータを表 3.6 に示す。図中赤線は初期の負荷として 1.05[p.u.] を表している。図 3.20 は図 3.19 を拡大したものである。

この場合は、PV 出力減少後、過渡的な変化を経て安定な動作点に至る。PV 出力減少の前後で、 $P_{LCP}[p.u.]$ は 0.5 で不変、 $P_{LIM}[p.u.]$ は 0.55→0.56 へと増加、 $Q_L[p.u.] = Q_{LIM}[p.u.]$ は 0.014→0.0067 へと減少し、 $v_r[p.u.]$ は 1.04→0.935 と減少する。また、すべり s は 0.0647→0.0843 と増加する。

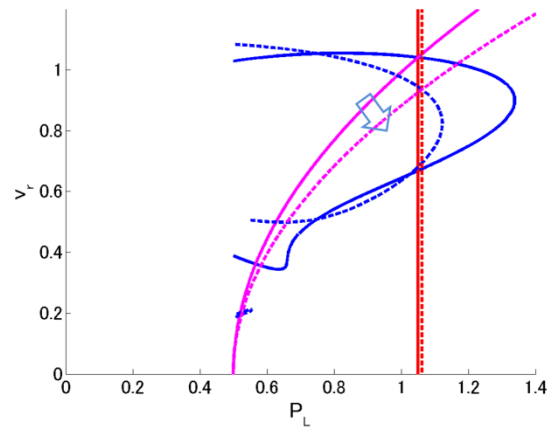


図 3.19 太陽光発電出力急減前後の PV カーブと等すべり曲線 ($ratio = 0.5$)

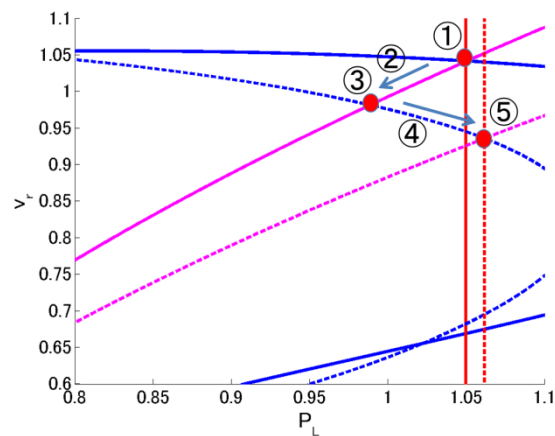


図 3.20 太陽光発電出力急減前後の PV カーブと等すべり曲線 (拡大図) ($ratio = 0.5$)

表 3.6 各パラメータ ($ratio = 0.5$)

単位は [p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	1.04	1.05	0.014	0.4	1.5	0.0647
安定化後		0.935	1.06	0.0067		0	0.0843

まず図中①の点は初期の動作点である。初期の負荷消費電力を 1.05[p.u.]としているので、これを表す図中赤色の直線と急減前の PV カーブである青実線との交点初期の動作点と

なっている。このときのすべりは 0.0647 である。

次に②では太陽光発電の急減が発生し、それでもすべりは不変であるので、すべりが 0.0647 の等すべり曲線上を推移し、太陽光急減後の PV カーブである青破線との交点である③の点まで推移する。

③の点では電氣的出力 P_{LIM} は初期の値よりも低下しているが、機械的出力 P_{LIMm} は不変である。そのため、式(2.19) $(H \frac{ds}{dt} = \frac{P_{LIMm}}{1-s} - P_{LIM})$ の右辺が正となり、すべりは増加し、等すべり曲線は右下方向へと推移していく。④では、これに伴い、等すべり曲線と PV カーブの交点である動作点も PV カーブ上を右下に推移していつている。

⑤の点では式(2.19)の右辺が 0 となり、すべりは変化を止め、安定となる。

これについて、動的なシミュレーションで各パラメータの推移をしてみる。図 3.21 にすべり s の時間変化を、図 3.22 に負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。1[s]の時点で太陽光発電出力が $1.5[\text{p.u.}]$ から、 $0[\text{p.u.}]$ に変化している。

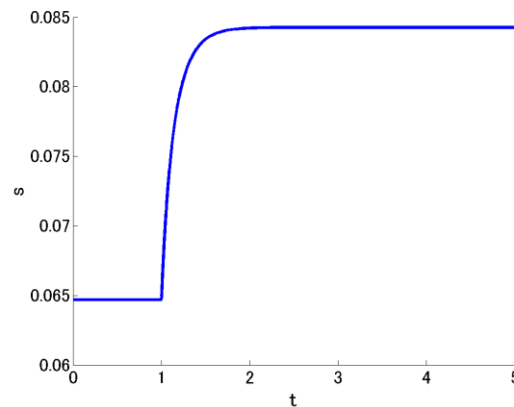


図 3.21 すべりの時間推移 (ratio = 0.5, PV 急減後も電圧崩壊に至らない)

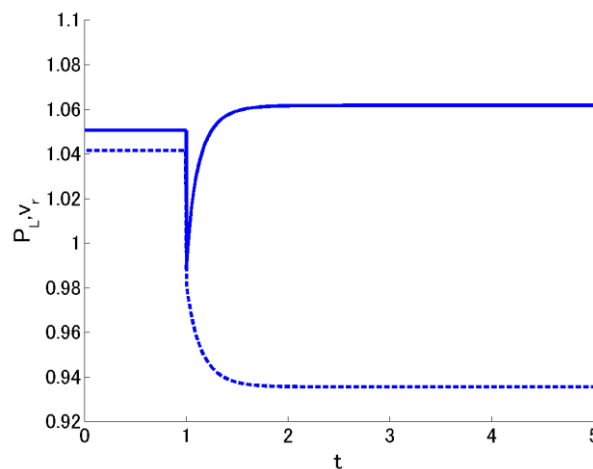


図 3.22 P_L と v_r の時間推移 (ratio = 0.5, PV 急減後も電圧崩壊に至らない)

図 3.21 で確認できる通り、すべりは擾乱発生時から単調に増加していくが、式(2.19)の右辺が 0 となる点で安定となる。また、負荷有効電力 P_L は擾乱発生時に急減した後、増加していき、安定となる。受電端電圧 v_r は擾乱発生時に急減し、その後も減少を続け安定となる。このように、電圧は低下し続けて一定に落ち着くが、負荷消費電力 P_L は一旦減少の後増加するという、特異な動きをする。なお、 P_L の最終値が初期値より若干増加するのは、機械出力を一定としているので、電圧が低下して誘導機の電流が増加し、抵抗損が増加するためである。

このように同規模の PV 出力減少に対しても、定電力負荷が混在する場合は電圧崩壊に至っていない。

3.5 太陽光出力急増時の電圧安定性

本節では 3.4 節とは逆で太陽光発電出力が急激に増加した場合の電圧安定性について検討する。具体的には、初め、1.8[p.u.]であった太陽光発電出力が、時間 $t = 1[s]$ の時点でステップ上に 2.0[p.u.]になる場合を想定する。また、初期の負荷は誘導機負荷、定電力負荷を合わせて 0.7[p.u.]であるとする。

3.5.1 誘導機負荷のみの場合

まずは負荷が誘導機負荷のみである場合、つまり $\text{ratio}=1.0$ の場合について検討する。この場合の太陽光出力急増前後の PV カーブをそれぞれ図 3.23 に、各パラメータを表 3.7 に示す。

この例では、太陽光出力増加後の青色点線の PV カーブは等すべり曲線との交点をもたず、不安定となる。

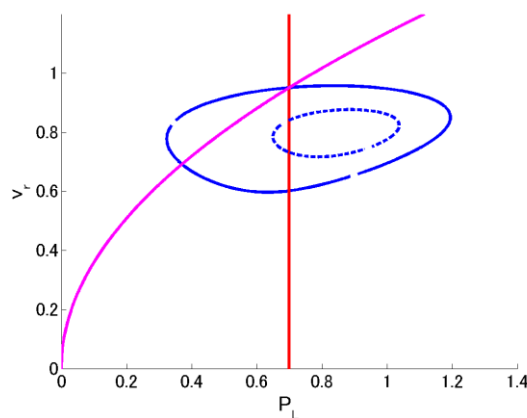


図 3.23 太陽光発電出力急増前後の PV カーブと等すべり曲線 ($\text{ratio} = 1$)

表 3.7 各パラメータ ($ratio = 1$)

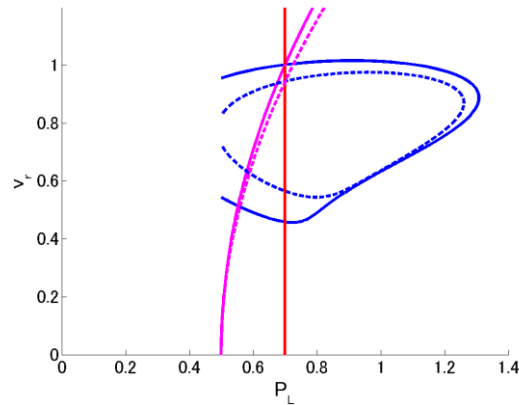
単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.951	0.7	0.059	0.4	1.8	0.0484

3.5.2 誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合

次に負荷として誘導機負荷と定電力負荷が混在している場合で $ratio=0.5$ の場合について検討する。初期条件は誘導機出力 $P_{LIMm} = 0.20$ と定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5$ とし、これらの和である負荷消費電力 P_L が 0.7 [p. u.] となる。また、定電力負荷の力率は 1 とする。各パラメータを表 3.4 に示す。この場合の太陽光急増前後の PV カーブをそれぞれ図 3.24, 図 3.25 に、各パラメータを表 3.8 に示す。図 3.25 は図 3.24 を拡大したものである。こちらの場合では、等すべり曲線と太陽光出力増加後の青色の PV カーブは交点をもち、太陽光の出力急増後は動作点がここに移った後、3.2.2 項で見た場合と同様の動作点の推移を経て、安定な動作点へと至る。

この場合は、PV 出力増加の前後で、 P_{LCP} [p. u.] は 0.5 で不変、 P_{LIM} [p. u.] は 0.20 で元通り回復、 Q_L [p. u.] = Q_{LIM} [p. u.] は $0.004 \rightarrow 0.008$ へと増加し、 v_r [p. u.] は $1.002 \rightarrow 0.944$ と減少する。また、すべり s は $0.0245 \rightarrow 0.0276$ と増加する。

図 3.24 太陽光発電出力急増前後の PV カーブと等すべり曲線 ($ratio = 0.5$)

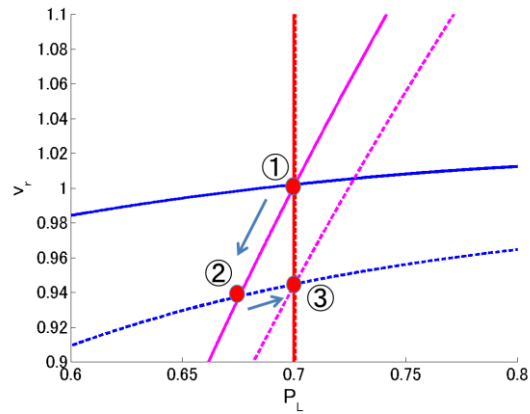


図 3.25 太陽光発電出力急増前後の PV カーブと等すべり曲線（拡大図）（ $ratio = 0.5$ ）

表 3.8 各パラメータ($ratio = 0.5$)

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	1.002	0.70	0.004	0.4	1.8	0.0245
安定化後		0.944	0.70	0.008		2.0	0.0276

図 3.26 にすべり s の時間推移を、図 3.27 に負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。1[s] の時点で太陽光発電出力が 1.8[p.u.] から、2.0[p.u.] に変化している。

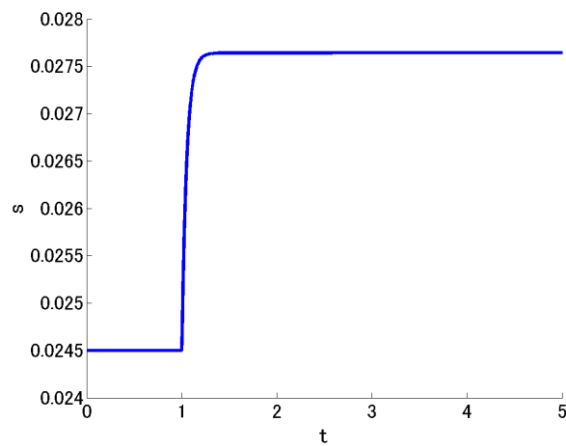


図 3.26 すべりの時間推移（ $ratio = 0.5$ ，PV 急増後も電圧崩壊に至らない）

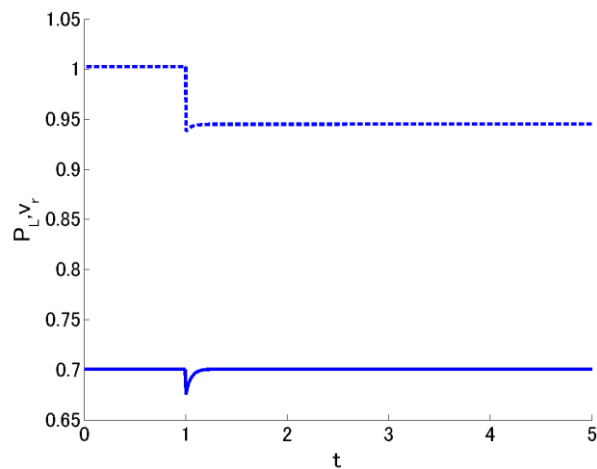


図 3.27 P_L と v_r の時間推移 (ratio = 0.5, PV 急増後も電圧崩壊に至らない)

このように同規模の PV 出力減少に対しても、定電力負荷が混在する場合は電圧崩壊に至っていない。

3.6 送電線インピーダンス増加時の電圧安定性

本節では送電線インピーダンスが増加した場合の電圧安定性について検討する。ここでは送電線リアクタンス x が、時間 $t = 1[s]$ の時点で $0.4[p.u.]$ から $0.55[p.u.]$ に増加することを考える。

3.6.1 誘導機負荷のみの場合

まずは誘導機負荷のみの場合について考察する。図 3.28 に送電線インピーダンス増加前の PV カーブを青実線で、増加後の PV カーブを青破線で示す。インピーダンス増加後は PV カーブが縮小している様子が見て取れる。各パラメータを表 3.9 に示す。

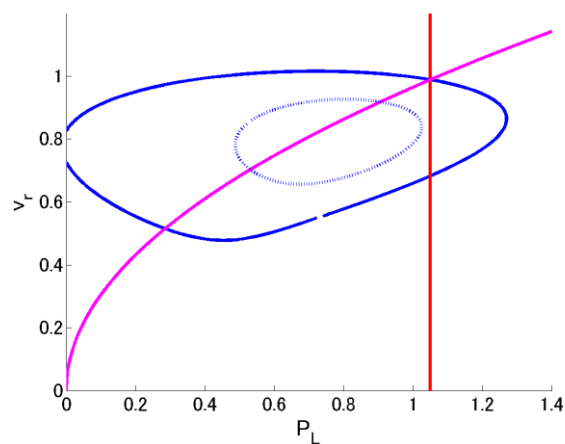


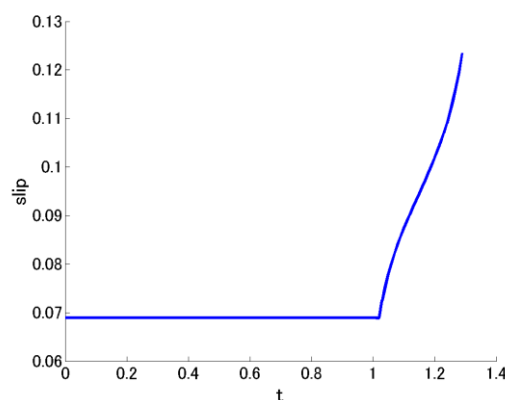
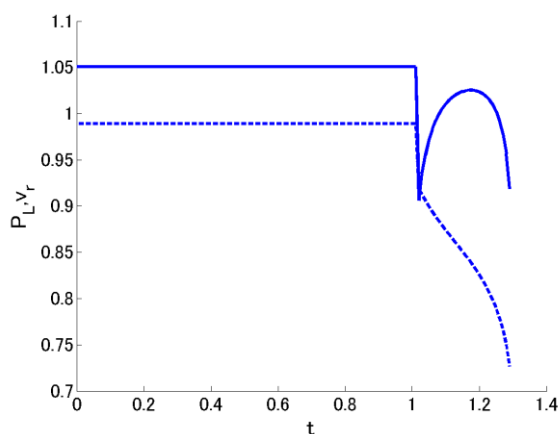
図 3.28 送電線インピーダンス増加後の PV カーブと等すべり曲線 (ratio = 1.0)

表 3.9 各パラメータ ($ratio = 1.0$)

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.989	1.05	0.064	0.4	1.5	0.0689

この場合は 3.4.1 と同様の推移を経て、電圧不安定となる。図 3.29 にすべり s の時間推移を、図 3.30 に負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

図 3.29 すべりの時間推移 ($ratio = 1.0$, 送電線 Z 増加により電圧崩壊に至る)図 3.30 P_L と v_r の時間推移 ($ratio = 1.0$, 送電線 Z 増加により電圧崩壊に至る)

3.6.2 誘導機負荷と定電力負荷が混在する場合

次に $ratio = 0.5$ の場合を考える。初期条件は誘導機出力 $P_{LIMm} = 0.55$ と定電力負荷 $P_{LCP} = 0.5$ とし、これらの和である負荷消費電力 P_L が 1.05 [p. u.] となる。また、定電力負荷の力率は 1 とする。図 3.31, 図 3.32 に送電線インピーダンス増加前の PV カーブを青実線で、増加後の PV カーブを青破線で示す。図 3.32 は図 3.31 を拡大したものである。また、表 3.10

に各パラメータを示す。

なお、送電線インピーダンス増加後の PV カーブは、図 3.28 の $ratio=1$ の場合よりも領域が拡大している。これは誘導機負荷の割合が少なくなったので、電圧低下時の誘導機負荷の無効電力特性の影響が軽減されているためである。これにより、インピーダンス増加後に PV カーブと、等すべり曲線との交点が存在することになり、電圧安定性が改善されることがわかる。

シミュレーション結果としては、PV 出力減少後、過渡的な変化を経て安定な動作点に至る。PV 出力減少の前後で、 $P_{LCP}[p.u.]$ は 0.5 で不変、 $P_{LIM}[p.u.]$ は $0.55 \rightarrow 0.553$ へとわずかに増加、 $Q_L[p.u.] = Q_{LIM}[p.u.]$ は $0.031 \rightarrow 0.008$ へと減少し、 $v_r[p.u.]$ は $1.04 \rightarrow 1.0$ と減少する。また、すべり s は $0.0647 \rightarrow 0.0710$ と増加する。

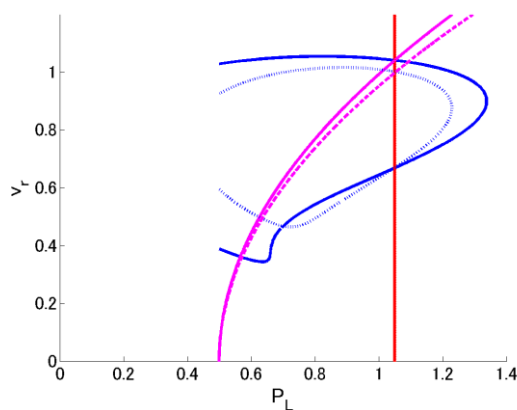


図 3.31 送電線インピーダンス増加後の PV カーブと等すべり曲線 ($ratio = 0.5$)

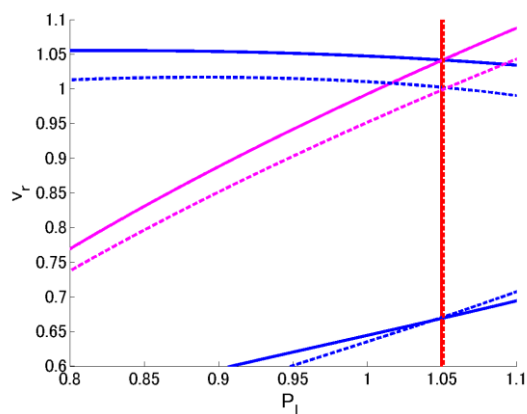


図 3.32 送電線インピーダンス増加後の PV カーブと等すべり曲線 (拡大図) ($ratio = 0.5$)

表 3.10 各パラメータ ($ratio = 0.5$)

単位は [p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	1.04	1.05	0.031	0.4	1.5	0.0647
安定化後		1.00	1.05	0.008	0.55		0.0710

この場合は 3.4.2 と同様の推移を経て、電圧は低下するものの安定な状態に至る。図 3.33 にすべり s の時間推移を、図 3.34 に負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で示す。

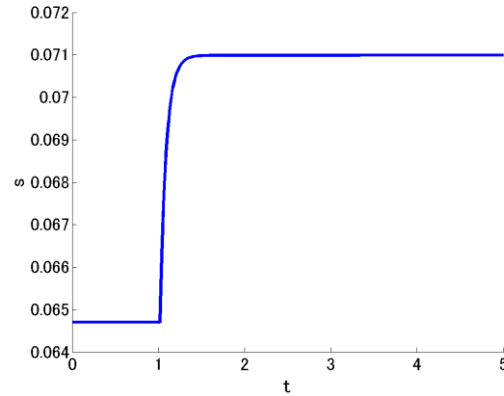


図 3.33 すべりの時間推移 (ratio = 0.5, 送電線 Z 増加後も電圧崩壊に至らない)

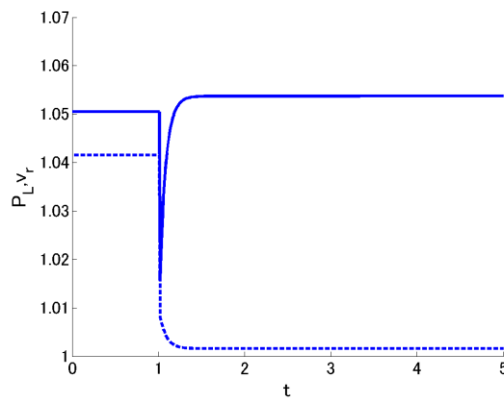


図 3.34 P_L と v_r の時間推移 (ratio = 0.5, 送電線 Z 増加後も電圧崩壊に至らない)

このように同規模の送電線インピーダンス増加に対しても、定電力負荷が混在する場合は電圧崩壊に至っていない。

3.7 誘導機負荷が電圧安定性に与える影響の考察

本章で見た結果は定電力負荷と誘導機負荷が混在する電力系統においては定電力負荷の比率が多いほど、すなわち、誘導機負荷の比率が少ないほど、電圧安定性の面で有利であるということを示唆している。このことの意味について詳しく考察してみる。

まず、しばしば PV カーブを用いて電圧安定性を議論するときに用いられる定電力負荷と定電流負荷と定インピーダンス負荷についてその電圧安定性に与える影響をみてみる。ここでは簡単のため、それぞれの負荷のみで構成される電力系統を想定し、図 3.23 に示す 2.1 節で導出した基本的な PV カーブを用いて説明する。

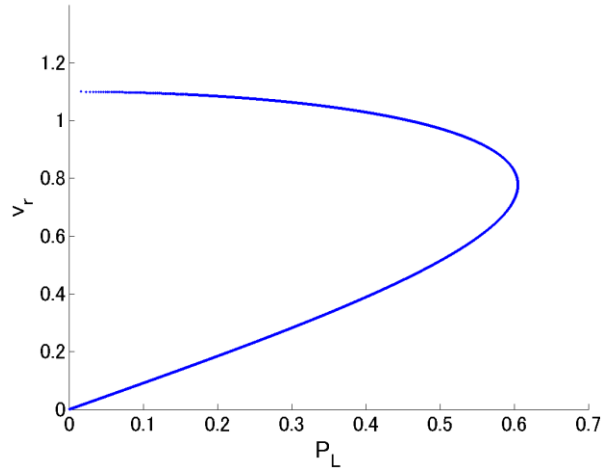


図 3.23 基本的な PV カーブ

2.1 節で述べたように PV カーブを用いて電圧安定性を議論する場合には PV カーブと負荷特性を表す曲線との交点に注目する。定電力負荷、定電流負荷、定インピーダンス負荷の負荷特性はそれぞれ以下の式 (3.3) (3.4) で表される。

$$P_L = P_0 v_r^\alpha \quad (3.3)$$

$$Q_L = P_0 v_r^\beta \quad (3.4)$$

$\alpha = \beta = 0$: 定電力特性

$\alpha = \beta = 1$: 定電流特性

$\alpha = \beta = 2$: 定インピーダンス特性

α, β は負荷の電圧特性定数と呼ばれる。それぞれについて P_0 が 0.5 [p. u.] の場合の負荷特性を実線で 0.65 [p. u.] の場合の負荷特性を破線で図 3.23 に重ねて表したものが図 3.24～図 3.26 である。ただし、いずれも力率は 1 としている。

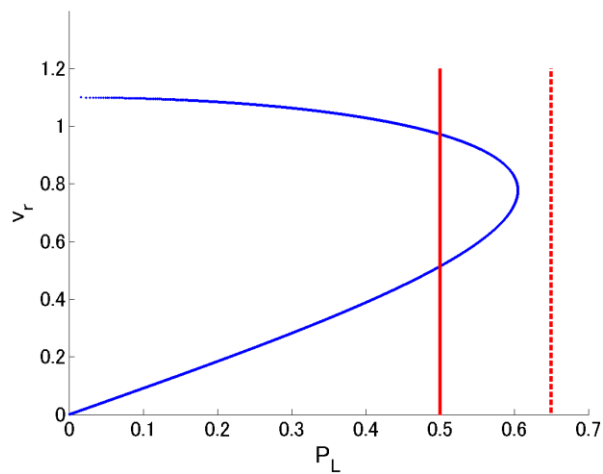


図 3.24 負荷が定電力特性の場合

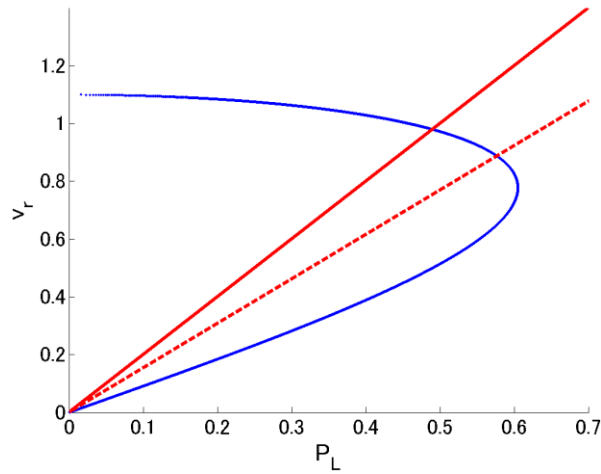


図 3.25 負荷が定電流特性の場合

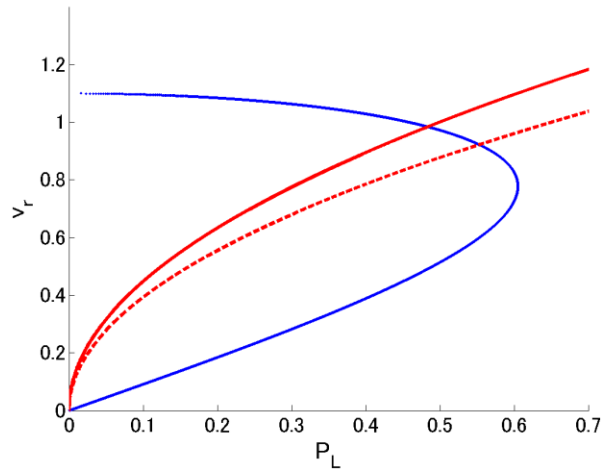


図 3.26 負荷が定インピーダンス特性の場合

これを見ると定電力負荷の場合は、負荷の増加により解を持たなくなっているのに対し、他の二つの負荷特性の場合は増加後も解を持っていることが分かる。また、定電流特性が直線として表わされるのに対し、定インピーダンス特性は上に凸な曲線になっており電圧が低くなった領域でも解を持ちやすいことが分かる。このように定電力負荷、定電流負荷、定インピーダンス負荷の3種類の負荷についてはこの順に電圧安定性が悪いと言うことができる。本来、負荷の電圧特性定数は系統にあわせて整数に限らず様々な値を取りうる^[10]が、本研究では、電圧安定性が厳しいケースを検討するために $\alpha = \beta = 0$ である定電力特性を混在する負荷の特性として設定している。

一方で、誘導機負荷が電圧安定性に与える影響については、2.2 節で示したように PV カーブの意味が先の3種類の負荷の電圧安定性の議論に用いたものと異なるため、一概に同じ方法で議論することはできない。誘導機負荷はすべりの変化によって生じる動特性によ

り、電圧安定性に悪影響を及ぼすと考えられている。ここでは、誘導機負荷のすべりの変化に着目して、その電圧安定性に関する影響を考察する。

誘導機負荷の消費有効電力 P_L 、消費無効電力 Q_L は、電圧 v_r とすべり s の関数として以下の式(3.5)(3.6)のように表される。

$$P_L = \frac{sr_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2x_{IM}^2} v_r^2 \quad (3.5)$$

$$Q_L = \frac{s^2x_{IM}}{r_{IM}^2 + s^2x_{IM}^2} v_r^2 \quad (3.6)$$

図 3.27, 3.28 に有効電力 P_L を青線で、無効電力 Q_L を赤線で、 $v_r = 1.0$ の場合について実線、 $v_r = \frac{1}{\sqrt{2}}$ の場合について破線で示す。図 3.27 をすべりが 0 から 0.1 の範囲で拡大したものが図 3.28 である。

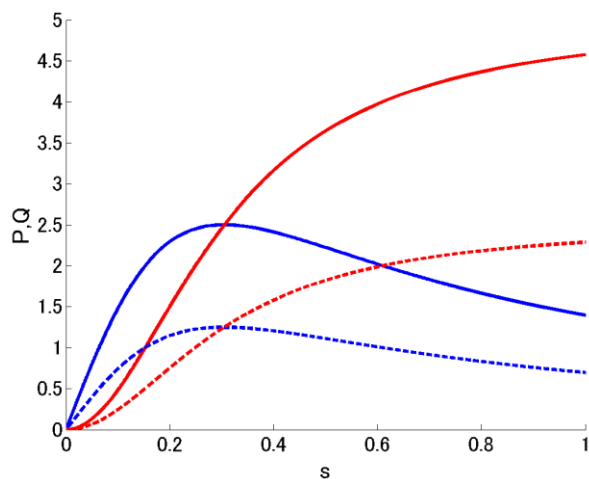


図 3.27 誘導機の消費有効電力、無効電力とすべりの関係 ($v_r = 1.0$)

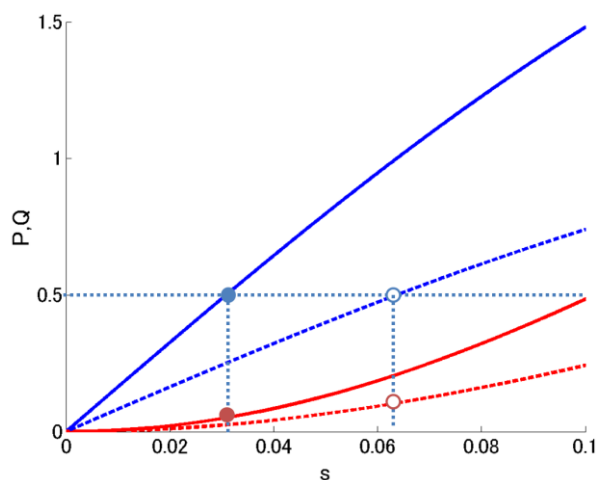


図 3.28 誘導機の消費有効電力、無効電力とすべりの関係 (拡大図) ($v_r = 1.0$)

今、 $v_r = 1.0[p.u.]$ で有効電力 P_L が $0.5[p.u.]$ の状態から v_r が $\frac{1}{\sqrt{2}}[p.u.]$ に低下することを考える。このとき、有効電力 P_L を一定に保とうとするとすべり s は増加し、無効電力 Q_L は増加することになる。つまり、受電端電圧が下がるような擾乱が発生した時に、有効電力を一定に保とうとすれば無効電力消費 Q_L が増加してしまう。これが、誘導機の動特性が電圧安定性に悪影響を及ぼす理由と考えられ、本章のシミュレーション結果からは定電力負荷が増えれば電圧安定性が増す、ということではなく、誘導機負荷が増えれば、電圧低下を伴う擾乱に対して、電圧安定性が悪化するという解釈ができる。

第 4 章 タップ付き変圧器を含む系統

4.1 タップ付き変圧器

送電線あるいは配電線の電圧を調整するために、電圧の変動に応じて変圧器に負荷をかけた状態で、巻線のタップを切り替える装置を負荷時タップ切替器といい、これが備わっている変圧器をタップ付き変圧器(LTC)と呼ぶ。たとえば送電線の 1 回線事故時には前章でみたような送電線インピーダンスの増加が起こり、変圧器二次側の電圧は低下するが、タップ付き変圧器が備わっている場合には、タップ上げ動作により徐々に電圧が回復する。本章では以下の図 4.1 に示すモデルを用い、LTC を含む電力系統について考察する。また、タップ付き変圧器の効果を検証するのが目的であるため、本章では、 $\text{ratio} = 1.0$ の場合のみを扱う。

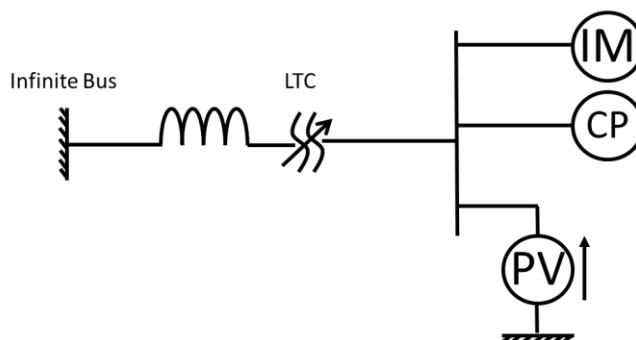


図 4.1 LTC を含む系統

4.2 タップ付き変圧器を含む系統のモデル化

図 4.1 に示した LTC を等価回路として示せば、図 4.2 のようになる。

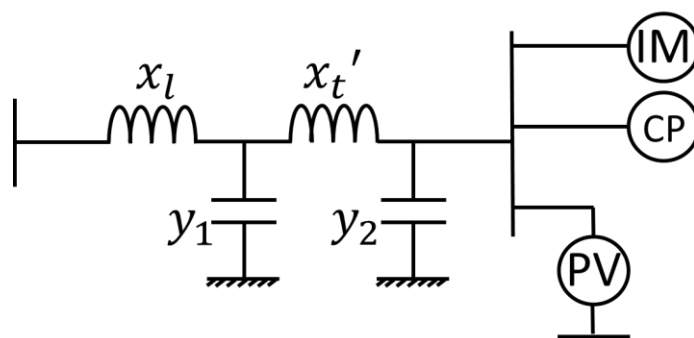


図 4.2 LTC の等価回路

ここで、 x_t', y_1, y_2 はタップ比 t の関数として以下のように表されるパラメータである。また、

x_t はタップ比が1の時のタップ付き変圧器のリアクタンスである。

$$x'_t = tx_t \quad (4.1)$$

$$y_1 = \frac{t-1}{jtx_t} \quad (4.2)$$

$$y_2 = \frac{1-t}{jt^2x_t} \quad (4.3)$$

上記モデルから以下の5本の式が成り立つ。

$$V_s - V_1 = jx_l I_l \quad (4.4)$$

$$V_1 - V_r = jx'_t I_1 \quad (4.5)$$

$$-jy_1 V_1 = I_l - I_1 \quad (4.6)$$

$$-jy_2 V_r = I_1 - I_r \quad (4.7)$$

$$P + jQ = V_r I_r^* \quad (4.8)$$

これを V_r, I_r について解くと、以下の式(4.9)が得られる。

$$\frac{1}{(1+x_l y_1)(1+x'_t y_2)+x_l y_2} V_s - V_r = j \frac{x_l + x'_t(1+x_l y_1)}{(1+x_l y_1)(1+x'_t y_2)+x_l y_2} I_r \quad (4.9)$$

タップ付き変圧器を考慮しない場合には以下の式(4.10)が成り立つ。

$$V_s - V_r = jx_L I_r \quad (4.10)$$

式(4.9)と式(4.10)を見比べると、タップ比が t である場合は、以下の式(4.11)(4.12)のように置き換えればいいことが分かる。

$$V_s \rightarrow \frac{1}{(1+x_l y_1)(1+x'_t y_2)+x_l y_2} V_s \quad (4.11)$$

$$x_L \rightarrow \frac{x_l + x'_t(1+x_l y_1)}{(1+x_l y_1)(1+x'_t y_2)+x_l y_2} \quad (4.12)$$

$t=1$ の場合は下記の式(4.13)のように式(4.9)は、タップが存在しない場合の式(4.10)と一致する。

$$V_s - V_r = j(x_l + x'_t) I_r = jx_L I_r \quad (4.13)$$

タップの動作制御の様子を以下の図 4.3 に示す。電圧の基準値から±2%の不感帯を取り、不感帯からの逸脱分の時間積分値が 18%を超えると動作指令が出る。動作指令の一分後にタップの上げ、もしくは下げ動作が行われる。これは、たとえば、5%の電圧低下が継続すると、6分で積分器の出力が18%になり、これのキック後1分間の時間遅れをもってタップが1段階動作する。キック信号発生と同時に、積分器はリセットされる。電圧低下が8%の場合は3分後にキック動作が発生する。

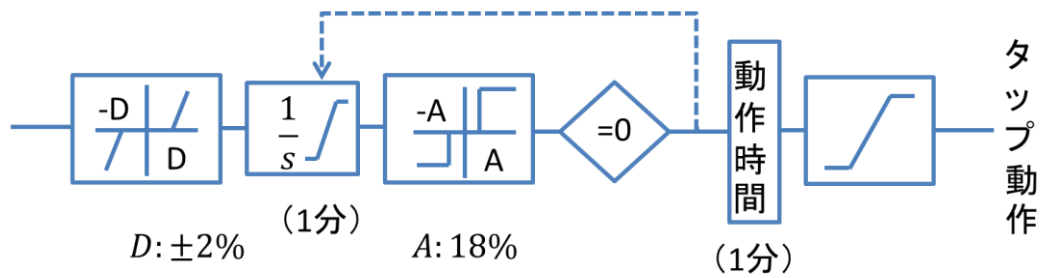


図 4.3 タップ動作の制御

タップは上げ下げともに 5 段階まで可能でタップ比 t は 1.0 から 0.02 刻みで変化するものとしている。

4.3 タップ比と PV カーブ

タップ比が変化した場合の負荷特性を考慮しない PV カーブの変化の様子を以下の図 4.4 に示す。図中青実線がタップ比 $t = 1.0$ の場合を示し、これに対してタップ比を 1.1, 1.2 と増加させた場合、0.9, 0.8 と減少させた場合について図示している。

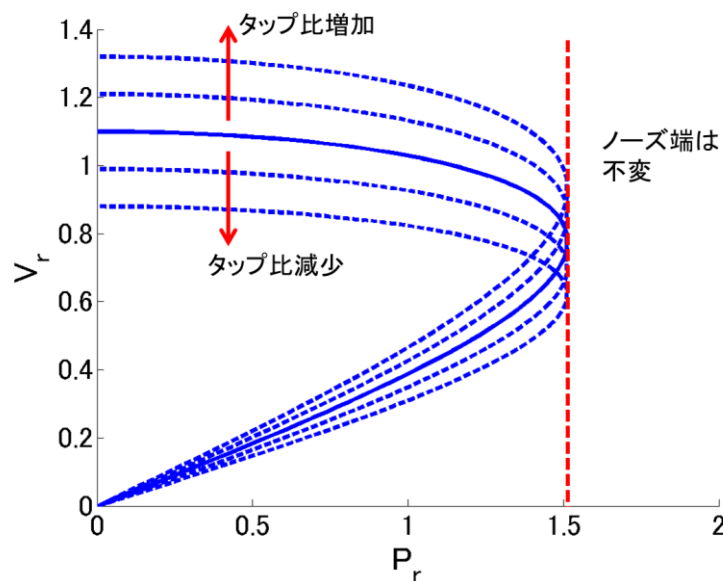


図 4.4 タップ比が変化した場合の PV カーブの変化

ここから分かるようにノーズ端は不変であるが、タップ比が増加するほど、PV カーブは上方へ拡大していく様子が見て取れる。

誘導機負荷を考慮した場合の PV カーブもこの変化に付随して変わってくる。その様子を $P_{PV} = 0$ の場合について図 4.5 に、 $P_{PV} = 1.5$ の場合について図 4.6 に示す。

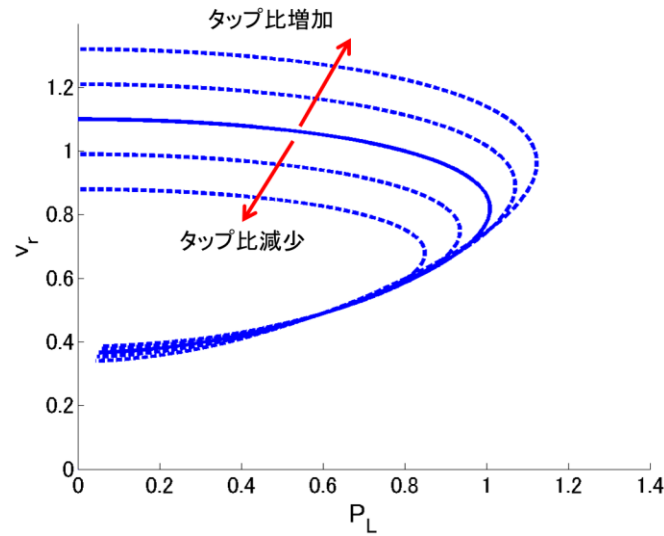


図 4.5 タップ比が変化した場合の誘導機特性を考慮した PV カーブの変化 ($P_{PV} = 0$)

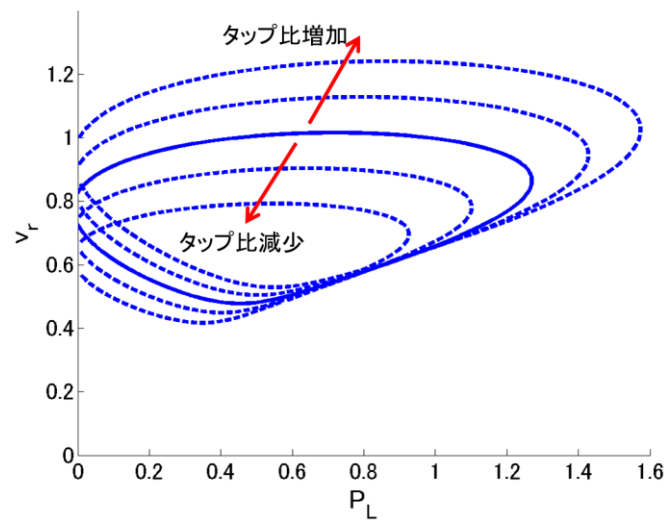


図 4.6 タップ比が変化した場合の誘導機特性を考慮した PV カーブの変化 ($P_{PV} = 1.5$)

このように誘導機特性を考慮した PV カーブの電圧高め領域では、タップ比の増加に従って上方に引っ張られるような変化をする。そのため、動作点が高め解にあるときには、負荷特性にもよるが、基本的に電圧が上昇する方向へと動作点が推移することになる。次項でシミュレーションによりこの効果を確認する。

4.4 送電線インピーダンス増加時のタップによる電圧回復

ここでは送電線インピーダンスが増加した場合にタップにより電圧回復を行うことを考える。例としては、タップ動作が有効に働く例と、タップ動作が追従できない例を扱う。

4.4.1 タップが有効に動作する場合

ここでは x が、0.4[p. u.]から 0.5[p. u.]に増加することを考える。シミュレーション条件は以下の表 4.1 の通りである。

表 4.1 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1. 1	0. 989	1. 051	0. 064	0. 4	1. 5	0. 0689
安定化後		0. 913	1. 067	0. 132	0. 5		0. 0839
1 段階上げ後		0. 953	1. 057	0. 114			0. 0753
2 段階上げ後		0. 986	1. 050	0. 102			0. 0693

擾乱発生直後のすべり s の時間推移を図 4.7 に、負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で図 4.8 に示す。

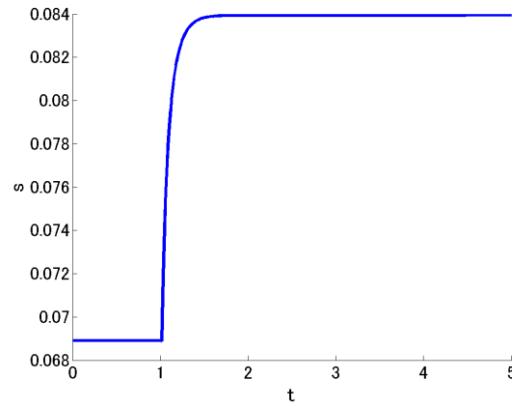


図 4.7 送電線 Z 増加直後のすべりの時間推移

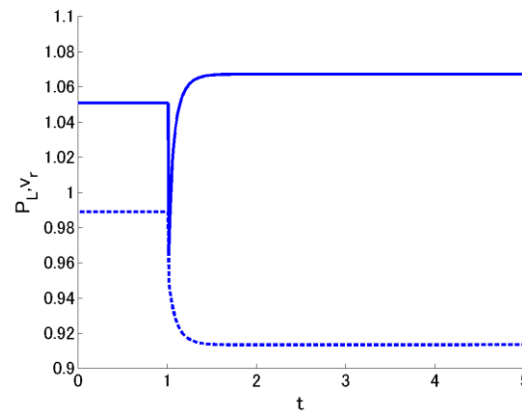


図 4.8 送電線 Z 増加直後の P_L と v_r の時間推移

このように擾乱発生直後からすべりは 0.0839 まで増加し、受電端電圧 v_r は 0.9134[p.u.]まで減少している。ここで図 4.3 に示すような動作をするタップ付き変圧器が備わっているとすべりは下図 4.9 に示すような時間推移を、負荷有効電力 P_L と受電端電圧 v_r は図 4.10 の

実線と破線で示すような時間推移を経て、受電端電圧の回復が行われる。図 4.10 において、 P_L の変化がとげのように見えている部分が 2箇所があるが、その 1 つ目の拡大図を図 4.11 に示す。過渡的にはタップ変化後の PV カーブに動作点が移るときに P_L は一時増加し、その後、すべりの減少による等すべり曲線の移動によって動作点は P_L が減少する方向に移動していったことが表れていることが分かる。

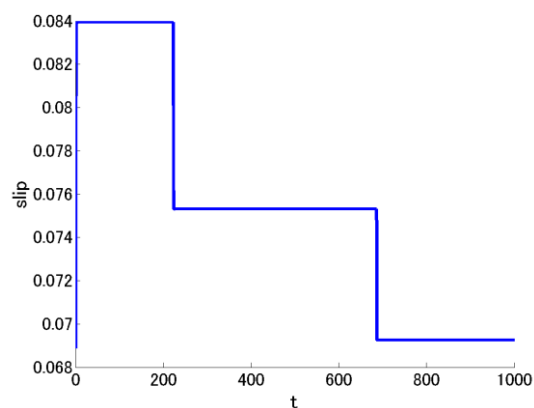


図 4.9 送電線 Z 増加後のタップ動作によるすべりの時間推移

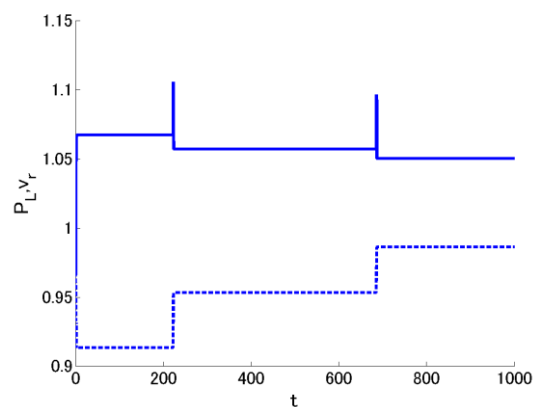


図 4.10 送電線 Z 増加後のタップ動作による P_L と v_r の時間推移

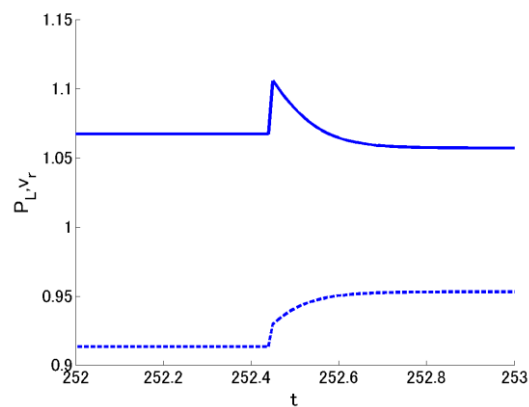


図 4.11 送電線 Z 増加後のタップ動作による P_L と v_r の時間推移 (t = 252~253[s]で拡大)

この時のタップ比の時間推移を図 4.12 に積分器への入力 A を図 4.13 に示す。

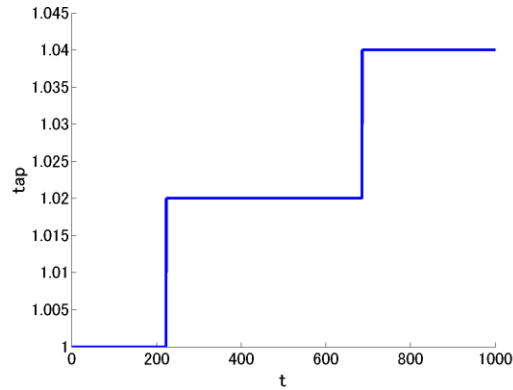


図 4.12 送電線 Z 増加後のタップ比の時間推移

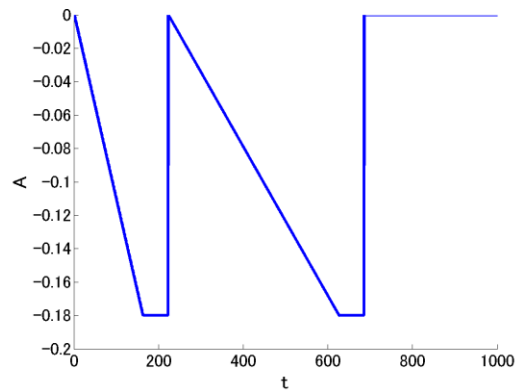


図 4.13 送電線 Z 増加後の積分器への入力

この場合は二段階のタップ上げ動作を行い、受電端電圧を回復していることがわかる。

4.4.2 タップ動作が追従できない場合

4.4.1 の例ではタップが有効に動作し、受電端電圧は回復したが、ここでは、タップ付き変圧器が有効に動作をせず、電圧不安定になってしまうケースとして x が、0.4[p. u.]から 0.52[p. u.]に増加することを考える。シミュレーション条件は以下の表 4.2 の通りである。

表 4.2 各パラメータ 単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.989	1.051	0.064	0.4	1.5	0.0689

擾乱発生直後のすべり s の時間推移を図 4.14、負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で図 4.15 に示す。

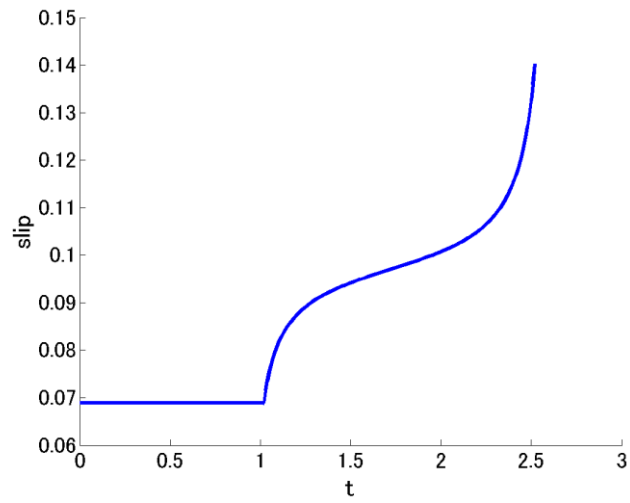


図 4. 14 送電線 Z 増加後のすべりの時間推移（タップが追従できない場合）

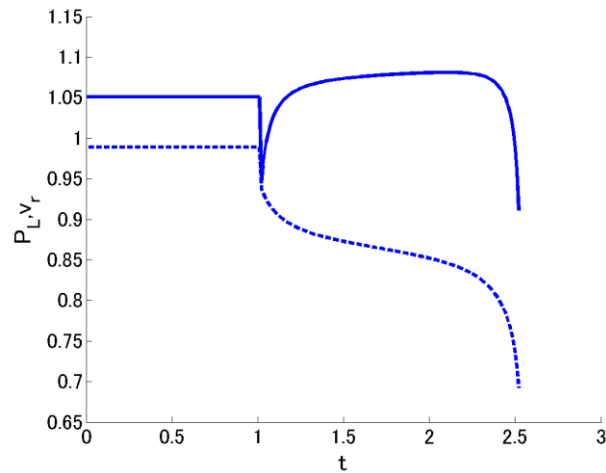


図 4. 15 送電線 Z 増加後の P_L と v_r の時間推移（タップが追従できない場合）

図 4. 14, 4. 15 から分かるように、このケースでは電圧低下が、タップ動作により回復することなく、電圧不安定となってしまっている。積分器への入力 A を図 4. 16 示す。これを見ると、等すべり曲線が PV カーブから外れる 2. 5[s] 時点においても A は -0. 18% であり、動作指令を出す -18% には達しておらず、タップ動作が追従できないことがわかる。

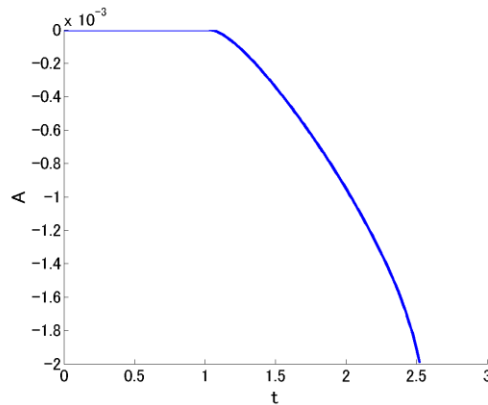


図 4.16 送電線 Z 増加後の積分器への入力（タップが追従できない場合）

4.5 太陽光発電出力ランプ状増加時のタップによる電圧回復

ここでは太陽光発電出力が増加した場合の電圧安定性について検討する。3.5.1 に示したステップ上の増加の場合では、太陽光発電出力増加と同時に PV カーブ上で解を持たなくなるため、タップ付き変圧器が有効に動作しないのは明らかである。タップなしでも電圧崩壊には至らない場合とタップがなければ電圧崩壊に至る例を扱う。

4.5.1 タップなしでも電圧崩壊には至らない場合

ここでは P_{PV} が、1.8 [p. u.] から 2.0 [p. u.] にランプ状に3分かけて増加することを考える。この場合は、3.5.1 のケースのように電圧崩壊には至らない。これは P_{PV} が変化することによる PV カーブの変化を、誘導機のすべりの変化が、追従できるため、等すべり曲線が変化していくことで、PV カーブと等すべり曲線が交点を持ち続けるためである。 P_{PV} の時間推移を示すと、図 4.17 ようになる。シミュレーション条件は以下の表 4.3 の通りである。

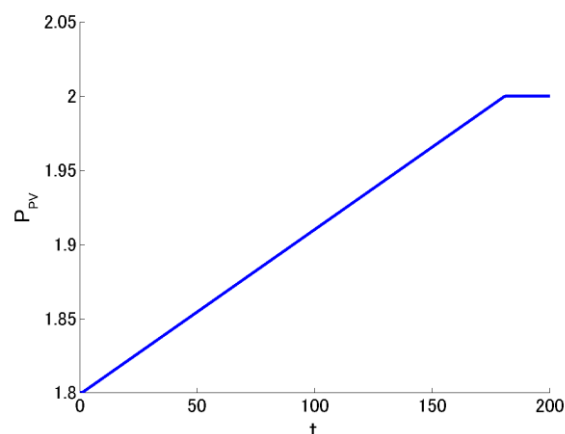


図 4.17 P_{PV} の時間推移

表 4.3 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.951	0.7	0.059	0.4	1.8	0.0484

この時、PV カーブと等すべり曲線は図 4.18 ようになる。また、擾乱発生直後のすべり s の時間推移を図 4.19、負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で図 4.20 示す。

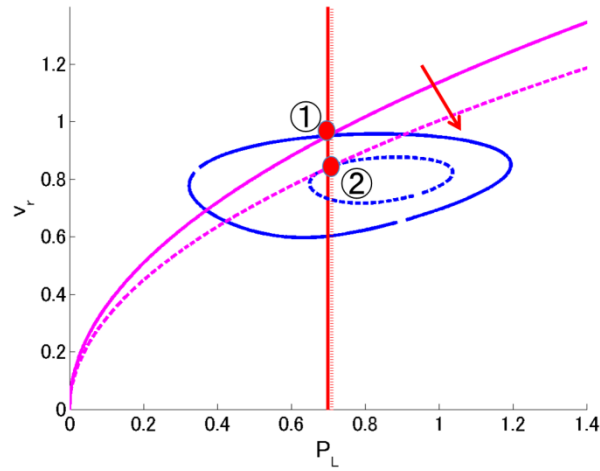


図 4.18 PV 出力増加時の PV カーブと等すべり曲線

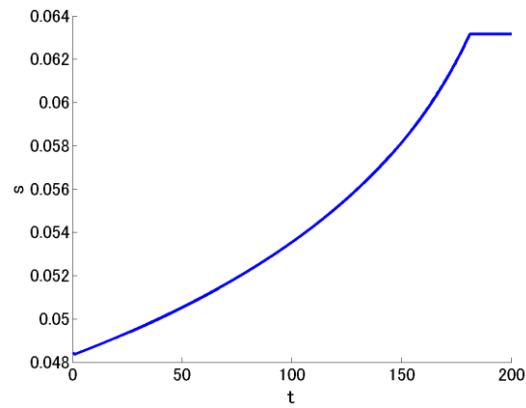


図 4.19 PV 出力増加時すべりの時間推移（タップ動作前）

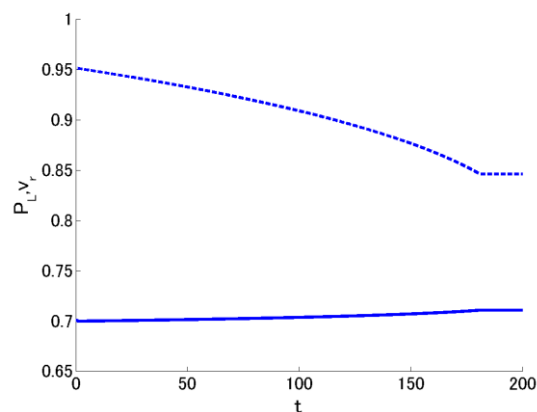


図 4.20 PV 出力増加時の P_L と v_r の時間推移（タップ動作前）

図 4.18 において、①は初期の動作点であるが、 P_{PV} が増加するにつれて、PV カーブは縮小し、動作点も移動していく。最終的に動作点は②まで移動し、受電端電圧は低下するが、3.5.1 でみたステップ上の増加の場合とは異なり、電圧崩壊には至らない。このような場合にはタップ付き変圧器による電圧回復が可能である。以下の図 4.21,4.22 にタップ動作によるすべり、負荷有効電力 P_L 、受電端電圧 v_r の時間推移を示す。

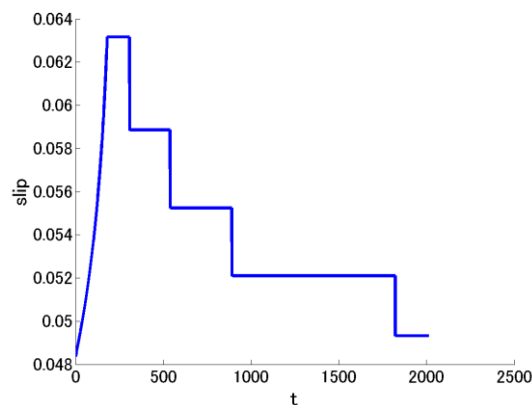


図 4.21 タップ動作によるすべりの時間推移

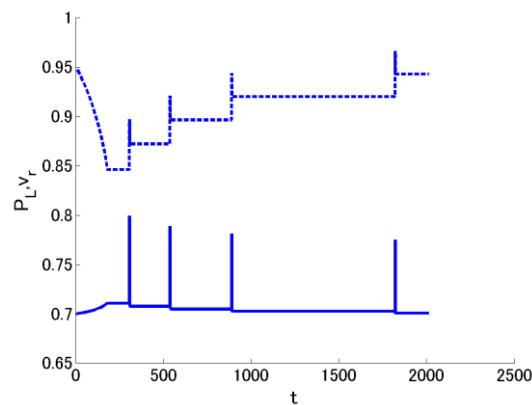


図 4.22 タップ動作による P_L （実線）と v_r （破線）の時間推移

この場合は四段階のタップ上げ動作を行い、30 分ほどの時間をかけて、受電端電圧を回復していることがわかる。

4.5.2 タップなしでは電圧崩壊に至る場合

4.5.1 ではタップなしでも電圧は低下するものの、電圧崩壊には至らない例を扱ったが、ここではタップ無しでは電圧崩壊に至ってしまう例、つまり、タップにより電圧崩壊を防ぐことができる例を示す。 P_{PV} が、1.8[p. u.]から 2.01[p. u.]にランプ状に 15 分かけて増加することを考える。まず、タップがない場合に電圧不安定が起こる様子を確認する。シミュレーション条件は以下の表 4.4 の通りである。

表 4.4 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.951	0.7	0.059	0.4	1.8	0.0484

この時、PV カーブと等すべり曲線は図 4.23 の実線のようにになる。また、擾乱発生直後からのすべり s の時間推移を図 4.24 に、負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で図 4.25 に示す。

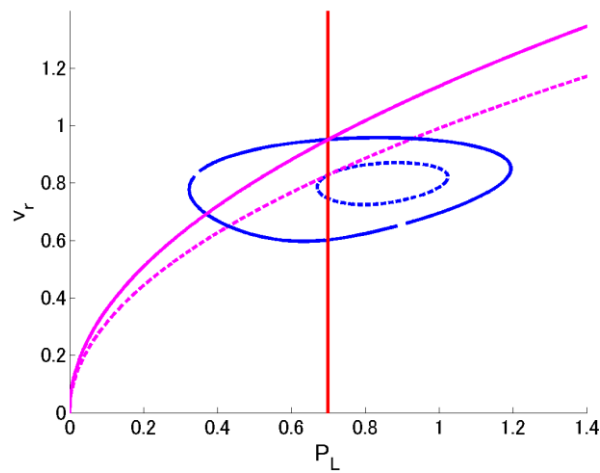


図 4.23 PV 出力増加時の PV カーブと等すべり曲線

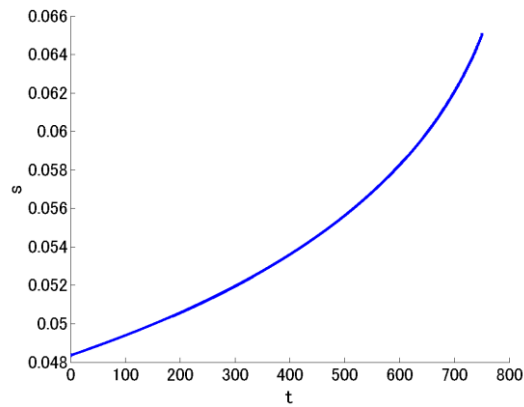


図 4.24 すべりの時間推移(タップ付き変圧器無し、電圧崩壊に至る)

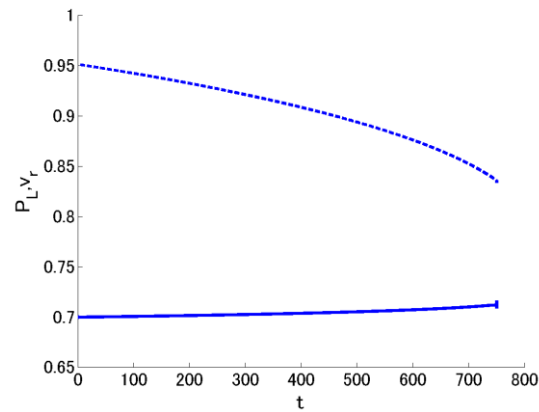


図 4.25 P_L と v_r の時間推移(タップ付き変圧器無し、電圧崩壊に至る)

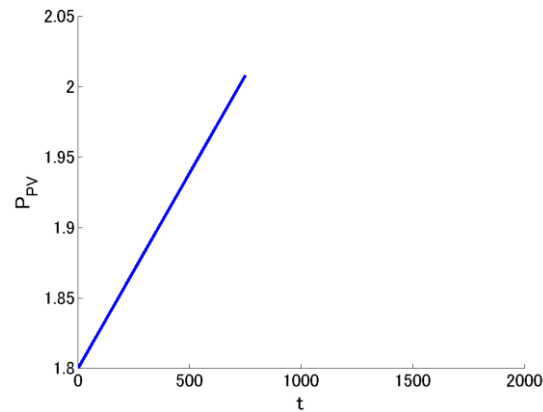


図 4.26 P_{PV} の時間推移(タップ付き変圧器無し、電圧崩壊に至る)

これらを見ると、PV 出力電力が増加するにつれて、すべりは増加、受電端電圧は低下していき、 $t = 750[s]$ において、解が得られず計算が終わっている。 $t = 750[s]$ 時点での PV カーブと等すべり曲線を図 4.22 に破線で示す。これをみると $t = 750[s]$ 時点で、PV カーブと等すべり曲線は接しており、これ以上 PV 出力電力が増加し、PV カーブが縮小すると、交点を失い、電圧不安定となることが分かる。このとき、図 4.26 に示すように、 P_{PV} は 2.0083

まで増加している。

次に、タップ付き変圧器が存在する場合のシミュレーション結果を示す。 P_{PV} の時間推移を図 4.27 に、すべり s の時間推移を図 4.28 に、負荷有効電力 P_L の時間推移を実線で、受電端電圧 v_r の時間推移を破線で図 4.29 に、それぞれ示している。また、タップ動作の様子として、タップ制御における積分器への入力 A を図 4.30 に、タップ比を図 4.31 にあわせて示す。 A が $\pm 18\%$ に達すると、タップ動作指令がなされ、動作時間である一分を経て、タップ比の変更が行われる。

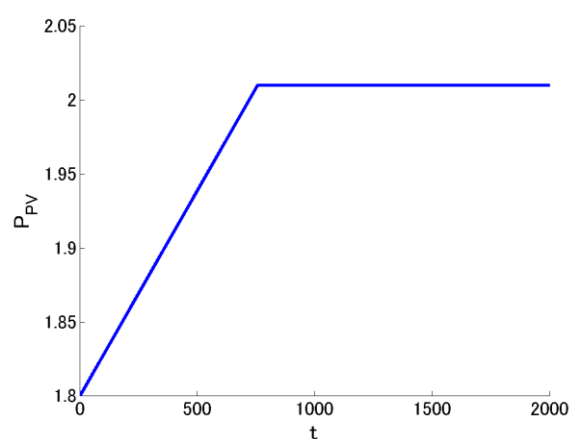


図 4.27 P_{PV} の時間推移(タップ付き変圧器有り)

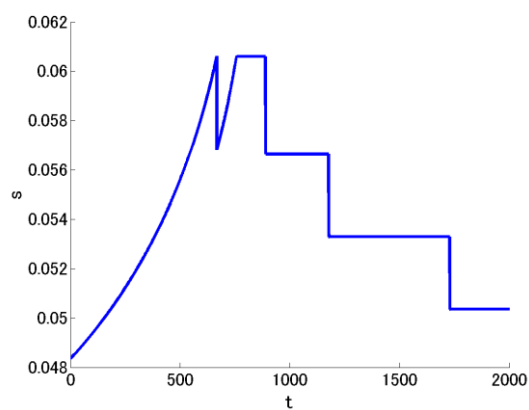


図 4.28 すべりの時間推移(タップ付き変圧器有り)

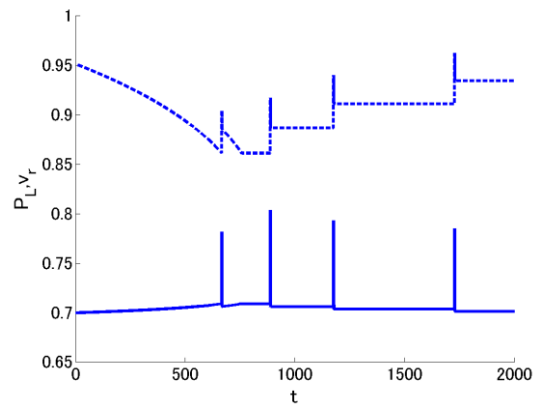


図 4.29 P_L (実線) と v_r (破線) の時間推移(タップ付き変圧器有り)

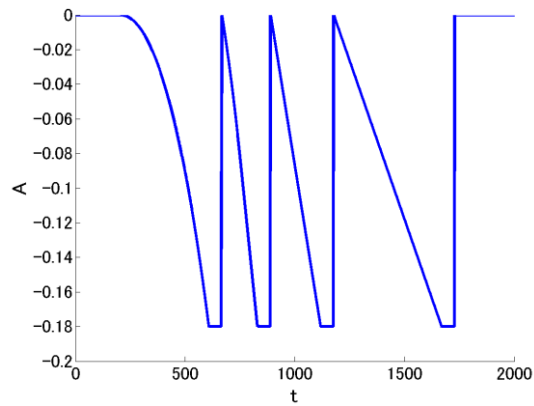


図 4.30 タップ制御における積分器への入力

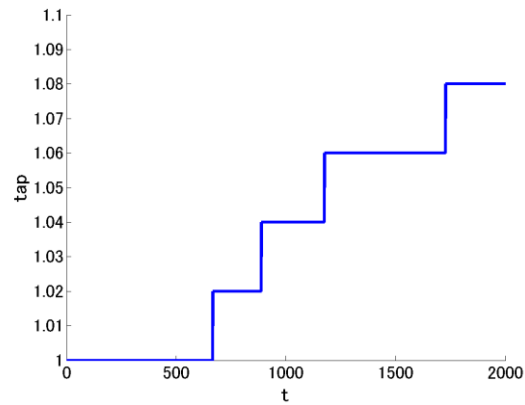


図 4.31 タップ動作

この場合は P_{PV} 増加中に一段階目のタップ動作が行われ、電圧崩壊を免れていることが分かる。その後もタップの上げ動作は続き、4段階のタップ上げ動作より、規定の値 ($0.951-0.02 < 0.9343 < 0.951+0.02$ [p. u.]) まで電圧の回復が行われている。タップ付き変圧器による電圧回復後の最終的な諸量を表 4.5 に示す。

表 4.5 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
タップ動作完了時	1.1	0.9343	0.701	0.105	0.4	2.01	0.0503

4.6 タップ付き変圧器の有効性

4.4.1、4.5 項で見たように、タップ動作は右側左側どちらのノーズ端に起因する電圧低下に対しても、電圧崩壊に至る速度がタップの動作時間に比して遅ければ、有効に動作する。一方で、4.4.2 ではタップは有効に動作しなかった。これは、タップ動作の時定数が1分と長く、送電線インピーダンスが増加することによる電圧低下に応答できないためである。タップ付き変圧器の有効性について以下の表 4.1 にまとめる。

表 4.6 タップ付き変圧器の有効性

擾乱の種類	タップの有効性
負荷変動	3.2.1, 3.4.1, 3.5.1 のようにタップ動作時間よりも速く電圧崩壊に至る場合には有効でない。
太陽光発電出力変動	電圧崩壊に至る場合でも、変動がタップ動作に比して遅ければ有効である。 3.2.2, 3.3 節, 3.4.2, 3.5.2 のようにタップ動作なしでも電圧低下に留まる場合は有効で、電圧をある程度復帰させる。
送電線インピーダンス増加	送電線事故による急峻な変動に対しては有効でない。

タップ動作より速く動作できる電圧回復手法として、無効電力制御がある。次章では PV の無効電力出力制御について説明し、その有効性を検証する。

第 5 章 PCS の無効電力制御

5.1 PCS の無効電力出力

太陽光発電設備には発電した直流電力を交流に変換するために PCS（パワーコンディショナ）が用いられる。近年ではこの PCS に、系統の電圧上昇を抑制するために無効電力を注入する機能が設けられている。

この無効電力の注入による電圧上昇の抑制には 2 種類の方法がある。1 つは系統の電圧が指定された電圧以上になると、指定された電圧以下になるまで力率制御の上限である力率値まで、連続的に無効電力を注入して電圧を抑制する方法、もう 1 つは有効電力と無効電力の比率を常に一定とする力率一定制御である。

ある時点での無効電力の出力可能量は PCS の最大出力容量とその時の出力力率に左右される。以下の図 5.1 に PCS が力率角 θ で動作している時の、PCS の最大出力容量と有効電力出力、無効電力出力の関係を示す。この動作円は PCS 接続点の電圧に比例するが、本節では無効電力や有効電力出力によらず定格電圧で保持されているものとする。

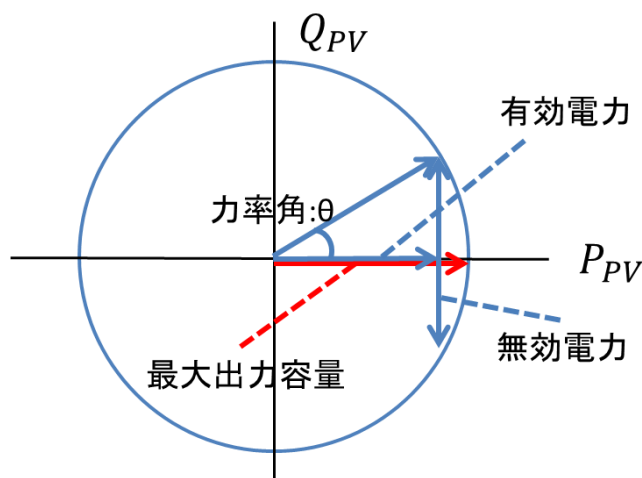


図 5.1 PV 有効電力出力と無効電力出力の関係

例えば最大出力容量が 500kVA の PCS を力率 0.85 で力率一定制御のもと運用することを考えると、有効電力 P は 425kW でリミットとなり、この状態では 263.4kvar の無効電力を出していることになる。

本章では、系統の電圧が指定された電圧以上になると、指定された電圧以下になるまで力率制御の上限である力率値まで、連続的に無効電力を注入して電圧を抑制する方法、を制御方法とし、無効電力制御の有効性を検討する。

5.2 PV の無効電力出力と PV カーブ

PV の無効電力出力が変化した場合の誘導機の負荷特性を考慮した PV カーブの変化の様子を $P_{PV} = 0$ の場合について以下の図 5.2 に、 $P_{PV} = 1.5$ の場合について図 5.3 に示す。図中青実線が $Q_{PV} = 0[p.u.]$ の場合を示し、これに対して $Q_{PV} = 0.1[p.u.]$, $0.2[p.u.]$ として系統側無効電力を注入した場合、 $Q_{PV} = -0.1[p.u.]$, $-0.2[p.u.]$ と吸収させた場合について青破線で図示している。

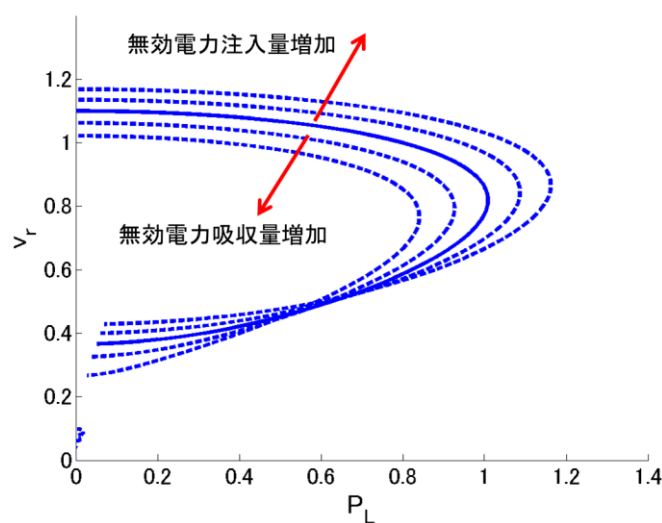


図 5.2 PV の無効電力出力が変化した場合の誘導機特性を考慮した PV カーブの変化
($P_{PV} = 0$)

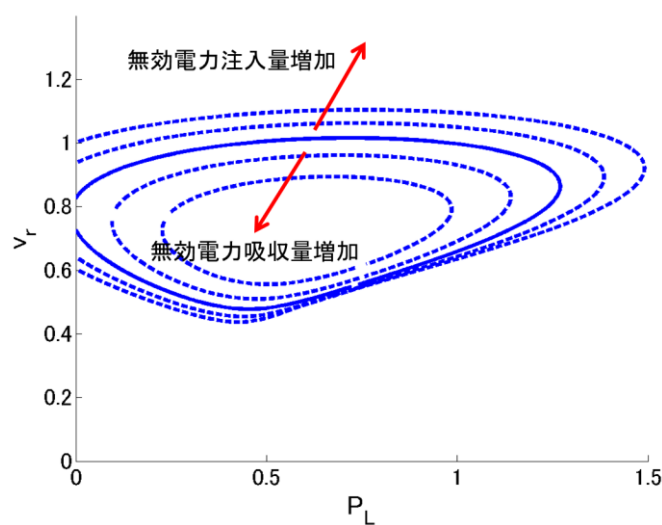


図 5.3 PV の無効電力出力が変化した場合の誘導機特性を考慮した PV カーブの変化
($P_{PV} = 1.5$)

図 5.2 と図 4.5、図 5.3 と図 4.6 をそれぞれ見比べてみると、PV カーブの高め解の領域において無効電力注入量増加時の変化とタップ比増加時の変化が、また、無効電力吸収量増加時の変化とタップ比減少時の変化がよく似ていることが分かる。このことからわかるように、PV による系統側への無効電力注入にはタップ付き変圧器のタップ上げ動作と同様に受電端電圧の低下を回復させる作用がある。このようにして PV の無効電力量を変化させることにより系統の電圧安定性を向上させることを無効電力制御と言う。PV の無効電力制御の時定数はタップ付き変圧器よりもはるかに速いので、4.4.2 で見たような、タップ付き変圧器では電圧回復操作が間に合わないようなケースでも有効である場合がある。次章で無効電力注入により電圧の回復が行われる様子を PV カーブ上で確認してみる。

5.3 PV 無効電力出力による電圧回復

ここでは、PV 無効電力注入による電圧回復効果を検討する。ケースとしては、送電線リアクタンス x が $t=1$ の時点で 0.4 から 0.5 に増加し、その後、PV による無効電力注入を行うことを考える。各パラメータは表 5.1 のようになった。特に受電端電圧 v_r について見てみると、0.989→0.913→1.018 と送電線リアクタンス増加による電圧低下から無効電力注入により電圧が回復していることが分かる。以下で、この回復の機構を、PV カーブを用いて明らかにする。

表 5.1 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1. 1	0. 989	1. 05	0. 064	0. 4	1. 5	0. 0689
擾乱後		0. 913	1. 07	0. 132	0. 5		0. 0839
注入後		1. 018	1. 04	0. 078			0. 0642

無効電力の注入を行わない場合、擾乱前後の PV カーブは図 5.4,図 5.5 のようになる。初期の動作点は①であり、送電線インピーダンス増加後は、増加後の PV カーブと等すべり曲線の交点である②に移る。その後、式(2.19)に従ってすべりが増加し、安定な点④に移り、結果として、電圧は低下する。

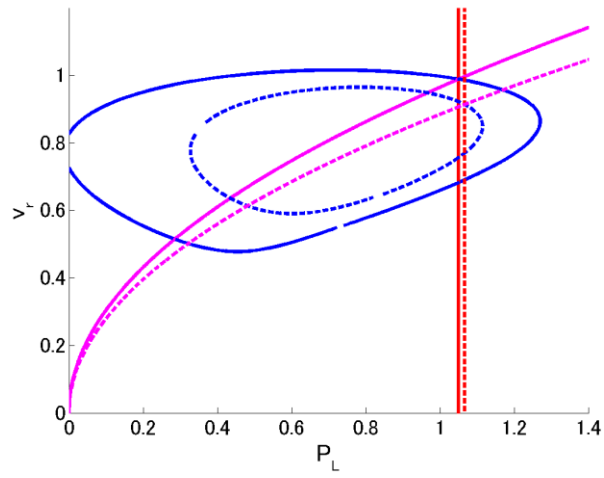


図 5.4 送電線 Z 増加前後の PV カーブと等すべり曲線

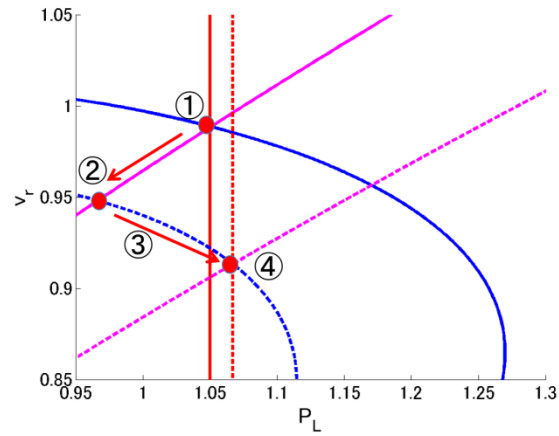


図 5.5 送電線 Z 増加前後の PV カーブと等すべり曲線(拡大図)

すべりの時間推移を図 5.6 に、 P_L, v_r の時間推移を図 5.7 にそれぞれ実線、破線で示す。

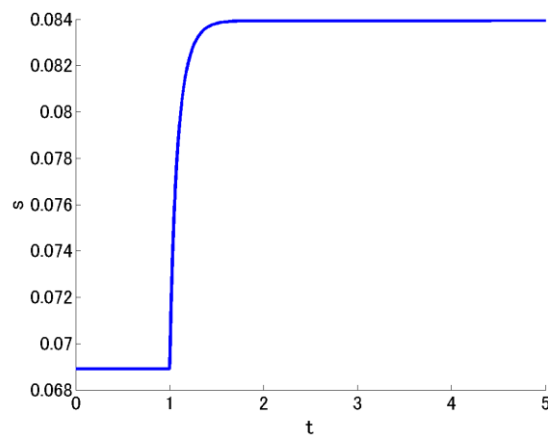


図 5.6 無効電力を注入しない場合のすべりの時間推移

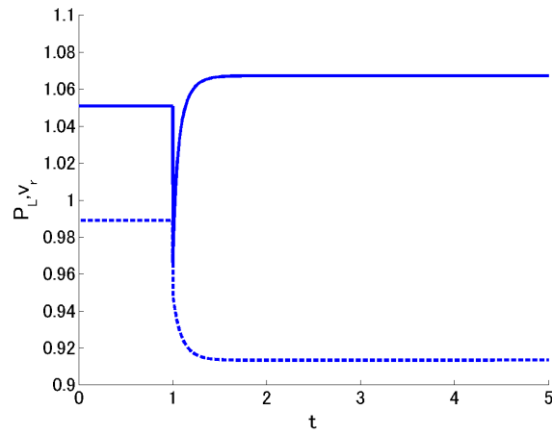


図 5.7 無効電力を注入しない場合の P_L, v_r の時間推移

このようにこのケースでは無効電力の注入を行わなければ、 v_r は 0.989 [p.u.] から 0.913[p.u.] まで低下する。

ここで、 $t=3$ の時点で $Q_{PV} = 0.1[p.u.]$ を注入してみる。図 5.4, 図 5.5 に $Q_{PV} = 0.1[p.u.]$ での PV カーブを重ねて描くと図 5.8, 図 5.9 のようになる。

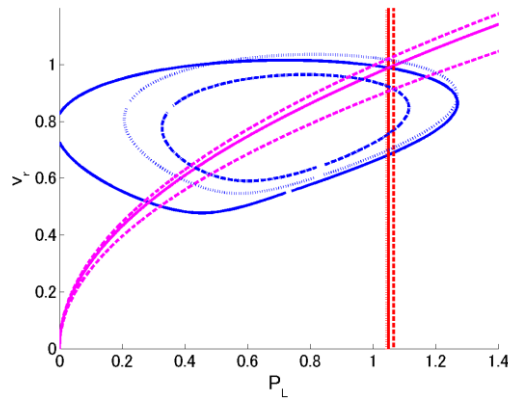


図 5.8 Q_{PV} 注入後の PV カーブ

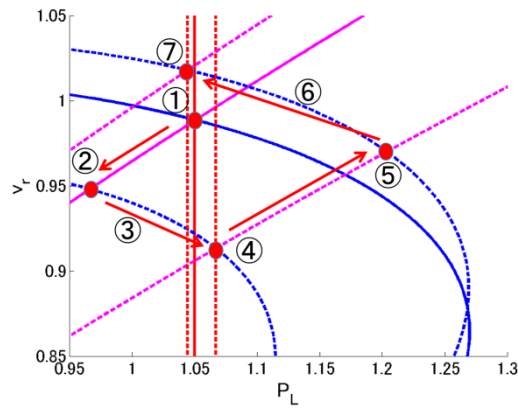


図 5.9 Q_{PV} 注入後の PV カーブ (拡大図)

送電線インピーダンスの増加後は④の位置にあった動作点が無効電力注入後の PV カーブと等すべり曲線の交点として決まる動作点である⑤に移行する。その後、式(2.19)により、すべりは減少し、動作点は無効電力注入後の PV カーブ上を推移し、⑦の点で安定となる。

このときのすべりの時間推移を図 5.10 に、 P_L, v_r の時間推移を図 5.11 にそれぞれ実線、破線で示す。

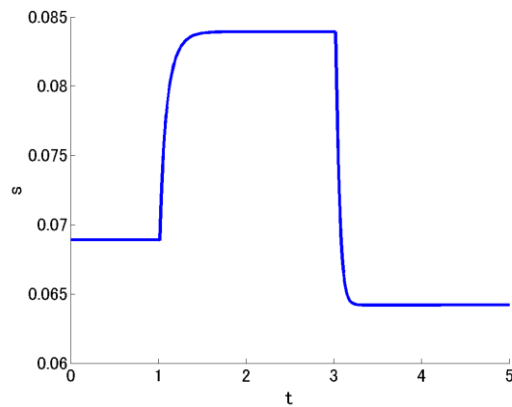


図 5.10 無効電力を注入した場合のすべりの時間推移

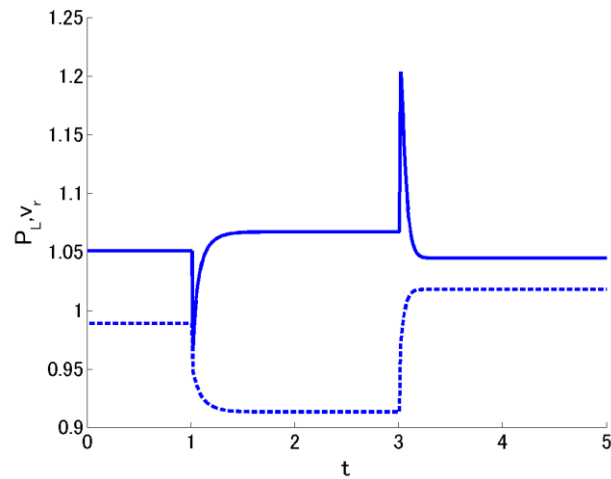


図 5.11 無効電力を注入した場合の P_L, v_r の時間推移

図 5.11 から分かるように PV による無効電力注入後、擾乱によって 0.913[p.u.]まで落ち込んでいた受電端電圧が 1.018[p.u.]まで増加する。

5.4 PV 無効電力出力制御の効果

前項では系統側へ無効電力を注入することの電圧低下に対しての効果を PV カーブ上で確認した。ここでは、無効電力制御を組み込んだシミュレーションにより、その電圧低下に対する効果を詳しくみても。以下の図 5.12 に PCS 無効電力制御のブロック図を示す。

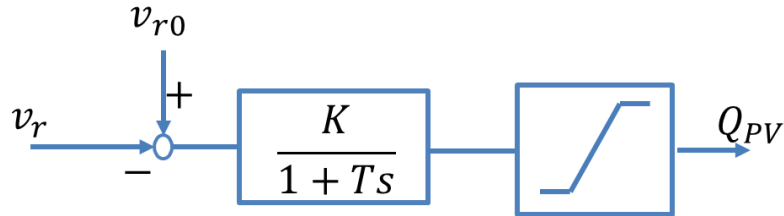


図 5.12 無効電力制御ブロック図

ここでは、 $K = 4$ （系統ベース）、 $T = 1[\text{sec}]$ とした。ゲイン K は PCS の定格力率を 0.85 とし、1.5[p.u.]の定格有効電力を出力していても、電圧低下が 20%程度で最大の無効電力を発生するように定めた。すなわち、最大無効電力を発生する最大の電圧を v とすれば、 $K(1 - v) = 0.9296v$ （ただし、0.9296 は定格力率 0.85 の PCS が定格有効電力 1.5[pu]を発生している時の定格電圧での無効電力発生可能量）より、 $K = 4$ では v は 0.811[pu]となるので、電圧低下 19%時に無効電力出力可能量をすべて発生することになる。

一方、時定数 T としては、PCS の能力からはもっと速い動作も可能であるが、タップ付き変圧器に比べ、十分速い値であることと、PCS の単独運転検出機能などさらに高速の動作を要求される機能との干渉を防ぐことから、1[sec]とした。

以下で送電線リアクタンスが増加する 2 ケースで無効電力出力制御の効果を検証する。

5.4.1 擾乱後電圧低下に留まる場合

送電線リアクタンス x が 0.4 から 0.5 に増加することを考える。シミュレーション条件は以下の表 5.2 のとおりである。

表 5.2 各パラメータ

単位は[p. u.]

	v_s	v_r	P_L	Q_L	x	P_{PV}	s
初期条件	1.1	0.989	1.05	0.064	0.4	1.5	0.0689

無効電力制御を行わない場合のすべりの時間推移を図 5.13 に、 P_L, v_r の時間推移を図 5.14 にそれぞれ実線と破線で示す。

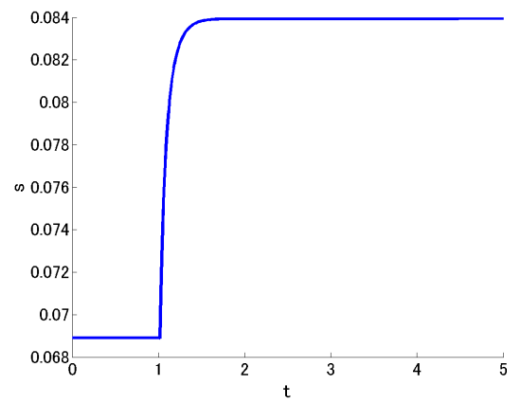


図 5.13 送電線 Z 増加後のすべりの時間推移 (Q 制御なし)

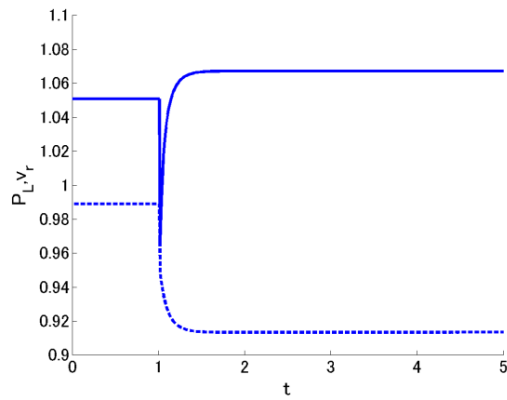


図 5.14 送電線 Z 増加後の P_L, v_r の時間推移 (Q 制御なし)

図 5.14 をみると、電圧は送電線インピーダンス増加後、0.913 まで減少している。

ここで図 5.12 のような無効電力制御を行った場合のすべり、 P_L, v_r の時間推移を図 5.15, 図 5.16 に示す。また、PV の無効電力出力についても図 5.17 に示す。

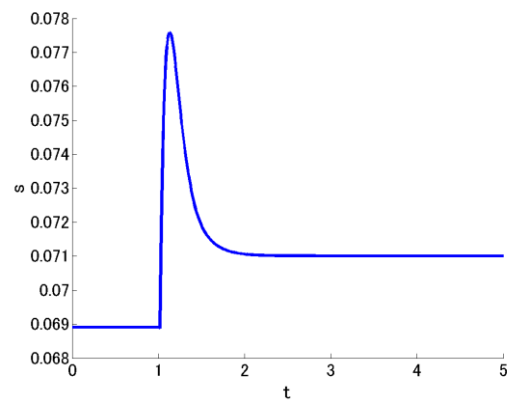


図 5.15 送電線 Z 増加後のすべりの時間推移 (Q 制御あり)

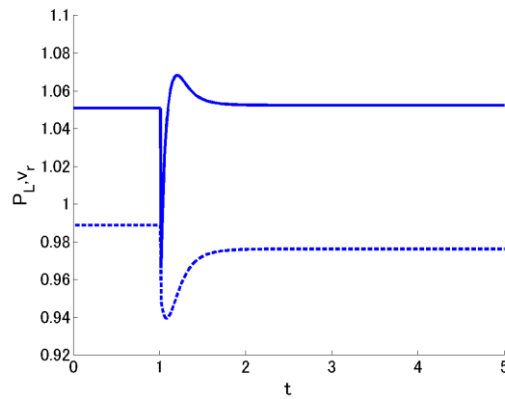


図 5.16 送電線 Z 増加後の P_L, v_r の時間推移 (Q 制御あり)

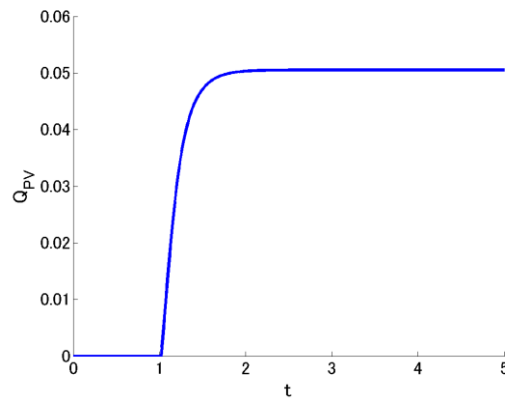


図 5.17, Q_{PV} の時間推移

図 5.14, 5.15 と比べると無効電力制御により、すべりの増加、受電端電圧の低下が抑えられていることが分かる。

5.4.2 擾乱後電圧崩壊に至る場合

5.4.1 で見た擾乱は、4.4.1 で見たように、タップ付き変圧器によっても電圧の回復が行えるものであった。次に、4.4.2 で扱った、タップ付き変圧器による電圧回復が間に合わない場合、つまり、送電線リアクタンス x が $0.4 \rightarrow 0.52$ に増加する場合を考える。初期条件は表 5.2 のとおりである。

無効電力制御を行わない場合のすべりの時間推移を図 5.18 に、 P_L, v_r の時間推移を図 5.19 にそれぞれ実線と破線で示す。

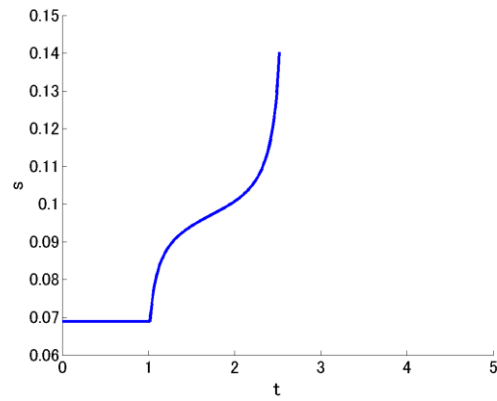


図 5.18 送電線 Z 増加後のすべりの時間推移 (Q 制御なし)

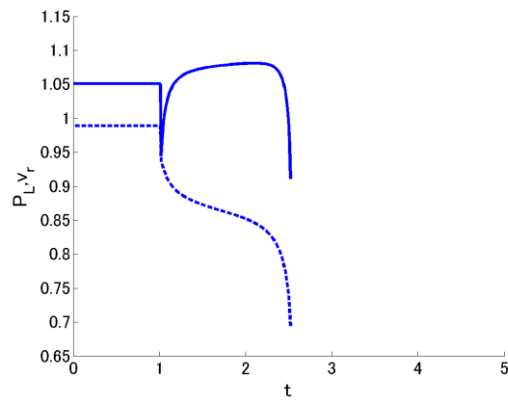


図 5.19 送電線 Z 増加後の P_L, v_r の時間推移 (Q 制御なし)

この場合は、なんの手も打たない場合、図 5.18, 5.19 のように電圧崩壊に至る。ここで図 5.13 のような無効電力制御を行った場合のすべり、 P_L, v_r の時間推移を図 5.20, 図 5.21 に示す。また、PV の無効電力出力についても図 5.22 に示す。

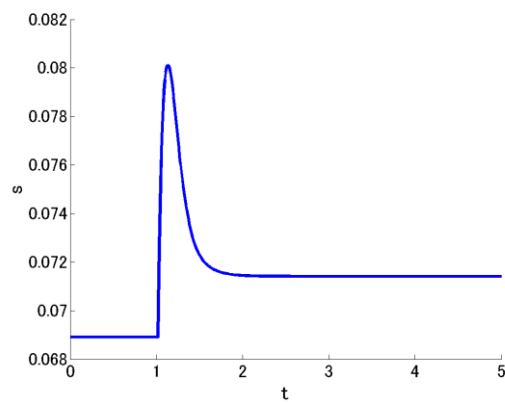


図 5.20 送電線 Z 増加後のすべりの時間推移 (Q 制御あり)

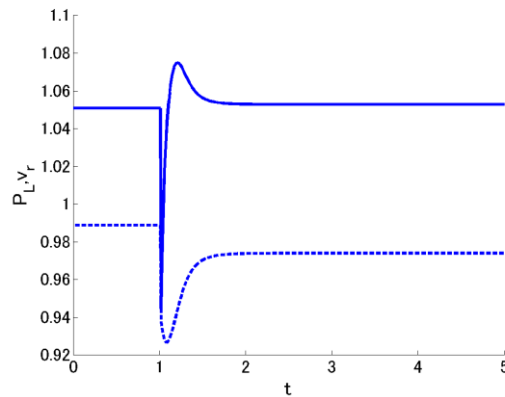


図 5.21 送電線 Z 増加後の P_L, v_r の時間推移 (Q 制御あり)

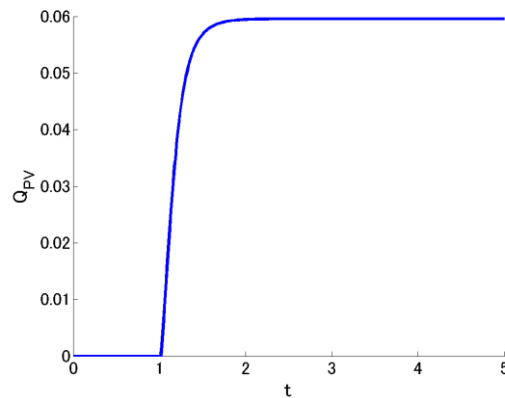


図 5.22, Q_{PV} の時間推移

このように、無効電力制御によってタップ付き変圧器の場合は防げなかった電圧崩壊が防げていることが分かる。

5.5 PV 無効電力制御の有効性

5.4.2 で見たように、時定数の短い無効電力制御は、タップ付き変圧器では追従できない速い電圧低下にも効果を発揮する。ここでは、送電線インピーダンス増加についての有効性を見たが、3 章で扱ったような他の擾乱に対しても同様に有効である。ただし、図 5.1 で示したように無効電力出力量には PCS の容量と有効電力出力によって決まる制限がある。本章では PCS の容量は十分大きいものとし、この制限を考えなかったが、本章で扱った例では無効電力注入量はおおむね $0.1[\text{p.u.}]$ 以下であり、これは $P_{PV} = 1.5[\text{p.u.}]$ という想定に対して、力率にして 0.997 という値である。この値は PV の出力力率の定格である 0.85 に比して十分大きく、本シミュレーションにおいては、無効電力出力制限は問題とならないといえる。

第 6 章 結論

6.1 まとめ

本論文では、太陽光発電が電力系統へ大量に導入された場合に電力系統の基礎的な電圧特性へ与える負荷特性と電圧制御の影響を示した。以下に、それぞれの章で得られた結論について述べる。

第 2 章では基本的な PV カーブの導出と誘導機負荷の力率特性を考慮した PV カーブの導出を行い、それぞれを用いた電圧安定性検討手法を示した。

第 3 章では、太陽光発電大量導入の想定のもとで誘導機負荷と定電力負荷が混在する電力系統の電圧安定性について示した。一般的に負荷モデルとして用いられる、定電力負荷、定電流負荷、定インピーダンス負荷の中では、3.7 節でみたように、定電力負荷が最も電圧安定性の面で不利であるため、最も厳しいケースとして、定電力負荷を選んだ。

電圧不安定性を引き起こす代表的な事象である、負荷変動、太陽光出力変動、送電線インピーダンス増加に対して、それぞれ、負荷が誘導機のみの場合と誘導機の一部が定電力負荷に置き換わった両負荷が混在する場合について、電圧が変動する機構を、PV カーブを描くことにより明らかにした。

太陽光発電大量導入時の電圧安定性には、PV カーブの右側ノーズ端だけでなく、左側ノーズ端も関わってくるというのは、誘導機負荷のみを扱った先行研究で得られた知見であった。本研究では、この左右両端のノーズ端に起因する電圧不安定性は両者とも、誘導機と定電力負荷が混在する場合には誘導機のみの場合より起こりにくくなるという結果が得られ、その原因についても考察を加えた。

第 4 章では電圧が低下した場合のタップ付き変圧器の効果について示した。タップ付き変圧器を含む電力系統の PV カーブを描くことにより、PV カーブ上での動作点の推移から電圧安定性を明らかにする手法を示した。ここでは、電圧崩壊がもともと起こらず、ある程度の電圧低下にとどまるような擾乱に対しては、タップ付き変圧器が有効であるが、送電線事故などの急峻な変動で電圧崩壊が起こる場合は有効でないという結果が得られた。また、PV の出力変化に対しては、その変動が太陽の高度の変化によるものなど、タップ動作に比してそれほど速くない擾乱であれば、タップ動作なしでは電圧崩壊に至る場合でもこれを防ぐことが可能であるという結果を得た。

第 5 章では太陽光発電の PCS の無効電力制御について、その有効性を検証した。無効電力制御を行った場合の電力系統の PV カーブを描くことにより、PV カーブ上での動作点の推移から電圧安定性を明らかにする手法を示した。無効電力制御は、送電線事故によるインピーダンスの増加のように、タップ付き変圧器が追従できないような速い変動に対しても、有効であるという結果が得られた。特に、太陽光発電大量導入時には、PCS の容量も大きくなるため、その有効性はより増してくると思われる。

6.2 今後の課題

傾向として、左側ノーズ端に起因するものに限らず、誘導機比率が小さいほうが電圧安定性に関して、有利という結果が得られたが、このことは誘導機の特徴が電圧安定性に悪影響を及ぼすことを示唆している。誘導機が電圧安定性に与える悪影響は、3.7節で示したように、誘導機においては、印加電圧が例えば低下するとすべりが増加し無効電力の消費が増加して電圧低下を助長するような特性があるためと考えられる。

本研究で扱った誘導機負荷と定電力負荷が混在している場合のシミュレーションでは、それぞれの負荷の電圧安定性に対する影響が同時に表れている。これら個々の電圧安定性を与える影響を切り分けて、どういった場合に、どちらの特徴が原因で電圧不安定が起こるのか、という点は別途明らかにしなくてはならない点である。

また、本研究ではタップ付き変圧器と無効電力制御について、それぞれ個別にPVカーブに与える変化を見たが、この2つを協調して制御する研究も行われており^[11]、その際の電圧安定性への影響はPVカーブを用いた電圧安定性検討の課題となりうる。

さらに、本論文では基礎的な特性の解明により電圧不安定性の発生機構と、電圧不安定性対策の一部の例の効果を論じただけであるので、今後は、実系統などを対象とした電圧不安定性発生条件などを定量的に明らかにするとともに、対策の量と効果についても明らかにしていく必要がある。

謝辞

本修士論文の執筆にあたり、指導教官である谷口治人特任教授には、大変お世話になりました。修士から研究室を変え、電力系統に関して知識の乏しかった私に、基本的なところからご指導してくださり、どんな些細な質問でも丁寧に答えて頂きました。私が行き詰まった時には、一緒になって親身に問題に取り組んでくださいました。修士としての生活を常に支えて頂いたことを深く感謝しております。

同研究室の鈴木宏和特任主幹研究員、ならびに、太田豊特任助教は毎週の勉強会で、私の研究内容について議論してくださり、ありがたいご助言、ご指摘を多数いただきました。

昨年度ご卒業された、石川幸一郎さんには、在学中は勉強会のみならず、普段からも気さくに質問に応じてくださり、卒業後も研究室に顔を出してくださるなど、大変お世話になりました。

上記の谷口研究室のみなさんには、毎週の勉強会の他、様々な見学会、旅行に連れて行っていただいたり、飲み連れて行っていただいたりと、研究を離れたところでもお世話になり、おかげさまで楽しく有意義な修士としての学生生活を送れたと感じております。重ねて感謝を申し上げます。

馬場旬平准教授には、研究について有意義なご助言を数多くいただきました。また、居室が同じということもあり、常に気にかけてくださり、研究内外でさまざまなご指導をしていただきました。ここに御礼を申し上げます。

馬場研究室の河内駿介先輩、今中政輝先輩は、いつも私の研究内容や、生活を気にかけてくださり、とても優しい先輩方でした。また、慶本裕史くん、佐々本英紀くん、田崎祐作くん、林祐希くん、奥谷和也くんには研究面ではもちろん、普段の話し相手として、仲良くしてもらい、お陰で楽しい生活が送れたと感じております。

私の修士としての研究生生活を支えてくださったすべての方々に感謝の意を表し、本論文の結びとさせていただきます。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] NEDO：「太陽光発電ロードマップ
(PV2030+)」, <http://www.nedo.go.jp/content/100116421.pdf> (2009)
- [4] 石川幸一郎：「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」 東京大学大学院,工学系研究科,電気系工学専攻,修士論文(2013)
- [5] 電力中央研究所,システム技術研究所,電力計算センター：「-電中研 電力系統安定度解析システム-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)
- [6] 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－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－」, 電力中央研究所報告, R10024, 電力中央研究所 (2011)
- [7] エレクトリックマシーン&パワーエレクトロニクス教科書編纂委員会：「エレクトリックマシーン&パワーエレクトロニクス」,(2004)
- [8] 石川幸一郎, 谷口治人, 鈴木宏和, 太田豊, 水野陽二郎：「誘導機負荷の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的検討」,電気学会論文誌 B, vol.134,No.1, pp2-8, (2014)
- [9] 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)
- [10] 浅田実, 山下光司：「わが国 60Hz 系統における負荷特性の実態分析」, 電気学会論文誌 B, vol. 121, No. 10, pp1371-1378 (2001)
- [11] 川崎章司, 金本憲明, 田岡久雄, 松本純也, 林泰弘「太陽光発電システム群の力率制御と LRT による協調形電圧制御法」, 電気学会論文誌 B, vol. 132, No. 4, pp309-316 (2012)

発表文献(第一著者)

水野陽二郎，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与える負荷特性の影響」，平成 25 年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会, PE-13-127, PSE-13-143, 九州工業大学(2013. 9)

発表文献(非第一著者)

- [1] 石川幸一郎，谷口治人，鈴木宏和，太田豊，水野陽二郎：「太陽光発電が大量に連系された系統の基礎特性」，平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会，10，新潟(2013. 8)
- [2] 古関隆章，水野陽二郎，水間毅：「車上運転支援装置を用いた高速域の近時定電力制動による省エネルギー運転」，平成 24 年電気学会全国大会, 広島(2012. 03)