



修士論文

太陽光発電が大量導入された
電力系統の縮約

平成24年2月8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

37-106467

千貫 智幸

内容梗概

近年 CO₂ 排出量削減の要求やエネルギーセキュリティ問題を背景に、我が国では太陽光発電（Photovoltaic generation :PV）の大量導入が検討されている。しかし、PV は天候の変化に発電出力が大きく依存するなど、在来の大規模回転発電機とは異なる特徴を数多く持ち、今後導入量が増加していった場合には電力系統の運用に様々な影響を及ぼすことが懸念されている。

本論文では、PV が電力系統の過渡安定度へ及ぼす影響に焦点を当てる。PV が過渡安定度に及ぼす影響を論じる場合には、下位系統に分散的に導入される多数台の PV をどのように表現するかが一つの問題となる。これは、今後導入される PV の多くは住宅用として配電系統に導入されることが予想されるが、過渡安定度解析において下位系統は一つの負荷モデルに集約されるなどして簡略的に表現されるためである。PV が過渡安定度を与える影響を正確に評価するためには、下位系統への分散的な PV の導入を反映した系統モデルを用いて解析を行う必要がある。

そこで本論文では、下位系統に導入された PV が過渡安定度に及ぼす影響を考慮することのできる系統縮約手法を提案する。縮約対象としては、下位系統の中でも特に将来的に PV の導入量が高くなることが予想される住宅用配電系統を想定する。

本論文で提案する縮約手法は、縮約対象系統を負荷、PV、系統インピーダンスの構成要素ごとに縮約し、縮約後の等価回路を集約 PV、集約負荷、および 3 つの等価インピーダンスによって表わす。提案する縮約等価回路を用いることで、系統の電圧変動に応じて変化する縮約点の潮流量を、縮約前の原系統において逐次潮流計算を行うことなく算出することができる。また、等価回路のパラメータは系統の潮流状態にほとんど依存しないため、ある潮流断面においてパラメータを求めた後は、負荷の総量と PV の総発電量を把握できれば、異なる潮流断面においても再度パラメータを更新することなく縮約等価回路を得ることができる。

本論文では提案縮約手法の有用性の検証として、住宅用配電系統モデルに提案手法を適用し、電圧-潮流特性の解析の精度を評価した。その結果、提案する縮約等価回路は、対象系統の負荷特性や潮流断面によらず、PV の導入された縮約対象系統の潮流特性を高い精度で算出可能であることを示した。また、提案縮約等価回路を用いた一機無限大母線系統の過渡安定度解析結果より、提案縮約等価回路は、臨界事故除去時間の算出結果に有意な誤差を与えないことが示唆され、提案縮約手法の有用性を確認した。これより、提案縮約手法は、PV の大量導入された系統の過渡安定度解析の効率化および精度向上に資するものであると考える。

目次

第 1 章 序論

1.1	本論文の背景.....	1
1.2	本論文の目的.....	1
1.3	本論文で対象とする縮約範囲.....	2
1.4	本論文の構成.....	3

第 2 章 電力系統と PV

2.1	PV の大量導入に伴う課題.....	4
2.2	PCS の機能.....	7
2.3	本論文で検討対象とする PV システム.....	8

第 3 章 縦続行列の概念を用いた縮約手法

3.1	需要家が縦続に連系した系統の縮約手法.....	11
3.2	縮約手法の拡張.....	13
3.3	縮約手法の積み上げ.....	16
3.4	等価回路のパラメータに関する考察.....	17
3.5	本章のまとめ.....	22

第 4 章 Z 分離縮約等価回路の提案

4.1	提案する縮約等価回路.....	23
4.2	提案縮約等価回路のパラメータに関する考察.....	27
4.3	定電力特性の要素が含まれる場合の縮約手法.....	34
4.4	簡略配電フィーダモデルを用いた等価回路の精度評価.....	35
4.5	本章のまとめ.....	38

第 5 章 詳細配電システムモデルによる提案縮約手法の有用性の検証

5.1	縮約対象とする詳細配電システムモデル.....	39
5.2	PV が導入された系統の潮流特性.....	42
5.3	提案縮約手法の有用性の検証.....	46
5.4	他の縮約手法を用いた場合との比較.....	55
5.5	本章のまとめ.....	61

第 6 章	縮約モデルの差異が過渡安定度に与える影響の評価	
6.1	一機無限大母線系統モデル.....	62
6.2	PV・負荷一括モデルによる解析.....	65
6.3	系統インピーダンスを無視したモデルとの比較.....	67
6.4	提案縮約等価回路を用いた解析.....	70
6.5	本章のまとめ.....	73
第 7 章	結論	
7.1	本論文の成果.....	74
7.2	今後の課題.....	75
謝辞		77
参考文献		77
発表文献		79
付録 A	单相三線式受電方式の考慮	80
付録 B	詳細配電システムモデルのインピーダンスマップ	81
付録 C	一機無限大母線システムモデルのパラメータ	83

第1章 序論

1.1 本論文の背景

近年 CO₂ 排出量削減の要求やエネルギーセキュリティ問題を背景に、再生可能エネルギー電源の導入拡大が進められている。特に太陽光発電 (Photovoltaic generations: PV) は、日本では国をあげて導入促進に向けた動きが強まっており^[1]、大きな注目を集めている。しかし、PV は天候の変化に発電出力が大きく依存するなど、在来の大規模回転発電機とは異なる特徴を数多く持ち、今後導入量が増加していった場合には電力系統の運用に様々な影響を及ぼすことが懸念されている。

本論文では、PV が電力系統の過渡安定度に及ぼす影響に焦点を当てている。PV の導入を考慮した過渡安定度解析に関しては既に研究事例の報告がなされている^{[2]-[6]}が、解析においては下位系統に導入される PV をどのように表現するかが一つの問題となる。これは、今後導入される PV の多くは住宅用として配電系統に連系することが予想されるが、一方で過渡安定度解析においては、計算量の増大や膨大なデータを管理する複雑さなどを避けるために基幹系統のみを考慮の対象とし、下位系統は一つの負荷に集約されるなどして簡略的に模擬されるためである。このため、一般的な過渡安定度解析で用いる系統モデルにおいては、下位系統に連系する多数台の PV を個別に表現することはできず、集約して表現する必要がある。

これまでに報告された研究事例においては、集約された PV が基幹系統の母線に連系するものとして模擬して解析を行っており^{[2]-[5]}、上位系統から PV の連系点までのインピーダンスを無視している。しかしこのようなモデルでは、個々の PV の連系点電圧の差異や、PV の導入分布など、PV が下位系統内に分散的に導入されているがゆえに生じるローカルな要因について考慮をすることができない。一方、配電系統内の電圧解析の面からは、配電系統インピーダンスをある程度考慮したモデルも提案されている^[7]が、系統内の負荷が均等に導入されている場合に限って議論されており、PV の導入分布の差異による影響についても十分に検証が為されていない。

PV が過渡安定度に与える影響をより正確に評価するためには、下位系統への分散的な PV の導入を反映した系統モデルを用いて解析を行う必要がある。

1.2 本論文の目的

本論文では、PV が導入された下位系統の縮約手法を提案する。系統縮約とは、系統の一部を、できるだけ等価性を維持するようにして、解析に適した簡略モデルに縮小表現することである。本論文では、下位系統に導入された PV が過渡安定度に及ぼす影響を考

慮することのできる系統モデルの構築を目的とする。本縮約手法を用いることで、系統の電圧変動に応じて変化する縮約点の潮流量を、縮約前の原系統において逐次潮流計算を行うことなく、かつ高い精度で算出することが可能となる。本論文で提案する縮約手法の概念図を図 1.1 に示す。

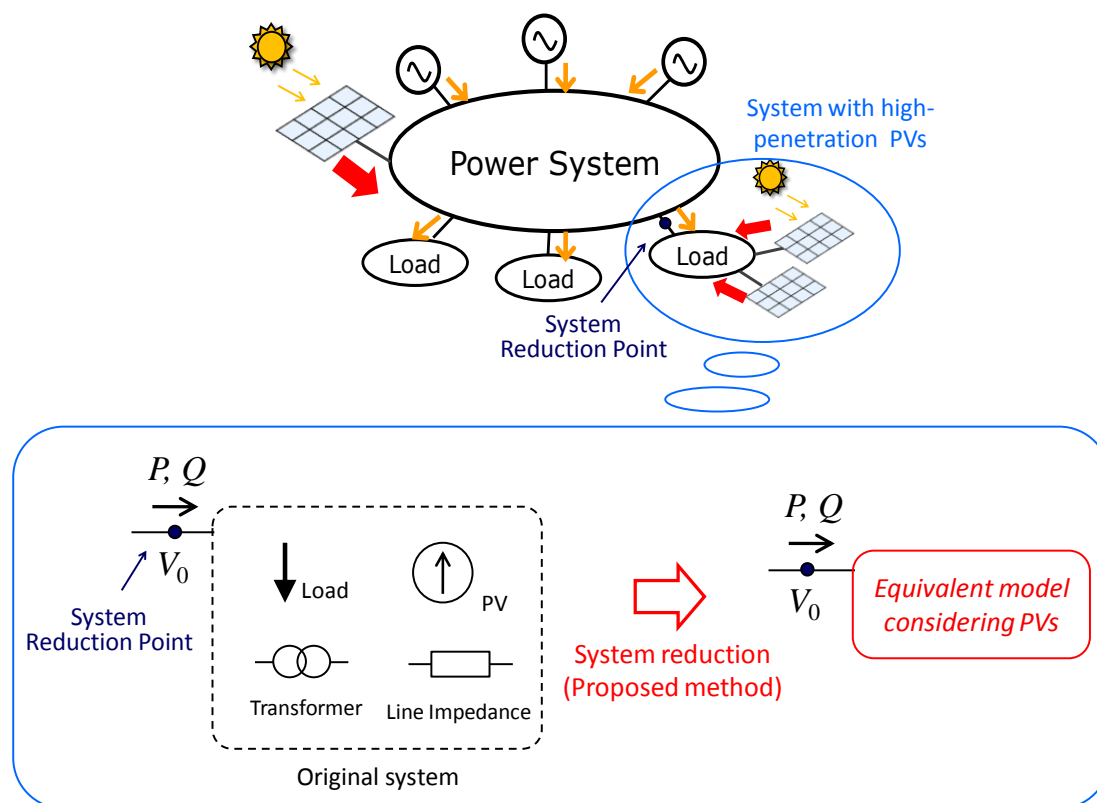


図 1.1 本論文で提案する縮約手法の概念図

Fig. 1.1 Concept of system reduction method proposed in this thesis

1.3 本論文で対象とする縮約範囲

本論文では、下位系統の中でも特に将来的に PV の導入量が高くなることが予想される住宅用配電系統を縮約対象として想定する。ただし、本縮約手法は縮約対象に動的な変化特性を持つ負荷が含まれていない場合、またはその影響が無視できる場合においては適用可能であるため、この限りにおいては住宅用配電系統以外の系統を縮約対象として置き換えて考えたとしても問題ない。

本論文では、縮約対象系統と上位系統の連系点を縮約点と称する。縮約に際しては、縮約点の電圧が変化した場合における縮約点の潮流量が、縮約の前後で高い精度で一致することを目的とする。なお、本論文では縮約点の電圧を V_0 と表記する。

1.4 本論文の構成

本論文は全7章で構成される。

第2章では、PVが将来的に大量導入された場合に懸念される電力系統の諸問題、及び本論文で提案するPVシステムについて述べる。

第3章では、PVの導入された系統の縮約手法として、4端子定数回路の縦続行列の概念を用いた手法を提案する。

第4章では、第3章で提案した縮約等価回路から、系統インピーダンスの要素を分離したZ分離縮約等価回路へと変形する。

第5章では、低圧系まで詳細に考慮した配電フィーダモデルを縮約対象とし、縮約前の系統に対して行った厳密な潮流計算結果との比較により、第4章まで提案した等価回路の等価性・有用性を検証する。

第6章では、第5章で述べた縮約モデルの差異が過渡安定度へ与える影響を、一機無限大母線系統を用いて評価する。

最後に、第7章が結論である。以上の本論文の構成を図1.2に示す。

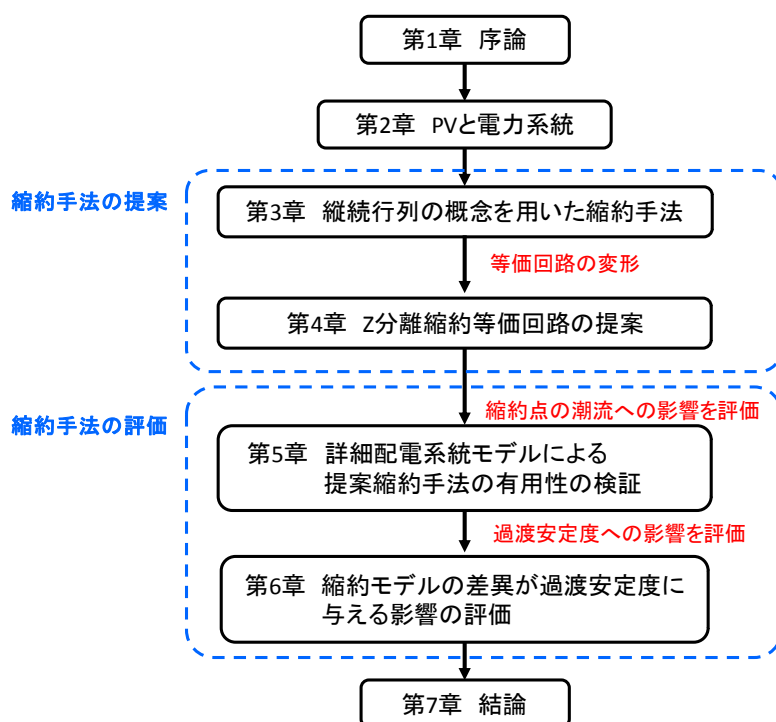


図 1.2 本論文の構成

Fig.1.2 Structure of this thesis

第2章 電力系統と PV

本章では、まず 2.1 節で大量導入された PV が電力系統に与える諸問題についてまとめる。次に、2.2 節では現状の PV システムの機能および構成について述べ、将来的に PV に付与される FRT 要件について説明する。最後に、2.3 節にて本論文で検討対象とする PV モデルについて述べる。

2.1 PV の大量導入に伴う課題

太陽光発電 (Photovoltaic generation: PV) は太陽の光エネルギーを電力に変換する発電システムである。PV はエネルギー源として太陽の光エネルギーを使用していること、また発電時に CO₂ や SO_x, NO_x などの有害物質を出さないクリーンな発電システムであることから、近年低炭素社会に向けた取り組みとして導入量が急速に伸びている。

特に、国内では国をあげて導入促進に向けた動きが強まっている。2008 年に発表された PV 導入量シナリオ^[1]では、2020 年に 14GW、2030 年に 53GW の導入量を見込んでおり、また 2009 年には、2020 年までの導入量を 28GW まで上方修正した。さらに、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により、原子力発電の新規増設が白紙になったため、PV をはじめとする再生可能エネルギー電源の導入への期待は今後益々高まっていくと考えられる。

一方で、電力系統工学の観点から考えたときには、PV の大量導入は懸念事項でもある。PV は発電出力が天候に大きく依存し出力制御が困難であり、またインバータ連系の電源であるなど、在来の大規模回転発電機とは異なる特徴を数多く持っている。このため、今後 PV の導入量が増加していった場合には、電力系統の運用に様々な影響を及ぼすことが危惧されている。

本節では、PV の大量導入に伴う問題のうち、代表的な以下の 5 項目について述べる。

- [1] 配電系統の電圧逸脱
- [2] 周波数変動問題
- [3] 余剰電力問題
- [4] 単独運転問題
- [5] 電力系統の過渡安定度を与える影響

[1] 配電系統電圧逸脱

国内では、PV の多くは住宅用として配電系統へ導入されることが予想されており、晴天時には需要家の消費電力を PV の発電出力が上回ることにより、配電線に逆潮流が生じ

る可能性がある。このような家庭が多数存在すると、配電系統の電圧上昇、ひいては電気事業法によって定められる電圧の適正範囲逸脱が起こることが懸念される。

現在では、電圧が適正範囲上限値に近付くと出力を抑制する機能が PV には付与されているが、この場合には発電機会の逸失が生じてしまうことになる。これを避けるため、電圧逸脱が生じる可能性の高い配電系統においては、柱状変圧器の分割設置、配電線の太線化、電圧制御装置である SVC(Static Var Compensator)の設置などの、配電系統の強化策が検討されている^[8]。

[2] 周波数変動問題

電力系統の周波数変動は、電力の消費量（需要）と発電量（供給）の不均衡によって生じる。需要家の負荷機器の多くは定格周波数付近で使用することを前提に設計されているため、周波数異常が継続すると、機器の異常動作などが発生する可能性がある。また、供給サイドにおいても、定格速度から大きく外れた状態での発電所の運転は困難となる。

PV や風力発電等の再生可能エネルギー電源は、発電出力が天候・気候に大きく依存し短時間に急激に出力が変動する可能性があるため、これらの電源の導入量が増加した場合には、電力系統における電力の需給調整能力が不足し、系統周波数が大きく変動する恐れがある。

系統周波数安定化の代表的な対策としては、電力を繰り返し充放電できる蓄電池の設置が挙げられる。だが、蓄電池は高コストであり設置容量を小さくすることが望まれることから、近年では新たな対策として、系統側から消費電力を制御することのできる「可制御負荷」を蓄電池の代替として利用した系統周波数制御も提案されている^[9]。

[3] 余剰電力問題

ゴールデンウィークや年末年始などの非常に負荷の軽い時期（特異日）や、中間季節期の休日などの軽負荷期には、原子力発電などのベース電力に、火力・水力発電の最低出力、負荷周波数制御のための運転予備力、再生可能エネルギーの発電電力を加えた電力の最低供給量が需要を上回り、系統内の発電電力が余ってしまうことが懸念されている。この問題を一般に余剰電力問題と言う。発電余剰をそのままとすると、周波数が上昇しすぎて発電所の安定な運転ができなくなる。

余剰電力問題の対策は、基本的には大容量の蓄電池などに余剰電力を貯蔵することであるが、余剰電力問題解決のために必要な蓄電池導入量は、周波数安定化のために必要な導入量よりもさらに大きく、莫大なコストがかかることが予想される。このため、揚水発電所の活用や、特異日に PV の出力を抑制する「カレンダー機能」を PV に付与することも、対策の一つとして検討されている。

[4] 単独運転問題

単独運転とは、系統事故が発生した際に、配電線遮断器が開放された後も、切り離された範囲内にある PV などの分散形電源が運転を継続し電力の供給を続けることである。切り離された系統内において負荷の消費電力と分散形電源の発電電力が均衡している場合に、単独運転状態が発生する可能性が高まる。単独運転状態では、主系統から切り離された後も配電線に電圧が生じるため、事故継続による被害の拡大や作業員の感電事故、復旧時の機器損傷などの恐れがある。このため、PV には単独運転状態を能動的または受動的に検出し、速やかに解列する機能を付与することが義務付けられている^[10]。

[5] 過渡安定度, FRT

PV はインバータ連系の電源であるため、回転発電機とは異なり慣性を持たない。このため、PV が電力系統に大量に導入された場合には、事故時の安定性である電力系統の過渡安定度に影響を与えることが予想される^{[2]-[6]}。

また、系統事故の発生時には、瞬時電圧低下(瞬低)により PCS (Power Conditioner System) の保護装置等が動作し、PV は運転を停止することがある。将来的に PV が大量導入された場合、系統事故時に大量の PV が一斉に解列してしまうと、系統電圧や周波数の安定性にさらに悪影響を及ぼす恐れがある。事故時の一斉解列を防ぐため、PV には系統の信頼度維持・向上を目的に、系統事故等による擾乱発生時においても運転を継続する性能を持つことが要求されている。この性能(能力)を FRT(Fault Ride Through (Capability))という。瞬低に対する FRT の概念図を図 2.1 に示す。

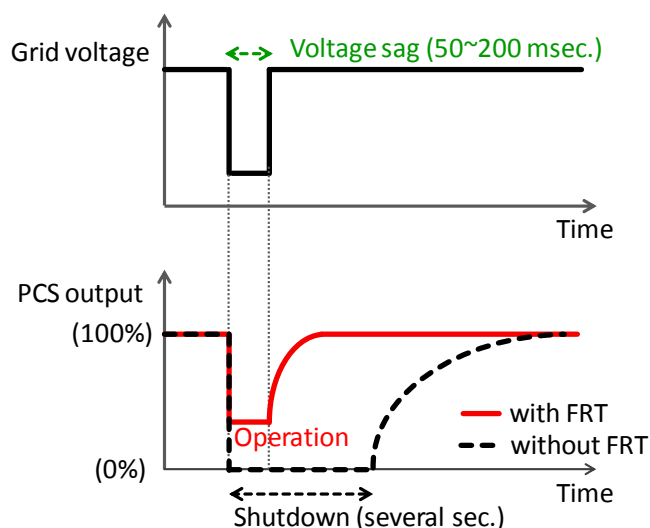


図 2.1 瞬低に対する FRT

Fig. 2.1 Fault-ride-through for voltage sag

2.2 PCS の機能

2.2.1 PCS の構成

PV は直流で発電を行うため、直流から交流への電力の変換を行う PCS を介して電力系統に連系している。PCS は電力変換の他にも、発電出力の安定化、最大発電出力点への追従、単独運転検出等の役割を担い、PV システムの出力制御を行っている。

なお、一般には PV アレイと PCS を合わせて PV システムと称するが、本論文では特に混同する恐れがない限り、PV システムを単に PV と表記する。PV システムの構成図を図 2.2 に示す。

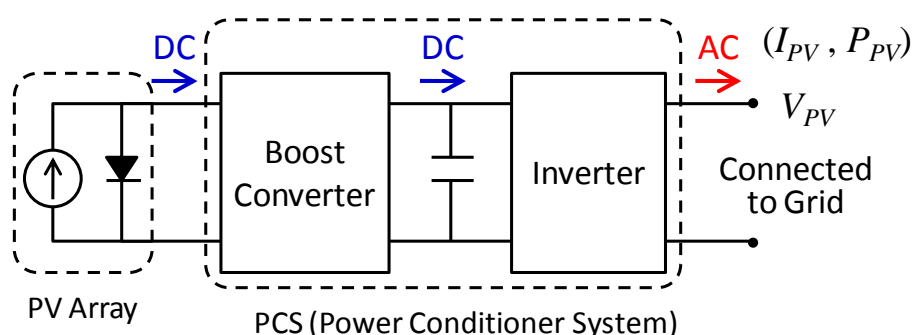


図 2.2 PV システムの構成図

Fig. 2.2 Construction of PV system

2.2.2 将来的に普及する PV の FRT 性能

将来的に普及する PV の FRT 性能については、NEDO プロジェクト^[11]により規定が為されている。瞬低発生時の FRT 要件を表 2.1 に、瞬低回復時の FRT 要件を表 2.2 にそれぞれ示す。表 2.1 と表 2.2 によれば、将来的に導入される PV には、瞬低中にも極力運転を継続することが求められている。また、残存電圧が 30% または 20% を下回るような電圧降下割合の大きな瞬低に対しても、機械的な連系解除はせずに PCS 内で一時的なゲートブロックをすることでやり過ごし、電圧が回復したときには速やかに連系運転を再開することが要求されている。

ただし、現状では残存電圧 70% 以下の瞬低に対しても運転停止する PV も存在し、残存電圧 40% 以下の瞬低に対してはほとんどの PCS が運転停止することが、実験結果により報告されている^[12]。

表 2.1 瞬低発生時の FRT 要件^[1]

Table 2.1. FRT requirement for PV during voltage sag

	PV が停止する 残存電圧 (LVRT レベル ^{※1})	PV が停止する 瞬低継続時間	瞬低発生時の PCS の挙動	
			残存電圧 \geq LVRT レベル	残存電圧 $<$ LVRT レベル
現状	70%~30%	0.3~1 秒	系統から解列	
現状からの 改良 (~2012)	30%以下	1 秒以上 ^{※2}	運転継続 (ゲートブロックしない ^{※3})	運転継続または ゲートブロック ^{※4}
新規開発 (~2016)	20%以下	1 秒以上 ^{※2}	運転継続 (ゲートブロックしない ^{※3})	運転継続または ゲートブロック ^{※4}

※1: Low Voltage Ride Through (FRT のうち、瞬時電圧低下に限定された場合は LVRT と称する。)

※2: 継続時間 1 秒以上の場合の PCS の動作としては、UVR (Under Voltage Relay: 不足電圧継電器) により解列する。

※3: 単相系統に接続する機器で位相投入角が 0° の条件で行われる瞬時電圧低下を除き、電圧低下の発生した瞬間から 2 サイクル以内に復帰するゲートブロックは許容する。ただし、ゲートブロックからの復帰後は、電圧低下中において再度のゲートブロックを行わないものとする。(ゲートブロックが動作しないよう運転を継続する機器の開発を 2016 年度までの目標とする。)

※4: 位相検出による運転停止

表 2.2 瞬低回復後の FRT 要件^[1]

Table 2.2 FRT requirement for PV after voltage sag

	瞬低回復後の PV の挙動	
	残存電圧 \geq LVRT レベル	残存電圧 $<$ LVRT レベル
現状	PCS100%出力復帰 まで 10~30 秒	PCS100%復帰まで 10~30 秒
現状からの改良 (~2012)	PCS80%出力復帰 まで 0.5 秒	PCS80%出力復帰 まで 1 秒
新規開発(~2016)	PCS80%出力復帰 まで 0.1 秒	PCS80%出力復帰 まで 1 秒 (0.2 秒目標)

2.3 本論文で検討対象とする PV システム

PV の導入された下位系統の特性は、個々の PV の出力特性に大きく依存するため、どのような PV を検討対象とするかは重要な問題である。本論文では、連系点電圧の変化に対して図 2.3 のような出力電流特性を持つ PV を検討対象とする。検討対象とする PV の特徴を下記に述べる。

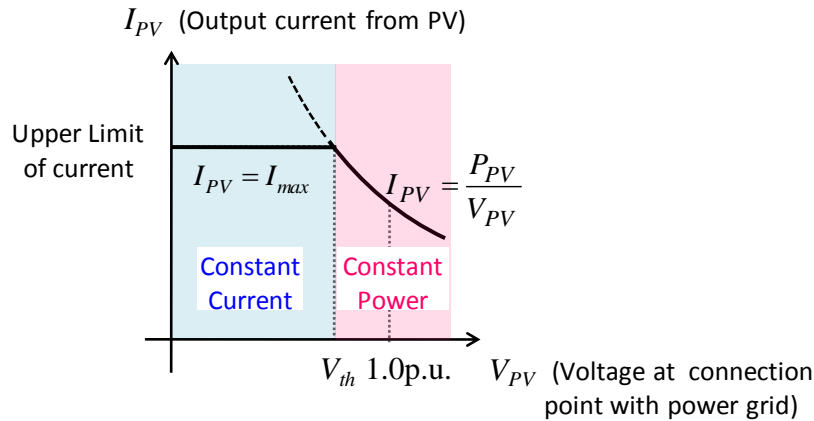


図 2.3 本論文で検討対象とする PV の出力電流特性

Fig. 2.3 Output current characteristics of PVs supposed in this thesis

- ・ 連系点電圧 V_{PV} が閾値電圧 V_{th} 以上では、定電力制御（力率 1）を行う。
- ・ 連系点電圧 V_{PV} が閾値電圧 V_t を下回った場合には、定電流制御（力率 1）を行う。

PV の PCS では、一般的に日射量の変化に応じて動作点を変化させる最大出力動作点追従制御が行われている。だが、後述のように過渡安定度の時間領域について論じる際には日射量の変化は無視することができるため、個々の PV は PCS からの指令値 P_{PV} を出力する定電力源とみなせる。

一方で、系統事故などにより系統連系点電圧が低下した場合には、電圧低下中も運転継続する PV は、PCS の過電流防止のために定電流制御に切り替わることが知られている^[12]。そこで、本論文で検討対象とする PV も、連系点電圧 V_{PV} が閾値電圧 V_{th} よりも低下した場合には、力率 1 の定電流源として動作することとする。その他、本論文で検討対象とする PV システムにおける仮定を以下に述べる。

仮定(1) 日射量・気温の変化は考慮しない。

日射量の変化の変動周期は一般的には 10 秒から数十秒周期である。これに対し、本論文では、電力系統の過渡安定度、特に事故後の第一波の擾乱に対する電力系統の安定性を考慮の対象としているため、解析対象となる時間領域は長くても 3 秒程度であり、日射変動の時間周期よりも短い。これより本論文では PV の日射量は一定であるとし、日射量変化による PV の出力変化は考慮しない。また、気温の変化に基づく出力変化についても考慮しない。

仮定(2) PV の脱落は考慮しない。

表 2.1 に示したように、将来的に導入される PV は残存電圧 0.2~0.3pu 程度、1 秒間の瞬時電圧降下に対しても脱落しないことが要求されている。これに対し、基幹系統における事故の事故継続時間は一般に 70msec 程度であり、また事故除去後は残存電圧 0.2~0.3pu 程

度までの電圧低下は起きないと考えられる。これより本論文では、系統事故による PV の脱落は考慮しないこととする。

仮定(3) PCS の動特性は考慮しない。

簡単のため、系統連系点電圧の変化に対する PCS の動的な変化特性（制御遅延等）は考慮せず、連系点電圧と PV の発電出力の関係は、図 2.3 に示す特性に従って 1 対 1 対応で決まるものとする。

本論文では、PV の制御切替の閾値電圧 V_{th} は実験結果^[12]を参考に 0.8p.u.と定める。PV の定格出力は 4.0kW とし、定電力制御時の出力を 3.2kW、定電流制御時の出力電流を 20A とする。検討対象とする PV の諸元を表 2.3 にまとめる。

表 2.3 検討対象とする PV の諸元

Table 2.3 Parameters of PV examined in this paper

連系点電圧(V_{PV})	動作	出力
0.8p.u.以上	定電力制御 (力率 1)	3.2kW
0.8pu 以下	定電流制御 (力率 1)	20A*

*PV は 200V 受電（単相三線受電方式の考慮については付録 A 参照）

第3章 縦続行列の概念を用いた縮約手法

本章では、本論文の基本となる縮約手法について述べる。本縮約手法では、需要家負荷が縦続に連系した電力系統の構成を利用し、4端子定数回路の縦続行列を用いて縮約を行う。縮約は下位系統から順に行い、縮約手法の積み上げによって縮約対象系統全体を一つの等価回路に縮約する。本縮約手法は、PVが定電流源として動作し、負荷特性が定インピーダンス特性として表わされる場合に対して適用可能であり、縮約後の等価回路は等価電流源と等価アドミタンスの2つの構成要素によって表わされる。本縮約手法により、縮約点電圧が変化した場合に縮約対象系統に流れる電流を数式的に記述することが可能となる。

なお、本論文では簡単のため三相不平衡は考慮せず、モデル系統は三相を一括した三相平衡系統として扱う。低圧系統に見られる単相三線式受電方式の考慮については、付録Aを参照されたい。

3.1 需要家が縦続に連系した系統の縮約手法

まず、図3.1のように n 軒の需要家が縦続に連系した低圧配電線モデルを縮約対象とする。本モデルは需要家負荷、住宅用PV、低圧配電線インピーダンスの3つの構成要素から成る。需要家負荷は定インピーダンス特性とし、PVは定電流源制御時を考える。PVは需要家負荷に並列に連系しているものとする。また、上位系統側から数えて i 番目のノードをノード i とし、ノード i に連系する需要家を需要家 i と称する。そのほか、図3.1中の各変数の説明を以下に述べる。

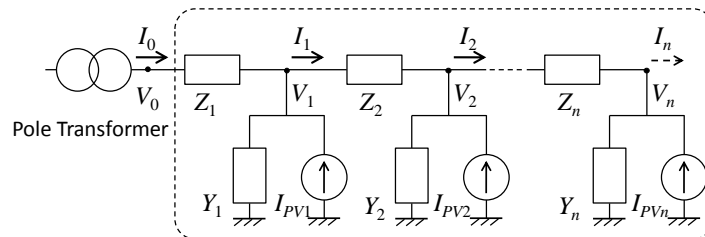


図 3.1 需要家が縦続に連系した低圧配電線モデル

Fig. 3.1 Low voltage distribution line model with customers in cascade arrangement

- V_i : ノード i における電圧
- I_i : ノード i からノード $(i+1)$ に流れる電流 (ただし, $I_n=0$)
- Y_i : 需要家 i の負荷アドミタンス
- I_{PVi} : 需要家 i に導入されたPVの出力電流 (PVが導入されていない場合は $I_{PVi}=0$)

- Z_i : ノード $(i-1)$ とノード i の間の配電線インピーダンス
 なお, $V_i, I_i, Y_i, I_{PV_i}, Z_i$ はいずれも複素フェーザである。

電圧 V_i , 電流 I_i ($i=1,2,\dots,n$) には式(3.1), (3.2)に示す関係式が成り立つ。

$$V_{i-1} = Z_i I_{i-1} + V_i \quad (3.1)$$

$$I_{i-1} + I_{PV_i} - I_i - Y_i V_i = 0 \quad (3.2)$$

式(3.1), (3.2)を整理すると, 式(3.3)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} V_{i-1} \\ I_{i-1} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} + \mathbf{b}_i I_{PV_i} \quad (3.3)$$

$$\text{ただし, } A_i = \begin{bmatrix} 1 + Z_i Y_i & Z_i \\ Y_i & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_i = - \begin{bmatrix} Z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

式(3.3)を $i=1,2,\dots,n$ に対して繰り返し用いると,

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} + \mathbf{b}_1 I_{PV1} \quad (3.4)$$

$$= A_1 \left(A_2 \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} + \mathbf{b}_2 I_{PV2} \right) + \mathbf{b}_1 I_{PV1} \quad (3.5)$$

$$= A_1 A_2 \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} + A_1 \mathbf{b}_2 I_{PV2} + \mathbf{b}_1 I_{PV1} \quad (3.6)$$

= ...

$$= \left(\prod_{k=1}^n A_k \right) \begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} + \left(\prod_{k=1}^{n-1} A_k \right) \mathbf{b}_n I_{PVn} + \dots + A_1 A_2 \mathbf{b}_3 I_{PV3} + A_1 \mathbf{b}_2 I_{PV2} + \mathbf{b}_1 I_{PV1} \quad (3.7)$$

$$= C_n \begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} + \mathbf{d}_n \quad (3.8)$$

$$\text{ただし, } C_n = \prod_{k=1}^n A_k \quad (=A_1 A_2 A_3 \dots A_n)$$

$$\mathbf{d}_n = \left(\prod_{k=1}^{n-1} A_k \right) \mathbf{b}_n I_{PVn} + \dots + A_1 A_2 \mathbf{b}_3 I_{PV3} + A_1 \mathbf{b}_2 I_{PV2} + \mathbf{b}_1 I_{PV1}$$

式(3.8)において $C_n = \begin{bmatrix} c_n^{(1,1)} & c_n^{(1,2)} \\ c_n^{(2,1)} & c_n^{(2,2)} \end{bmatrix}, \mathbf{d}_n = \begin{bmatrix} d_n^{(1)} \\ d_n^{(2)} \end{bmatrix}$ と表わし, 末端条件 $I_n=0$ を代入すると,

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_n^{(1,1)} & c_n^{(1,2)} \\ c_n^{(2,1)} & c_n^{(2,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_n^{(1)} \\ d_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

さらに式(3.9)から V_n を消去して整理すると、 V_0 と I_0 との関係式を式(3.10)に示す形で表わすことができる。

$$I_0 = V_0 Y_{eq} - I_{eq} \quad (3.10)$$

ただし、 Y_{eq} 、 I_{eq} はそれぞれ式(3.11)および(3.12)で与えられる。

$$Y_{eq} = \frac{c_n^{(2,1)}}{c_n^{(1,1)}} \quad (3.11)$$

$$I_{eq} = \frac{c_n^{(2,1)}}{c_n^{(1,1)}} d_n^{(1)} - d_n^{(2)} (= Y_{eq} d_n^{(1)} - d_n^{(2)}) \quad (3.12)$$

式(3.10)より、図 3.1 に示した低圧配電線モデルは、図 3.2 に示した回路と等価である。すなわち、図 3.1 に示した低圧配電線モデルは図 3.2 に示した等価回路に縮約可能である。本論文では、図 3.2 に示す一つの等価アドミタンスと一つの等価電流源から成る等価回路を、YI 等価回路と称する。

なお、本節で述べた縮約手法は、低圧配電線のみならず、線路に負荷および PV が縦続に連系した一般の系統に対しても適用することが可能である。

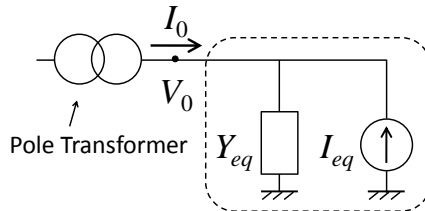


図 3.2 YI 等価回路

Fig. 3.2 YI equivalent circuit

3.2 縮約手法の拡張

3.1 節では、需要家が縦続に連系した単純な構成の系統に対して縮約手法を適用した。本節では、前節の縮約手法を拡張し、分岐が存在する場合、主幹線から負荷までの間のインピーダンスを考慮した場合を考える。

3.2.1 分岐が存在する場合

分岐が存在する場合の縮約手法について述べる。まず、図 3.3 に示すように、縮約点から m 本の配電線が分岐している系統の縮約を考える。以下では、分岐している並列の配電線を上から順に、分岐線 1、分岐線 2、 \dots 、分岐線 m と称する。

各分岐線 k ($k=1,2,\dots,m$)は, 3.1 節に述べた縮約手法により一つの等価アドミタンス $Y_{eq_line(k)}$ と一つの等価電流源 $I_{eq_line(k)}$ から成る YI 等価回路に縮約することができる。分岐線縮約後の等価回路を図 3.4 に示す。

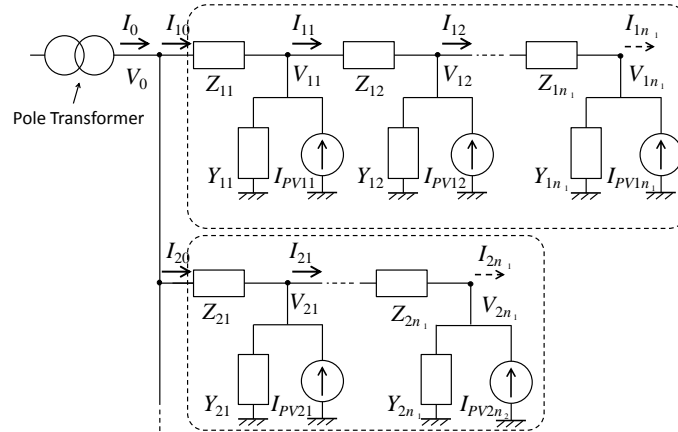


図 3.3 縮約点から分岐した低圧配電システムモデル

Fig. 3.3 Low voltage distribution system model with branch lines on system reduction point

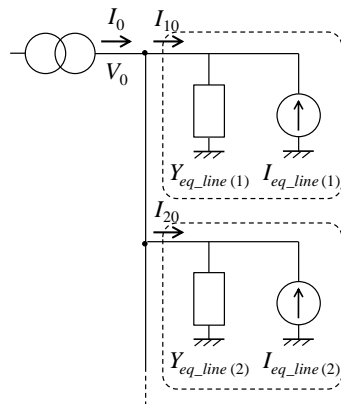


図 3.4 分岐線の縮約

Fig. 3.4 Reduction of branch lines

ここで, 各分岐線の等価回路は並列に繋がっているので,

$$Y_{eq} = \sum_{k=1}^m Y_{eq_line(k)} \quad (3.13)$$

$$I_{eq} = \sum_{k=1}^m I_{eq_line(k)} \quad (3.14)$$

として Y_{eq} , I_{eq} を定義すれば, 分岐線 1 から分岐線 m までを含む縮約対象システムを, YI 等価回路の形によって縮約できる。

より一般に線路の途中に分岐が存在する場合においても、同様にまず分岐点以下の系統を縮約することで、対象系統を等価的に1本の配電線モデルとして表わすことができる。

3.2.2 主幹線から負荷までの間のインピーダンスを考慮した場合

主幹線から負荷までの間のインピーダンスを考慮した場合の縮約手法について述べる。例として、低圧配電線から需要家*i*までの引込線インピーダンス Z_{SWi} を考慮した場合の縮約手法について考える。このとき低圧配電システムモデルは図3.5のように表わされる。

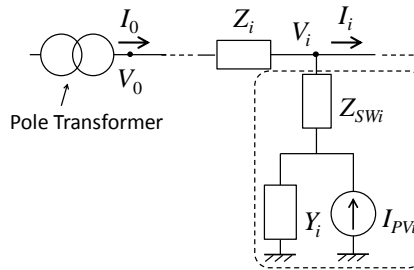


図 3.5 引込線インピーダンスを考慮した低圧配電システムモデル

Fig. 3.5 Low voltage distribution system model considering impedance of service wires

図 3.5 に示すモデルの電圧 V_i 、電流 I_i ($i=1,2,\dots,n$) に関しては、式(3.15)、(3.16)が成り立つ。なお、式(3.15)は式(3.1)に等しい。

$$V_{i-1} = Z_i I_{i-1} + V_i \quad (3.15)$$

$$I_{i-1} + I_{PVi} - I_i - Y_i \{V_i - Z_{SWi}(I_{i-1} - I_i)\} = 0 \quad (3.16)$$

式(3.15)、(3.16)を整理すると、式(3.17)が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} V_{i-1} \\ I_{i-1} \end{bmatrix} = A_{SWi} \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{SWi} I_{PVi} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3.17)$$

$$\text{ただし、} A_{SWi} = \begin{bmatrix} 1 + t_i Z_i Y_i & Z_i \\ t_i Y_i & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_{SWi} = -t_i \begin{bmatrix} Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad t_i = \frac{1}{1 + Y_i Z_{SWi}}$$

式(3.15)は、式(3.3)における Y_i を $t_i Y_i$ で、 I_{PVi} を $t_i I_{PVi}$ でそれぞれ置き換えた式である。したがって、 Y_i 、 I_{PVi} にそれぞれ定数 $t_i = \frac{1}{1 + Y_i Z_{SWi}}$ を掛けることで引込線インピーダンスを含めた等価回路を得ることができる。引込線インピーダンスの縮約の概念図を図3.6に示す。

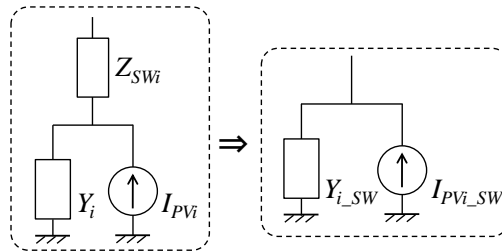


図 3.6 引込線インピーダンスの縮約

Fig. 3.6 Reduction of service wire impedance

引込線インピーダンスの考慮による等価回路のパラメータへの影響について簡単に考察する。一般に Z_{swi} の虚部は正なので、需要家負荷が遅れ力率の場合には $|t_i| < 1$ となる。このため、 t_i を掛けた後の Y_i および I_{PVi} の大きさは、それぞれ t_i を掛ける前の大きさよりも小さくなる。このことは、引込線インピーダンスが存在する場合、需要家負荷のアドミタンスおよび PV の出力電流が等価的に小さく見えることを意味する。

なお、本項の議論はより一般に、主幹線と需要家 i の間にインピーダンス Z_{swi} が存在する場合の縮約手法としても解釈することができる。

3.2.1 項、3.2.2 項で述べた縮約手法を組み合わせることで、PV が定電流源として動作し、負荷が定インピーダンス特性を持つ場合であれば、ループ系統を除くあらゆる構成の低圧系統を YI 等価回路の形に縮約することが可能となる。

3.3 縮約手法の積み上げ

本節では、下位系統からの縮約手法の積み上げについて述べる。本縮約手法によって得られる YI 等価回路は電流源とアドミタンスの並列回路であり、PV の導入された需要家負荷モデルと等しい構成をしている。このため、例えば高圧配電系統を縮約する場合には、まず各柱上変圧器以下の低圧系統を縮約することで、縮約後の各 YI 等価回路をあたかも高圧系統に連系する一つの負荷モデルとしてみなすことができる。これにより、低圧系統まで考慮した高圧配電系統モデルを単純化することができ、次には高圧配電系統全体に本縮約手法を適用することが可能となる。このように、下位系統から順に縮約手法を適用していくことを、本論文では「縮約手法の積み上げ」と称する。

縮約手法の積み上げを行うことで、定インピーダンス特性の負荷と、電流源として表わされる分散形電源から成る系統であれば、高圧系統やより上位の系統についても YI 等価回路に縮約することが可能となる。縮約手法の積み上げの概念図を図 3.7 に示す。

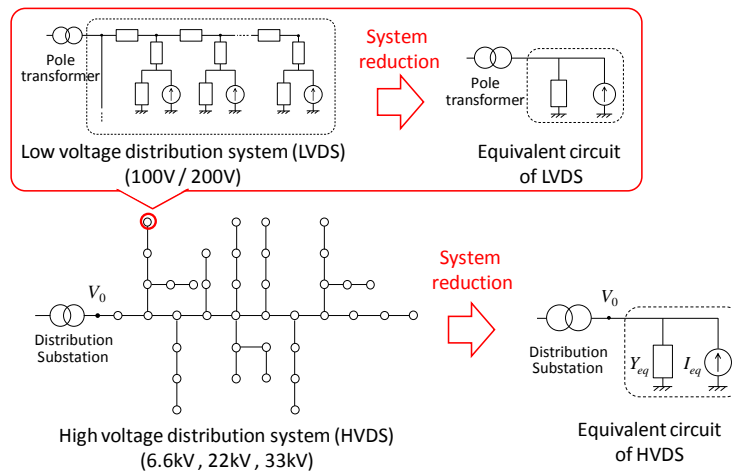


図 3.7 縮約手法の積み上げ

Fig. 3.7 System reduction for higher voltage system

3.4 等価回路のパラメータに関する考察

本節では、前節までに提案した YI 等価回路のパラメータに関する考察を述べる。なお、本節では議論の簡単化のため、3.1 節で扱った需要家負荷が縦続に連系したシステムを検討対象とするが、本節で述べる考察は、縮約対象システムが定インピーダンス負荷と電流源から成る場合一般に成り立つものである。

3.4.1 パラメータ算出式から得られる考察

式(3.11)および式(3.12)で与えられる等価回路のパラメータについて考察する。

等価電流源 I_{eq} について

① I_{eq} は各 PV の出力電流 I_{PVi} の線形和として表わされる。

…式(3.8)下の d_n の定義式より、 d_n の各成分は各 PV の出力電流 I_{PVi} の線形和で表わされる。

また、式(3.12)によれば、等価電流源 I_{eq} はベクトル d_n の成分の線形和で表わされる。したがって、等価電流源 I_{eq} は各 PV の出力電流 I_{PVi} の線形和として表わされる。このため、縮約対象システム内に PV が導入されていない場合、すなわち全てのノードで $I_{PVi}=0$ となるときには $I_{eq}=0$ となり、縮約後の等価回路は等価アドミタンス Y_{eq} のみによって表わされる。

② 各 PV の出力電流の大きさ $|I_{PVi}|$ と等価電流源 I_{eq} は比例しない。

…PV の力率は 1 に固定されているため、各 I_{PVi} の位相は連系点電圧の位相につねに追従し、かつその連系点電圧の位相は縮約対象システム内の潮流状態に依存する。このため、全ての PV の出力電流の大きさ $|I_{PVi}|$ が r 倍になったとしても、各 I_{PVi} の位相が変化するために、等価電流源 I_{eq} は r 倍にはならない。

- ③縮約点電圧 V_0 が変化すると、等価電流源 I_{eq} も変化する。
- …縮約点電圧 V_0 が変化すると、潮流状態が変わり各 PV の連系点電圧の位相が変化する。PV が力率 1 制御を行っているときは、これに応じて個々の PV の出力電流 I_{PVi} の位相も変化するため、 I_{eq} の値も変化するようになる。逆に言えば、PV が力率 1 制御を行う場合には、 V_0 が与えられたとしても、個々の PV の連系点電圧の位相を得られない限り、YI 等価回路のパラメータを決定できない。

等価電流源 Y_{eq} について

- ④PV の出力電流 I_{PVi} は等価アドミタンス Y_{eq} に影響を与えない。
- …等価アドミタンス Y_{eq} を表わす式(3.11)は、行列 C_n の成分のみによって表わされている。次に式(3.8)下の行列 C_n の定義式を見ると、式に PV の出力電流 I_{PVi} は含まれていないことがわかる。これより、変数 I_{PVi} は等価アドミタンス Y_{eq} には影響を及ぼさない。言い換えれば、縮約対象系統内に導入された個々の PV の発電量やその導入分布は、等価回路内の等価電流源にのみ影響を与え、等価アドミタンスには影響しない。各変数が等価回路のパラメータに与える影響の概念図を図 3.8 に示す。

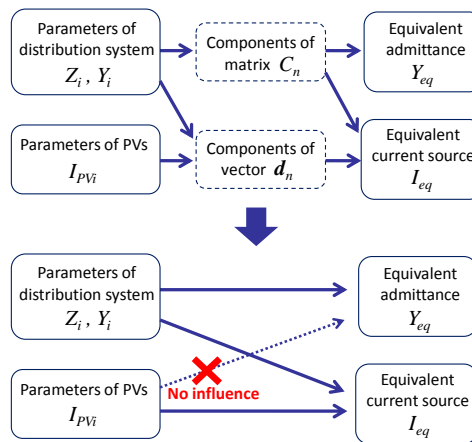


図 3.8 各変数が等価回路のパラメータに与える影響

Fig. 3.8 Influence of variations on parameters of equivalent circuit

- ⑤等価アドミタンス Y_{eq} へ流れる電流は PV が導入されていない場合での縮約対象系統に流れる電流を示している。
- …①で述べたように PV が導入されていない場合には等価回路は等価アドミタンスのみによって表わされる。これと④とにより、YI 等価回路のうち等価アドミタンス Y_{eq} へ流れる電流は、PV が導入されていない場合に縮約対象系統に流れる電流を示していることがわかる。

3.4.2 簡略配電フィーダモデルを用いた検討

配電系統の主幹線のみを模擬した簡略配電フィーダモデルに本縮約手法を適用し，得られる等価回路のパラメータについて考察する。

解析に用いるモデルを図 3.9 に示す。本モデルは 6.6kV 高圧配電系統の主幹線フィーダを簡略模擬したモデルであり，ノード $i(i=1,2,\dots,n)$ 以下に連系する負荷をアドミタンス Y_i ，PV を電流源 I_{PV_i} でそれぞれ表わしている。主幹線からの分岐点以下の系統インピーダンスは考慮していない。ノード数 n のオーダーとしては 50 程度，フィーダへの連系需要家数は 2000 軒程度を想定する。

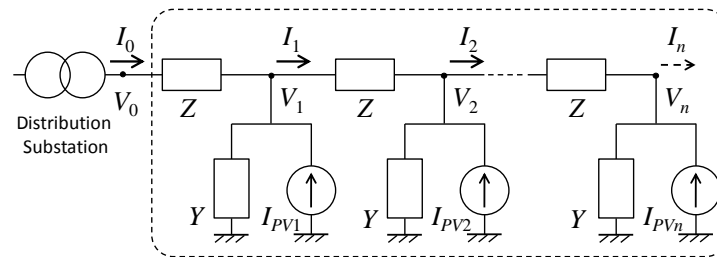


図 3.9 簡略配電フィーダモデル

Fig. 3.9 Simplified model of distribution feeder

本節では，考察を行うに当たり，下記に示す 3 つの仮定を置く。

- ・ 仮定(1) 各ノードの負荷および各ノード間の配電線インピーダンスはそれぞれ等しい。
($Z_i=Z, Y_i=Y, \forall i \in \{1,2,\dots,n\}$)
- ・ 仮定(2) $(nZ)(nY)$ の 2 乗は 1 より十分に小さい。 $(1+(n^2ZY)^2 \approx 1)$
- ・ 仮定(3) ノード数 n は 1 より十分に大きい。 $(n \gg 1)$

(仮定(2)に関する補足)

nY はフィーダに連系する全需要家の負荷アドミタンスの総和を表わしている。例として，需要家総数を 2000 軒，需要家 1 軒の負荷を $1\text{kW}+0.3\text{kVar}$ (100V 受電の場合，負荷アドミタンスは $0.1-j0.03$)とすれば， nY は式(3.18)のように求まる。

$$nY = 2000[\text{軒}] \times (0.1-j0.03)[\text{S}] \div (6.6[\text{kV}]/100[\text{V}])^2 \approx 0.05-j0.02[\text{S}] \quad (3.18)$$

一方， nZ は主幹線の互長インピーダンスを表わしており，文献^[13]によれば互長 4km の住宅用配電系統においては $1+j2[\Omega]$ 程度である。以上より，上記の計算例では， $(nZ)(nY) \approx 0.1+j0.1$ 程度となり， $\{(nZ)(nY)\}^2$ は実部虚部ともに 1 よりも十分小さいと言える。

簡略配電フィーダモデルに本章で提案する縮約手法を適用する。近似(1)を適用すると，回路方程式より式(3.19)が得られる。

$$\begin{bmatrix} V_{i-1} \\ I_{i-1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} + \mathbf{b} I_{PV_i} \quad (3.19)$$

$$\text{ただし, } A = \begin{bmatrix} 1+ZY & Z \\ Y & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = - \begin{bmatrix} Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

式(3.19)は式(3.3)における A_i を A で, \mathbf{b}_i を \mathbf{b} でそれぞれ置き換えた式に等しい。したがって, モデル系統を図 3.9 に示す等価回路に縮約したときの YI 等価回路のパラメータはそれぞれ式(3.20)および(3.21)で与えられる。

$$Y_{eq} = \frac{c_n^{(2,1)}}{c_n^{(1,1)}} \quad (3.20)$$

$$I_{eq} = \frac{c_n^{(2,1)}}{c_n^{(1,1)}} d_n^{(1)} - d_n^{(2)} (= Y_{eq} d_n^{(1)} - d_n^{(2)}) \quad (3.21)$$

$$\text{ただし, } C_n = A^n, \quad \mathbf{d}_n = \sum_{k=1}^n A^{k-1} \mathbf{b}_k I_{PV_k}$$

ここで, 仮定(2)による近似 $(n^2ZY)^2 \ll 0$ を用いると, 行列 A の n 乗 A^n および $A^{k-1} \mathbf{b}_k$ は以下のように求まる。

$$A^n \approx \begin{bmatrix} 1 + \frac{n(n+1)}{2} ZY & nZ \left(1 + \frac{(n-1)(n+1)}{6} ZY \right) \\ nY \left(1 + \frac{(n-1)(n+1)}{6} ZY \right) & 1 + \frac{(n-1)n}{2} ZY \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1 + \frac{n^2}{2} ZY & nZ \left(1 + \frac{n^2}{6} ZY \right) \\ nY \left(1 + \frac{n^2}{6} ZY \right) & 1 + \frac{n^2}{2} ZY \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$A^{k-1} \mathbf{b}_k \approx \begin{bmatrix} kZ \left(1 + \frac{(k-1)(k+1)}{6} ZY \right) \\ 1 + \frac{(k-1)k}{2} ZY \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\approx \begin{bmatrix} kZ \left(1 + \frac{k^2}{6} ZY \right) \\ 1 + \frac{k^2}{2} ZY \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ただし, 式変形に際しては, 仮定(3)による近似 $n(n-1) \approx n^2$ および $k(k-1) \approx k^2$ を用いた。

式(3.23)および(3.25)を, 式(3.20), 式(3.21)に代入することで, 本モデルを縮約した YI 等価回路のパラメータ Y_{eq} および I_{eq} を得る。

$$Y_{eq} \approx \frac{nY(1 + \frac{n^2}{6}ZY)}{1 + \frac{n^2}{2}ZY} \quad (3.26)$$

$$\approx \frac{nY}{1 + \frac{n^2}{3}ZY} \quad (3.27)$$

$$I_{eq} \approx \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{1 + \frac{(n-k)^2}{2}ZY}{1 + \frac{n^2}{2}ZY} I_{PVk} \right\} \quad (3.28)$$

ただし、式(3.26)から式(3.27)の変形に際しては、分子分母に $1 - \frac{n^2}{6}ZY$ を乗じ、仮定(2)による近似 $1 + (n^2ZY)^2 \approx 1$ を用いた。

式(3.27)および式(3.28)から以下の事柄が明らかになる。

- ①負荷が遅れ力率の場合、等価アドミタンスの大きさ $|Y_{eq}|$ は、負荷アドミタンスの総和の大きさ $|nY|$ よりも小さくなる。
 …少なくとも負荷が遅れ力率の場合には ZY の実部は正になるため。 $(Z$ の虚部は正を仮定。)
 負荷が進み力率であっても、 ZY の実部が正であれば①は成り立つ。

- ②等価電流源の大きさ $|I_{eq}|$ は、PV 出力電流の総和 $\sum |I_{PV}|$ よりも大きくなる。特に、PV が配電フィーダ末端寄りに導入されるほど、 $|I_{eq}|$ は小さくなる。(負荷が遅れ力率の場合)
 …①と同様の理由による。PV が配電フィーダ始端($k=0$)にのみ導入された場合、 I_{eq} の値は出力電流の値と一致する。

例として、下記の5通りのPV 導入分布に対して、式(3.28)を用いて等価電流源のパラメータを求めた結果を表 3.1 に示す。ただし、各 PV の連系点電圧の位相差は無視し、任意の k に対し、 $I_{PVk} = |I_{PVk}|$ とした。表 3.1 より、PV が配電フィーダ始端寄りに連系しているほど、等価電流源の大きさが大きいこと、ならびに PV が配電用変電所近傍ノードのみに連系している場合には等価電流源の大きさが PV の出力電流の和に等しくなることがわかる。

表 3.1 PV 導入分布による等価電流源のパラメータの変化

Table 3.1 Parameter of equivalent current source for each installation area of PVs

PV 導入分布	説明	I_{PVk} の値	等価電流源の近似値 (式(3.28)から算出)
始端導入	配電用変電所近傍ノード のみに導入	$ I_{PV1} =n I_{PV} ,$ $I_{PVk}=0 (\forall k \neq 1)$	$ nI_{PV} $
前方導入	配電用変電所から順に, 亘長の半 分までのノードに均等に導入	$ I_{PVk} =2 I_{PV} (k \leq n/2),$ $I_{PVk}=0 (n/2 < k)$	$\frac{n I_{PV} }{1 + \frac{5}{24}(nZ)(nY)}$
均等分布	各ノードに均等に導入	$ I_{PVk} = I_{PV} $ ($\forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$)	$\frac{n I_{PV} }{1 + \frac{1}{3}(nZ)(nY)}$
後方導入	末端ノードから順に, 亘長の半分 までのノードに均等に導入	$I_{PVk}=0 (k \leq n/2),$ $ I_{PVk} =2 I_{PV} (n/2 < k)$	$\frac{n I_{PV} }{1 + \frac{11}{24}(nZ)(nY)}$
末端導入	末端ノードのみに導入	$ I_{PVn} =n I_{PV} ,$ $I_{PVk}=0 (\forall k \neq n)$	$\frac{n I_{PV} }{1 + \frac{1}{2}(nZ)(nY)}$

3.5 本章のまとめ

本章では, PV の導入された電力系統の縮約手法として, 4 端子定数回路の縦続行列の概念を用いた縮約手法を提案した。本縮約手法は, 需要家負荷が縦続に連系した電力系統の特性を利用している。本縮約手法を用いることで, PV が電流源として動作し負荷特性が定インピーダンス特性である場合には, ループ系統を除くあらゆる形状の下位系統を一つの等価アドミタンスと等価電流源から成る簡単な等価回路によって縮約可能であることを示した。

また, 本等価回路を用いた考察の例として, 簡略された配電フィーダモデルに縮約手法を適用し, PV が導入された電力系統の特性に関して定性的な議論を行った。その結果, 負荷が遅れ力率の場合において下記の傾向が明らかになった。

- 等価アドミタンスの大きさ $|Y_{eq}|$ は負荷アドミタンスの総和の大きさ $|nY|$ よりも小さくなり, 等価電流源の大きさ $|I_{eq}|$ は, PV 出力電流の総和 $\Sigma|I_{PV}|$ よりも大きくなる
- PV が末端寄りに導入されるほど, $|I_{eq}|$ は小さくなる。

第4章 Z 分離縮約等価回路の提案

第3章では、PV が電流源として動作し負荷が定インピーダンス特性である場合に、縮約対象系統が YI 等価回路に縮約できることを示した。数式によって記述した等価回路の特性は縮約前の原系統と完全に等価であったが、その一方で、PV が力率1制御を行う場合には、等価電流源のパラメータが縮約点電圧に依存して変化してしまうという問題点があった。

そこで本章では、PV が力率1制御を行う場合も等価回路のパラメータが定数となる Z 分離縮約等価回路を提案する。本等価回路は、縮約対象系統内の系統インピーダンスを等価インピーダンスによって表現した等価回路であり、YI 等価回路からの等価変形によって導出できる。Z 分離縮約等価回路を用いることで、縮約点電圧が変化した際の縮約点の潮流を高い精度で算出することができる。また、縮約対象系統内に定電力特性の要素が含まれる場合も本等価回路が有用であることを、シミュレーションにより示す。

なお、本章では複素数を I_{PV} のように大文字斜体で、スカラー量を i_{PV} のように小文字で表記する。また、電圧フェーザ、電流フェーザの位相基準は縮約点電圧 V_0 とする。

4.1 提案する縮約等価回路

4.1.1 Z 分離縮約等価回路

第3章で提案した YI 等価回路を図4.1に示す。YI 等価回路の構成要素は等価アドミタンスと等価電流源の2つであり、この2つの要素に縮約対象系統の負荷、PV、系統インピーダンスの3つの構成要素が縮約されている。これに対し、本章では YI 等価回路の各パラメータから系統インピーダンスの要素を分離し、縮約対象系統を負荷、PV、系統インピーダンスの構成要素ごとに分けて縮約した Z 分離縮約等価回路を提案する。本章で提案する Z 分離縮約等価回路を図4.2に示す。

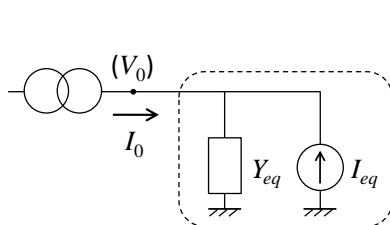


図 4.1 YI 等価回路

Fig. 4.1 YI equivalent circuit

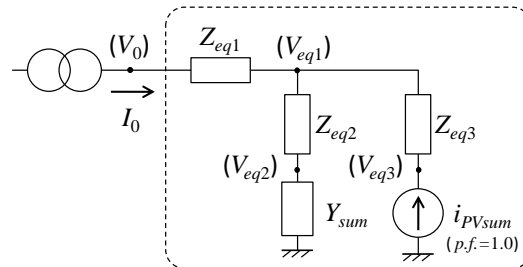


図 4.2 本章で提案する Z 分離縮約等価回路

Fig. 4.2 Z-separated equivalent circuit proposed in Chap. 4

Y_{sum} は縮約対象系統内の各負荷アドミタンス Y_i の総和, i_{PVsum} は各 PV の出力電流の大きさ $|I_{PV}|$ の総和であり, それぞれ式(4.1), 式(4.2)によって定義される。本論文では, Y_{sum} のように縮約対象系統内の負荷を集約して表わした要素を集約負荷, i_{PVsum} のように PV を集約して表わした要素を集約 PV と称する。

$$Y_{sum} = \sum_{i \in N} Y_i \quad (4.1)$$

$$i_{PVsum} = \sum_{i \in N} |I_{PV}| \quad (4.2)$$

ただし, N は縮約対象系統内の全ノードの集合

縮約対象系統内の系統インピーダンスは Z_{eq1} から Z_{eq3} までの 3 つの等価インピーダンスによって表現している。等価インピーダンスは, 系統インピーダンスによる有効電力・無効電力損失を表わすとともに, 集約負荷の受電点電圧 V_{eq2} , 集約 PV の連系点電圧 V_{eq3} を, それぞれ縮約前の系統の個々の負荷の平均受電点電圧, 個々の PV の平均連系点電圧に合致させる役割を持つ。

4.1.2 パラメータの決定方法

Z 分離縮約等価回路の構成要素のうち, 集約負荷のアドミタンス Y_{sum} および集約 PV の出力電流 i_{PVsum} は式(4.1)および式(4.2)によって与えられるため, Z 分離縮約等価回路のパラメータの決定とは, すなわち 3 つの等価インピーダンス $Z_{eq1}, Z_{eq2}, Z_{eq3}$ の決定を意味する。

本論文では, 3 つの等価インピーダンスを下記の 2 つの方針に基づいて決定する。

- ①縮約点電圧 V_0 と縮約点の電流 I_0 の関係が, YI 等価回路と Z 分離縮約等価回路で合致するようにする。
- ②PV の連系点電圧が, 縮約前後で合致するようにする。すなわち, Z 分離縮約等価回路における集約 PV の連系点電圧が, 縮約前の系統の個々の PV の平均連系点電圧に合致するようにする。

以下, 各パラメータの決定方法の詳細について述べる。

・ Z_{eq1}, Z_{eq2} の決定方法 :

図 4.1 の YI 等価回路において縮約点電圧 V_0 と縮約点電流 I_0 の関係は式(4.3)によって表わされる。

$$I_0 = V_0 Y_{eq} - I_{eq} \quad (4.3)$$

一方, 図 4.2 の Z 分離縮約等価回路においては式(4.4)~式(4.6)が成り立つ。

$$V_0 = V_{eq1} + Z_{eq1}I_0 \quad (4.4)$$

$$I_0 = \frac{Y_{sum}}{1 + Z_{eq2}Y_{sum}}V_{eq1} - i_{PVsum}e^{j\theta} \quad (4.5)$$

$$V_{eq3} = V_{eq1} + i_{PVsum}e^{j\theta}Z_{eq3} \quad (4.6)$$

ただし、 θ は縮約点電圧 (V_0) から集約 PV の連系点電圧 (V_{eq3}) までの位相差である。

式(4.4)、式(4.5)、式(4.6)から V_{eq1} を消去して整理すると、式(4.7)、式(4.8)を得る。

$$I_0 = \frac{Y_{sum}}{1 + (Z_{eq1} + Z_{eq2})Y_{sum}}V_0 - \frac{1 + Z_{eq2}Y_{sum}}{1 + (Z_{eq1} + Z_{eq2})Y_{sum}}i_{PVsum}e^{j\theta} \quad (4.7)$$

$$V_{eq3} = V_0 - Z_{eq1}I_0 + Z_{eq3}i_{PVsum}e^{j\theta} \quad (4.8)$$

式(4.3)と式(4.7)が任意の V_0 について成り立つためには (方針①)、式(4.9)および式(4.10)が成立することが条件である。

$$Y_{eq} = \frac{Y_{sum}}{1 + (Z_{eq1} + Z_{eq2})Y_{sum}} \quad (4.9)$$

$$I_{eq} = \frac{1 + Z_{eq2}Y_{sum}}{1 + (Z_{eq1} + Z_{eq2})Y_{sum}}i_{PVsum}e^{j\theta} \quad (4.10)$$

式(4.9)、式(4.10)を Z_{eq1} , Z_{eq2} について整理すると式(4.11)および式(4.12)が得られる。

$$Z_{eq1} = \frac{1}{Y_{eq}} - \frac{I_{eq}}{i_{PVsum}e^{j\theta}Y_{eq}} \quad (4.11)$$

$$Z_{eq2} = \frac{I_{eq}}{i_{PVsum}e^{j\theta}Y_{eq}} - \frac{1}{Y_{sum}} \quad (4.12)$$

式(4.11)および式(4.12)より、YI 等価回路のパラメータ Y_{eq} , I_{eq} および集約 PV の連系点電圧の位相 θ が決定されれば Z_{eq1} および Z_{eq2} を決定することができる。ただ、第 3 章にて述べたように I_{eq} は V_0 の値に依存する変数であり、また θ も集約 PV の力率を 1 に固定していることから V_0 の値によって変化する。このため、式(4.4)、式(4.5)を満たす Z_{eq1} , Z_{eq2} は、厳密には定数として表わすことができないが、本論文では $V_0=1.0\text{p.u.}$ のときに式(4.11)および式(4.12)が満足されるように、 Z_{eq1} , Z_{eq2} を定めることとする。

・ Z_{eq3} の決定方法：

Z_{eq3} および V_{eq3} についての制約式は式(4.8)のみであり、 V_0 と I_0 の値が指定されたとしても Z_{eq3} と V_{eq3} を一意に求めることはできない。これは、**YI** 等価回路のパラメータの数が 2 (自由度 2) であるのに対し、**Z** 分離縮約等価回路ではパラメータの数が 3 (自由度 3) であり、自由度が 1 大きいためである。

そこで本論文では、初期状態 ($V_0=1.0\text{p.u.}$) において V_{eq3} が縮約前の系統における各 PV の連系点電圧の平均値になるように、 Z_{eq3} を定めることとする。(方針②) これは、初期状態 ($V_0=1.0\text{p.u.}$) において縮約点の潮流および PV の出力電流の位相が縮約前後で一致するように縮約すれば、その後の潮流状態も合致するであろうという発想に基づいている。

以上の方針に基づいて、本論文では 3 つの等価インピーダンス $Z_{eq1} \sim Z_{eq3}$ を式(4.13)～式(4.15)によって決定する。

$$Z_{eq1} = \frac{1}{Y_{eq}} - \frac{I_{eq(init)}}{i_{PVsum} e^{j\theta_{avr(init)}} Y_{eq}} \quad (4.13)$$

$$Z_{eq2} = \frac{I_{eq(init)}}{i_{PVsum} e^{j\theta_{avr(init)}} Y_{eq}} - \frac{1}{Y_{sum}} \quad (4.14)$$

$$Z_{eq3} = \frac{V_{avr(init)} - V_{0(init)} + Z_{eq1}(Y_{eq}V_{0(init)} - I_{eq(init)})}{i_{PVsum} e^{j\theta_{avr(init)}}} \quad (4.15)$$

なお、式(4.15)は式(4.8)との対応を明確にするために Z_{eq1} を用いて表わした。式(4.13)～式(4.15)における各変数の定義は以下の通りである。

- ・ $V_{0(init)}$: 1.0p.u.
- ・ $I_{eq(init)}$: $V_0=V_{0(init)}$ としたときの I_{eq} の真値 ($V_0=V_{0(init)}$ における個々の PV の連系点電圧の位相を、 I_{eq} の算出式に代入した値)
- ・ $V_{avr(init)}$: 縮約前の系統における各 PV の連系点電圧の平均値
- ・ $\theta_{avr(init)}$: $V_{avr(init)}$ の位相

ただし、個々の PV の出力電流が異なる場合には、 $V_{avr(init)}$ は PV の連系点電圧について各 PV の出力電流の加重平均を取った値として定義され、式(4.16)で表わされる。

$$V_{avr(init)} = \frac{\sum_{i \in N_{PV}} i_{PV_i} V_{init(i)}}{\sum_{i \in N_{PV}} i_{PV_i}} \quad (4.16)$$

- ・ $V_{init(i)}$: $V_0=V_{0(init)}$ のときの縮約対象系統内のノード i の電圧
- ・ N_{PV} : 縮約対象系統内の PV が導入されているノードの集合

4.2 提案縮約等価回路のパラメータに関する考察

4.2.1 パラメータ算出式から得られる考察

式(4.13)~式(4.15)で与えられる Z 分離縮約等価回路のパラメータについて考察を述べる。

①各パラメータは、縮約対象系統内の PV の総導入量が等しい場合でも、PV 導入分布によって変化する。

…3.4 節で述べたように、YI 等価回路の等価電流源 I_{eq} の値は PV の導入分布によって変化した。これより、Z 分離等価回路のパラメータも PV の導入分布によって変化する。これは、縮約前の個々の負荷の平均受電点電圧、および個々の PV の平均連系点電圧が、PV の導入分布によって変化する事と対応している。

② Z_{eq1} と Z_{eq2} の和は PV の条件に依存しない。

… Z_{eq1} と Z_{eq2} の和は式(4.17)によって表わされ、PV の条件によらない定数となる。

$$Z_{eq1} + Z_{eq2} = \frac{1}{Y_{eq}} - \frac{1}{Y_{sum}} \quad (4.17)$$

これは、縮約点から集約負荷までの間の 2 つの等価インピーダンスの和は、PV の導入量や導入分布によらずに、一定であることを示している。

③PV の導入分布が異なる場合であっても、縮約対象系統の全 PV の出力が 0 となる場合では、Z 分離縮約等価回路は等しくなる。

全 PV の出力が 0 となる場合には、等価回路は集約負荷 Y_{sum} および等価インピーダンス Z_{eq1} , Z_{eq2} の直列回路で表わされる。②より Z_{eq1} と Z_{eq2} の和は一定であることから、③は明らかである。なお、PV が導入されていない場合には、Z 分離縮約等価回路は YI 等価回路とも等しくなる。($\frac{1}{Y_{eq}} = \frac{1}{Y_{sum}} + Z_{eq1} + Z_{eq2}$ より明らか。)

4.2.2 簡略配電フィーダモデルを用いた検討

3.4.2 項で扱った簡略配電フィーダモデルに、本章で提案する縮約手法を適用し、近似を用いて Z 分離縮約等価回路の等価インピーダンスを求め、その傾向を明らかにする。

解析対象とする簡略配電フィーダモデルを図 4.3 に再掲する。また、本モデルに第 3 章で提案した縮約手法を適用したときの YI 等価回路のパラメータを式(4.18), 式(4.19)に再掲する。(式(3.26)および式(3.28)参照)

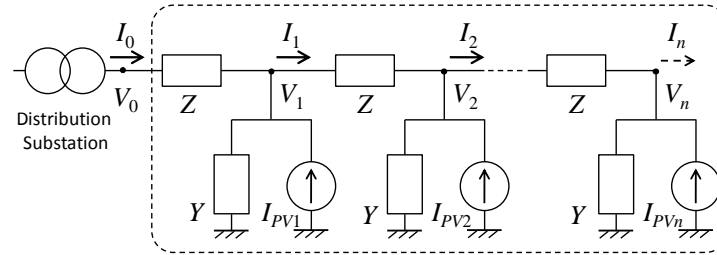


図 4.3 簡略配電フィーダモデル

Fig. 4.3 Simplified model of distribution feeder

$$Y_{eq} \approx \frac{nY}{1 + \frac{n^2}{3}ZY} \quad (4.18)$$

$$I_{eq} \approx \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{1 + \frac{(n-k)^2}{2}ZY}{1 + \frac{n^2}{2}ZY} / I_{PVk} / e^{j\theta_k} \right\} \quad (4.19)$$

ただし、 θ_k は縮約前の系統におけるノード k の電圧の位相である。

YI 等価回路のパラメータ算出に際しては、3.4.2 項と同様に以下の 3 つの仮定を用いた。

- ・ 仮定(1) 各ノードの負荷および各ノード間の配電線インピーダンスはそれぞれ等しい。
- ・ 仮定(2) $(nZ)(nY)$ の 2 乗は 1 より十分に小さい。 $(1 + (n^2ZY)^2 \approx 1)$
- ・ 仮定(3) ノード数 n は 1 よりも十分に大きい。 $(n^2 \gg 1)$

式(4.18)および式(4.19)で表わされる YI 等価回路から、Z 分離縮約等価回路を求める。ただし、一般的な PV 導入分布に対する等価インピーダンスの式は複雑になるので、本節では PV 導入分布として 3.4.2 項で検討したケースのうち

- [1] 均等分布：各ノードに均等に導入 $|I_{PVk}| = |I_{PV}|$ ($\forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$)
- [2] 始端導入：配電用変電所近傍ノードのみに導入 ($|I_{PV1}| = n|I_{PV}|$, $I_{PVk} = 0$ ($\forall k \neq 1$))
- [3] 末端導入：末端ノードのみに導入 $|I_{PVn}| = n|I_{PV}|$, $I_{PVk} = 0$ ($\forall k \neq n$)

の 3 ケースについて検討を行う。各 PV 導入分布において、系統内の PV の総導入量は等しいとする。すなわち、いずれのケースにおいても $i_{PVsum} = n|I_{PV}|$ である。

[1] 均等分布

式(4.19)を用いて、 $V_0 = V_{0(init)}$ のときの等価電流源 $I_{eq(init)}$ を計算すると、

$$I_{eq(init)} \approx \sum_{k=1}^n \left(\frac{1 + \frac{(n-k)^2}{2} ZY}{1 + \frac{n^2}{2} ZY} \right) / I_{PV} / e^{j\theta_{avr(init)}} \quad (4.20)$$

$$= \frac{1 + \frac{n^2}{6} ZY}{1 + \frac{n^2}{2} ZY} (n / I_{PV}) e^{j\theta_{avr(init)}} \quad (4.21)$$

$$\approx \frac{1}{1 + \frac{n^2}{3} ZY} i_{PVsum} e^{j\theta_{avr(init)}} \quad (4.22)$$

ただし、式(4.19)から式(4.20)の変形に際しては、係数 $\frac{1 + \frac{(n-k)^2}{2} ZY}{1 + \frac{n^2}{2} ZY}$ で重みづけしたとき

の I_{PVk} の位相の平均値が、 $\theta_{avr(init)}$ に等しいとの仮定を置いた。

式(4.18)、式(4.22)を用いて、式(4.13)～式(4.15)より Z 分離縮約等価回路のパラメータを

$$\text{算出すると、} Z_{eq1} \approx \frac{n}{3} Z, Z_{eq2} \approx 0, Z_{eq3} \approx \frac{V_{avr(init)} - \left(V_0(init) - \frac{n}{3} Z I_0(init) \right)}{i_{PVsum} e^{j\theta_{avr(init)}}} \text{ が得られる。ただし、}$$

$I_0(init)$ は、 $V_0=V_0(init)$ のときの縮約点の電流である。

ここで、PV および負荷が均等分布している場合の縮約前の系統の各ノードの平均電圧 V_{avr} を求める。個々の PV の出力電流の位相差を無視した場合、各ノード間を流れる電流は、図 4.4 に示すように I_0 に比例するものと近似できる。これより V_{avr} は下式によって求まる。

$$V_{avr} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k \quad (4.23)$$

$$\approx \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ V_0 - \left(\sum_{u=0}^{k-1} \frac{n-u}{n} Z I_0 \right) \right\} \quad (4.24)$$

$$\approx V_0 - \frac{n}{3} Z I_0 \quad (4.25)$$

式(4.25)より、 $V_0=V_0(init)$ のとき $V_{avr(init)} \approx V_0(init) - \frac{n}{3} Z I_0(init)$ となるため $Z_{eq3} \approx 0$ となる。これ

より、近似を用いて計算した場合の Z 分離縮約等価回路は図 4.5 のようになる。

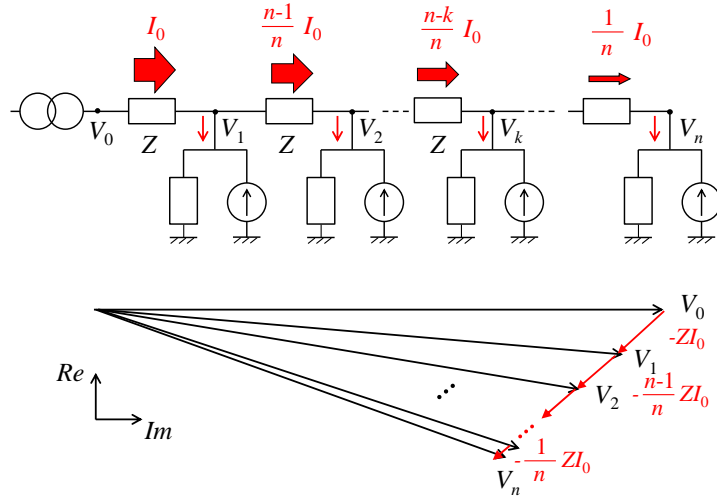


図 4.4 PV が均等分布している場合の電圧分布

Fig.4.4 Voltage profile when PVs are installed equally at each node

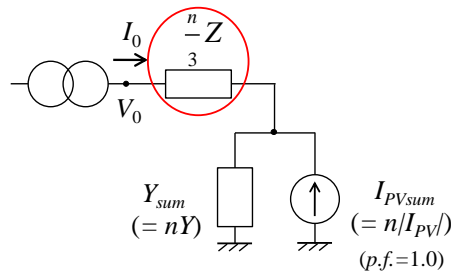


図 4.5 PV が均等分布している場合の Z 分離縮約等価回路

Fig.4.5 Z-separated equivalent circuit when PVs are installed equally at each node

[2] 始端導入

式(4.19)を用いて、 $V_0=V_{0(init)}$ のときの等価電流源 $I_{eq(init)}$ を計算すると、

$$I_{eq(init)} = \frac{1 + \frac{(n-1)^2}{2} ZY}{1 + \frac{n^2}{2} ZY} / n I_{PV} / e^{j\theta_1(init)} \quad (4.26)$$

$$\approx i_{PVsum} e^{j\theta_1(init)} \quad (4.27)$$

ただし、 $\theta_1(init)$ は $V_0=V_{0(init)}$ のときのノード 1 の電圧の位相である。PV はノード 1 にのみ導入されているので $V_{avr(init)}=V_1(init)$ 、 $\theta_{avr(init)}=\theta_1(init)$ である。ここで、 $V_1(init)\approx V_0$ 、 $\theta_1(init)\approx 0$ として近似すると、式(4.13)～式(4.15)より Z 分離縮約等価回路のパラメータは、 $Z_{eq1}\approx 0$ 、 $Z_{eq2}\approx \frac{n}{3}Z$ 、

$Z_{eq3} \approx 0$ と求まる。これより、近似を用いて計算した場合の Z 分離縮約等価回路は図 4.6 のようになる。

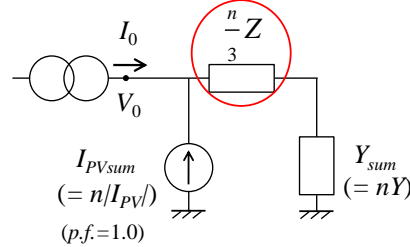


図 4.6 PV が始端ノードのみに導入された場合の Z 分離縮約等価回路

Fig.4.6 Z-separated equivalent circuit when PVs are installed at only starting node

[3] 末端導入

式(4.19)を用いて、 $V_0=V_{0(init)}$ のときの等価電流源 $I_{eq(init)}$ を計算すると、

$$I_{eq(init)} \approx \frac{1}{1 + \frac{n^2}{2}ZY} i_{PVsum} e^{j\theta_{n(init)}} \quad (4.28)$$

ただし、 $\theta_{n(init)}$ は $V_0=V_{0(init)}$ のときのノード n の電圧の位相である。PV はノード n にのみ導入されているので $V_{avr(init)}=V_{n(init)}$, $\theta_{avr(init)}=\theta_{n(init)}$ である。このとき、Z 分離縮約等価回路の

パラメータは、 $Z_{eq1} \approx \frac{n}{2}Z$, $Z_{eq2} \approx -\frac{n}{6}Z$, $Z_{eq3} \approx \frac{V_{n(init)} - \left(V_{0(init)} - \frac{n}{2}ZI_{0(init)} \right)}{i_{PVsum} e^{j\theta_{n(init)}}}$ となる。

ここで、各ノード間の位相差を無視した場合、各需要家負荷に流れる電流は $\frac{I_0 + i_{PVsum} e^{j\theta_n}}{n}$ と表わされるため、末端ノードの電圧は下式によって求まる。

$$V_n \approx V_0 - \sum_{u=0}^{n-1} Z \left\{ \frac{n-u}{n} (I_0 + i_{PVsum} e^{j\theta_n}) - i_{PVsum} e^{j\theta_n} \right\} \quad (4.29)$$

$$\approx V_0 - \frac{n}{2}ZI_0 + \frac{n}{2}Zi_{PVsum} e^{j\theta_n} \quad (4.30)$$

式(4.30)より、 $V_{n(init)} \approx V_{0(init)} - \frac{n}{2}ZI_{0(init)} + \frac{n}{2}Zi_{PVsum} e^{j\theta_{n(init)}}$ となるため、これより、近似

を用いて計算した場合の Z 分離縮約等価回路は図 4.7 のようになる。

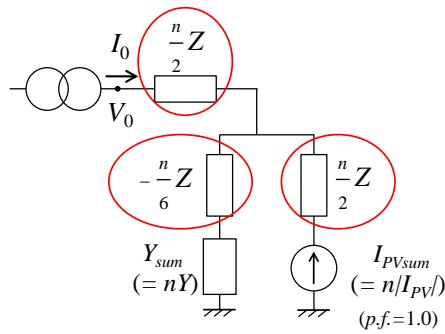


図 4.7 PV が末端ノードのみに導入された場合の Z 分離縮約等価回路

Fig.4.7 Z-separated equivalent circuit when PVs are installed at only ending node

近似式から求めた各 PV 導入分布ケースにおける Z 分離等価回路のパラメータを、数値計算により確認する。数値計算に用いた簡略配電フィーダモデルのパラメータを表 4.1 に示す。全需要家軒数は 1500 軒、需要家負荷の合計は 1500kW+450kVar（各需要家の受電電圧を 1.0p.u.とした場合）である。また、PV の導入された需要家数は 400 軒、PV の総導入量は 1600kW（各 PV の連系点電圧を 1.0p.u.とした場合）である。負荷特性は定インピーダンス特性、PV は定電流源動作時を考える。

結果を表 4.2 に示す。表 4.2 には、近似計算により求めた等価回路のパラメータの値（近似値）と、提案手法から近似を用いずに算出したパラメータの値（真値）を示した。結果より、近似値と真値は約 30mΩ 程度（巨長インピーダンスの約 1/50）の誤差の範囲内で一致していることがわかる。なお、始端導入のケースにおいては、近似計算では $V_1 \approx V_0$ とし、縮約点とノード 1 の間のインピーダンスを無視したために、 Z_{eq1} の真値が 0 より大きくなったと考えられる。

表 4.1 簡略配電フィーダモデルのパラメータ

Table 4.1 Parameters of simplified distribution feeder model

	説明	値	備考
n	ノード数	50	
-	各ノードの需要家軒数	30 軒	
Z	各ノード間の線路インピーダンス	25.0+j35.0[mΩ]	巨長インピーダンス 1.25+j1.75[Ω]を想定
Y	各ノードの負荷アドミタンス	0.689+j0.207[mS] (6.6kV 系換算時)	1 軒当たり 1.0kW+0.30kVar を想定 (受電点電圧が 1.0p.u.時)
i_{pv}	各ノードに連系する PV の出力電流	0.484[A] (6.6kV 系換算時)	8 軒/30 軒に導入, 1 軒あたり 4.0kW を想定 (連系点電圧が 1.0p.u.時)

表 4.2 各 PV 導入分布ケースに対する Z 分離縮約等価回路のパラメータ[mΩ]

Table 4.2 Parameters of Z-separated equivalent circuit for each PV installation case

		Z_{eq1}	Z_{eq2}	Z_{eq3}
[1] 均等分布	近似値	$417+j583 (= \frac{n}{3} Z)$	0	0
	真値	429+j595	0.5-j0.4	-0.5+j0.6
[2] 始端導入	近似値	0	$417+j583 (= \frac{n}{3} Z)$	0
	真値	25+j35	404+j560	0.0+j0.0
[3] 末端導入	近似値	$625+j875 (= \frac{n}{2} Z)$	$-208-j291 (= -\frac{n}{6} Z)$	$625+j875 (= \frac{n}{2} Z)$
	真値	638+j882	-208-j287	613+j847

以上の検討をもとに、簡略配電フィードモデルの等価回路のパラメータに関する考察を述べる。

①PV が均等に分布している場合には、 $Z_{eq2} \approx 0$ かつ $Z_{eq3} \approx 0$ 。

…縮約前の系統において、負荷および PV が均等分布している場合には、個々の負荷の受電点電圧の平均値と、個々の PV の連系点電圧の平均値が等しくなることと対応している。

② Z_{eq1} と Z_{eq2} の和はおよそ $\frac{n}{3} Z$ で一定である。

…式(4.17)および式(4.18)より成り立つ。

③ Z_{eq1} の大きさは、PV が末端寄りに導入されているほど大きく、PV が始端寄りに導入されているほど小さい。

…式(4.13)より Z_{eq1} は i_{PVsum} と $I_{eq(init)}$ の差に比例し、式(4.19)より $I_{eq(init)}$ の大きさは i_{PVsum} より小さく、また PV が末端寄りに導入されるほどさらに小さくなるため。

④ Z_{eq2} は、PV が均等分布よりも末端寄りに導入されている場合には、実部・虚部ともに負であり、始端寄りに導入されている場合には、実部・虚部ともに正である。

…②～③より成り立つ。

ただし、③および④については、負荷が進み力率の場合や、ZY の虚部が負となる場合においては、成り立たない場合もある。

4.3 定電力特性の要素が含まれる場合の縮約手法

Z 分離縮約等価回路においては負荷モデル・PV モデルは、それぞれ縮約系統内の負荷および PV を単純に足し合わせたものとして表現される。このため、系統構成や系統インピーダンス値、PV の導入分布など、負荷量・PV 発電量以外の系統の要因は、全て 3 つの等価インピーダンスのインピーダンス値に集約されているものと考えることができる。

そこで、本論文では、定電力特性（または定電流特性）の負荷や、定電力源として動作する PV が縮約対象系統に含まれている場合には、集約負荷または集約 PV の電圧特性を置き換えることで、対象系統の Z 分離縮約等価回路を表現する。例えば、縮約対象系統の個々の負荷が定電力特性の場合には、Z 分離縮約等価回路内の集約負荷のモデルを定電力特性に置き換えることとする。本手法の概念図を図 4.8 に示す。

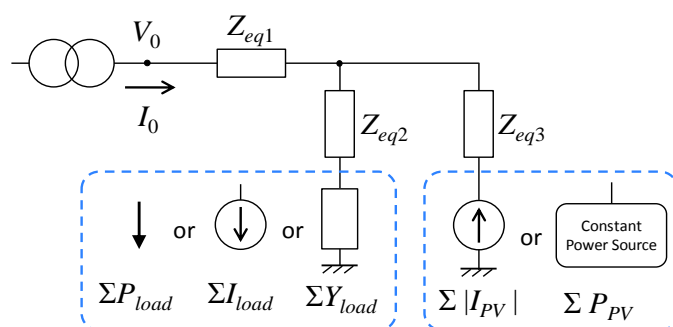


図 4.8 Z 分離等価回路の拡張

Fig.4.8 Generalization of Z-separated equivalent circuit

定電力動作時の PV を考慮し、かつ縮約対象系統内の負荷が定電力特性の場合の縮約手法を図 4.9 および下記にまとめる。

- (1) 縮約対象系統内の負荷を定インピーダンス特性に、PV を力率 1 の定電流源に置き換える。これにより、縮約対象系統の構成要素がインピーダンスと電流源のみで表わされる。
 ※ただし、定インピーダンス負荷の値は、受電点電圧 1.0p.u.における消費電力が、元の負荷と等しくなるように定める。PV の電流源の値は、定電流源動作時の電流の大きさとする。
- (2) 第 3 章に述べた縮約手法により YI 等価回路に縮約する。
 ※縮約に際しては、(1)で得た系統において $V_0=1.0\text{p.u.}$ として潮流計算を行い、結果から得た各 PV の連系点電圧を、 I_{eq} の決定に用いる。
- (3) 4.2 節で述べた手法により、Z 分離縮約等価回路を求める。
 ※等価インピーダンスの決定には、(2)で行った潮流計算結果から得られる $V_{avr(init)}$, $\theta_{avr(init)}$ の値を用いる。

- (4) 集約負荷を元の負荷特性に置き換える。また、集約 PV の制御は、集約 PV の連系点電圧 (図 4.2 中 V_{eq3}) の大きさと閾値電圧との大小により、定電流制御と定電力制御が切り替わるものとする。

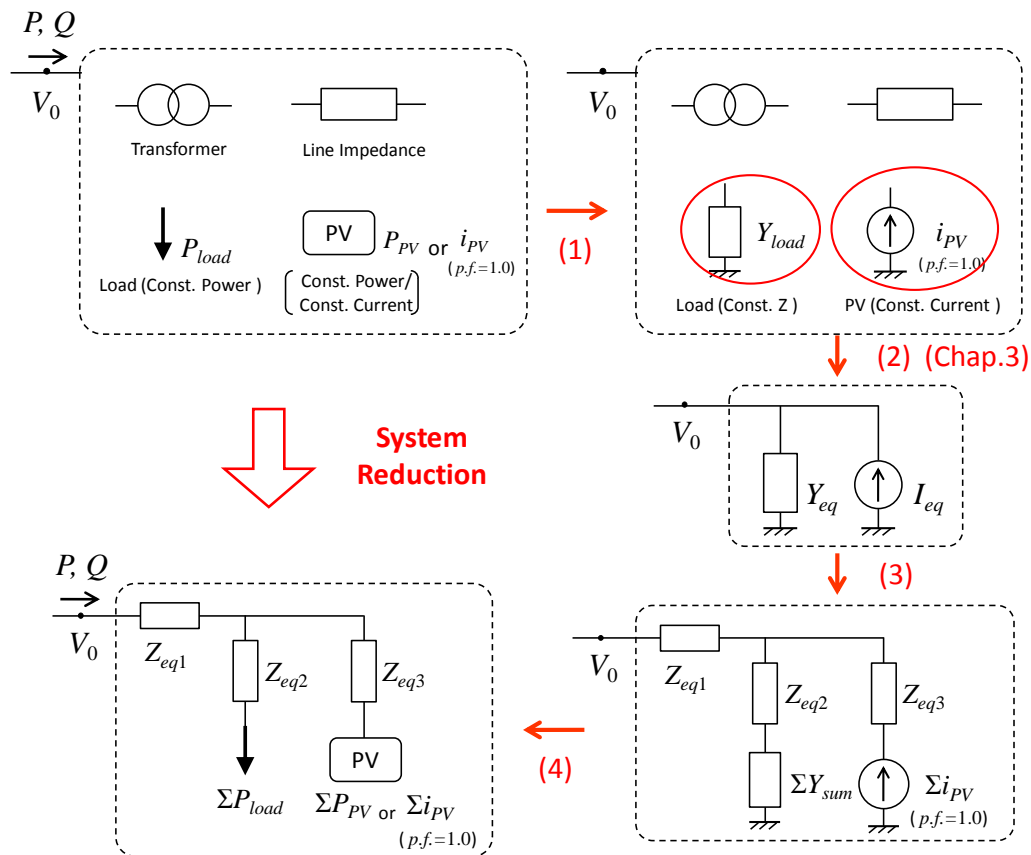


図 4.9 定電力特性の要素が含まれた場合における縮約手法

Fig. 4.9 System reduction method for system with const. power load

4.4 簡略配電フィーダモデルを用いた等価回路の精度評価

4.4.1 負荷が定インピーダンス特性の場合

PV が定電力制御を行う領域まで含め、 Z 分離縮約等価回路を用いた解析結果の精度を、図 4.3 に示す簡略配電フィーダモデルを用いて評価する。

まず負荷特性が定インピーダンス特性の場合を検討する。負荷、系統インピーダンス、および PV 導入割合は表 4.1 に準じるが、個々の PV の出力特性としては、連系点電圧の大きさによる制御切替を考慮した表 2.3 に示す特性を用いる。すなわち、個々の PV は、自身の連系点電圧が $0.8p.u.$ 以上では定電力制御を行い、 $0.8p.u.$ 未満では定電流制御を行う。

なお、定電流制御時の、出力電流値は表 4.1 に示す PV の電流値に等しい。PV の導入分布は均等分布とする。

解析では、下記の 2 通りの手法によって、縮約点電圧 V_0 が変化した場合の縮約点の潮流 P, Q を求める。

(A)厳密解：各 V_0 の値ごとに、厳密な潮流計算によって潮流を算出

(B)Z 分離縮約等価回路を用いた解析：本論文で提案する等価回路により、潮流を算出。

なお、等価回路のパラメータは、表 4.2 内 [1]均等分布 [真値]に示した値 ($Z_{eq1}=429+j595[m\Omega]$, $Z_{eq2}=0.5-j0.4[m\Omega]$, $Z_{eq3}=-0.5+j0.6[m\Omega]$) に等しい。

結果を図 4.10 に示す。(B)Z 分離縮約等価回路を用いた解析結果は、有効電力の誤差が最大で 0.1kW 程度 (需要家 1 軒あたりの負荷の約 1/10 倍程度)、無効電力の誤差が最大で 0.03kVar 程度であった。これより、負荷特性が定インピーダンス特性の場合には、Z 分離縮約等価回路は、簡略配電フィーダの特性を精度良く表現できると言えよう。

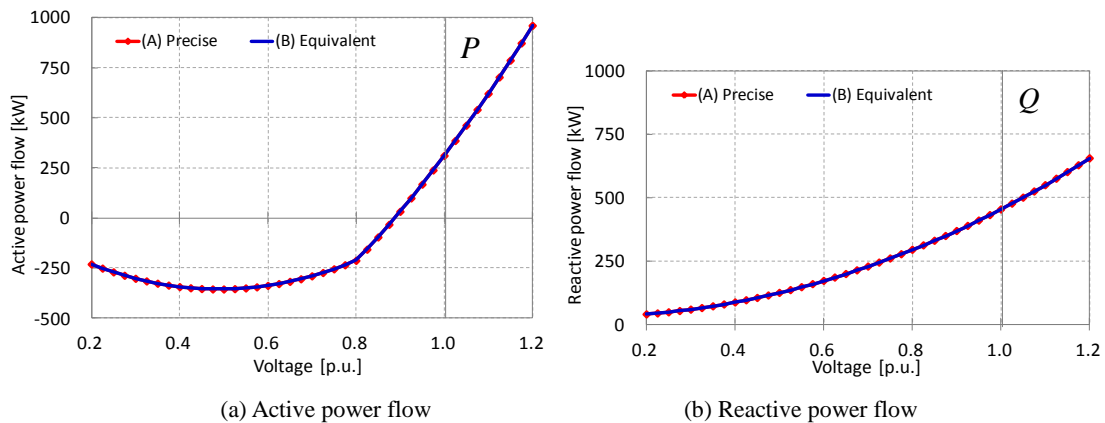


図 4.10 Z 分離縮約等価回路による解析結果と厳密解の比較 (定インピーダンス負荷)

Fig. 4.10 Analysis result using Z-separated equivalent circuit (Constant Impedance load)

4.4.2 負荷が定電流特性または定電力特性の場合

負荷特性が定電流特性または定電力特性の場合において、Z 分離縮約等価回路の精度を評価する。簡略配電フィーダモデルの定電流負荷および定電力負荷の値は、表 4.1 に示すように、受電点電圧が 1.0p.u.のときに 1 軒当たり 1.0kW+0.30kVar とするよう定めた。

(A)厳密解と(B)Z 分離縮約等価回路を用いた解析結果の比較を図 4.11 に示す。図 4.11(a)は負荷が定電流特性を持つ場合の結果、図 4.11(b)は負荷が定電力特性を持つ場合の解析結果である。ただし、定電力負荷は、受電点電圧の低下に伴い負荷電流が反比例的に上昇することから、電圧低下時には他の負荷特性を持つ負荷よりも脱落しやすいことが予想されるため、解析範囲は $0.6p.u. \leq V_0 \leq 1.2p.u.$ とし、範囲外の結果は網掛けして示した。

各負荷特性において、(A)厳密解に対する(B)Z 分離縮約等価回路を用いた解析結果の誤差の RMS 値 (Root Mean Square: 二乗平均誤差) を表 4.3 に示す。結果より、(B)Z 分離縮約

等価回路を用いた解析結果は、負荷特性を変更した場合であっても、有効電力・無効電力ともに高い精度で厳密解と一致していることがわかる。

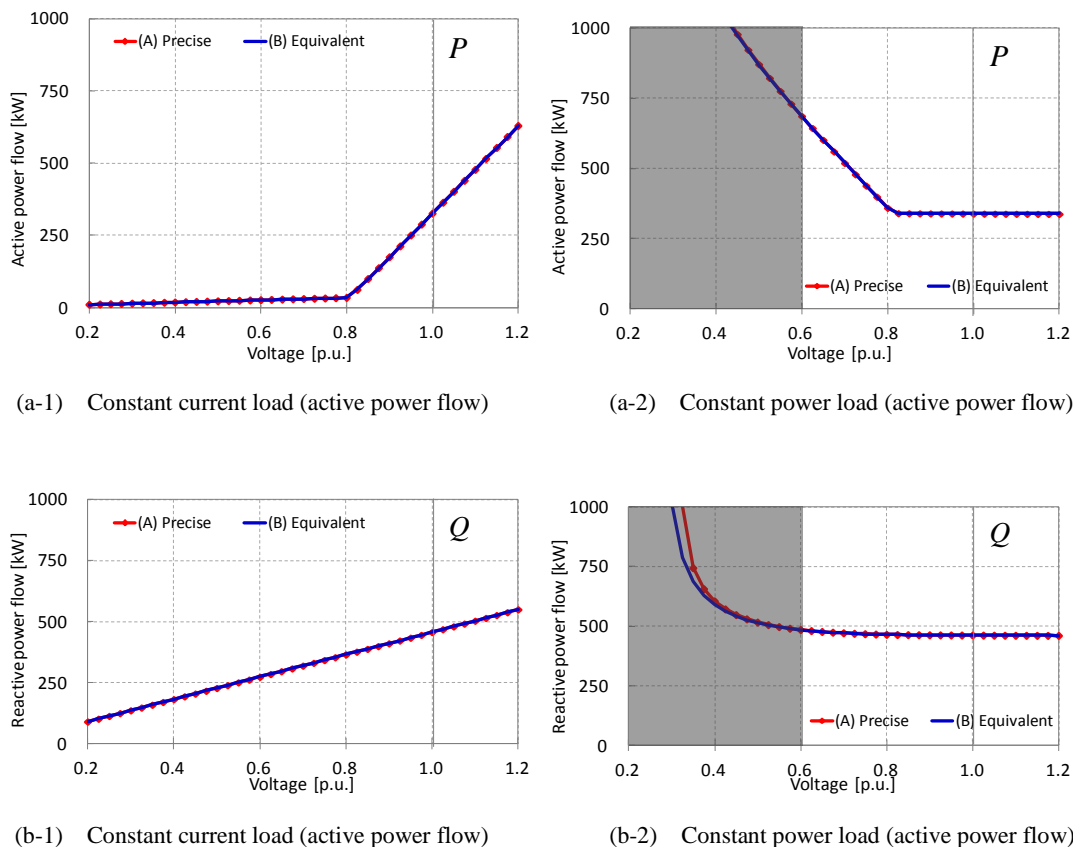


図 4.11 Z 分離縮約等価回路による解析結果と厳密解の比較

Fig. 4.11 Analysis result using Z-separated equivalent circuit

表 4.3 Z 分離縮約等価回路を用いた解析結果の誤差の RMS 値*

Table 4.3 RMS value of error on analysis result using Z-separated equivalent circuit

	定インピーダンス負荷	定電流負荷	定電力負荷
有効電力誤差	0.02kW	0.02kW	0.38kW
無効電力誤差	0.01kVar	0.01kVar	0.33kVar

*: 解析範囲内の各値の誤差をそれぞれ 2 乗した上で、その平均値の平方根を取った値

以上の結果より、定インピーダンス負荷と電流源 PV のみから成る系統以外においても、等価インピーダンス背後の集約負荷および集約 PV モデルを置き換えることで、縮約前の系統の特性を高い精度で表現できることが示された。これより、簡略配電フィーダモデルに対しては、Z 分離縮約等価回路による縮約手法は有用性が高いことが示された。

4.5 本章のまとめ

本章では、YI 等価回路から系統インピーダンスの要素を分離して等価インピーダンスとして表現した、Z 分離縮約等価回路を提案した。Z 分離縮約等価回路を用いることで、縮約前のモデルを用いて潮流計算を行う場合と比較して大幅な計算量の低下が可能となり、また縮約点電圧が変化した場合における下位系統への潮流量を高い精度で算出することができた。また、縮約対象系統内に定電力の要素が含まれた場合においても、等価インピーダンス背後の集約モデルを定電力要素に置き換えるだけで、精度の高い等価回路を得ることができることを、簡略配電フィーダモデルを用いて確認した。

Z 分離縮約等価回路においては負荷モデル・PV モデルは、それぞれ縮約系統内の負荷および PV を単純に足し合わせたものとして表現されるため、系統の構成や系統インピーダンス値、PV の導入分布など、負荷量・PV 発電量以外の系統要因による影響は、全て等価インピーダンスの値の変化として表われる。これにより、系統条件が変化した場合における潮流の変化の解釈が容易になることが予想される。

第5章 詳細配電システムモデルによる提案縮約手法の有用性の検証

本章では、低圧系統まで詳細に考慮した住宅用配電システムモデルを縮約対象とし、縮約点電圧が変化したときの縮約点の潮流を解析し、提案縮約手法の有用性を検証する。

まず、5.2 節では、詳細配電システムモデルを用いて解析を行い、PV の導入が下位系統の電圧一潮流特性へ及ぼす影響を明らかにする。次に、5.3 節では第 4 章で提案した Z 分離縮約等価回路（以下、提案縮約等価回路と称する。）を用いて解析を行い、解析結果の精度を評価する。また、提案縮約等価回路のパラメータは潮流断面にほとんど依存しないことを示す。5.4 節では、本論文で提案する縮約等価回路以外の縮約モデルを用いて縮約点の潮流を算出し、提案縮約手法による解析結果と精度を比較する。

5.1 縮約対象とする詳細配電システムモデル

5.1.1 システムモデル

本章での解析では、住宅地区配電システム 1 フィーダを縮約対象とする。本章で扱うモデルを図 5.1 に、モデルの緒元を表 5.1 にそれぞれ示す。本モデルは電協研住宅用配電フィーダモデルのパターン C₂^[14]（住宅地区）を参考にしている。柱上変圧器の位置や需要家軒数は文献^[15]に従った。

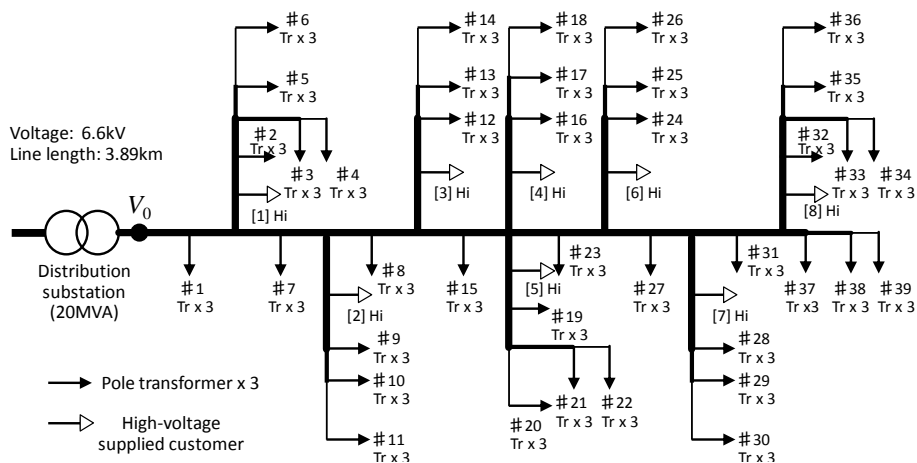


図 5.1 住宅地区配電フィーダモデル

Fig. 5.1 Residential distribution feeder model

表 5.1 モデルの諸元

Table 5.1 Parameters of model

	容量	総数
柱上変圧器	50kVA	117 台 (=39 ノード*3 相分)
低圧需要家	3kVA	1755 軒 (=39 ノード*3 相*15 軒)
高圧需要家	150kVA	8 軒(=8 ノード*1 軒)

各負荷ノードには、柱上変圧器と高圧需要家のいずれかが連系している。図 5.1 中において白矢印 (▽) で示したノードには、高圧需要家用変圧器を介して高圧需要家が連系している。一方、黒矢印 (▼) で示したノードには、1 ノードにつき 3 台の単相柱上変圧器が、各相間に 1 台ずつ合計 3 台連系している。各柱上変圧器の二次側には 15 軒の需要家を含む図 5.2 に示す低圧系統が連系している。本論文では簡単のため、各低圧系統の構成およびパラメータは全て等しいとする。また、調相設備は導入されていないものとする。配電フィーダモデルおよび低圧系統モデルのインピーダンスマップは付録 B を、また低圧系統の三相単線方式の考慮の方法は付録 A を参照されたい。

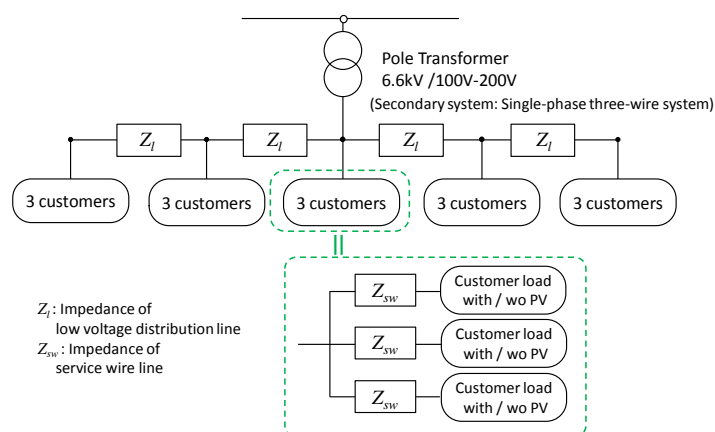


図 5.2 低圧系統モデル

Fig. 5.2 Low voltage distribution system model

5.1.2 PV 導入量, 負荷パターン

PV 導入量は表 5.2 に示す 2 パターンを検討する。[PV1]パターンは 2030 年の導入目標が達成された場合の平均的な配電系統の PV 導入割合を、[PV2]パターンは局所的に集中して PV が導入された場合の導入割合を念頭に置いた。個々の PV は表 2.3 に従った。連系点電圧の大きさによる制御切替を考慮した表 2.3 に示す特性を用いる。すなわち、個々の PV は自身の連系点電圧が 0.8p.u.以上では定電力制御を行い、0.8p.u.未満では定電流制御を行う。PV の導入分布は、特に断らない限り、各ノード以下の低圧需要家に均等な割合で PV が導入された「均等分布」とする。

負荷は表 5.3 に示す 2 パターンを検討する。[L1]パターンは中間季節期などの軽負荷期の休日を、[L2]パターンは夏季または冬季の平日を想定している。時間断面は 2 パターンとも PV の出力が高くなる正午前後を想定している。

PV 導入量と負荷のパターンを組み合わせた 4 パターンの潮流断面を表 5.4 に示す。4 パターンのうち 3 つは、初期状態において縮約点を流れる潮流が逆潮流となっている。各潮流断面の名称については、例えば PV 導入量パターン[PV2]と負荷パターン[L1]を組み合わせた潮流断面を[PV2・L1]のように表記する。

表 5.2 検討した PV 導入量パターン

Table 5.2 Examined patterns of PV installation

PV 導入量パターン	PV 導入割合	総 PV 導入量
[PV1]	1 軒/3 軒	1872kW (3.2kW*585 軒)
[PV2]	2 軒/3 軒	3744kW (3.2kW*1170 軒)

各値は連系点電圧が 1.0p.u.のときの値 (表 5.3, 表 5.4 についても同様)

表 5.3 検討した負荷パターン

Table 5.3 Examined patterns of load power flow

負荷パターン	低圧需要家 1 軒分の負荷	高圧需要家 1 軒分の負荷 (契約容量(150kVA)比)	総負荷
[L1]	0.50kW+0.15kVar	60kW+18kVar (P:40%, Q:12%)	1358kW+407kVar
[L2]	1.0kW+0.30kVar	120kW+36kVar (P:80%, Q:24%)	2717kW+815kVar

表 5.4 検討した PV 導入量・負荷パターンの組合せ

Table 5.4 Examined patterns of PV installation and load power flow

潮流断面パターン	総負荷需要-PV 導入量
[PV2・L1]	-2390kW+410kVar
[PV2・L2]	-1030kW+810kVar
[PV1・L1]	-520kW+410kVar
[PV1・L2]	+840kW+810kVar

各値は下 1 桁目を四捨五入。順潮流が少ない順 (逆潮流が大きい順) に記載

5.1.3 負荷特性

個々の負荷の特性は、表 5.5 に示す 3 通りを検討する。本論文では、有効電力・無効電力ともに、各条件において同一の特性を持つものとする。例えば、負荷特性が定インピーダンス特性の場合には、有効電力・無効電力とも受電点電圧の 2 乗に比例して変化する。

表 5.5 検討した負荷特性

Table 5.5 Examined patterns of load characteristics

略称	名称	特性説明
cZ	定インピーダンス特性	受電点電圧の 2 乗に比例して消費電力が変化
cI	定電流特性	受電点電圧の 1 乗に比例して消費電力が変化
cP	定電力特性	受電点電圧によらず消費電力は一定

5.2 PV が導入された系統の潮流特性

5.2.1 解析条件

まず、詳細配電システムモデルを用いた解析により、縮約点電圧 V_0 が変化した際の縮約点の潮流の傾向を明らかにする。本節では、系統インピーダンスによる影響についても考察するため、全ての系統インピーダンスを 0 とした条件においても解析を行った。これらの解析手法を下記にまとめる。

- ・厳密解 [Precise]

- …詳細システムモデルを用いた解析 (縮約モデルを用いずに各 V_0 の値ごとに潮流計算を行う。)

- ・系統インピーダンスを無視した解析 [no Z]

- …詳細配電システムモデルにおいて、全ての系統インピーダンスを 0 としたもとの解析 (「全ての負荷および PV が直接縮約点に連系したモデルによる解析」との解釈もできる。)

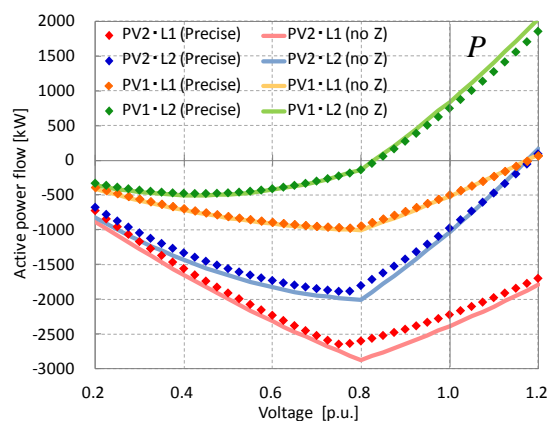
解析においては、PV 導入量パターン、負荷パターン、負荷特性をパラメータとする。PV 導入量および負荷パターンは表 5.4 に示す 4 通りを、負荷特性は、表 5.5 に示す 3 通りを検討する。PV は、各ノードに均等な割合で導入されているものとする。

V_0 の解析範囲は 0.2p.u. から 1.2p.u. とする。ただし、cP の負荷は、受電点電圧が大幅に低下した場合には過電流防止によって脱落するか定電流制御に切替ることが予想されるため、本論文においては cP の解析ケースのみ解析範囲の下限値を 0.6p.u. とする。

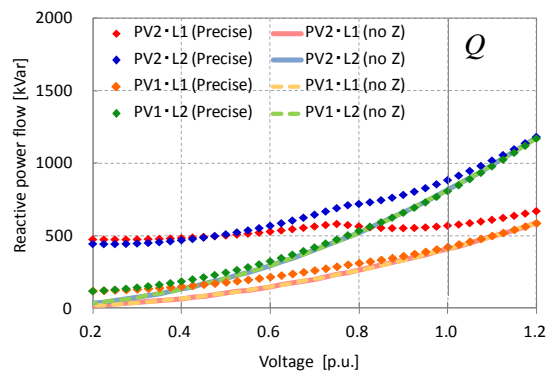
5.2.2 有効電力潮流の解析結果に対する考察

[1] PV と負荷の電圧特性に起因した各結果の傾向

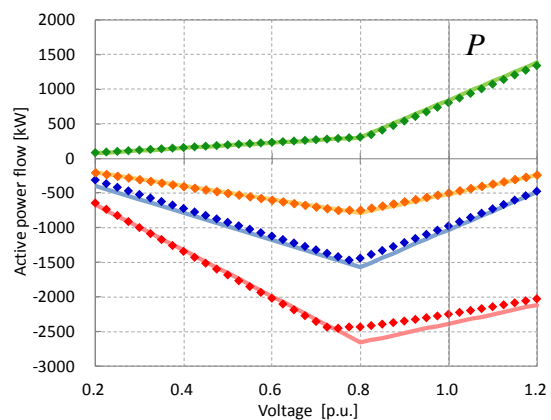
有効電力潮流 (P) の解析結果を図 5.3(a) に示す。縮約点を流れる P の特性は、全ての解析条件において、 V_0 が PV の制御切替電圧 (0.8p.u.) 付近においてその傾向が大きく変化した。これより、PV が大量導入された場合、個々の PV の出力制御は潮流特性に大きな影響を与えることがわかる。以下では、PV の制御切替電圧以上の領域と以下の領域のそれぞれにおいて、有効電力潮流特性について考察する。



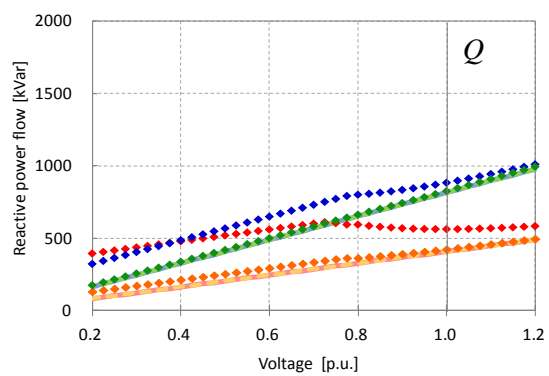
(a-1) Load characteristics: cZ (Active power flow)



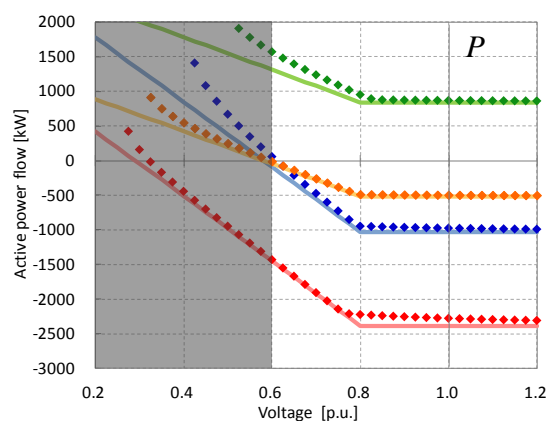
(b-1) *Load characteristics: cZ (Reactive power flow)



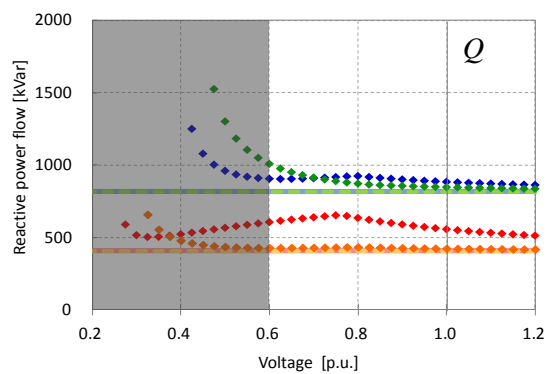
(a-2) Load characteristics: cI (Active power flow)



(b-2) *Load characteristics: cI (Reactive power flow)



(a-3) Load characteristics: cP (Active power flow)



(b-3)* Load characteristics: cP (Reactive power flow)

図 5.3 詳細配電システムモデルを用いて算出した縮約点の潮流

Fig. 5.3 Power flow at system reduction point by using detailed distribution system model

*注) システムインピーダンスを無視した解析 ([no Z]) では、負荷量が等しいパターンどうし ([PV2・L1]と [PV1・L1], [PV2・L2]と[PV1・L2]) の Q の特性が完全に一致している。

V_0 が0.8p.u.付近よりも高い場合において特筆すべき傾向は下記の2点である。

傾向(1) : cZ, cI では、初期状態の潮流によらず V_0 が低下すると P が減少。

…初期状態で逆潮流の3パターン ([PV2・L1], [PV2・L2], [PV1・L1]) では V_0 の低下に伴ってさらに逆潮流が増加し、初期状態で順潮流の[PV1・L2]パターンは V_0 の低下に伴って順潮流が減少した。特に、cZ・[PV1・L2]パターンでは、初期状態において順潮流であったが、電圧低下によって潮流の向きが反転し逆潮流が発生した。

傾向(2) : cZ, cI において、 V_0 に対する P の変化の割合 (dP/dV_0)は、初期状態の負荷量に依存する。負荷が大きいほど V_0 が低下した際に P が大きく減少。

…負荷パターンが[L2]のケースは、負荷パターンが[L1]のケースよりも dP/dV_0 が大きく、負荷特性・負荷量が等しいケースでは dP/dV_0 は同程度である。

傾向(1), (2)はともに系統電圧の低下に伴う負荷の消費電力の減少によって説明できる。cZ, cI の負荷は受電電圧の低下に伴い消費電力が減少するが、一方で PV は連系点電圧が0.8p.u.付近より高い範囲では定電力制御を行っており、電圧が変動しても発電出力は変化しない。このために、 V_0 が低下すると P が減少し (傾向(1))、その減少の割合は負荷量に依存する (傾向(2)) ことになる。当然、初期状態での負荷量が大きいケースの方が P の減少の割合は大きい。cZ・[PV1・L2] パターンにおいて V_0 の低下に伴って潮流方向が反転したのは、電圧低下により負荷の消費電力が PV の発電出力を下回ったためである。

縮約点電圧が0.8p.u.付近よりも低い場合における負荷特性ごとの傾向を下記に示す。

傾向(3) : cP では、電圧低下に伴い P が増加。

傾向(4) : cI では、 P は縮約点電圧にほぼ比例して変化。

傾向(5) : cZ では、電圧低下領域では負荷量の差異による P への影響が低下。

これらの傾向も、前項と同様に負荷と PV の電圧特性によって解釈できる。cP での電圧低下に伴う P の増加は、定電流制御を行う PV の発電出力の低下に由来している。cI では、負荷・PV とともに定電流制御となるため、 P は縮約点の電圧にほぼ比例して変化する。cZ では、PV からの発電電流は一定であるのに対し、負荷の電流は電圧低下により減少するために、負荷による P への影響が電圧低下領域では小さくなる。

[2] 系統インピーダンスによる傾向

図 5.3 によれば、ほとんどのケースにおいて、厳密解の P が系統インピーダンスを無視した場合の P よりも大きくなったが、解析条件によっては厳密解の P が小さくなる場合も見られた。これは以下の要因による。

系統インピーダンスにより P が増加する要因としては、

①系統インピーダンスによる損失

②逆潮流による電圧上昇に起因した cZ, cI 負荷の消費電力の増加

③順潮流による電圧降下に起因した定電流動作 PV の出力減少

が挙げられる。例えば、 $cP \cdot [PV1 \cdot L2]$ パターン・ PV が定電流制御をする領域では、①・③が原因となって P が増加し、 $cZ \cdot [PV2 \cdot L1]$ パターン・ PV が定電力制御をする領域では、①、②が原因となって P が増加した。

逆に、系統インピーダンスにより P が減少する要因としては、

①逆潮流による電圧上昇に起因した定電流動作 PV の出力増加

②順潮流による電圧降下に起因した cZ, cI 負荷の消費電力の減少

が挙げられる。このため、系統インピーダンスにより P が減少したのは、 $cZ \cdot [PV1 \cdot L2]$ および $cI \cdot [PV1 \cdot L2]$ の両ケースにおける PV が定電力制御をする領域などであった。

興味深い点としては、 cZ で PV が定電力制御をする領域では、 PV の導入によって系統インピーダンスによる傾向が反転することである。すなわち、 $[PV1 \cdot L2]$ パターンでは系統インピーダンスにより P が減少し、 $[PV2 \cdot L2]$ パターンなどでは系統インピーダンスにより P が増加した。

このように、系統インピーダンスによる影響は、負荷特性や PV の発電特性に比べれば小さいものの、 PV の導入によって傾向が変化する可能性もあり、その影響は複雑である。

5.2.3 無効電力潮流の解析結果に対する考察

無効電力潮流 (Q) の解析結果を図 5.3(b)に示す。解析範囲における無効電力潮流の傾向は下記のとおりである。

傾向(1) Q は、 PV 制御の閾値電圧前後でも、 P ほどには傾向は変化しない。

傾向(2) $V_0=1.0p.u.$ 付近の Q は、負荷量によってほぼ決定される。

傾向(3) cZ および cI の電圧低下領域では、 PV の導入量が多いほど Q が増加した。この傾向は特に、 cZ のときに顕著であった。

傾向(1), (2)の理由は、全ての PV が力率 1 制御を行っており、特に電圧が高い領域では負荷の消費無効電力が支配的となるためである。

一方で、 cZ および cI の電圧低下領域では負荷の消費無効電力は減少し、 Q の特性は PV の導入量に依存する傾向が見られた。(傾向(3)) 電圧低下領域において PV の導入が多いほど Q が増加した理由は以下の 2 つである。

①逆潮流の増加による無効電力損失の増加

② PV の出力による系統電圧の上昇に起因した負荷の消費無効電力の減少

以上のように、 PV が力率 1 制御を行う場合であっても、 PV は縮約点の Q に影響を与える可能性があり、特にその傾向は系統電圧低下領域において顕著となる。

5.3 提案縮約手法の有用性の検証

5.3.1 詳細配電システムモデルを用いた解析（厳密解）との比較

[1] 解析条件

縮約点電圧 V_0 が変化した場合の縮約点の潮流 P, Q を以下の2通りによって解析し、結果を比較することで、本論文第3章、第4章で提案した縮約等価回路の有用性を検証する。PVの導入分布は、前節と同じく各ノードに均等な割合で導入されているものとする。

(A) 厳密解 [Precise]

…前節の厳密解と同じ。（詳細配電システムモデルを用いて、各 V_0 に対して潮流計算を行う。）

(B) 提案縮約手法による解析 [Equivalent]

…提案縮約等価回路を用いて、縮約点電圧が変化した場合の潮流 P, Q を解析

[2] 解析結果

解析結果を図5.4に、解析範囲内での(B)の誤差のRMS値を表5.6にそれぞれ示す。

図5.4では、[PV2]パターンでは[PV1]パターンよりも誤差が若干増加したものの、全ての解析条件において(B)提案縮約手法による解析結果は(A)厳密解に高い精度で一致した。また図5.3との比較からわかるように、(B)提案縮約手法による解析は、負荷特性やPVの電圧特性による傾向だけでなく、5.2節で述べた系統インピーダンスによる影響も表現することができている。

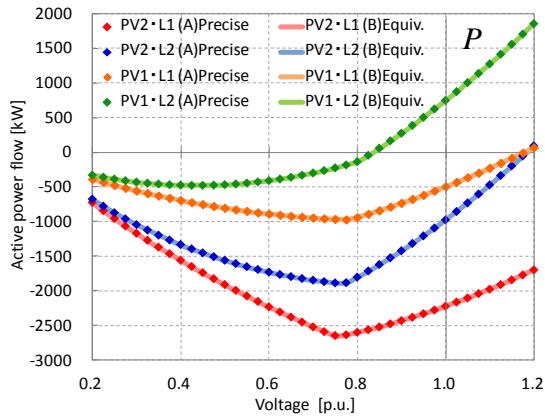
これより、提案縮約手法による解析は、第4章で検証した簡略配電フィーダモデルだけでなく、低圧システムまで含めた詳細な配電システムに対する潮流解析においても有用であることが確認された。

表 5.6 (B) 提案縮約手法による解析結果の誤差のRMS値

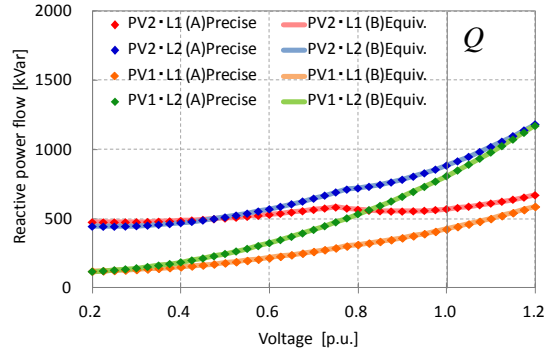
Table 5.6 Root Mean Square Value of error on analysis results using proposed method

	[PV2・L1]		[PV2・L2]		[PV1・L1]		[PV1・L2]	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
cZ	2.7kW	1.7kVar	1.7kW	1.0kVar	0.2kW	0.1kVar	0.3kW	0.04kVar
cI	1.0kW	0.5kVar	0.7kW	0.5kVar	0.1kW	0.1kVar	0.3kW	0.1kVar
cP*	1.0kW	1.7kVar	1.0kW	1.2kVar	0.1kW	0.04kVar	0.3kW	0.1kVar

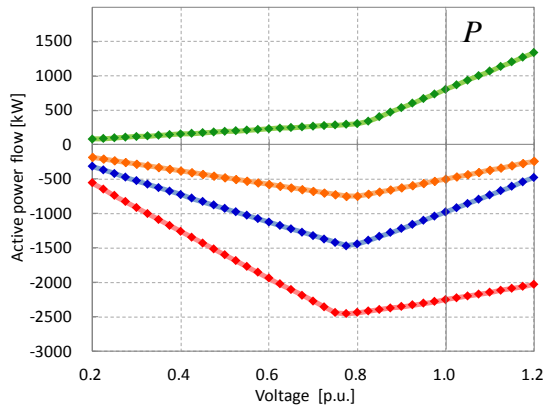
* cPのみ解析範囲は0.6~1.2p.u. 以下の表でも同様



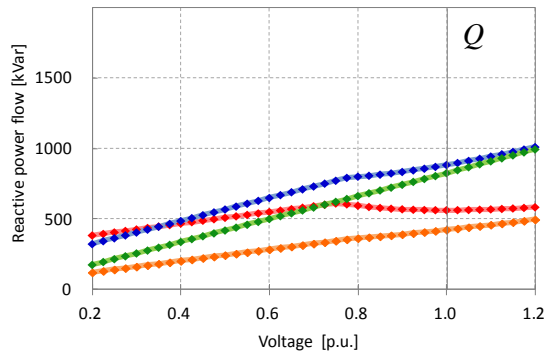
(a-1) Load characteristics: cZ (Active power flow)



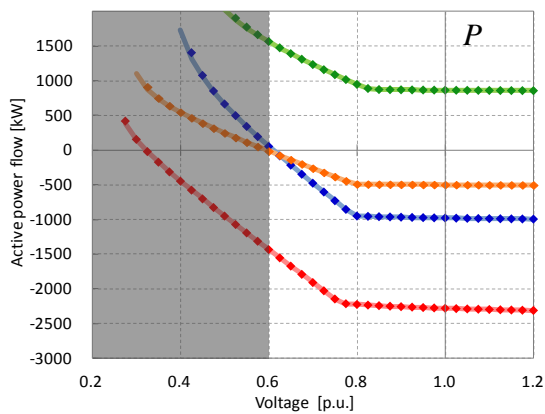
(b-1) Load characteristics: cZ (Reactive power flow)



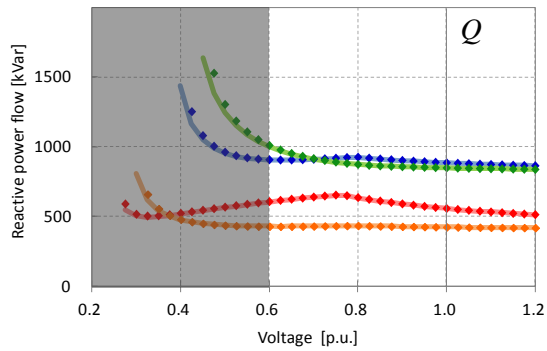
(a-2) Load characteristics: cI (Active power flow)



(b-2) Load characteristics: cI (Reactive power flow)



(a-3) Load characteristics: cP (Active power flow)



(b-3) Load characteristics: cP (Reactive power flow)

図 5.4 (B)提案縮約手法による解析結果と(A)厳密解の比較

Fig. 5.4 Comparison of analysis results using proposed reduction method with precise analysis

[3] 等価回路のパラメータに関する考察

各潮流断面における提案縮約等価回路のパラメータの値を表 5.7 に示す。

異なる潮流断面における各パラメータの値を比較すると、実部の差異は 0.05Ω 程度以内 (Z_{eq3} にて差異は最大。同差異は Z_{eq1} の大きさに対して約 5%) に、虚部の差異は 0.01Ω 程度以内 (Z_{eq1} にて差異は最大。同差異は Z_{eq1} の大きさに対して約 2%) にそれぞれ収まった。これより、異なる潮流断面において縮約手法を適用しても、PV および負荷の分布が等しければ、等価インピーダンスのパラメータ値には顕著な影響は表れないと言えよう。この理由は、提案縮約等価回路における等価インピーダンスは、縮約対象系統から負荷および PV の要素を分離したパラメータであり、その値は負荷や PV の導入分布が等しければ、負荷量や PV 出力自体には大きく依存しないためであると推察される。

各パラメータのオーダーについては、 Z_{eq1} のパラメータの大きさが他の 2 つのパラメータと比較して 5~10 倍程度大きな値を取っている。これは、解析条件として PV も負荷も各ノードに均等に導入された偏りの小さい系統状態を検討しているため、 Z_{eq2} および Z_{eq3} の値が小さくなったためと考えられよう。

また、4.2 節での主幹線のみを考慮した簡略配電フィーダモデルを用いた検討によれば、分岐配電線以下のインピーダンスが無視され PV も負荷も均等に導入されている簡易配電線モデルでは、 $Z_{eq1} + Z_{eq2}$ の大きさは主幹線の亘長インピーダンスの 1/3 程度になるが、本検討では各潮流断面における $Z_{eq1} + Z_{eq2}$ の平均値 ($0.574 + j0.886[\Omega]$) は、本モデルの主幹線の亘長インピーダンス (縮約点からノード#37 までのインピーダンス: $0.887 + j1.517[\Omega]$) の 1/3 の値よりも 2 倍程度大きくなった。これは、本モデルでは主幹線インピーダンス以外にも、分岐配電線、低圧系統、柱状変圧器のインピーダンスを考慮しているためである。

参考として、低圧系統の系統インピーダンスを無視した場合 (高圧系統のノードに直接低圧系統の負荷及び PV が連系しているとした場合) における等価インピーダンスの算出結果を表 5.8 に示す。

表 5.7 各潮流断面における Z 分離縮約等価回路のパラメータ [Ω]

Table 5.7 Parameters of Z-separated equivalent circuit at each analysis case [Ω]

	Z_{eq1}	Z_{eq2}	Z_{eq3}
[PV2・L1]	0.574+j0.893	-0.055-j0.047	0.115+j0.127
[PV2・L2]	0.573+j0.884	-0.053-j0.040	0.117+j0.131
[PV1・L1]	0.573+j0.884	-0.053-j0.040	0.117+j0.131
[PV1・L2]	0.574+j0.881	-0.055-j0.037	0.160+j0.132

表 5.8 各潮流断面における Z 分離縮約等価回路のパラメータ[Ω]
(低圧系統の系統インピーダンスを無視した場合)

Table 5.8 Parameters of Z-separated equivalent circuit at each analysis case[Ω]
(without considering impedance in low-voltage system)

	Z_{eq1}	Z_{eq2}	Z_{eq3}
[PV2・L1]	0.384+j0.654	0.012+j0.036	-0.002-j0.002
[PV2・L2]	0.383+j0.645	0.014+j0.043	0.000+j0.003
[PV1・L1]	0.383+j0.646	0.013+j0.044	0.001+j0.003
[PV1・L2]	0.385+j0.642	0.012+j0.046	0.002+j0.002

5.3.2 PV が均等分布でない場合における厳密解との比較

[1] 解析条件

本項では、PV の導入分布が均等分布でない場合において、提案縮約手法による解析の精度を検証する。PV の導入分布としては、下記の 3 ケースを検討する。PV の導入軒数は 3 ケースにおいて全て等しいものとする。各 PV 導入分布ケースの概念図を図 5.5 に示す。

①始端から順に導入 [Former]

…配電用変電所側のノードに連系する需要家から順に導入。

②均等分布 [Equal]

…各低圧系統に均等な割合で導入。(前項までの条件)

③末端から順に導入 [Latter]

…配電フィーダ末端側のノードに連系する需要家から順に導入。

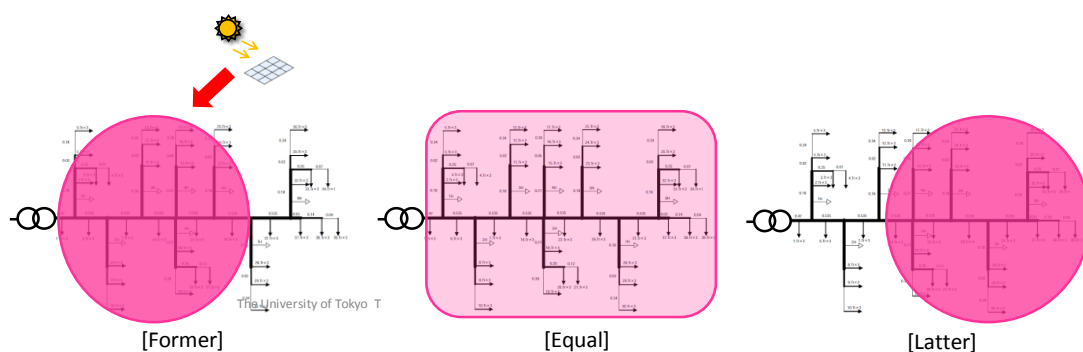


図 5.5 検討した PV 導入分布ケース

Fig. 5.5 Cases of PV's installation area

[2] 解析結果

各 PV 導入分布ケースにおいて、縮約点電圧 V_0 が変化したときの縮約点の潮流を(A)厳

密解, (B)提案縮約手法の2通りの解析手法によって算出した。潮流パターンは[PV1・L2], [PV2・L2]の2通りを検討し, 負荷特性はcZとした。解析結果を図5.6に示す。また, (B)提案縮約手法による解析の誤差を表5.9にまとめる。

まず, (A)厳密解どうしでのPV導入分布の差異を比較する。各PV導入分布による解析結果の差異を表5.10に示す。表5.10および図5.6より, PV導入分布の差異は P よりも Q に大きく影響を与えていること, ならびにPVが末端から順に導入されたケース([Latter])において Q が最も大きくなっていることがわかる。

これは, PVが末端寄りに導入された方が, 縮約点からPVの連系点までの間で生じる無効電力損失が増加することが主な理由である。本解析条件では系統インピーダンスのリアクタンス分が抵抗分よりも大きいいため, Q に顕著な影響が表れたと考えられる。なお, 系統インピーダンスが P , Q に与える影響については, 5.2節でも述べたように損失以外にも様々な要因があるが, 少々複雑であるため本論文では割愛する。

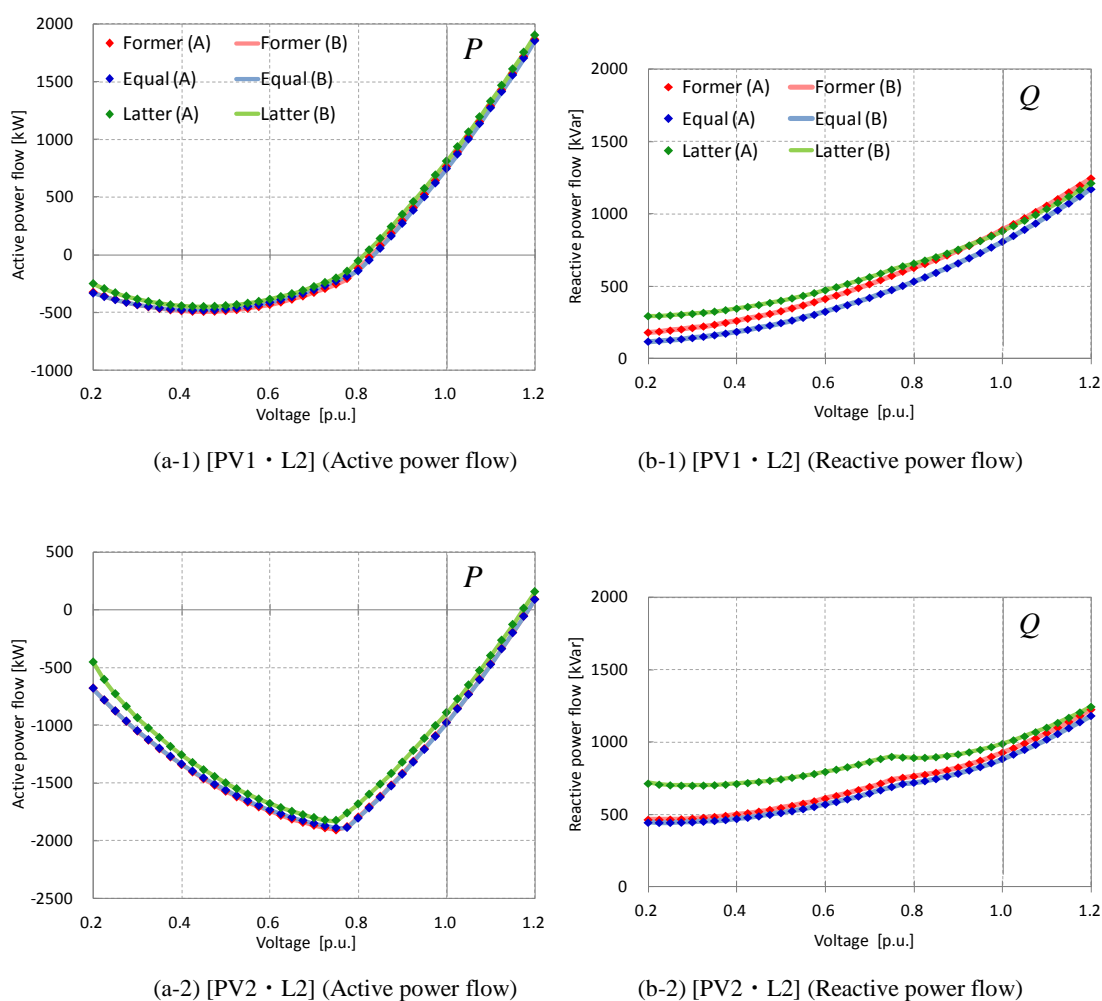


図 5.6 PV 導入分布の差異による比較

Fig. 5.6 Comparison of difference in PV's installation area

表 5.9 (B)提案縮約手法による解析結果の誤差の RMS 値 (PV 導入分布の差異による比較)

Table 5.9 Root Mean Square Value of error on analysis results using proposed method
(Comparison of difference in PV's installation area)

	Former		Equal		Latter	
	P	Q	P	Q	P	Q
[PV1・L2]	0.8kW	0.2kVar	0.3kW	0.04kVar	0.2kW	0.2kVar
[PV2・L2]	0.8kW	1.7kVar	1.7kW	1.0kVar	1.5kW	1.3kVar

表 5.10 (A)厳密解における PV 導入分布による解析結果の差異
(均等分布ケースからの差異の RMS 値)

Table 5.10 Root Mean Square value of Difference in power flow at system reduction point by
PV's installation area in (A) precise analysis difference from "Equal distribution case"

	Former		Equal		Latter	
	P	Q	P	Q	P	Q
[PV1・L2]	17.2kW	82.5kVar	-	-	53.9kW	130.1kVar
[PV2・L2]	9.1kW	38.8kVar	-	-	96.1kW	194.7kVar

次に、(A)厳密解と(B)提案縮約手法による解析結果を比較する。表 5.9 より、PV 導入分布が均等分布でない場合においても(B)提案縮約手法による誤差は RMS 値で 1kW 程度、1kVar 程度であり、PV 導入分布が均等分布の場合の誤差とほぼ変わらないことがわかる。

これより、本解析条件においては、本縮約手法の精度は PV の導入分布によらないことが確認された。また、表 5.10 に示したように、PV 導入分布による P , Q の差異の RMS 値は 10kW~100kW,程度 40kVar~200kVar 程度であったことから、表 5.9 と合わせて考慮すると、本縮約手法は PV 導入分布の差異を表現するにあたって十分な精度を持っていると言える。

[3] 等価回路のパラメータに関する考察

各 PV 導入分布における提案縮約等価回路のパラメータを表 5.11 に示す。

Z_{eq1} と Z_{eq2} に注目すると、4.2 節の簡略配電フィーダモデルを用いた検討と同じく、PV が末端に導入されているほど、 Z_{eq1} の値が大きくなり Z_{eq2} の値が小さくなっていることがわかる。これは、各 PV から縮約点までのインピーダンスの平均値の増加を、提案縮約等価回路では集約 PV と縮約点の間にある Z_{eq1} の増加によって表わしていると解釈することができる。この概念図を図 5.7 に示す。なお、4.2.1 項②、4.2.2 項の考察②で述べたように、 Z_{eq1} と Z_{eq2} の和は PV の導入分布によらずに各ケースともほぼ等しい値を取っている。

表 5.11 各 PV 導入分布における提案縮約等価回路のパラメータ [Ω]

Table 5.11 Parameters of Z-separated equivalent circuit at each analysis case [Ω]

PV 導入分布	潮流断面	Z_{eq1}	Z_{eq2}	Z_{eq3}
Former	[PV1・L2]	0.389+j0.580	0.128-j0.260	0.656+j0.784
	[PV2・L2]	0.500+j0.764	0.017-j0.077	0.215+j0.249
Equal	[PV1・L2]	0.574+j0.881	-0.055-j0.037	0.160+j0.132
	[PV2・L2]	0.573+j0.884	-0.053-j0.040	0.117+j0.131
Latter	[PV1・L2]	0.713+j1.106	-0.196-j0.266	1.001+j1.342
	[PV2・L2]	0.663+j1.027	-0.146-j0.187	0.517+j0.840

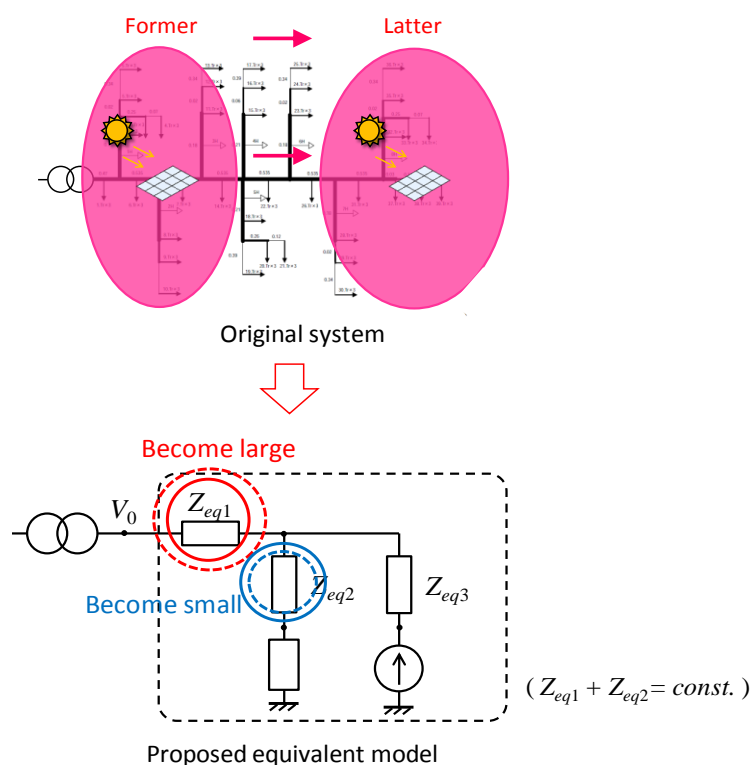


図 5.7 PV の導入分布の差異による Z_{eq1} , Z_{eq2} の変化

Fig. 5.7 Changes of parameters Z_{eq1} and Z_{eq2} for difference of PV's installation area

Z_{eq3} の値は、PV が均等分布ではない 2 ケース ([Former], [Latter]) では、均等分布ケース [Equal] よりも大きくなった。これは、[Former], [Latter] では、PV が導入されているノードにおいて低圧系統内での電圧上昇が大きくなるために、集約 PV の連系点電圧の調整の役割を果たす Z_{eq3} が増加したものと考えられる。

潮流断面 (PV 導入量) によるパラメータの差異を、各 PV 導入分布において比較すると、[Former], [Latter] においてはパラメータの差異が [Equal] よりも大きいことに気づく。だがこ

ここで、[Former]または[Latter]においては、フィーダの片端から順に PV を導入されていることに注意されたい。PV の導入量が多い[PV2・L2]のケースの方が、[PV1・L2]のケースよりも広域に PV が導入されていることを考えれば、[PV2・L2]のパラメータが[Equal]により近い値を取っていることは合理的な結果である。

5.3.3 等価インピーダンスの値の更新を行わない場合

前項までで示したように、個々の負荷、PV の発電出力・導入分布、系統インピーダンスの各値を予め得ることができれば、提案縮約手法から等価回路を算出し、縮約点の潮流を高い精度で求めることが可能である。しかし、負荷や PV の発電出力は解析対象とする各時間断面によって変化するため、時間断面が変わるごとに新たに提案縮約手法を適用し等価回路のパラメータ値を更新しなければならないというのでは、提案縮約手法は計算負荷や入力データ量の膨大さ等の観点から実用性に難があると言えよう。

一方で、5.3.1 項の結果によれば、PV 導入分布が等しい限りにおいては、異なる潮流断面において算出した提案縮約等価回路のパラメータ値には、大きな差異は見られなかった。そこで本項では、潮流断面が変わっても等価回路のパラメータの更新をしなかった場合の解析精度を検証するため、異なる潮流断面において算出したパラメータを用いて解析を行う。本項では、5.3.1 項の検討において等価回路のパラメータ値に差が見られた[PV2・L1]パターンと[PV1・L2]パターンに注目し、[PV2・L1]パターンで算出した等価回路のパラメータを用いて、[PV1・L2]パターンの解析を行う。解析手法の概念図を図 5.8 に示す。

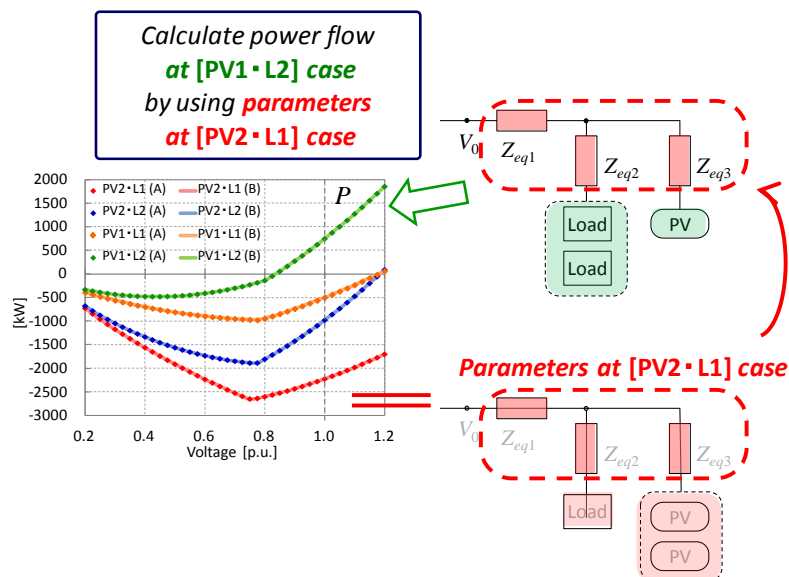


図 5.8 異なる潮流断面において算出した等価回路のパラメータを用いた解析

Fig. 5.8 Analysis by using parameters calculated in other system condition

解析結果を、[PV1・L2]パターンの(A)厳密解とともに図 5.9 に示す。また、(B)提案縮約手法による解析結果の誤差を、使用したパラメータの差異によって比較した結果を表 5.12 に示す。

表 5.12 より、異なる潮流断面において算出したパラメータを用いた場合の解析結果は、対象とする潮流断面において算出したパラメータを用いた解析結果と比較して、精度は若干落ちているものの、本解析条件では誤差は最大でも 5kW 程度(低圧需要家約 1800 軒中、5 軒分程度の消費電力)までに収まった。これより、本解析条件においては、配電系統あたり 5kW 程度までの誤差を許容するのであれば、ある潮流断面のもとで算出した等価回路のパラメータ値は、異なる潮流断面においても適用可能であることが確認された。

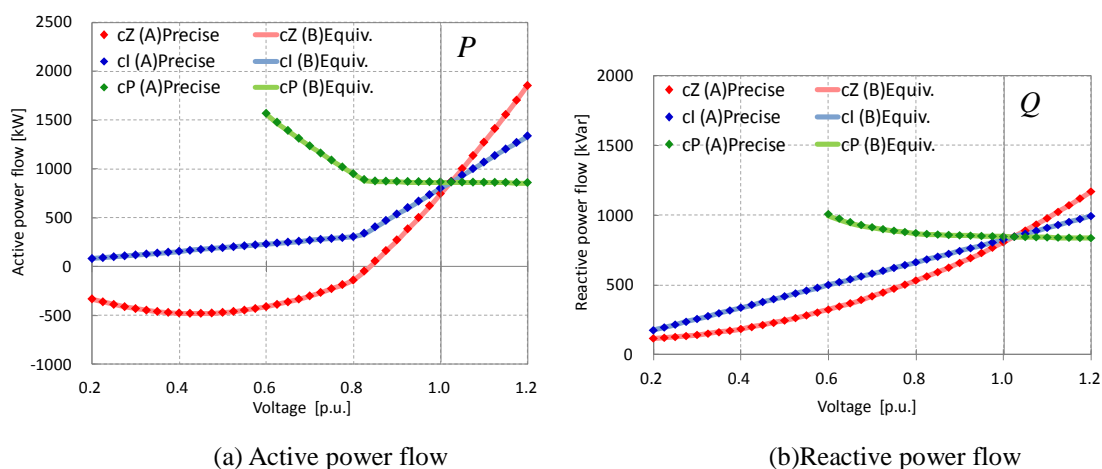


図 5.9 異なる潮流断面において算出したパラメータを用いた場合との比較

Fig. 5.9 Comparison with analysis results by using parameters calculated in other system condition

表 5.12 (B)提案縮約手法による解析結果の誤差の RMS 値

(異なる潮流断面において算出したパラメータを用いた場合との比較)

Table 5.12 Root Mean Square Value of error on analysis results using proposed method
(Comparison with analysis using parameters calculated in other system condition)

	対象とする潮流断面において算出したパラメータを用いた場合		異なる潮流断面において算出したパラメータを用いた場合	
	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
cZ	0.3kW (1.1kW)	0.04kVar (0.1kVar)	2.5kW (5.0kW)	1.3kVar (1.8kVar)
cI	0.3kW (0.8kW)	0.1kVar (0.3kVar)	2.4kW (5.2kW)	2.1kVar (2.3kVar)
cP	0.3kW (0.9kW)	0.1kVar (0.4kVar)	0.4kW (0.7kW)	0.1kVar (0.2kVar)

※括弧内は解析範囲内の誤差の絶対値の最大値

5.4 他の縮約手法を用いた場合との比較

前節までの結果より，本論文で提案する縮約等価回路の精度が高いことが示された。本節では，本論文で提案する縮約手法とは異なる下記の2つの縮約手法を用いて解析を行い，結果を比較する。

- ・(C) 系統インピーダンスを無視したモデル [no Z]
- ・(D) PV・負荷一括縮約モデル [Lump]

本節では，(D), (C)の順に検討を行う。

5.4.1 PVの発電特性を無視したモデルとの比較

まず，PVの発電特性を無視し，PVと負荷を一括して同一の負荷特性により表わしたモデル（以下，(D)PV・負荷一括縮約モデル，または単に(D)と称する。）を検討する。

(D)PV・負荷一括縮約モデルでは，縮約点の潮流は式(5.1)・式(5.2)によって計算される。

$$P = P_{(init)} V_0^\alpha \quad (5.1)$$

$$Q = Q_{(init)} V_0^\beta \quad (5.2)$$

ただし， $P_{(init)}$ ， $Q_{(init)}$ はそれぞれ縮約点電圧が1.0p.u.のときの有効電力潮流と無効電力潮流。 α, β は電圧特性指数であり，負荷がcZ, cI, cPのときそれぞれ $\alpha=\beta=2, \alpha=\beta=1, \alpha=\beta=0$ 。

(D)PV・負荷一括縮約モデルでは，例えば負荷特性がcZの場合にはPVの特性も定インピーダンス特性とみなし，縮約点の潮流が縮約点電圧の2乗に比例して変化すると考える。また，縮約対象系統内の系統インピーダンスについても考慮しない。ただし，初期状態($V_0=1.0$ p.u.)における潮流のみ与えられているものとする。(D)PV・負荷一括縮約モデルの概念図を図5.10に示す。

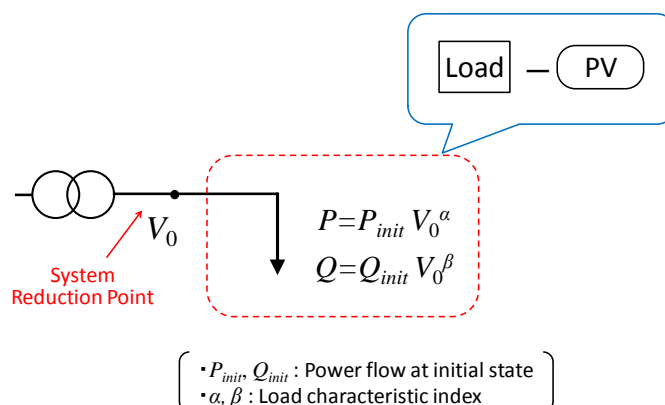


図 5.10 (D) PV・負荷一括縮約モデル

Fig. 5.10 (D) Lumped model for PV and load

解析では PV 導入量および負荷特性をパラメータとする。参考までに PV が導入されていない場合も解析を行う。(この場合には本モデルは単に系統インピーダンスを省略したモデルを意味する。) また、本節の解析では負荷パターンによる傾向の大きな違いは見られなかったため、負荷パターンは[L2]に固定した。

(D) PV・負荷一括縮約モデルによる解析結果 ([Lump]) を、前節の(A) 厳密解 ([Precise]) と比較した結果を図 5.11 に示す。結果の考察を、負荷特性ごとに分けて述べる。

[1] 負荷特性が cZ, cI のケース

PV 導入がない場合には、(D) PV・負荷一括縮約モデルを用いた解析結果の誤差は $P \cdot Q$ ともにほぼ見られなかった。しかし、PV が導入された場合においては誤差が増大し、いくつかの解析条件において(D)の有効電力解析結果は(A)厳密解と異なる傾向を示した。

縮約点電圧が 1.0p.u.よりも低い範囲では、cZ, cI ともに(D)は(A)厳密解よりも P が高くなった。これは、(D)では PV を定電流特性または定インピーダンス特性として表現しているために、電圧低下時の PV の発電出力を(A)厳密解よりも低く捉えているためである。

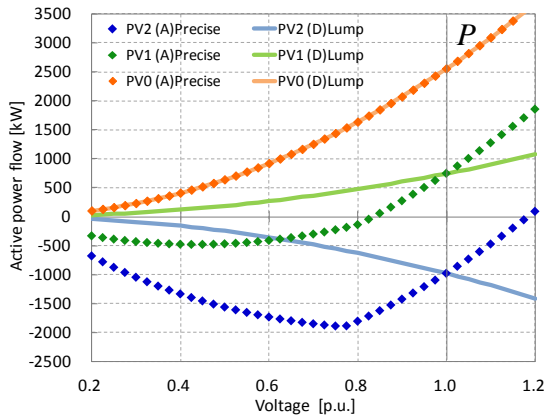
初期状態において逆潮流となっている[PV2]パターンでは、縮約点電圧が 0.8p.u.あたりよりも高い領域において、系統電圧の低下に伴うさらなる逆潮流の増加を(D)では表現できず、逆に電圧低下によって逆潮流量が減少する結果となった。5.2 節でも述べたように、同電圧領域では PV は定電力源であり、系統電圧が低下したときには負荷の消費電力のみが減少するため、厳密な解析を行えば逆潮流は増加することになるが、負荷と PV を一括して表現したモデルでは、このような負荷と PV の電圧特性の差異を表わすことはできない。同様の理由により、cZ・[PV2]パターンにおいて順潮流から逆潮流に潮流状態が反転する結果を、(D)では表現することができなかった。

無効電力については、PV による影響が有効電力ほど表れないため、cZ・[PV2]のケースを除いては(A)と(D)の結果に顕著な差は見られなかった。ただし、cZ・[PV2]のケースでは、図 5.11 (b-1)において[(D) Lump]の 3 ケースが重なっていることからわかるように、電圧低下領域において誤差が大きくなった。これは、(A)厳密解において系統インピーダンスによる影響が強く表れたのに対し、(D)では系統インピーダンスを無視しているためである。

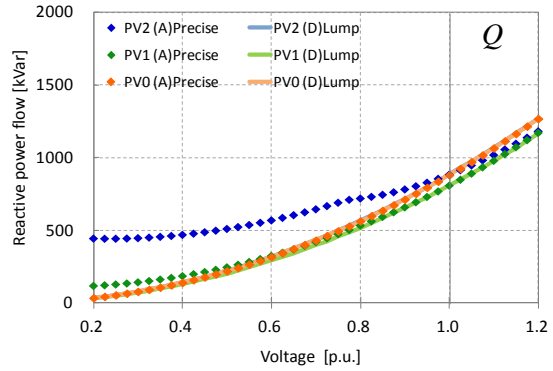
[2] 負荷特性が cP のケース

電圧が 0.8p.u.あたりよりも高い領域では PV は定電力制御を行っているため、PV と負荷を一括して定電力特性で模擬した(D)においても目立った誤差は生じなかった。PV が定電流制御を行っている電圧領域では、 P に関しては PV の導入率が高いほど誤差が増大した。

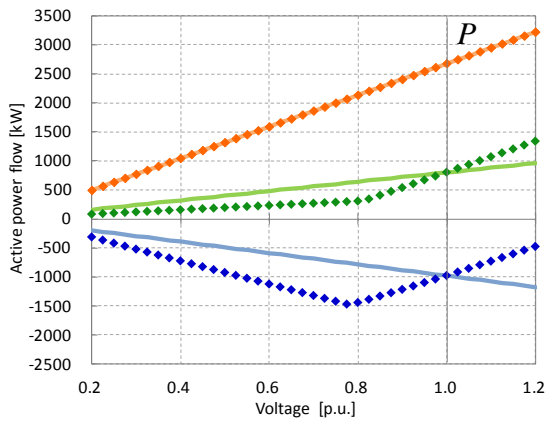
Q は、[PV0]のケースにおいて、電圧低下時に誤差が増大した。これは、[PV0]では電圧低下時において順潮流方向に過大な電流が流れるために、負荷の受電点電圧が低下し、その結果系統インピーダンスでの無効電力損失が増大したためと考えられる。



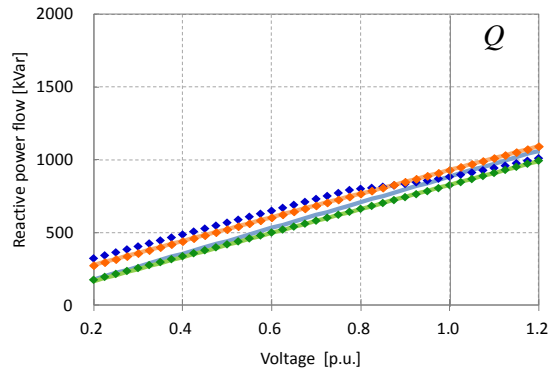
(a-1) Load characteristics: cZ (Active power flow)



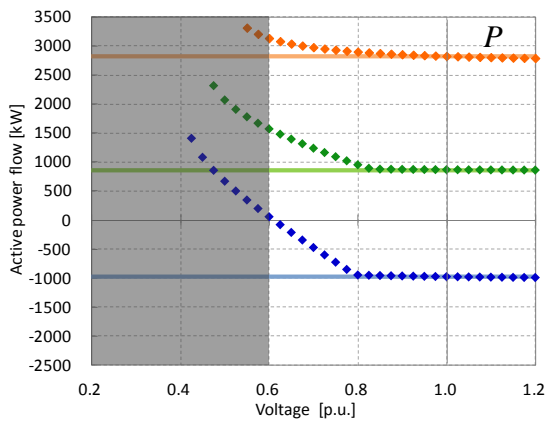
(b-1)* Load characteristics: cZ (Reactive power flow)



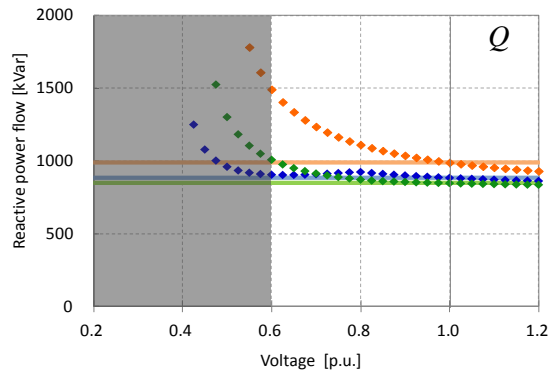
(a-2) Load characteristics: cI (Active power flow)



(b-2)** Load characteristics: cI (Reactive power flow)



(a-3) Load characteristics: cP (Active power flow)



(b-3) Load characteristics: cP (Reactive power flow)

図 5.11 (D) PV・負荷一括縮約モデルによる解析結果

Fig. 5.11 Analysis results with (D) Lumped model for PV and load

注) *(D)Lump (PV・負荷一括モデル) の Q の特性は、cZ では 3 本ともほぼ重なっている。

** (D)Lump (PV・負荷一括モデル) の Q の特性は、cI では [PV2] と [PV0] の 2 本がほぼ重なっている。

本項の解析結果を以下にまとめる。PV と負荷を一括して表現したモデルでは負荷と PV の電圧特性の差異を表現できず、負荷特性次第で潮流を実際よりも低く算出してしまう場合も、また逆に高く算出してしまう場合もあり、提案縮約等価回路を用いた解析と比較してはるかに精度が悪化した。特に、初期状態において逆潮流となっている条件においては、電圧低下時の傾向そのものを反対に捉えてしまう危険性も明らかになった。これらの危険性を排除するためには、少なくとも負荷と PV を別個のモデルによって表現し、かつ電圧低下時の PV の発電特性を正確に模擬した縮約を行う必要がある。

5.4.2 損失を無視したモデルとの比較

次なる縮約モデルとして、負荷特性および電圧低下時の PV の特性は正確に表現するが、系統インピーダンスを無視したモデル（以下、(C)系統インピーダンス無視モデル ([no Z]) または単に(C)と称する。）を検討する。なお、(C)系統インピーダンスを無視したモデルは、縮約対象系統内の全負荷および全 PV が、縮約点に直接連系していると仮定したモデルに等しい。(C)系統インピーダンスを無視したモデルを図 5.12 に示す。

各解析条件での潮流算出結果を図 5.13 に、(C)による解析結果 ([no Z]) と(A)厳密解 ([Precise]) との誤差を表 5.13 に示す。なお、図 5.13 は図 5.3 の再掲である。

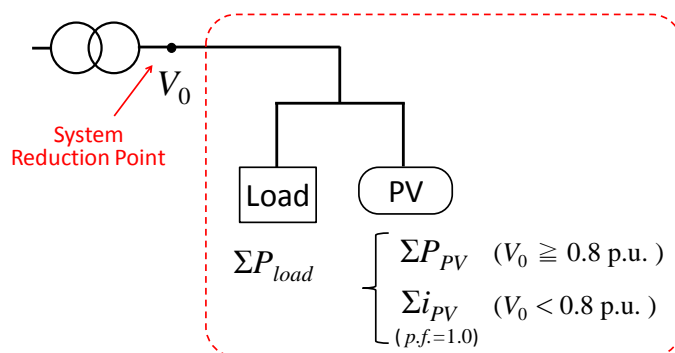
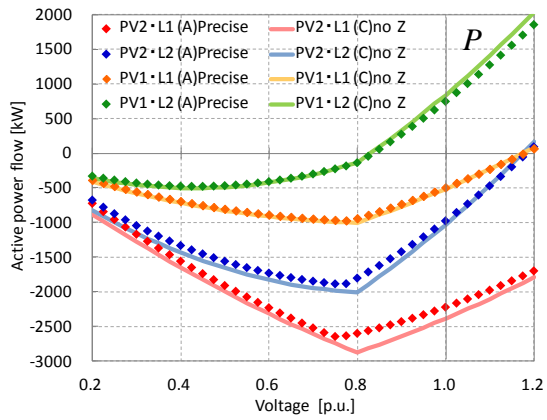


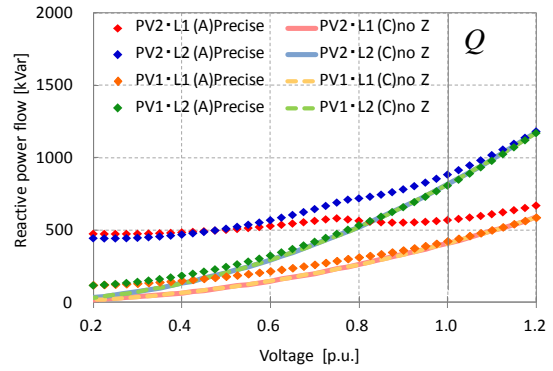
図 5.12. (C) 系統インピーダンスを無視したモデル

Fig. 5.12 (C) Equivalent model without considering system impedance

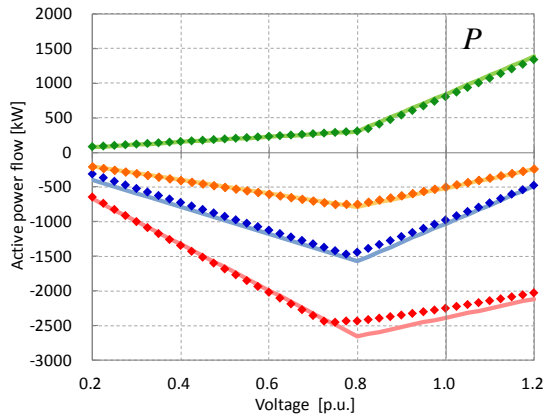
※図は定電力負荷の場合



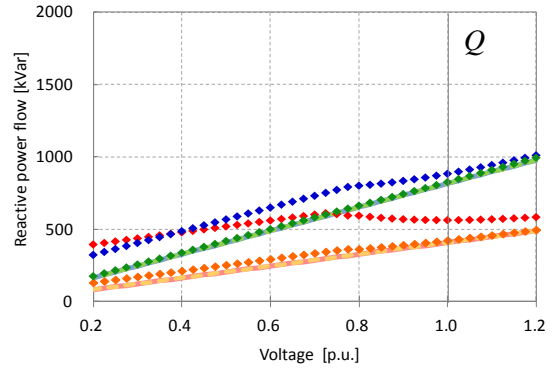
(a-1) Load characteristics: cZ (Active power flow)



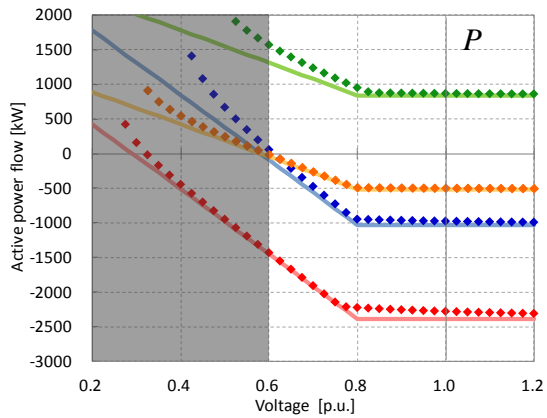
(b-1) *Load characteristics: cZ (Reactive power flow)



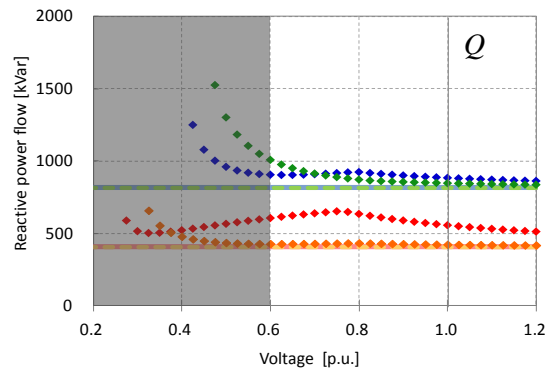
(a-2) Load characteristics: cI (Active power flow)



(b-2) *Load characteristics: cI (Reactive power flow)



(a-3) Load characteristics: cP (Active power flow)



(b-3)* Load characteristics: cP (Reactive power flow)

図 5.13 (C) 系統インピーダンスを無視したモデルによる解析結果

Fig. 5.13 Analysis results with (C) equivalent model without considering system impedance

*注) (C) 系統インピーダンスを無視した解析 ([no Z]) では、負荷量が等しいパターンどうし ([PV2・L1] と[PV1・L1], [PV2・L2]と[PV1・L2]) の Q の特性が完全に一致している。

表 5.13 (C) 系統インピーダンスを無視したモデルを用いた解析結果の誤差の RMS 値

Table 5.13 Root Mean Square Value of error on analysis results by using [no Z] model

	[PV2・L1]		[PV2・L2]		[PV1・L1]		[PV1・L2]	
	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
cZ	138kW (270kW)	331kVar (458kVar)	102kW (200kW)	252kVar (411kVar)	26kW (59kW)	65kVar (104kVar)	74kW (186kW)	39kVar (85kVar)
cI	99kW (221kW)	265kVar (317kVar)	62kW (127kW)	135kVar (162kVar)	16kW (39kW)	41kVar (51kVar)	26kW (50kW)	13kVar (18kVar)
cP*	95kW (161kW)	185kVar (247kVar)	72kW (147kW)	84kVar (111kVar)	19kW (33kW)	21kVar (28kVar)	106kW (256kW)	77kVar (195kVar)

括弧内は解析範囲内の最大誤差（絶対値）

表 5.13 によれば、(C)の解析結果は、cI・[PV1・L1]ケースのように全解析範囲において誤差が 50kW, 50kVar 程度に以下に収まる場合もあったが、一方で cZ・[PV2・L1]や cP・[PV1・L2]ケースにおいては、最大で 300kW 程度、450kVar 程度もの誤差が生じた。これは、cZ・[PV2・L1]ケースなどにおいては、縮約点の潮流の絶対値が比較的大きくなり、系統インピーダンスによる損失や負荷の受電点電圧の変化が顕著に表れるが、(C)系統インピーダンスを無視したモデルではそれらの影響を表現できないためである。

また、(C)系統インピーダンスを無視したモデルでは PV の導入分布を表現できないため、PV の導入分布次第ではさらに誤差が増大することが予想される。参考までに、PV が配電フィーダ末端から順に導入されたケース（[Latter] 5.3.2 項参照）と、系統インピーダンスを無視したモデルを比較した結果の一例を表 5.14 に示す。表 5.13 と表 5.14 との比較より、本解析条件では、PV の導入分布次第で *P, Q* ともに誤差の RMS 値が 2 倍程度増大する（*P* の誤差の RMS 値: 102kW→190kW, *Q* の誤差の RMS 値: 252kW→444kW,）ことが確認された。

表 5.14 (C) 系統インピーダンスを無視したモデルを用いた解析結果の誤差の RMS 値

(PV が末端から順に導入された場合の(A)厳密解との比較)

Table 5.14 Root Mean Square Value of error on analysis results by using [no Z] model

(comparison with (A) precise analysis results when PVs are installed in [Latter] distribution)

	[PV2・L2]・[Latter]	
	<i>P</i>	<i>Q</i>
cZ	190kW (373kW)	444kVar (680kVar)

括弧内は解析範囲内の最大誤差（絶対値）

本項の検討により、(C)系統インピーダンスを無視したモデルを用いた解析は、提案縮約手法を用いた解析よりも誤差が大きいこと、また(C)では提案縮約手法と異なり PV の導入分布を表現することができないために、PV の導入分布次第ではさらに誤差が増大する可能性があることが確認された。

5.5 本章のまとめ

本章では、詳細な配電システムモデルを縮約対象とし、縮約点電圧が変化したときの縮約点の潮流を様々な解析条件のもとで求め、本論文で提案する縮約手法の有用性の検証を行った。

5.2 節および 5.3 節の結果より、提案縮約手法から導出した縮約等価回路は、PV の導入された縮約対象システムの潮流特性を高い精度で算出することができることが確認された。また、Z 分離縮約等価回路の等価インピーダンスの値は潮流断面の差異による影響をほとんど受けないことが明らかになった。これより、ある潮流断面において等価回路のパラメータを求めれば、PV の出力分布が変化しない限り、異なる時間断面においても再度パラメータを更新することなく、縮約等価回路を得ることができる。

5.4 節では、本論文で提案するもの以外の縮約手法を用いて解析を行い、その精度の評価を行った。第一に検討を行った PV と負荷を一括して表現したモデルでは、負荷と PV の電圧特性の差異を表現できず、提案縮約等価回路を用いた解析と比較してはるかに精度が悪化した。第二に、系統インピーダンスを無視したモデルでは、系統インピーダンスによる損失や、負荷・PV の受電点電圧の変化を表現できないために、提案縮約手法よりも誤差が増加した。また、PV の導入分布次第ではさらに誤差が増大する可能性があることも確認された。対して、提案縮約等価回路は PV の導入分布もパラメータの変化によって表現できるため、PV が均等に分布していない場合においても、高い精度で縮約点の潮流を算出できることが示された。

第6章 縮約モデルの差異が過渡安定度に与える影響の評価

第6章では, PV の導入された配電系統の縮約モデルの差異が過渡安定度に及ぼす影響について評価する。

過渡安定度解析には, 一機無限大母線系統に負荷供給系統が連系したモデルを基幹系統モデルとして用いる。事故後の発電機について電力相边角曲線 (P- δ カーブ) を描き, 等面積法により CCT(Critical Clearing Time)を算出することで, 過渡安定度の比較を行う。

縮約対象は, 負荷供給系統末端に連系する配電系統とする。縮約モデルとして, 第5章において扱った下記の3通りを検討する。各縮約モデルを図6.1に示す。本章では, (D), (C), (B)の順に解析を行う。

- ・ (B) 提案縮約等価回路 [Equivalent]
- ・ (C) 系統インピーダンスを無視したモデル [no Z]
- ・ (D) PV・負荷一括縮約モデル [Lump]

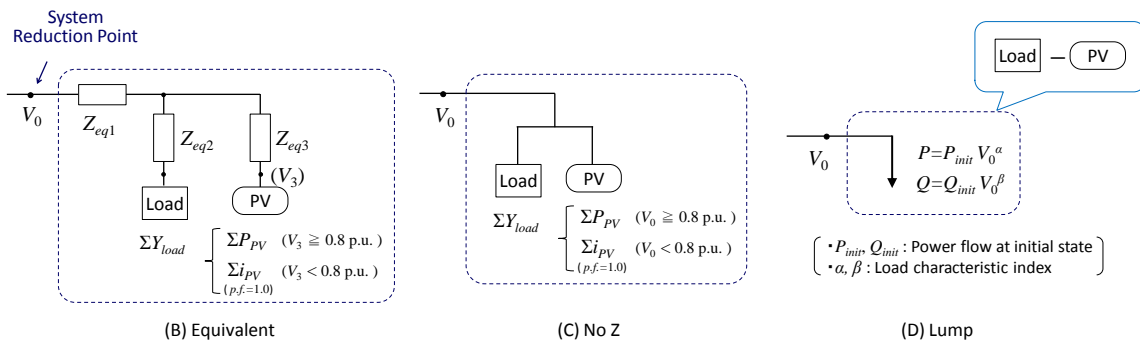


図 6.1 検討する縮約モデル

Fig. 6.1 Equivalent model examined in this chapter

(図は定インピーダンス特性の負荷の場合)

6.1 一機無限大母線系統モデル

6.1.1 基幹系統モデル

解析に用いる系統モデルを図6.2に示す。発電機モデルは発電所の発電機群を, 無限大母線は発電所から見た主系統を表わしている。発電機昇圧用変圧器の2次側母線(500kV)には負荷供給系統が連系している。本論文では, 発電機の制御系は考慮せずに, 発電機モデルとして x_d' 背後電圧一定モデルを用いる。変圧器のタップ比は1.0とする。モデルの諸定数は付録Cに示す。

事故ケースは母線 2 至近端の送電線における三相短絡事故とする。事故中は母線 2 の電圧の大きさは 0，発電機の出力は 0 となる。事故除去は送電線一回線開放により行う。

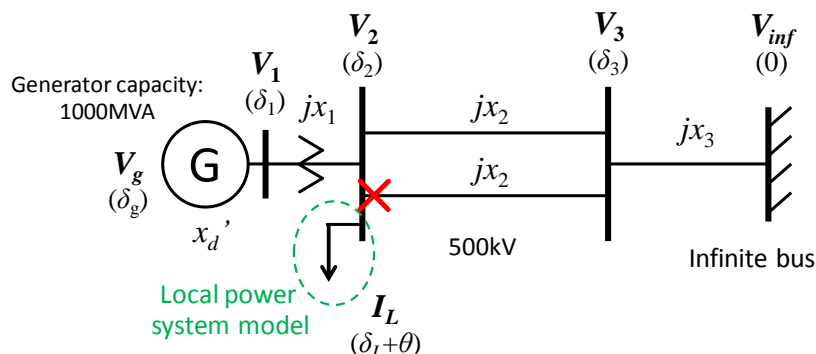


図 6.2 一機無限大母線系統モデル (系統容量 1000MVA)

Fig. 6.2 One-machine-to-infinite bus system model (System capacity: 1000MVA)

6.1.2 負荷供給系統モデル

解析で用いる負荷供給系統モデルを図 6.3 に示す。本モデルは電気学会拡充モデル (West10) における下位系統モデルを参考にしており，基幹系統母線から多数の配電系統まで数ルートに分岐しながら伸びる負荷供給系統を 1 ルートに集約して表わしている。負荷供給系統モデルの末端には，配電線容量 3000kVA の配電フィーダが 250 本並列に連系している。本論文では，簡単のため負荷供給系統モデルの要素として送電線インピーダンスと変電所の変圧器インピーダンスのみを考慮し，66kV に連系する超高压需要家，超高压系に導入される発電機，変電所の調相設備などは考慮しない。

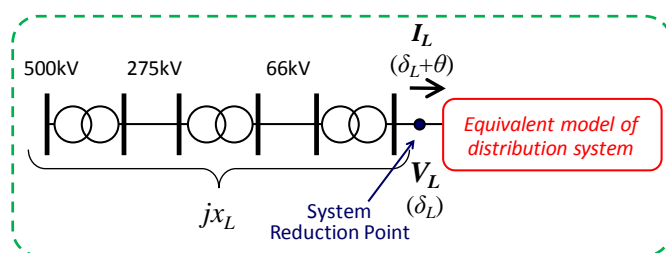


図 6.3 負荷供給系統モデル

Fig. 6.3 Local power system model

6.1.3 配電系統モデル

本解析における縮約対象である。配電系統モデルとしては，第 5 章で縮約対象とした住宅地区配電フィーダモデルが並列に 250 本連系したモデルを用いる。本論文では住宅地区

以外の配電フィーダは考慮せず、それぞれの条件において 250 本の配電フィーダモデルには同一のモデルを用いる。

縮約モデルとしては、図 6.1 に示した 3 通りを検討する。各縮約モデルの説明は、次節以降で述べる。

配電システムの負荷および PV 導入量を表 6.1 に示す。PV 導入量は、第 5 章と同様に[PV1]パターン（需要家 3 軒につき 1 軒の割合で導入）、[PV2]パターン（需要家 3 軒につき 2 軒の割合で導入）の 2 通りを検討する。負荷パターンは第 5 章で用いた[L2]パターンを用いる。また、本章では特に明記しない限り、PV の導入は均等分布、負荷特性は cZ（定インピーダンス特性）とする。

表 6.1 配電システムの PV 導入量および負荷

Table 6.1 PV installation and customer's load in distribution system

PV 導入割合	250 本の配電フィーダの合計（1 配電フィーダあたり）		
	PV 導入量	負荷	負荷潮流－PV 潮流
[PV1] (1 軒/3 軒)	470MW (1900kW)	680MW+200MVar (2700kW+800kVar)	210MW+200MVar (840kW+810kVar)
[PV2] (2 軒/3 軒)	940MW (3700kW)	680MW+200MVar (2700kW+800kVar)	-260MW+200MVar (-1000kW+810kVar)

全負荷の受電点電圧，全 PV の連系点電圧がともに 1.0p.u.としたときの値。有効数字 2 桁表記。

6.1.4 発電機運用方針

x_d 背後電圧の大きさは、初期状態において発電機母線の電圧(v_1)が 1.0pu になるように定める。初期状態での発電機の出力は PV 導入量に応じて表 6.2 のように変える。なお、本章における「初期状態」とは事故前における状態のことであり、第 5 章での初期状態（縮約点電圧が 1.0p.u.の状態）とは異なることを注意されたい。

表 6.2 初期状態における発電機出力

Table 6.2 Output power of generator at initial state

PV 導入割合	初期状態における発電機出力
[PV1]	600MW (0.6p.u.)
[PV2]	800MW (0.8p.u.)

6.2 PV・負荷一括モデルによる解析

6.2.1 解析に用いた縮約モデル

本節では、下記の2ケースにおいて過渡安定度解析を行い、結果を比較する。

(A) 厳密解 [Precise]

…詳細配電系統モデルを用いた解析。縮約モデルは用いない。前章での潮流計算から得た、縮約点電圧と縮約点の潮流の関係を用いて過渡安定度解析を行う。

(D) PV・負荷一括縮約モデルを用いた解析 [Lump]

…PVの発電特性を無視しPVと負荷を一括して同一の負荷特性(cZ)により表わした縮約モデルとして用いた解析。

各解析手法における縮約点の潮流の解析結果を図6.4に示す。図6.4の横軸は縮約点電圧であり、縦軸には配電フィーダ250本分の潮流の和を系統基準(1000MVA)ベースで示している。5.4.1項でも述べたように、(D)PV・負荷一括モデルを用いた解析では、PVの発電出力特性を無視しているために、[PV2]パターンにおいて電圧が1.0p.u.から低下した際に逆潮流がさらに増加する現象や、[PV1]パターンにおいて縮約点の電圧低下に伴い縮約点の潮流方向が反転する(順潮流から逆潮流になる)現象を表現できていない。

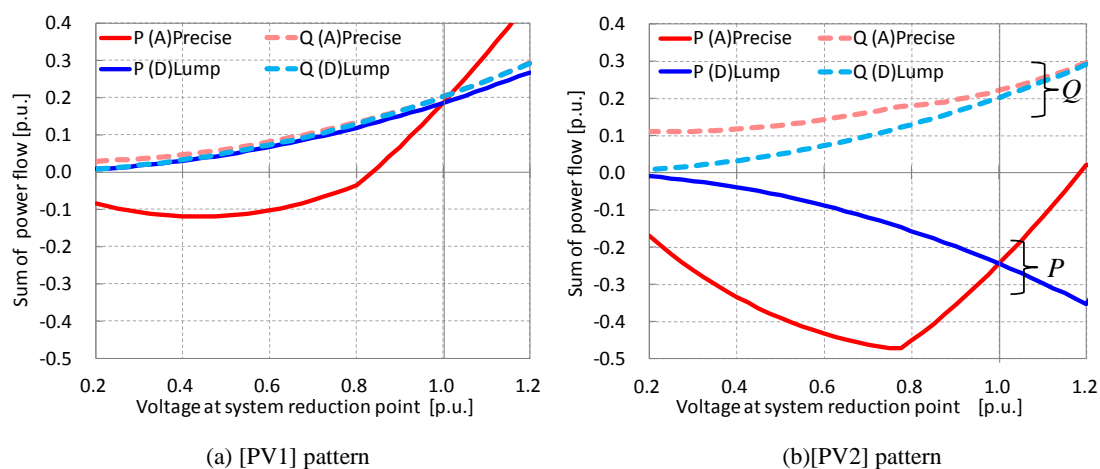


図 6.4 (D) PV・負荷一括モデルにより求めた縮約対象系統の電圧－潮流特性

Fig.6.4 Voltage-power flow characteristics at system reduction point calculated by using (D) lumped model for PVs and load

6.2.2 解析結果

過渡安定度解析結果として、CCTの算出結果を表6.3に示す。また、事故除去後のP- δ カーブ、および事故除去後における発電機相対角に対する縮約点電圧の変化を図6.5に示す。図6.5(a)P- δ カーブでは、初期状態における相対角 δ_{init} (◆印)、臨界事故除去相対角 δ_{cr} (▲印)、発電機が安定運転可能な最大相対角 δ_{end} (●印)も併記している。

表 6.3 (D) PV・負荷一括モデルによる CCT 算出結果 [sec]

Table 6.3 CCT calculated by using (D) lumped model for load and PVs [sec]

	(A) Precise	(D) Lump
[PV1]	0.127	0.149
[PV2]	0.117	0.210

※解析精度に基づいた有効数字は3桁 以下も同様

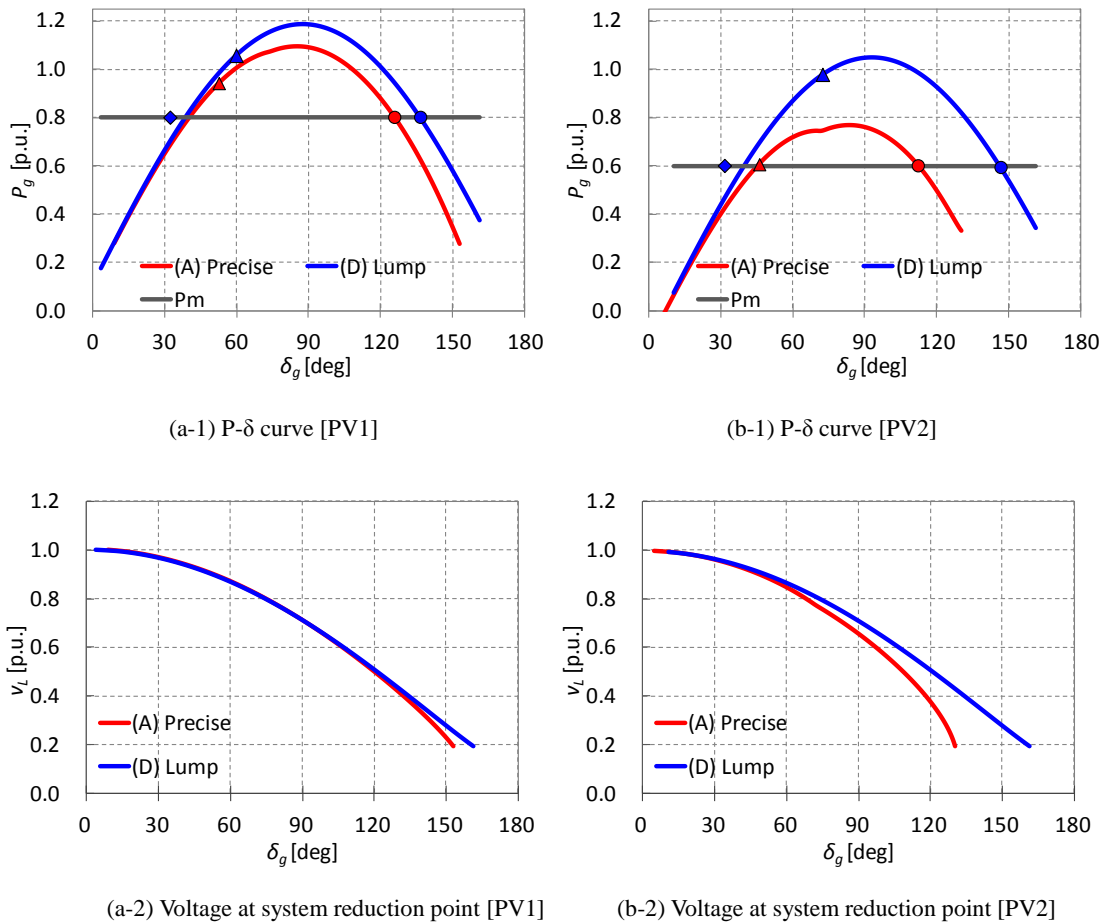


図 6.5 (D) PV・負荷一括モデルによる解析結果

Fig. 6.5 Analysis results by using (D) lumped model for load and PVs

(D)PV・負荷一括モデルでは、[PV1]、[PV2]ともに CCT 算出結果に顕著な誤差が見られた。特に[PV2]のパターンの誤差は 100msec 程度ともなった。PV の特性を無視した一括モデルでは、PV 導入量が高いほど過渡安定度解析の誤差が増大することがわかる。

また、特筆すべきは[PV1]、[PV2]の両ケースにおいて(D)の CCT は(A)よりも長くなっていることである。これは、PV の特性を無視して下位システムの潮流特性を表現する PV・負荷一括集約モデルでは、現実には生じ得る過渡安定度の不安定性を見過ごしてしまう危険性があることを示唆している。この理由としては、(D)では PV と負荷の電圧特性の差異によ

て生じる、電圧低下に伴う負荷端からの発生電力の増加（または負荷端での消費電力の減少）を表現できないために、負荷端での電力消費による発電機の減速エネルギーを(A)よりも高く見積もってしまったことが原因であると考えられる。

より精度の高い過渡安定度解析のためには、少なくとも負荷と PV を別個のモデルによって表現し、かつ電圧低下時の PV の発電特性を正確に模擬した縮約を行う必要がある。

参考として、事故後の発電機位相角に対する縮約点における有効電力潮流を図 6.6 に示す。例として相差角が 90° のときの(A)と(D)の有効電力潮流を比較すると、[PV1]パターンでは 0.15p.u.程度、[PV2]パターンでは 0.30p.u.程度の差が生じており、またその差分の半分以上が発電機の出力によって調整されていることが図 6.6(a-1),(b-1)から確認できる。これより、縮約モデルの差異による負荷端での消費電力の差は、至近端の発電機の出力に大きな影響を及ぼすことがわかる。

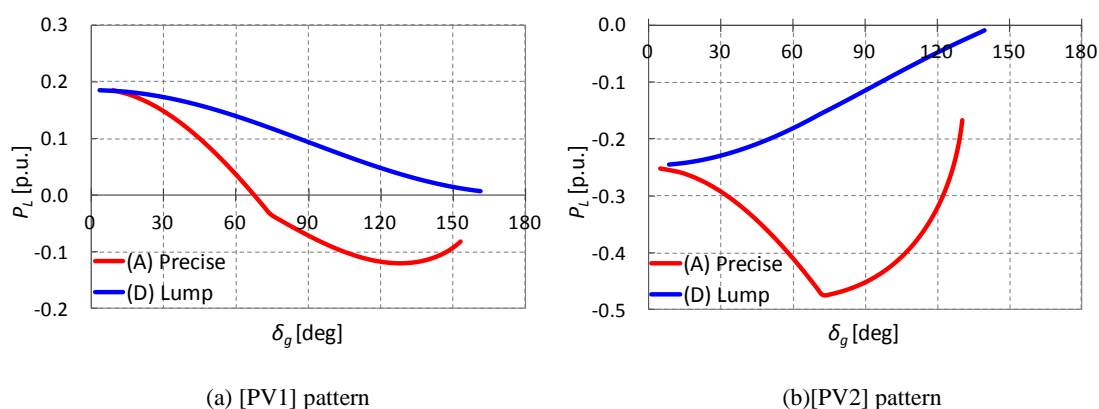


図 6.6 縮約点での有効電力潮流の比較

Fig. 6.6 Comparison of active power flow at system reduction point

6.3 系統インピーダンスを無視したモデルとの比較

6.3.1 解析に用いた縮約モデル

本節では、下記の3ケースにおいて過渡安定度解析を行い、結果を比較する。

(A) 厳密解 (PV 均等分布) [(A) Equal]

…全配電系統において PV が均等分布。(前節の(A)厳密解と同じ)

(A) 厳密解 (PV 末端分布) [(A) Latter]

…全配電系統において、末端から順に PV を導入。

(C) 系統インピーダンスを無視した縮約モデルを用いた解析 [(C) no Z]

…配電系統の系統インピーダンスを無視し、全負荷および全 PV が縮約点に直接連系しているとしたモデルによる解析。ただし、負荷の総消費電力、PV の総導入量、および負荷特性・PV の発電特性は既知とする。

縮約点電圧に対する縮約点の潮流の変化を図 6.7 に示す。第 5 章でも述べたように、系統インピーダンスを無視したモデルは、[PV2]パターンにおいて、負荷特性が cZ のもとでは、PV から縮約点までの系統インピーダンス値が等価的に長く見える PV 末端導入のときに誤差が増大する。特に、電圧低下時の無効電力潮流については誤差が大きい。これらの縮約モデルの差異が過渡安定度解析結果に与える影響を検討する。

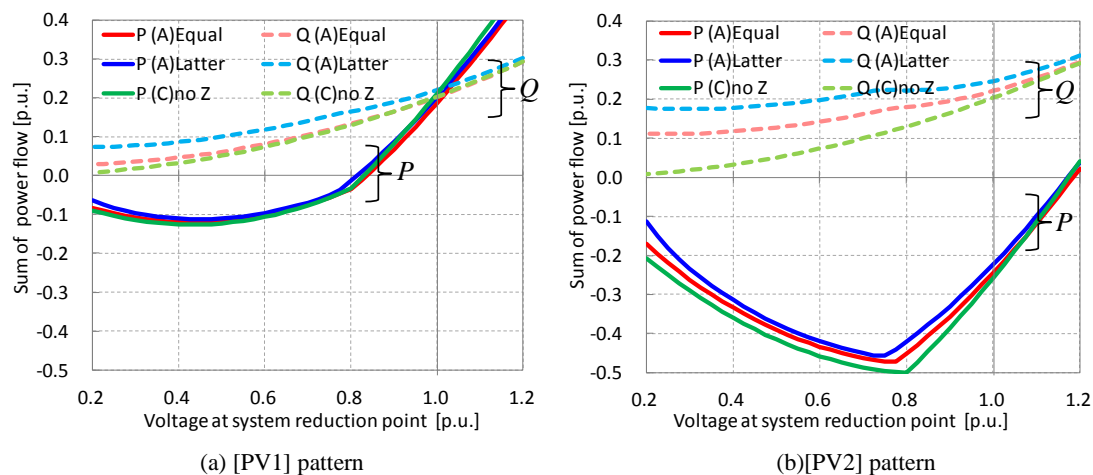


図 6.7 (C) 系統インピーダンスを無視したモデルにより求めた縮約対象系統の電圧－潮流特性

Fig.6.7 Voltage-power flow characteristics at system reduction point calculated by using (C) equivalent model without considering system impedance

6.3.2 解析結果

過渡安定度解析結果を表 6.4 および図 6.8 に示す。また、事故後の発電機位相角に対する縮約点における潮流を図 6.9 に示す。

PV が均等分布しているケースにおいて厳密解と(C)系統インピーダンスを無視したモデルを比較すると、[PV1]パターンでは両者の間に有為な差は見られなかった。また、[PV2]パターンでも、縮約点の電圧に差は生じたものの、CCT の差は 4msec 程度に収まった。

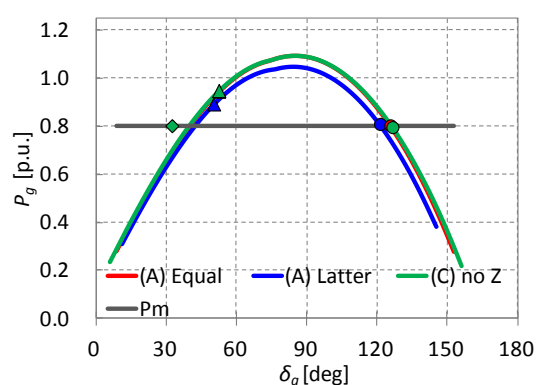
一方で、PV が末端導入されているケースでは、[PV1]、[PV2]パターンともに(C)系統インピーダンスを無視したモデルでは CCT 算出結果に 10msec 程度の誤差が生じた。また、(C)の CCT は、[PV1]パターン、[PV2]パターンともに (A)よりも長くなり、(C)ではいわゆる楽観サイドの結果となった。末端導入の[PV2]のパターンにおいては相差角が増加したときの縮約点電圧にも顕著な影響が表れた。相差角 90° のときに縮約点電圧の差は 0.06p.u. 程度 (6.6kV 換算で約 0.4kV)、安定限界に近い相差角 110° 付近では 0.10p.u. (6.6kV 換算で約 0.7kV) もの差が生じた。

本節の解析結果をまとめると、系統インピーダンスを無視した縮約モデルを用いた場合には、PV が均等に分布されている限りにおいては、本解析条件では PV の導入量が負荷の消費電力を大きく上回る場合を除いて過渡安定度解析結果に有為な誤差は生じなかった。しかし、PV が末端から順に導入された場合には、電圧低下時の負荷端での無効電力消費量の増加を表現できないために、過渡安定度解析結果に誤差が発生する可能性がある。このため、より精度の高い解析のためには、PV の導入分布についても考慮可能な縮約モデルによって、PV の導入された縮約対象系統を表現する必要がある。

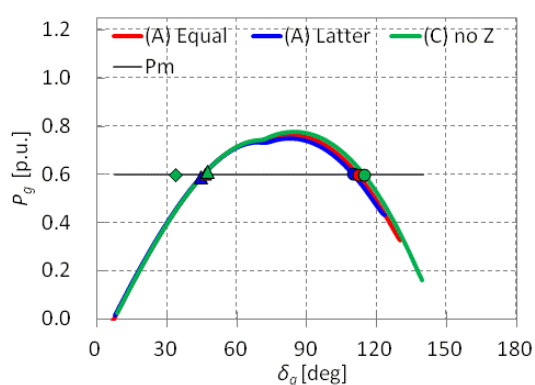
表 6.4 系統インピーダンスを無視した縮約モデルによる CCT 算出結果 [sec]

Table 6.4 CCT calculated by using equivalent model without considering system impedance [sec]

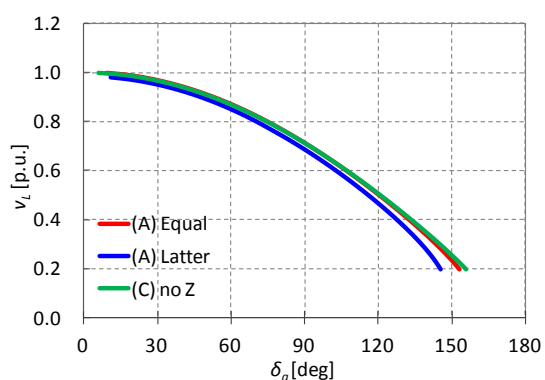
	(A) Precise [Equal]	(A) Precise [Latter]	(C) no Z
[PV1]	0.127	0.115	0.127
[PV2]	0.117	0.110	0.121



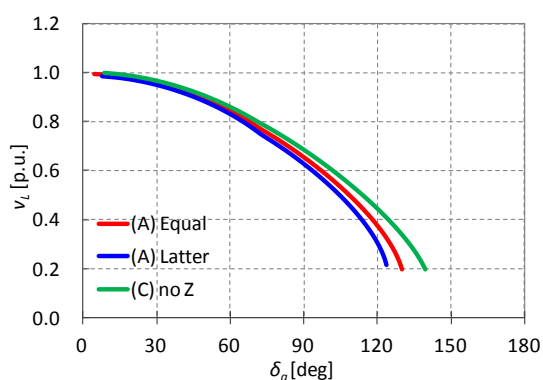
(a-1) P-δ curve [PV1]



(b-1) P-δ curve [PV2]



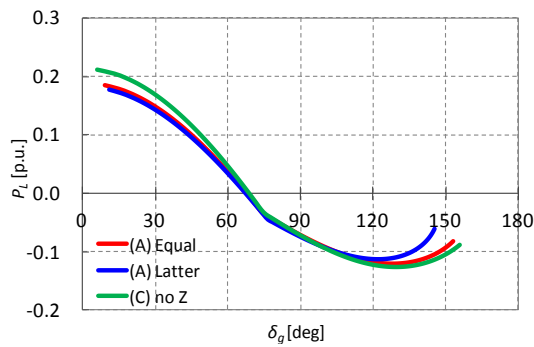
(a-2) Voltage at system reduction point [PV1]



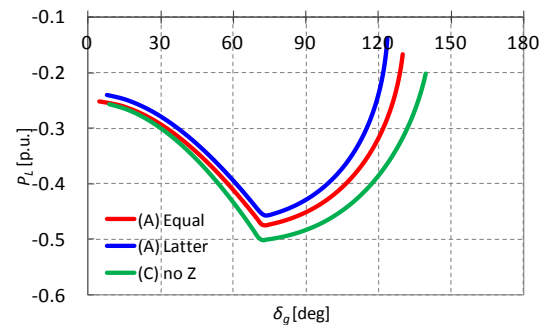
(b-2) Voltage at system reduction point [PV2]

図 6.8 (C) 系統インピーダンスを無視した縮約モデルによる解析結果

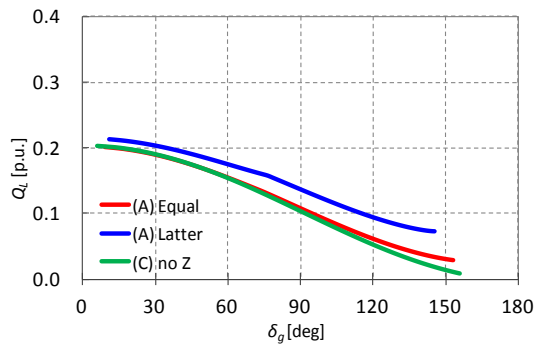
Fig. 6.8 Analysis results by using (C) equivalent model without considering system impedance



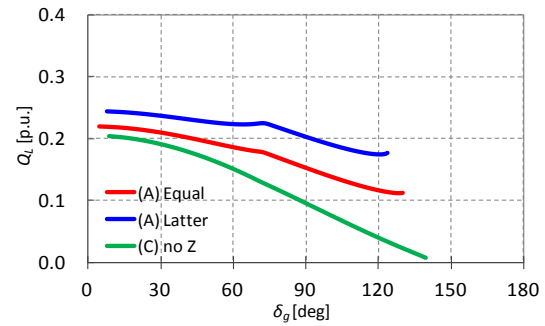
(a-1) Active power flow [PV1]



(b-1) Active power flow [PV2]



(a-2) Reactive power flow [PV1]



(b-2) Reactive power flow [PV2]

図 6.9 縮約点での潮流の比較

Fig. 6.9 Comparison of power flow at system reduction point

6.4 提案縮約等価回路を用いた解析

6.4.1 解析に用いた縮約モデル

本節では、下記の3ケースにおいて過渡安定度解析を行い、結果を比較する。

(A) 厳密解 [Precise]

…前節までの(A)厳密解と同じ。PVは均等分布とする。

(B) 提案縮約等価回路を用いた解析(1) [Equivalent(1)]

…提案縮約手法により配電系統モデルを縮約した等価回路を用いた解析

(B') 提案縮約等価回路を用いた解析(2) [Equivalent(2)]

…異なる潮流断面において算出したパラメータ値を設定した提案縮約等価回路を用いた解析。本節では、第5章表5.7に示す[PV2・L1]パターンにおいて算出したパラメータ値を用いる。

各解析条件における縮約点電圧と縮約点潮流の関係を図 6.10 に示す。第 5 章の結果によれば、提案縮約等価回路を用いた解析結果は、異なる潮流断面から算出した等価インピーダンスを用いた場合でも、配電フィーダ 1 本当たりの誤差は数 kW 程度、数 kVar 程度であった。この誤差が過渡安定度解析結果にどの程度の結果を与えるか、一機無限大母線を用いた解析により検討する。

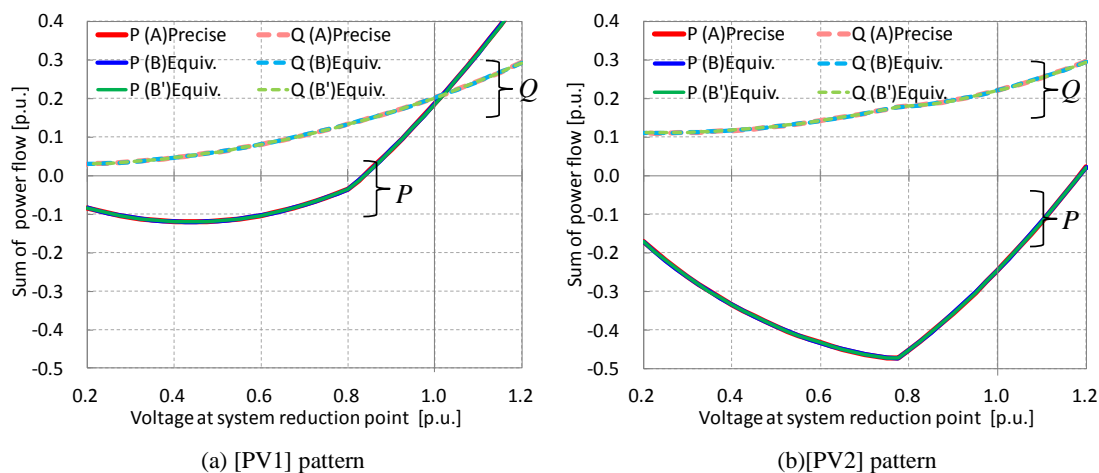


図 6.10 提案縮約等価回路により求めた縮約対象系統の電圧－潮流特性

Fig.6.10 Voltage-power flow characteristics at system reduction point calculated by using (B) proposed equivalent model

6.4.2 解析結果

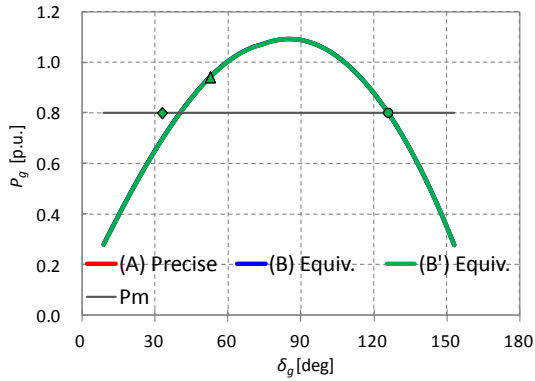
各解析手法における過渡安定度解析結果を表 6.5 および図 6.11 に示す。(A)厳密解と(B)Z分離縮約等価回路を用いた結果の間とは、[PV1]パターン、[PV2]パターンともに最大で 1msec 程度の誤差しか生じなかった。また、 $P-\delta$ カーブもよく一致しており、計算精度上有意な差は見られなかった。この結果は、異なる潮流断面から算出した等価インピーダンスの値を持つ Z 分離縮約等価回路を用いた場合の結果(B')についても同様であった。これは、縮約点電圧変化時の縮約点潮流の算出結果が、厳密解ときわめてよく一致しているためである。

これより、本論文で提案する縮約等価回路は、過渡安定度解析を行うにあたり、PV の導入された系統の特性を十分な精度で模擬できていることが示された。また、等価回路のパラメータの更新を行わない場合においても、本縮約手法は有用であると言えよう。

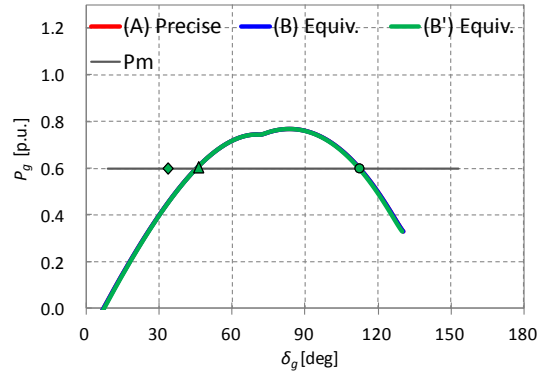
表 6.5 提案縮約等価回路による CCT 算出結果 [sec]

Table 6.5 CCT calculated by using proposed equivalent model [sec]

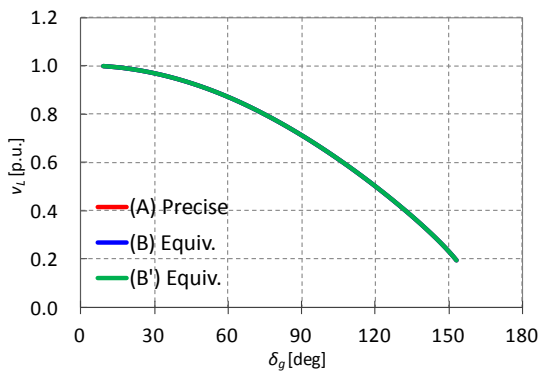
	(A) Precise	(B) Equivalent(1)	(B')Equivalent (2)
[PV1]	0.127	0.127	0.126
[PV2]	0.117	0.117	0.116



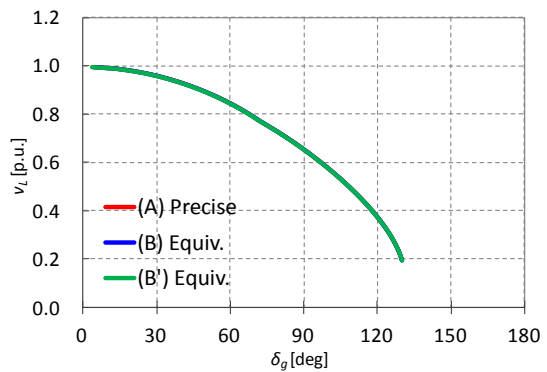
(a-1) P-δ curve [PV1]



(b-1) P-δ curve [PV2]



(a-2) Voltage at system reduction point [PV1]



(b-2) Voltage at system reduction point [PV2]

図 6.11 提案縮約等価回路による解析結果

Fig. 6.11 Analysis results by using proposed equivalent model

PV が末端から順に導入された場合においても、提案縮約等価回路を用いて解析を行った。CCT 算出結果を表 6.6 に示す。表 6.6 より、PV が末端寄りに導入された場合においても、提案縮約等価回路は過渡安定度解析に有為な誤差を与えていないことがわかる。これより、提案縮約等価回路は、PV の導入分布による過渡安定度への影響も表現できることが示された。

表 6.6 提案縮約等価回路を用いた解析による CCT 算出結果 (PV 末端導入) [sec]

Table 6.6 CCT calculated by using proposed equivalent model (PV:Latter installation) [sec]

	(A)Precise [Latter]	(B) Equivalent [Latter]
[PV1]	0.115	0.115
[PV2]	0.110	0.110

6.5 本章のまとめ

本章では, PV が高い割合で導入された配電系統が負荷供給系統インピーダンスを介して一機無限大母線系統に連系した簡単な基幹系統モデルを想定し, 等面積法によって過渡安定度解析を行った。

本章では, 配電系統を縮約対象とし, 縮約モデルとして(D)PV・負荷一括モデル, (C)系統インピーダンスを無視したモデル, (B)提案縮約等価回路の3つを検討した。

PV の特性を無視した(D)PV・負荷一括モデルでは, 負荷端での消費電力の減少に起因した, 現実に起こりうる過渡安定度の不安定現象を表現できず, 楽観サイドでの解析を行ってしまう可能性があることを指摘した。これより, 過渡安定度解析のためには, 少なくとも負荷と PV を別個のモデルによって表現し, かつ電圧低下時の PV の発電特性を正確に模擬した縮約を行う必要があることが明らかになった。

(C)系統インピーダンスを無視したモデルでは, PV の総発電量と総負荷量, PV の発電特性が既知であれば, PV が均等に導入されている限りでは精度の高い解析が可能であるが, PV が末端に導入されたケースでは解析結果に無視できない誤差が生じる可能性があることが示された。これより, より精度の高い過渡安定度解析のためには, PV の導入分布を考慮することが可能な縮約モデルによって系統を表現する必要があることが明らかになった。

(B)提案縮約手法を用いた場合, 高い精度で基幹系統の過渡安定度を解析できることが確認された。また, 提案縮約手法は, 潮流断面が変化したときにおいてもパラメータを更新せずとも高い精度による解析が可能であること, また PV の導入が均等分布でない場合においても, 本解析条件においては CCT の算出結果には有為な誤差を与えないことが明らかになり, 提案縮約手法の有用性が示された。

第7章 結論

7.1 本論文の成果

本論文では、下位系統に導入された PV が過渡安定度に及ぼす影響を考慮することのできる電力系統の縮約手法を提案した。

第3章および第4章では、本論文で提案する縮約手法について述べた。提案手法では、まず4端子定数回路の縦続行列の概念を用いて対象系統を一つの等価アドミタンスと一つの等価電流源から成る YI 等価回路に縮約し、その後 YI 等価回路から系統インピーダンスの要素を分離することで、本論文で提案する縮約モデルである Z 分離縮約等価回路を導出した。本縮約等価回路は、対象系統を負荷、PV、系統インピーダンスの構成要素ごとに分けて縮約した等価回路であり、各構成要素を集約負荷、集約 PV、3つの等価インピーダンスによってそれぞれ表現している。本縮約等価回路を用いることで、縮約点電圧が変化したときの縮約点の潮流量を、縮約前の原系統において逐次潮流計算を行うことなく算出することが可能となる。また本章では、提案縮約手法がループ系統を除くあらゆる形状の系統に対し適用可能であること、ならびに定電力特性の要素が含まれる場合にも等価回路を導出可能であることを示した。

第5章では、低圧配電系統まで考慮した詳細配電系統モデルを縮約対象とし、縮約点電圧が変化したときの縮約点の潮流を様々な解析条件のもとで求め、本論文で提案する縮約等価回路の有用性を検証した。結果より、提案縮約等価回路は、PV の導入された縮約対象系統の潮流特性を高い精度で算出可能であることを示した。また、等価回路のパラメータは対象系統の負荷量や PV の発電量の違いにはほとんど依存しないことを明らかとした。これより、ある潮流断面において等価回路のパラメータを求めた後は、負荷の総量と PV の総発電量を把握しさえすれば異なる潮流断面においても再度パラメータを更新することなく縮約等価回路を得ることができる。

第6章では、本論文で提案する縮約等価回路の他に2つの縮約モデルを取り上げ、PV の大量導入された配電系統の縮約モデルの差異が過渡安定度へ与える影響を、一機無限大母線系統モデルを用いて評価した。結果より、PV の特性を無視したモデルや、縮約対象系統の系統インピーダンスを無視したモデルでは、現実には起こりうる過渡安定度の不安定現象を表現できず、楽観サイドでの解析を行ってしまう可能性があることを明らかとした。一方、提案縮約等価回路を用いた場合には、厳密な配電系統モデルを用いた解析結果と比較しても有意な誤差が見られず、提案縮約等価回路の有用性を確認した。

以上の検討より、提案縮約等価回路は、過渡安定度解析への適用を考慮した際にも、系統の電圧変動に応じて変化する縮約点の潮流量を実用上十分な精度で算出できることを示

した。また、本縮約手法は縮約対象系統の負荷特性によらず適用可能であり、等価回路のパラメータ値も潮流断面によらないことから汎用性も高いと言えよう。

そして何よりも、本縮約手法の特徴は、PVの導入された下位系統を数少ない構成要素によって表現できる点である。この点により、本縮約手法はPVの導入によって複雑化する下位系統の特徴を明確にし、系統固有の特徴の分析・解明に大きく貢献するものであると考える。

本論文がPVの大量導入された系統の過渡安定度解析の効率化および精度向上の一助になることを著者は願っている。

7.2 今後の課題

本研究の今後の課題のうち、特に主要と思われるものを以下に3点述べる。

(1) より少ない情報量から等価回路のパラメータを推定する方法

本論文で提案した縮約手法は、少なくとも一つの潮流断面において、個々の負荷、PVの発電出力・導入分布、系統インピーダンスの各値を予め得ることができれば、精度の高い等価回路を算出することができる。だが、例えば需要家が1000万軒程度存在するような大規模系統において上記の各値を全て得ることは、管理するデータ量の膨大さなどを考慮すると現在の運用システムでは容易なことではない。今後の課題としては、まず本論文で提案する等価回路のパラメータを、より少ない情報によって推定できる手法を検討することが挙げられる。また、その場合に提案縮約手法を用いた解析精度にどの程度の影響があるかも改めて評価する必要がある。

(2) 住宅地区配電系統以外の系統を縮約対象とした場合の検討

本論文では、将来的にPVが最も導入されるであろう住宅地区配電系統を縮約対象とし、提案縮約手法の有用性を評価した。今後の課題としては、住宅地区配電系統より主幹線の亘長が長く、系統インピーダンスによる影響が大きいと予想される郊外地区配電系統モデルなどにおいても、本縮約手法の有用性を検証する必要がある。

(3) PCSのより詳細なモデル化

本論文では、PCSの動的な変化特性（微分方程式によって表わされる変化特性）については考慮せず、PV連系点電圧と出力電流の関係は瞬時に1対1対応で決まるものと仮定した。だが、現実的にはPCSの制御にも数msec程度の制御遅延などが存在することが考えられるため、それらの要因が基幹系統の過渡安定度に及ぼす影響についても考慮する必要がある。また、縮約対象系統内で個々のPCSの特性（制御切替の閾値電圧等）にばらつきがある場合の縮約手法についても検討する必要があるだろう。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、指導教官の谷口治人特任教授には、終始懇切丁寧なご指導と、多くの貴重なご助言を頂きました。谷口特任教授は、私の研究活動を常に温かく見守って下さり、研究面でも精神面でも支えて下さいました。私が研究に行き詰って途方に暮れていたときにも、谷口特任教授の一言で光が差し込んだように感じられたことも多々ありました。そして何よりも、谷口特任教授は私に「電力系統」の世界の面白さ、奥深さを教えて下さいました。私が本論文をまとめ上げることができ、また修士課程の二年間で研究者としても一人の人間としても成長できたのは、谷口特任教授のお陰です。ここに厚く御礼申し上げます。

東京電力株式会社中島達人様、東京大学太田豊特任助教、鈴木宏和特任研究員をはじめとし、APET の多くの方々にお世話になりました。研究への親切なご指導、ありがとうございました。また、数多くの施設見学の機会を与えてくださったことにも、感謝しております。

仁田旦三明星大学教授、馬場旬平准教授には、研究内容に関して大変貴重なご助言を頂いただけでなく、研究以外の事柄に関しても様々な興味深い知識を与えて下さいました。深く感謝しております。

秘書の石下美奈子氏、玉岡徳子氏には、研究生活を送っていく上で様々な便宜を図って頂きました。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下さいました。

馬場研究室の河内駿介氏、今中政輝氏、服部圭佑氏、森昭人氏、萩原裕人氏、恩田祐輔氏、手操亮祐氏、昨年度卒業された横山研究室の吉原徹氏は、常に私を激励して下さり、私の研究生活を充実したものにしてくれました。皆と互いに研究内容について語り合い、電力・エネルギーに関連する知識を共有した研究生活の日々を忘れることはありません。また、谷口研究室の後輩として一年間をともに過ごした石川幸一郎氏は、常に私に良いプレッシャーを与えてくれた大切な存在でした。真面目で優秀な氏と、ともに谷口研究室で学び、ともに成長できたことを大変嬉しく思います。

最後に、私の研究生活を支えて下さったすべての皆様に心より感謝の意を表し、皆様の今後のご発展とご活躍を心からお祈りします。

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> (2009)
- [2] Yun Tiam Tan and Daniel S Kirschen： “Impact on the Power System of a Large Penetration of Photovoltaic Generation”， *Power Engineering Society General Meeting*, 2007, IEEE (2007)
- [3] Nguyen Hoang Viet and Akihiko Yokoyama： “Impact of Fault Ride-Through Characteristics of High-Penetration Photovoltaic Generation on Transient Stability” 2010 *International Conference on Power System Technology (POWERCON '10)* (2010)
- [4] Feng Li, Wei Li, Feng Xue, Yongjie Fang, Tao Shi, and Lingzhi Zhu： “Modeling and Simulation of Large-scale Grid-connected Photovoltaic System”， *2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON '10)* (2010)
- [5] 坂本尚也，谷口治人，太田豊，中島達人，千貫智幸：「太陽光発電大量導入時の一機無限大母線系統の過渡安定度解析」， *電気学会論文誌 B*， vol.132, No.1, pp9-15 (2012)
- [6] S. Achilles, S. Schramm, and J.Bebic (GE Global Research) “Transmission System Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics”， Subcontract Report, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-581-42300 (2008)
- [7] 石丸雅章，田町英樹，駒見慎太郎：「配電用変圧器のタップ動作を考慮した PV 進相運転による電圧上昇抑制効果」， *電気学会論文誌 B*， vol.131, No.5, pp429-436 (2011)
- [8] 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部：「新エネルギーの大量導入に伴って必要となる系統安定化対策について」， 低炭素電力供給システムに関する研究会 第2回新エネルギー大量導入に伴う系統安定化対策・コスト負担検討小委員会資料 参考3， <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81125a12j.pdf> (2008)
- [9] 益田泰輔，清水浩一郎，横山明彦：「大量の再生可能エネルギー電源が導入された電力系統における多数台のヒートポンプ給湯機と電気自動車を利用した負荷周波数制御」， *電気学会論文誌 B*， vol.132, No.1, pp23-33 (2012)
- [10] 日本電気技術規格委員会：「系統連系規定 JEAC9701-2010 [2011年追補版(その1)]， JESCE0019 (2010)， 社団法人日本電気協会 系統連系専門部会(2011)
- [11] 小林広武・鈴木啓彦：「太陽光発電用パワーコンディショナの瞬低回復時の運定安定化方式」， 電力中央研究所報告書， R9015， 電力中央研究所(2010)

- [12] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「新エネルギー技術研究開発 単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究」平成 20 年度～平成 21 年度成果報告書, (2011)
- [13] 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, Vol.60, No.2, 電気協同研究会(2004)
- [14] 電気協同研究会：「配電系統の高調波障害防止対策」, 電気協同研究, Vol.37, No.3, 電気協同研究会(1981)
- [15] NEDO：「集中連系型太陽光発電システム実証研究」, 平成 15 年度～平成 19 年度成果報告書 (2008)

発表文献

➤ 本論文に関する発表文献

- [1] 千貫智幸, 谷口治人, 中島達人, 太田豊, 坂本尚也: 「太陽光発電が大量導入された配電システムの縮約に関する一考察」, 平成 23 年電気学会全国大会, 6-044 (2011.3)
- [2] T. Chinuki, H. Taniguchi, T. Nakajima, Y. Ota: “Study on System Reduction of Distribution System with Penetration of Photovoltaic Generation for Transient Stability”, *The Interbational Conference on Electric Engineering (ICEE) 2011*, ICR-100, Kowloon, Hong Kong (2011.7)
- [3] 千貫智幸, 谷口治人, 中島達人, 太田豊: 「太陽光発電が大量導入された配電システムの縮約手法の提案 – 太陽光発電を電流源, 負荷を定インピーダンス負荷とみなした場合」, 平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 29, 福井 (2011.8)
- [4] 千貫智幸・谷口治人・中島達人・太田豊: 「太陽光発電が大量導入された電力システムの縮約 – 太陽光発電が定電力源として表現される場合 –」平成 23 年電気学会電力系統技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-066, PSE-11-083, 大阪 (2011.9)

➤ 本論文に関連する発表文献 (非第一著者)

- [1] 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, 千貫智幸: 「太陽光発電大量導入時の一機無限大母線システムの過渡安定度解析」, 電気学会論文誌 B, vol.132, No.1, pp9-15 (2012.1)
- [2] 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」, 平成 24 年電気学会全国大会, 広島(2012.3) (発表予定)

➤ 本論文の内容以外の発表文献

- [1] T. Chinuki, A. Yokoyama, T. Shinji, S. Tsujita: “Contribution of Microgrids to System Frequency Suppression Considering Distribution Voltage Violations”, *The International Conference on Electric Engineering (ICEE) 2010*, Busan, Korea (2010.7)

付録 A 単相三線式受電方式の考慮

柱上変圧器の2次側は図 A.1(a)に示す単相 100/200V 低圧系統となっており、100V 需要家負荷と PV とでは受電電圧が異なる。本論文では、低圧系統を以下のように 200V 系に統一して考えた。

本論文では、1軒の需要家内で各電圧線間に繋がる負荷が等しいと仮定する。このとき、図 A.1(a)の低圧系統は図 A.1(b)のように表わせる。さらに、図 A.1(b)では対称性より中性線に電流が流れないため、図 A.1(b)は図 A.1(c)、図 A.1(d)のように等価変形することができる。

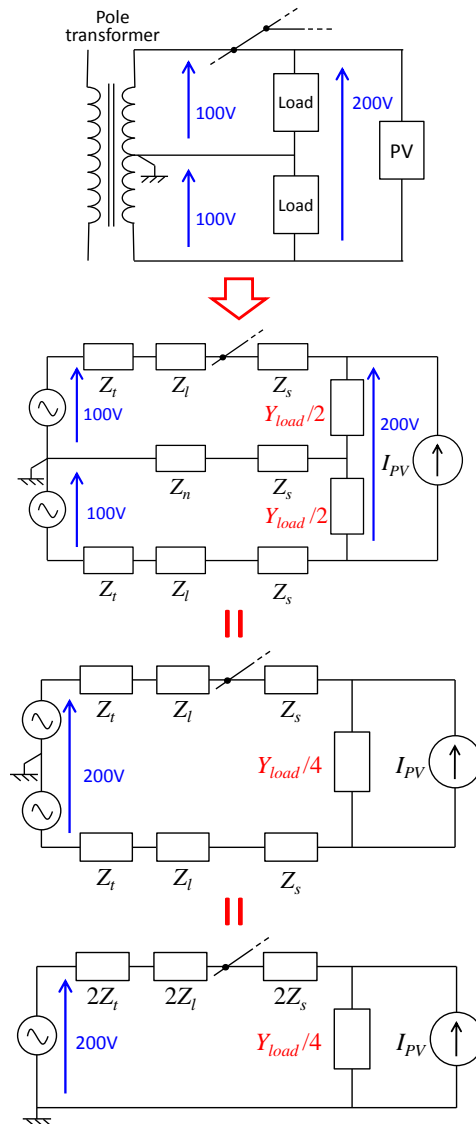


図 A.1 単相三線受電方式の考慮 (上から順に(a)~(d))

Fig. A.1 Consideration of single-phase three-wire distribution system

付録 B 詳細配電システムモデルのインピーダンスマップ

本論文第 5 章で縮約対象とした配電フィーダモデルのインピーダンスマップを図 B.1 および図 B.2 に示す。また、本論文で用いた低圧配電システムモデルを図 B.3 に再掲する。図 B.1 では各配電線の長さを示している。本モデルの設定に際しては文献^{[13][14]}を参考にした。

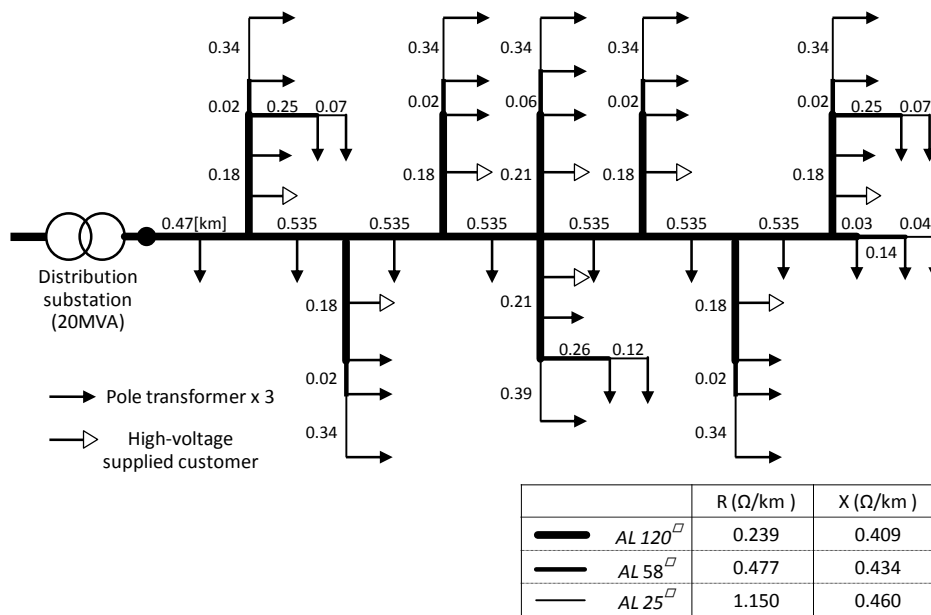


図 B.1 配電フィーダモデルのインピーダンスマップ

Fig. B.1 Impedance map of distribution feeder model

表 B.1 低圧システムモデルおよび高圧需要家用変圧器の諸元

Table B.1 Parameters of low-voltage system and transformer for high-voltage supplied customer

	諸量	@ 200V
柱上変圧器インピーダンス (Z_t)	$Z_t = 9+j16[\text{m}\Omega]$	$2Z_t = 18+j32[\text{m}\Omega]$
低圧配電線インピーダンス (Z_l)	$Z_l = 13+j9[\text{m}\Omega]$	$2Z_l = 26+j18[\text{m}\Omega]$
引込線インピーダンス (Z_s)	$Z_s = 22+j1[\text{m}\Omega]$	$2Z_s = 44+j2[\text{m}\Omega]$
高圧需要家の 変圧器インピーダンス	$0.8+j3.0[\Omega]$ (6.6kV, 500kVA で %Z≈3.5)	-

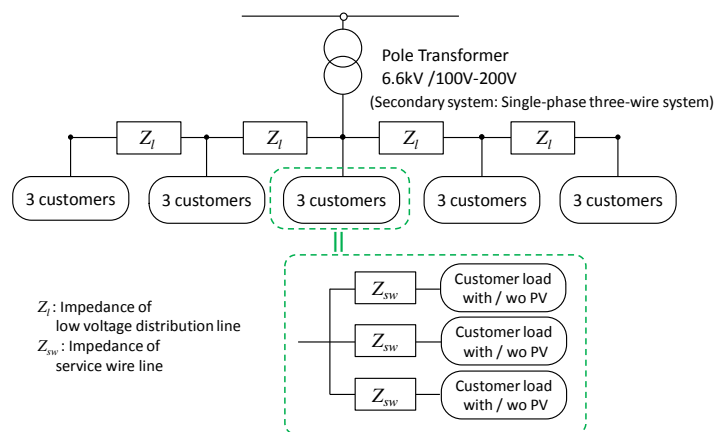


図 B.2 低圧系統モデル (再掲)

Fig. B.2 Low-voltage system model

付録 C 一機無限大母線系統モデルのパラメータ

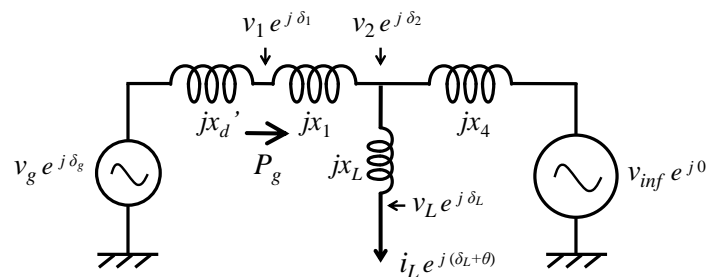
第 6 章で過渡安定度解析に用いた一機無限大母線系統のパラメータを表 C.1 に示す。また、基幹系の一機無限大母線系統に負荷供給系統を含めたモデルの回路図を図 C.1 に示す。

表 C.1 一機無限大母線系統モデルの諸定数

Table C.1 Parameters of 1-generator infinite-bus model

変数	名称	値
K_{sys}	系統基準容量	1,000MVA
ω_0	系統周波数	60Hz
S_{base}	発電機定格容量	1,000MVA
M	発電機の慣性定数	7.0sec
$P_m (=P_{e0})$	発電機の機械的入力 (初期状態での発電機の電气的出力)	0.80pu または 0.60p.u. (PV 導入量によって異なる。 詳細は 6.1 節参照)
v_{10}	初期状態での発電機端子電圧	1.0pu
x_d'	過渡リアクタンス	0.35pu
x_1	昇圧変圧器リアクタンス	0.10pu
x_2	送電線インピーダンス (1 回線分)	0.30pu
x_3	送電線インピーダンス	0.20pu
x_L	負荷供給系統インピーダンス	0.08p.u.

初期状態における値は添え字に 0 を付けて示す。



$$x_4 = \begin{cases} x_2/2 + x_3 & (\text{at initial state}) \\ x_2 + x_3 & (\text{after clearing fault}) \end{cases}$$

図 C.1 一機無限大母線系統モデルの回路図

Fig. C.1 Circuit diagram of 1-generator infinite-bus model