



修士論文

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

平成23年2月9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

学籍番号 37-096460

坂本 尚也

内容梗概

本研究の目的

地球温暖化や化石燃料枯渇問題への解決策の一つとして、我が国では太陽光発電 (PV: Photovoltaics) の大量導入が検討されている。

PV が大量に導入された系統での安定度への影響については十分な検討はなされておらず、系統事故時の同期機の過渡安定度への影響が懸念される。本研究では同期機を古典モデルと詳細モデルの 2 通りで表現して様々な解析条件で臨界事故除去時間 (CCT: Critical Clearing Time) を求め、太陽光発電が大量導入された系統で、様々な要因が過渡安定度に与える影響を分析することを目的とする。

本研究の成果

本研究の成果として、PV の導入された系統での同期機出力を算出する P- δ カーブの式を導出したことと、様々な解析条件で CCT を算出したことが挙げられる。

CCT の算出結果からは、PV 導入時の同期機の運用方針や PV 出力の大小、送電電力の運用方針などが CCT へ与える影響が明らかとなった。同期機容量削減では、同期機容量維持と比べて系統基準での過渡リアクタンスが大きいため P- δ カーブが低下し、さらに慣性定数が小さくなるため、どのケースでも CCT は短くなった。PV なしでは、同期機だけで総発電電力をまかなうため、標準解析条件と比べて同期機の機械入力が大きくなり、CCT は短くなった。これらの傾向のほとんどは P- δ カーブの式から説明が可能である。

たとえば、導出した式より PV の運転継続では、PV 脱落に比べ、同期機出力が PV の出力によって小さくなるので減速エネルギーが少なくなり安定度が悪化することがわかる。

表 1: 古典モデル・詳細モデルでの各系統・同期機容量方針・解析条件での CCT[s]

同期機容量	維持				削減			
	電源系統		負荷あり系統		電源系統		負荷あり系統	
同期機モデル	詳細	古典	詳細	古典	詳細	古典	詳細	古典
標準解析条件	0.317	0.363	0.337	0.361	0.187	0.220	0.147	0.172
PV 脱落補償あり	0.317	0.313	0.332	0.294	0.187	0.158	0.142	-
PV 無効電力補償		0.391		0.421		0.261		0.226
送電電力増加	0.162	0.190	0.192	0.200	0.112	0.136	0.117	-
負荷インバータ特性			0.341	0.369			0.142	0.168
軽負荷			0.737	0.727			0.182	0.205
負荷脱落			0.287	0.287			0.117	0.109
PV 低出力	0.182	0.225	0.192	0.216	0.137	0.175	0.137	0.150
PV なし	0.092	0.117	0.117	0.117	0.092	0.117	0.117	0.117
PV 脱落なし	0.247	0.269	0.297	0.295	0.137	0.144	0.137	0.140

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	PV の大量導入	1
1.1.2	関連論文	4
1.2	研究の目的	5
1.3	本論文の構成	7
第 2 章	PV モデル及び特性	8
2.1	PV システムの構成	8
2.1.1	等価回路	8
2.1.2	PV システムの詳細モデル	10
2.2	PV モデル	10
2.2.1	検討解析条件	10
第 3 章	電力系統と関連する要素モデル	13
3.1	解析条件の概要	13
3.2	系統モデル	14
3.2.1	電源系統モデル	14
3.2.2	負荷あり系統モデル	17
3.2.3	検討する比較条件	18
3.3	発電機モデル	18
3.3.1	古典モデル	19
3.3.2	同期機モデル	19
3.3.3	励磁系モデル	19
3.3.4	調速機モデル	19
3.3.5	同期機の加速減	20
3.3.6	同期機運用方針による容量の決定	21
3.3.7	検討する比較条件	22
3.4	負荷モデル	22
3.4.1	検討する比較条件	22
3.5	本章のまとめ	22
第 4 章	CCT 計算手法	25
4.1	電源系統	25
4.1.1	系統電圧位相 δ_3 の算出	25
4.1.2	系統電圧 v_3 の導出	27
4.1.3	同期機発電電力 P_1 の算出	27
4.1.4	PV 発電電力 P_2 の導出	27
4.1.5	送電電力 P_3 の導出	28

4.2	負荷あり系統	28
4.2.1	系統電圧位相 δ_3 の算出	29
4.2.2	系統電圧 v_3 の算出	29
4.2.3	同期機出力 P_1 の算出	29
4.2.4	PV 出力 P_2 の算出	29
4.2.5	負荷電力 P_4 の算出	29
4.2.6	系統ベースの変換	30
4.2.7	等面積法	30
4.2.8	臨界事故除去時間の算出	31
第 5 章	古典モデルを用いた等面積法による過渡安定度の評価	32
5.1	PV モデルによる影響	32
5.1.1	PV なしによる影響	33
5.1.2	PV 低出力による影響	35
5.1.3	PV 運転継続による影響	36
5.1.4	PV 無効電力補償の場合	37
5.2	負荷モデルによる影響	40
5.2.1	負荷インバータ特性による影響	40
5.2.2	軽負荷による影響	40
5.2.3	負荷脱落による影響	42
5.3	同期機運用条件による影響	45
5.3.1	同期機容量削減による影響	45
5.3.2	PV 脱落補償の有無による影響	46
5.4	系統モデルによる影響	48
5.4.1	系統モデルの違いによる影響	48
5.4.2	送電電力増加による影響	49
5.5	本章のまとめと複合的な解析条件での検討	52
5.5.1	結果の概要	52
5.5.2	PV 運転継続と他の解析条件との組み合わせ	54
第 6 章	発電機詳細モデルを用いた Y 法シミュレーションによる過渡安定度の評価	58
6.1	PV モデルによる影響	58
6.1.1	PV なしによる影響	58
6.1.2	PV 低出力による影響	59
6.1.3	PV 運転継続による影響	60
6.2	負荷モデルによる影響	61
6.2.1	負荷インバータ特性による影響	62
6.2.2	軽負荷による影響	63
6.2.3	負荷脱落による影響	65
6.3	同期機運用条件による影響	65
6.3.1	詳細モデルの考慮による影響	66
6.3.2	同期機容量削減による影響	67
6.3.3	PV 脱落補償による影響	68
6.4	系統モデルによる影響	69
6.4.1	系統モデルの違いによる影響	71
6.4.2	送電電力増加による影響	71

6.4.3	まとめ	72
第 7 章	結論	74
7.1	本研究の成果	74
7.2	今後の課題	74
付 録 A	P- δ カーブの見方	81
付 録 B	等面積法による臨界故障時間 CCT の導出過程	82

第1章 序論

本章では私の研究そのものを説明する前に、研究背景を紹介した後、研究目的、本論文の構成について説明する。第1節では研究背景として、PVの導入状況、系統事故の発生状況、PVを考慮した過渡安定度解析の研究動向について紹介する。第2節ではPVの大量導入された電力系統の過渡安定度解析をする目的や意義について述べる。第3節では本論文全体の構成を図を用いて示す。

1.1 研究背景

地球温暖化や化石燃料枯渇問題への解決策の一つとして、我が国では太陽光発電 (PV: Photovoltaics) の大量導入が検討されている。PVの大量導入時には、瞬時電圧低下事故発生時の過渡安定度への影響が懸念される。

1.1.1 PVの大量導入

太陽光発電で用いる太陽光電池は光起電力効果を利用し、光エネルギーを直接電力に変換する電力機器である^[1]。1974年の石油ショック以降、太陽光電池は燃料の要らない純国産の電源として注目され本格的な開発が始まった。1997年に議決された京都議定書では、地球温暖化防止のためにCO₂を代表とする温室効果ガスの削減が義務付けられた^[2]。太陽光発電はCO₂を排出しない発電方法として、国際的に注目され、日本でも導入が進んでいる。

(I) PVの導入実績

PVの1992年から2008年までの導入実績を図1.1に示す^[3]。1997年以降、PV導入量が急増しており、2008年では約2[GW]の設備容量のPVが導入されている。経済産業省の試算結果では、設備容量は2005年では、設備容量は241[GW]である(表1.4)^[4]。実際ピーク需要となる8月の月間最大電力の全国の合計は162[GW]である(2009年度)^[5]。設備容量でのPV割合は2008年時点でも2009年と同程度のピーク需要であったとすると、 $\frac{2}{168} \approx 0.012$ であり、1.2[%]となる。すなわち、現状の系統ではPVの導入量はまだわずかであると言える。

(II) PVの導入計画

経済産業省で公表されているPVの導入計画を図1.2に示す^[6]。2020年に28GW、2030年に53GWの導入が計画されている。経済産業省の試算結果では、設備容量は最大導入ケースで2020年度で280[GW]、2030年度で295[GW]であり(表1.1)、努力継続ケースで2020年度で258[GW]、2030年度で288[GW]であり(表1.2)、現状固定ケースで2020年度で283[GW]、2030年度で332[GW]となっている(表1.3)^[4]。設備容量でのPV割合は、2030年のピーク需要が2009年と同程度であったとすると、 $\frac{53}{162} \approx 0.33$ であり、33[%]となる。さらに、軽負荷時(例えばGWの日中)や、特定地域によっては、PV割合がさらに高くなることが懸念される。

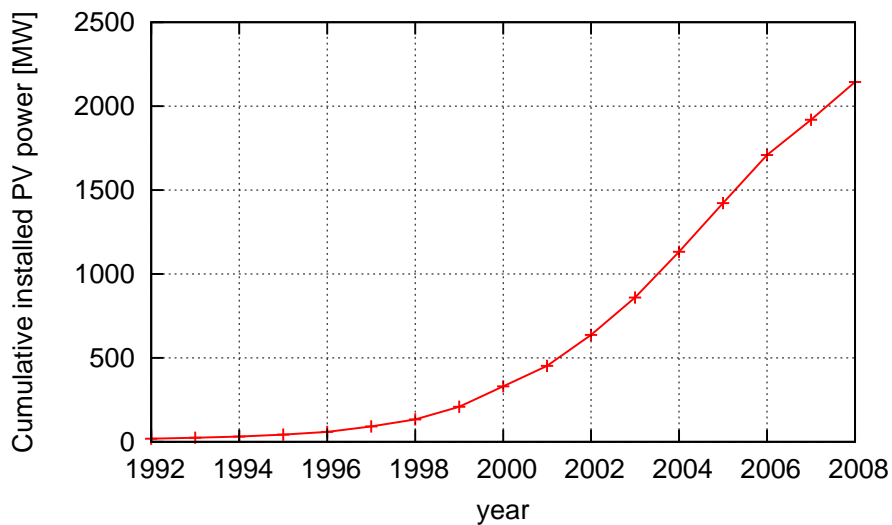


図 1.1: PV 導入実績^[3]

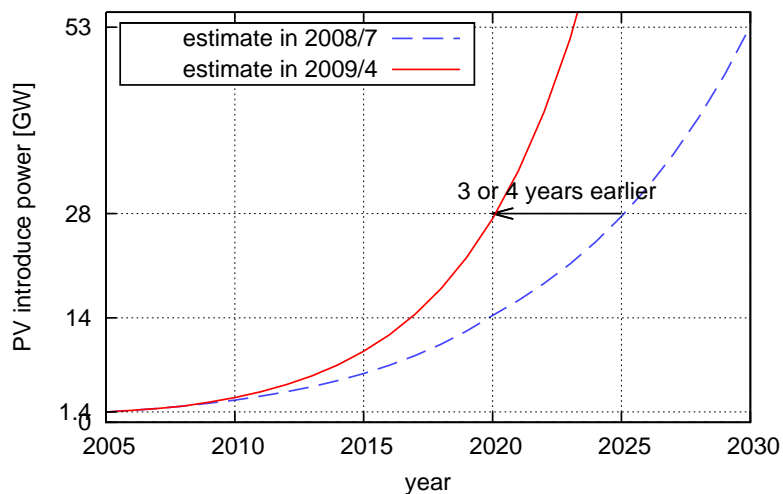


図 1.2: 太陽光発電導入目標量の拡大

表 1.1: 最大導入ケースでの年度末設備容量 [GW]^[4]

	2020 年度		2030 年度	
	容量 [GW]	割合 (%)	容量 [GW]	割合 (%)
水力	50	18%	51	17%
火力	138	49%	121	41%
原子力	60	21%	63	21%
新エネルギー	33	12%	60	20%
合計	281		296	

表 1.2: 努力継続ケースでの年度末設備容量 [GW]^[4]

	2020 年度		2030 年度	
	容量 [GW]	割合 [%]	容量 [GW]	割合 [%]
水力	49	19%	51	17%
火力	139	54%	142	49%
原子力	60	23%	63	22%
新エネルギー	10	4%	33	11%
合計	258		288	

表 1.3: 現状維持ケースでの年度末設備容量 [GW]^[4]

	2020 年度		2030 年度	
	容量 [GW]	割合 [%]	容量 [GW]	割合 [%]
水力	49	17%	49	15%
火力	163	58%	186	56%
原子力	60	21%	63	19%
新エネルギー	10	3%	33	10%
合計	283		288	

表 1.4: 年度末設備容量の実績 [GW]^[4]

	1990 年度		2005 年度	
	容量 [GW]	割合 [%]	容量 [GW]	割合 [%]
水力	36	21%	46	19%
火力	104	60%	143	59%
原子力	31	18%	50	21%
新エネルギー	0	0%	3	1%
合計	172		241	

(III) PVの大量導入による課題

PVの大量導入による課題として、配電電圧の逸脱、緊急・復旧時の課題(太陽光発電の脱落)、周波数調整の困難化、運転予備力の増加、供給予備力の増加、余剰電力の発生、潮流調整の困難化が挙げられる^[7]。PVには単独運転検出装置が備わっており、事故などによる電圧や周波数の擾乱によって誤動作することがある。PVが大量に脱落すると、電源不足により周波数の低下現象が発生する恐れがある。

図 1.3 に架空送電線および特別高圧配電線と地中送電線の系統事故の発生率を示す^[8]。100kmあたりの系統事故は、架空の場合 0.05~0.30 件、地中の場合 0.1~0.25 件である。2004 年に架空送電線での事故割合が高い理由は、自然災害(台風 18 号、台風 23 号などの大型台風)が挙げられる。全体として増加も減少もしておらず、送電線事故は今後も一定割合で発生すると考えられる。

(IV) 瞬時電圧低下継続時間

図 1.4 に瞬時電圧低下に対する機器の運転継続可能領域の基準を示す^[9]。この図の見方を説明する。例えば ITIC の基準を守った機器の動作は、ある電圧・時間領域より下回った場合、例えば 0.1 秒

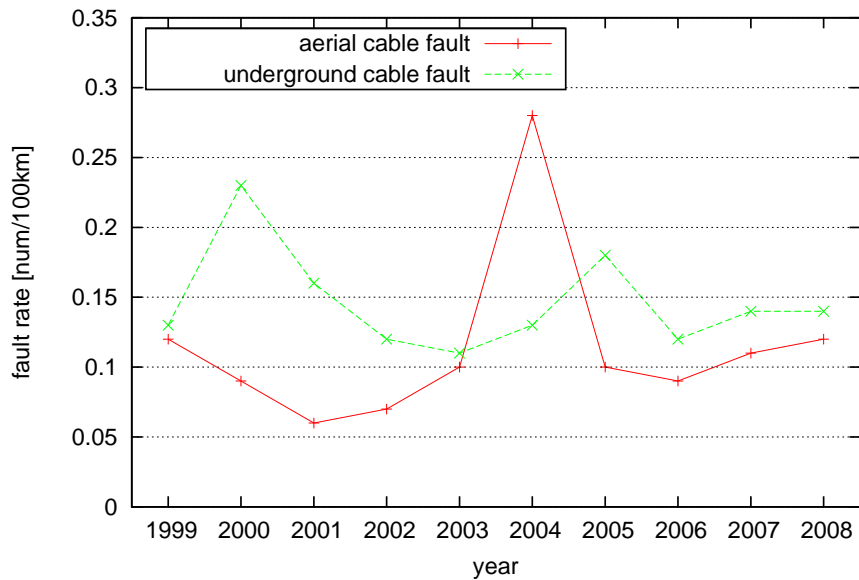


図 1.3: 架空送電線及び地中送電線での事故率の推移

間電圧が 60%を継続は機器が運転を継続できなくても問題ない。ただし、0.2 秒間電圧が 0%であっても、基準領域から外れていないので運転を継続できなければならない。

IEEE1346 では電圧低下に対する運転継続能力として、Information Technology Industry Council (ITIC) カーブが採用されている。SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International) はより厳しい基準である SEMI F47 カーブを採用している。Cheng-Chieh Shen 氏は、IEC61000-4-11 試験を用いて計測した 3 つの PLC(Programmable Logic Controller) の耐久能力を計測した結果が PLC # 1 ~ # 3 である。以上のことから、0.02 秒程度の瞬時電圧低下には耐えられることは必須である。基準によっては、0.3 秒程度の瞬時電圧低下に耐えられることを基準にしている。一般に、瞬時電圧低下などの事故除去にかかる時間は 0.07~0.2 秒ほどといわれている。

1.1.2 関連論文

本研究の説明の前に、関連する研究を紹介しておく。本研究では直接用いたわけではないが、考慮しておくことでより詳細な過渡安定度解析ができるような論文を選んだ。

(I) 安定度解析用の太陽光発電モデル^[10]

Tan 氏の研究では、日射量及び系統電圧の急峻な増減による MPPT 制御における PV 出力の過渡特性について実測し、近似モデルが示されている。図 1.5 に論文中に用いられた PV システムモデルを示す。日射 I_r が PV アレーによって電圧 P_{pv} 、直流電流 I_{pv} の電力に変換され、インバータによって交流電圧 V_{ac} 、交流電流 I_{ac} に変換され出力される。アレー電圧 V_{pv} 、アレー電流 I_{pv} は MPPT に入力される。MPPT(Maximum Power Point Tracking) は PV アレーからの有効電力が最大となるようなアレー電圧を指示する。この MPPT によって決められたアレー電圧 V_{pv} をインバータにアレー電圧指令値として出力する。

図 1.6 に日射量が急増したときの PV の応答特性を示す。時刻 2.6[s] において日射量が 20%から 100%に急増している (図 1.6(a))。PV の有効電力は 12[W] から 60[W] まで約 5.5[s] かけて到達した。

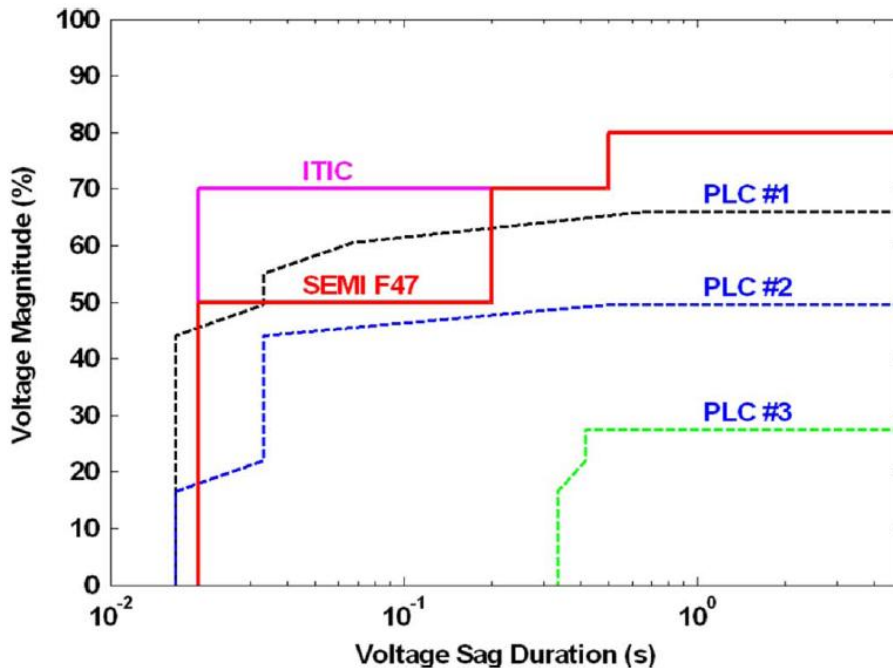


図 1.4: ITIC and SEMI F47 curves, and three PLC 's voltage sags tolerance test results.

IV 特性では、初期状態では点 A で運転していたが、日射量が急増したことにより 40%カーブの点 B に移動した。MPPT コントローラは徐々に V_{PV} を増少させ最大電力点の点 C に到達する (図 1.6(c))。

図 1.7 に日射量が急減したときの PV の応答特性を示す。時刻 2.6[s] において日射量が 100%から 40%に急減している (図 1.7(a))。PV の有効電力は 60[W] から 15[W] に落ち、0.5[s] 後に 25[W] に復帰している。IV 特性では、初期状態では点 A で運転していたが、日射量が急減したことにより 40%カーブの点 B に移動した。MPPT コントローラは徐々に V_{PV} を減少させ最大電力点の点 C に到達する (図 1.7(c))。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、系統の過渡安定度が太陽光発電の大量導入によってどのような影響を受けるのか検討することである。

地球温暖化対策やエネルギーセキュリティ対策として、我が国では太陽光発電の積極的な導入が検討されている。太陽光発電の設備容量の増加は、太陽光発電が系統に与える影響力が大きくなることを意味する。太陽光発電は日射強度の変動によって出力が変動する安定な電源であり、その系統全体における太陽光発電の出力割合は時々刻々と変化する。また、太陽光発電は回転機のような慣性が物理的に存在しないため、系統で事故が発生した場合に出力が急変することが予想される。太陽光発電の出力特性は定電流源で模擬され、回転機型発電機のような定電圧源とは異なる特性を持つ。

このような理由から、以下のような場合について検討をする。

- PV の発電電力に応じて、同期機容量を減らす場合、維持する場合
- PV の単独運転検出装置の誤動作により一斉脱落した場合、運転継続した場合
- PV が脱落した場合に、同期機出力を素早く増やした場合

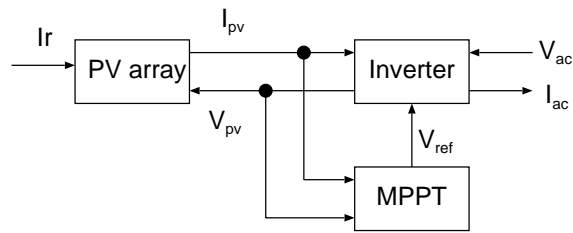


図 1.5: PV システムモデル [10]

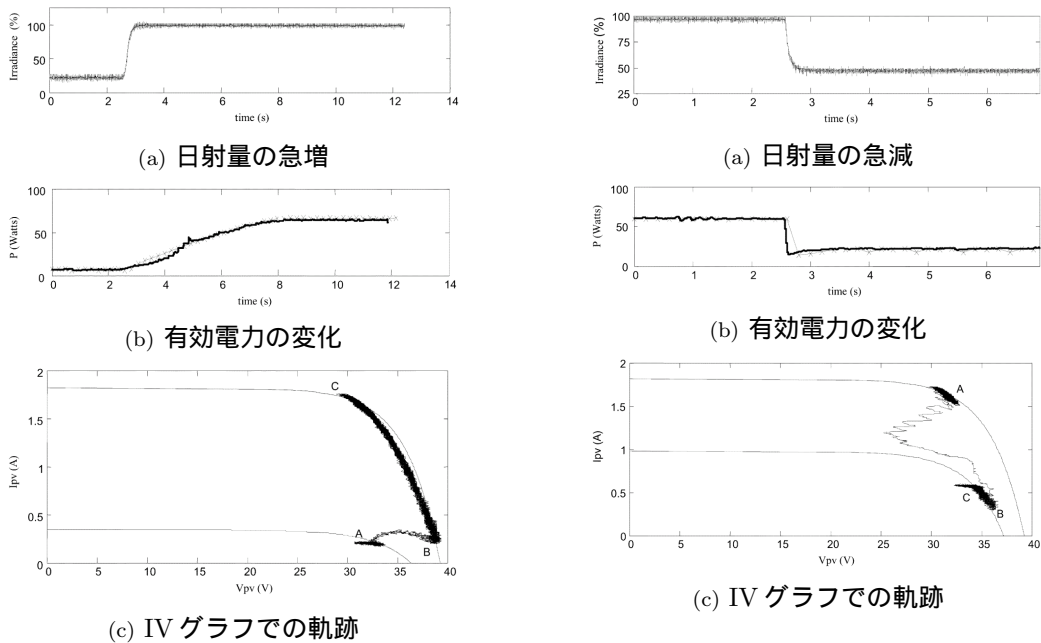


図 1.6: 日射量の急増時の PV の応答特性 [10]

図 1.7: 日射量の急峻な減少時の PV の応答特性 [10]

- 他電力系統に電力を送る時に、同期機の発電電力と PV の発電電力の合計値を一定にする場合、PV の発電電力を上乗せで送電する場合
- 負荷量が多い場合、小さい場合
- 負荷が抵抗型機器ではなくインバータ機器が多かった場合
- 負荷が一斉脱落した場合
- PV 出力が小さい場合、ない場合 (比較のため)

近年のオール電化や電気自動車、情報通信機器の普及によって社会の電力への依存度は高まっており、電力の安定供給がより一層重要になっている。したがって、上述の場合での過渡安定度がどのようになるかを解析し明らかにすることは、停電事故を未然に防ぐために必要な手続きである。本研究では系統を無限大母線と連系線を持つ送電系統と負荷系統に大別し、同期機を古典モデルと詳細モデルの 2 通りで表現して様々な解析条件で検討することで、太陽光発電の大量導入された系統での不安定現象の原因を分析することを目的とする。

1.3 本論文の構成

第一章では序論として、現在の電力系統における PV の導入計画と、過渡安定度の現状と解決すべき課題、本論文で過渡安定度を解析する目的について述べる。PV の大量導入が見込まれており、その時の過渡安定度について検討することは重要となっている。

第二章では、本研究の過渡安定度解析に用いる PV モデルについて述べる。PV は基本的に定電力特性で模擬できるが、電圧がある閾値以下になった場合に PCS 内の保護回路の働きによって定電流源特性で模擬できる。

第三章では、過渡安定度解析での系統、同期機、負荷に用いたモデルについて述べる。系統モデルとして送電系統モデルと負荷系統モデルの 2 通りを用い、同期機は古典モデルと詳細モデルの 2 通りを用いて結果を比較する。

第四章では、過渡安定度の基準として用いる臨界事故除去時間の算出手法について述べる。等面積法の計算手法や $P-\delta$ カーブの見方について詳しく説明する。

第五章では、同期機を古典モデルとして表現したときの過渡安定度解析結果について述べる。同期機運用方針として同期機容量維持と削減の傾向の一致や違い等について説明する。

第六章では、同期機を詳細モデルとして表現したときの過渡安定度解析結果について述べる。第五章で検討した結果と比較をし、同期機を詳細モデルとした場合での結果に与える影響について考察する。

最後に、第七章では、本論文の成果をまとめ、結論を述べるとともに、今後の課題についても示す。

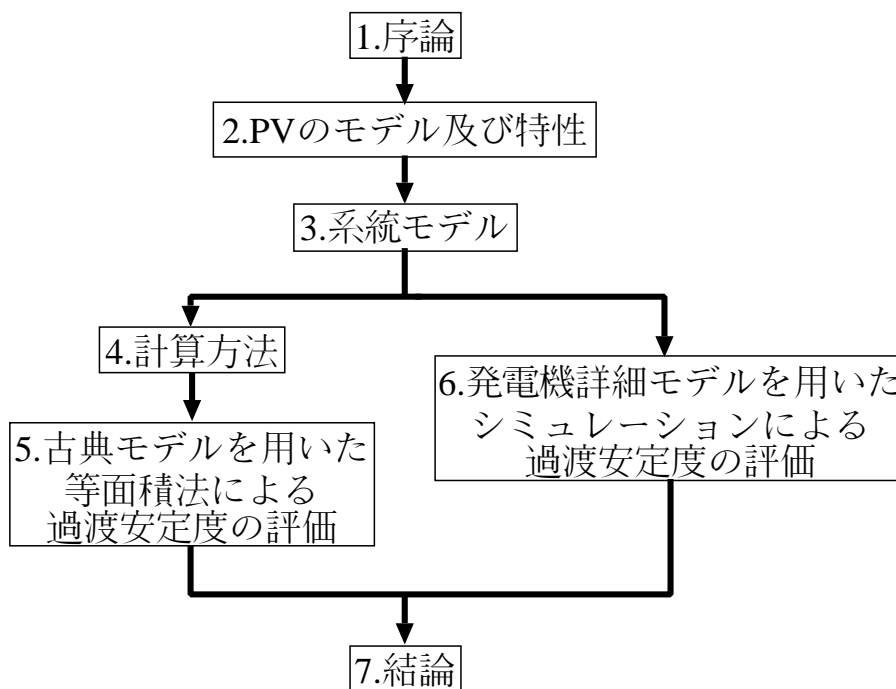


図 1.8: 本論文の構成

第2章 PVモデル及び特性

本章では、PVシステムの構成について考慮した上で、本論文で用いたPVの過渡モデルを示す。PV特性は後述する同期機古典モデルでは機器容量ベースで1.2[pu]までの上限電流をもった定電力特性(図2.4)で模擬する。同期機詳細モデルでは機器容量ベースで1.0[pu]の定電流特性で模擬する。

PVモデルとして、PV出力、PV脱落特性、事故除去後のPVの運転モードの変更を想定する。

PV出力は標準解析条件では定格出力を想定しているが、PV低出力ではPV出力を定格出力の半分、PVなしではPV出力がない場合すなわちPVが接続されていない場合を想定した。

PVは送電系統事故による電圧低下で脱落するすなわち出力を零とする場合を標準の解析条件とし、運転を継続する場合(PV運転継続)を比較対象とした。また、運転を継続する場合には、事故除去後のPVの運転モードとして、

事故前と同じく有効電力のみを出力する力率1運転と、有効電力を出力せず接続点の電圧を維持するように進み無効電力のみを供給する場合を想定した。

2.1 PVシステムの構成

2.1.1 等価回路

図2.2にPVシステムの等価回路を示す。

PV moduleでは、光エネルギーが電力に変換される。同じ日射強度でもPVモジュールにかかる電圧 V_{PV} によって出力電流 I_{PV} は異なる。図2.1にPVのVI特性の理論曲線と実測曲線を示す^[11]。横軸がPVモジュール電圧 V_{PV} に相当し、 V_{PV} を定めたときに出力電流が決まるため出力電力が定まる。

通常、MPPTは出力電力が最大となるようにPVモジュール電圧 V_{PV} を制御する。

Boost Converterでは昇圧チョッパによってPVモジュール電圧 V_{PV} を昇圧し直流電圧 V_{DC} にする。スイッチ S_1 のデューティサイクルを制御して、直流電圧 V_{DC} を一定を保っている。さらに、コンデンサ C_{DC} によって直流電圧にかかるスイッチングノイズを除去している。

Grid Converterでは、直流電圧 V_{DC} を交流電圧 V_{AC} に変換する。構成要素の電流上限を超えない範囲で無効電力は制御可能である。

モデル作成に関連した想定は、以下の通り。

- 単相PVモジュール群は1つのPVモジュールに集約され、3相交流電源として出力される。
- 出力電力は上限電流を超えない限り、一定である。
- 上限電流を超えた場合は、出力電流は上限電流で一定である。
- 商用周波数のサイクル時間以下の全てのダイナミクスは無視する。
- PVのMPPTでは一定周期で電流と電圧の関係を調査しているが、シミュレーションモデルではこの現象による影響を無視する。

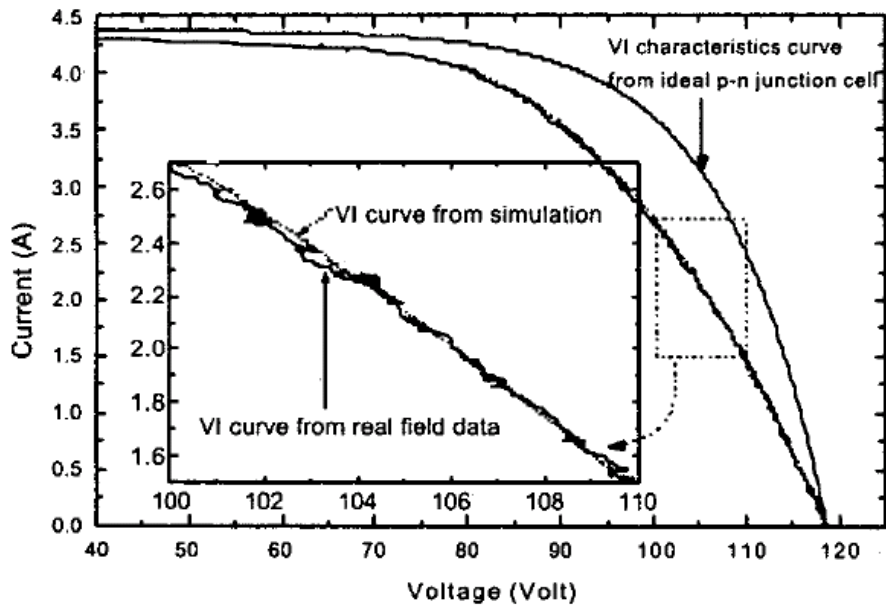


図 2.1: 電圧電流特性曲線 [11]

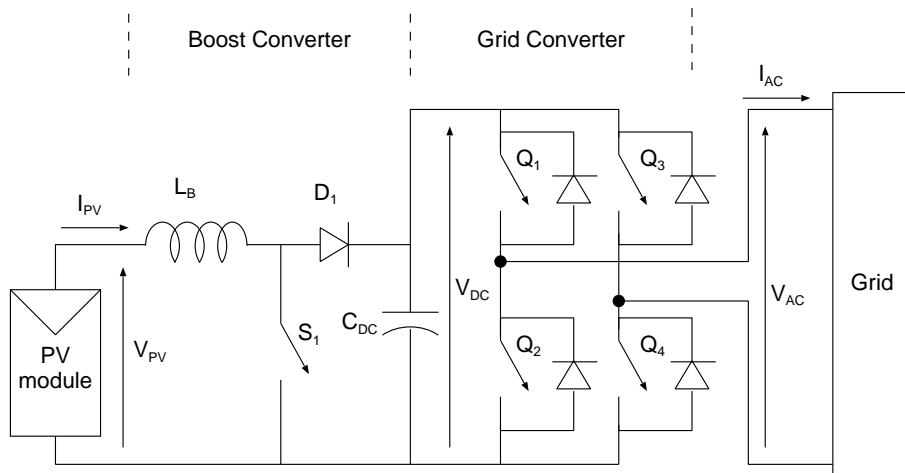


図 2.2: PV システムの等価回路 [12]

2.1.2 PVシステムの詳細モデル

図 2.3 に PV システムのブロック図を示す^[12]。Active Power Control は MPPT と ACL の 2 つの制御ループを含んでいる。

- MPPT(Maximum Power Point Tracking) は前節で説明したとおり、最大電力を取り出す働きをする。この制御により比較的ゆっくりした出力変化を可能にする。
- ACL(Active Current Limit) はインバータの電流上限に近づいたり超えたりしたときにモジュールの有効電力を制限する。この制御は系統電圧が下がった時に、PV が解列しないで運転継続している時に働く。

最大選択分岐は運用電圧を決めるために、2 つの制御ループから与えられた電圧のうち、最大の電圧を選択する。最大電圧を選択することは、最低出力を選択することになる。この制御により PV モジュールの急停止を防ぎ、別ループへのスムーズな移り変わりを可能にする。

Boost Converter は上下限の制約を持っており、PV モジュールに与える電圧 V_{pv} が PV モジュールの使用可能範囲になるように制約する。

PV module は光エネルギーを電力に変換するモジュールであり、与えられる電圧 V_{pv} によって出力が異なる特性を持つ。詳しくは次節で説明する。

Grid converter は PLL(Phase Locked Loop) とインバータから成っている。

2.2 PVモデル

PV モデルとして、同期機モデルが古典モデルではインバータ特性モデル (図 2.4) を、同期機モデルが詳細モデルでは定電流特性モデルを用いた。

インバータ特性とは、電圧が 1.0[pu] 付近だと定電力特性であるが、事故中のような電圧が低下した場合は、ACL による過電流制限によって定電流になるためである。閾値として、過電流を機器ベースで 1.2[pu] を上限とし、電圧が $1/1.2 \approx 0.83$ [pu] 以上は定電力特性、未満では定電流特性となる特性^[13]である。なお、制御遅れや内部回路による損失は考慮しない。

定電流特性モデルでは、電圧に関わらず常に機器定格で 1.0[pu] の出力電流を出すモデルである。これは、公開版 Y 法^[14]ではインバータ特性モデルが存在しないためであり、代わりに最もインバータ特性モデルに近い電流源モデルを用いた。

PV 出力の力率として、1.0 を用いた。これは有効電力を最大とする制御が行われる場合を想定している。

PV は事故によって脱落し、復旧しない場合を想定した。これは単独運転検出装置の誤動作によって、PV の一斉脱落を想定している。

日射量として、PV の定格出力を出す日射量を想定した。なお、日射強度の変動周期は一般的に数十秒以上であり、今回対象としている過渡解析の時間領域は最大でも数秒程度であるため、その影響を無視した。

2.2.1 検討解析条件

PV の特性として 4 種類の解析条件を想定した。その解析条件とは、PV なし、PV 低出力、PV 運転継続、PV 無効電力補償である (表 3.8)。標準とした条件は、PV 出力が 0.5[pu]、PV 脱落である。

無効電力補償 事故によって脱落せず、事故除去後に出力電流位相を電圧位相に対して $-\frac{\pi}{2}$ だけずらして出力する解析条件。すなわち、事故除去後に進相無効電力を系統に注入する。

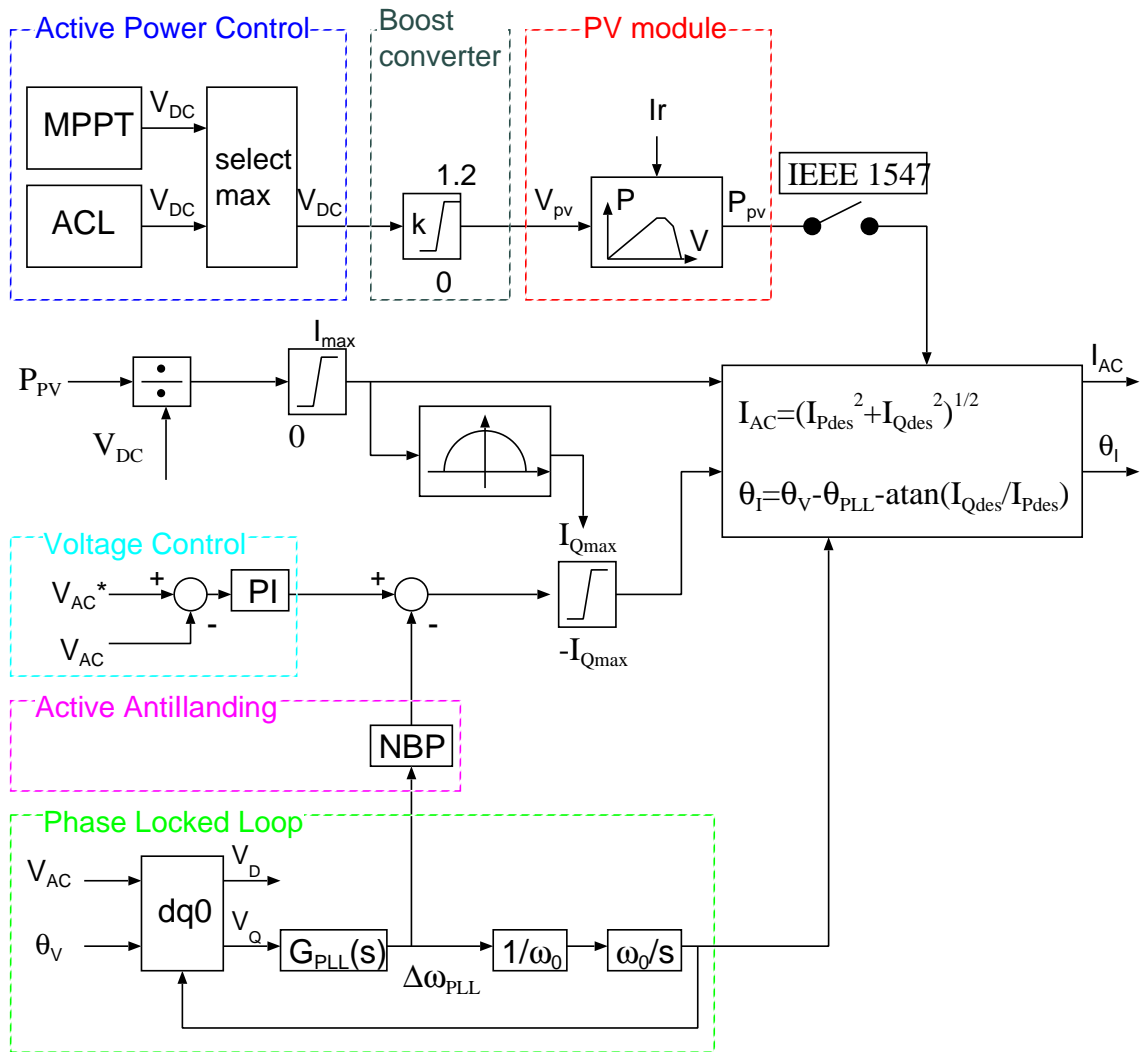


図 2.3: PV システムのブロック図 [12]

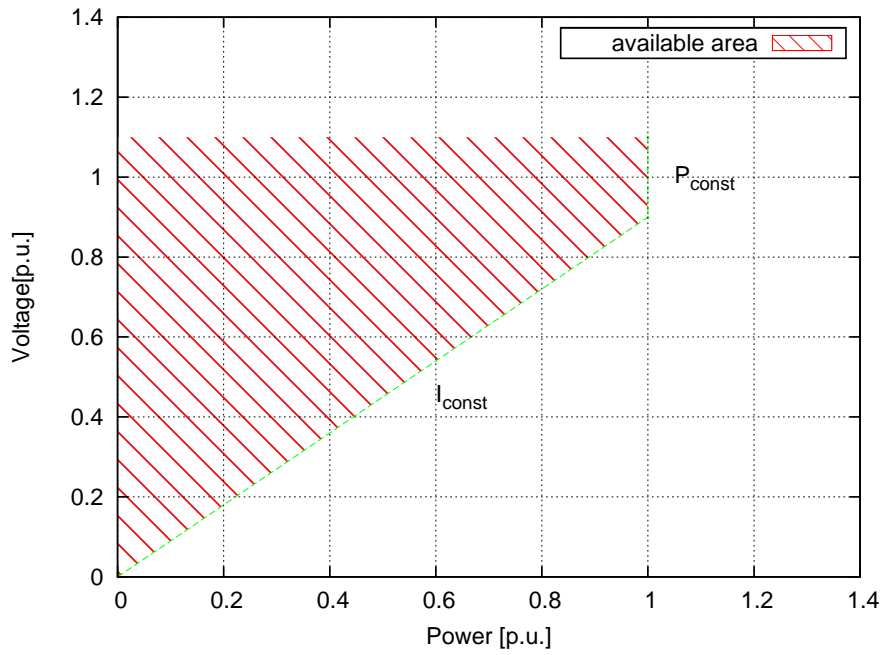


図 2.4: インバータ特性

PV 運転継続 事故によって脱落せず、事故除去後でも力率 1 のまま出力する解析条件。

PV 低出力 例えば朝や夕方のような、日射強度が弱く出力が定格の半分となる解析条件。

PV なし PV が存在しない系統、すなわち PV 出力が常に 0 となる解析条件。

第3章 電力系統と関連する要素モデル

本章では、本論文で用いる種々の解析条件に対する系統モデル、発電機モデル、同期機運用条件、負荷モデルについて述べる。

3.1 解析条件の概要

本研究では、2つの系統モデル、2つの発電機モデル、2つの同期機運用方針、10個の解析条件について過渡安定度を解析する。

表 3.1 に検討する同期機モデルを示す。同期機モデルとして、古典モデルと詳細モデルを用いた。古典モデルとは、 x'_d 背後電圧一定モデルである。同期機を簡単な回路で表せるため、計算式から求めた $P-\delta$ カーブに等面積法を適用して評価した。詳細モデルとは、同期機の動的特性を詳細に模擬したモデルである。時間軸での検討が必要であり、Y法シミュレーションを用いて評価した。

表 3.2 に検討する系統モデルを示す。系統モデルは電源系統を主として対象とするが、負荷に関する検討をするため負荷あり系統についても検討する。電源系統とは、同期機と PV が無限大母線に送電する系統である。負荷あり系統とは、同期機と PV が負荷と無限大母線に送電する系統である。

表 3.3 に同期機運用方針を示す。同期機運用方針とは、同期機容量の決め方のことである。同期機容量維持は同期機の容量を PV がなかった時と同じ量に維持する解析条件であり、同期機容量削減は同期機の容量を PV の出力相当分だけ削減する。

表 3.4 に解析条件名と変更内容を示す。PV 無効電力補償、PV 低出力、PV なし、PV 運転継続は PV に関する解析条件である。PV 脱落補償あり、同期機運用方針は同期機に関する解析条件である。送電電力増加、検討する系統モデルは系統に関する解析条件である。

これらの解析条件の詳細については、次節以降に述べる。

表 3.1: 検討する同期機モデル

古典モデル	背後電圧一定モデル、解析に等面積法を用いる
詳細モデル	励磁系まで考慮したモデル、解析に Y 法シミュレーションを用いる

表 3.2: 検討する系統モデル

電源系統	同期機と PV が無限大母線に送電する系統
負荷あり系統	同期機と PV が負荷と無限大母線に送電する系統

表 3.3: 同期機運用方針

同期機容量維持	同期機の容量を PV がなかった時と同じだけ維持
同期機容量削減	同期機の容量を PV の出力相当分だけ削減

表 3.4: 解析条件名と変更内容

sn	解析条件名	変更内容
0	標準解析条件	変更なし
1	PV 脱落補償あり	事故除去後に同期機の機械入力が増加
2	PV 無効電力補償	事故除去後に PV が進相無効電力を注入
3	送電電力増加	PV 出力を送電電力に上乘せし、同期機出力は減じない
4	負荷インバータ特性	負荷特性をインバータ特性 (図 2.4) に変更
5	軽負荷	負荷電力が標準解析条件の 6 割 (0.54[pu]) となる
6	負荷脱落	事故除去後に負荷電力が 0 となる
7	PV 低出力	初期状態において PV が定格出力の半分の 0.25[pu] だけ出力
8	PV なし	初期状態での PV 出力がない
9	PV 運転継続	事故除去後も PV が運転継続する

3.2 系統モデル

系統モデルとして、電源系統モデルと負荷あり系統モデルを想定した。電源系統とは、同期機と PV が無限大母線に送電する系統である。負荷あり系統とは、同期機と PV が負荷と無限大母線に送電する系統である。

3.2.1 電源系統モデル

本論文では、発電機 (同期機) と PV が無限大母線に送電する系統を電源系統モデルと呼ぶ (表 3.2)。電源系統モデルでは、ひとかたまりの発電機群をひとつの大規模な電力系統と見なし、他の電力系統へ連系線を介して送電している状況を想定する。

(I) 一機無限大母線系統モデル

大きい電力系統にある一つの発電機を接続したとき、その発電機から見た電力系統は周波数と電圧の大きさが一定の電源に見える。無限大母線とは、このような電圧と周波数が常に一定のモデルのことであり、大容量の電力系統を模擬している^[16]。図 3.1 のように、一機の発電機が送電線を介して無限大母線に接続している系統のことを一機無限大母線系統と呼ぶ。

過渡安定度を解析する場合、一機無限大母線系統を用いると数式化や説明がしやすい。まず、系統モデルとしてこの一機無限大母線系統をベースにモデルを作成する。

系統モデルでは、大規模系統を想定しているため、送電線は超高压送電線を想定している。超高压送電線に含まれる抵抗成分は、送電線に含まれるリアクタンス成分の約 1/10 の値であり、とても小さい。解析をする上でこの小さな抵抗成分を考慮すると計算式が複雑になるため、本研究の系統モデルでは簡単のために送電線抵抗を無視する。

(II) 複数の同期機の集約モデル

同期機は、古典モデルでは電圧源とリアクタンス (過渡リアクタンスと変圧器のリアクタンスと送電線のリアクタンスの合成リアクタンス) でモデル化される。図 3.2(a) に同期機が n 台並列する系統

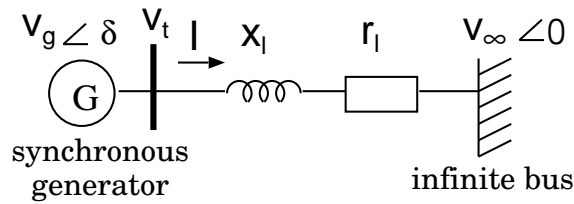


図 3.1: 一機無限大母線系統モデル

を考える。この n 台の同期機を図 3.2(b) のように 1 台の同期機が並列する系統に縮約するときの合成リアクタンス x_1 と総発電電力 P_1 を求める。

$$x_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{x_{1k}}} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$P_1 = \sum_{k=1}^n P_{1k} \dots \dots \dots (3.2)$$

式 (3.1) と式 (3.2) のような x_1 と P_1 を用いれば、複数の同期機のリアクタンスと出力を 1 台の同期機に等価縮約できる。例えば全ての発電機が一樣な出力とリアクタンスを持つ場合、1 台あたりの出力を P 、リアクタンスを x とおくと合成リアクタンス x_1 と総発電電力 P_1 は式 (3.3) 及び式 (3.4) で与えられる。

$$x_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k}} = \frac{1}{\frac{n}{x}} = \frac{x}{n} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$P_1 = \sum_{k=1}^n P_{1k} = nP \dots \dots \dots (3.4)$$

同期機容量を削減することは、発電機台数 n の値を小さくすることと等価であり、式 (3.3)、式 (3.4) を用いることで表現できる。

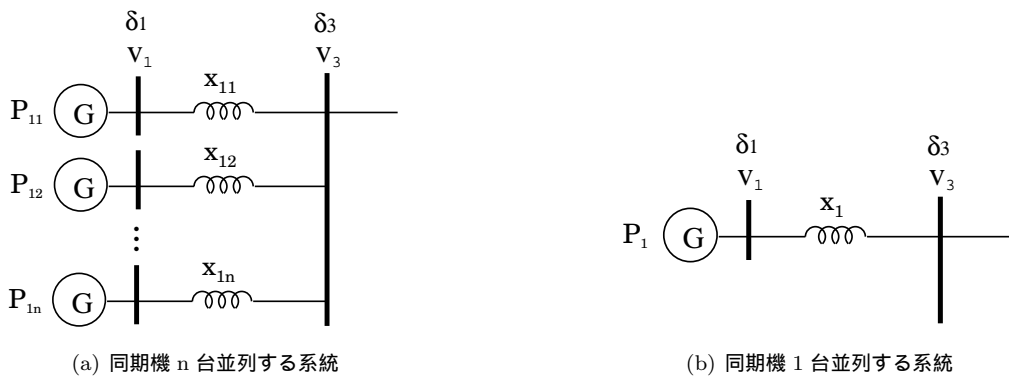


図 3.2: 複数の同期機の集約モデル

(III) 送電線のモデル

送電線は二回線とした (図 3.3(a))。事故は発電機の送電端で発生し、一回線開放によって除去され (図 3.3(b))、再閉路はしないという過酷な条件の事故を想定する (図 3.3(c))。このとき、送電線の合

成リアクタンスは初期状態と事故中は式 (3.5)、事故除去後は式 (3.6) のようになる。

$$x_{30} = \frac{1}{\frac{1}{x_{31}} + \frac{1}{x_{31}}} + x_{32} = \frac{x_{31}}{2} + x_{32} \dots \dots \dots (3.5)$$

$$x_{3c} = \frac{1}{\frac{1}{x_{31}} + \frac{1}{x_{31}}} + x_{32} = x_{31} + x_{32} \dots \dots \dots (3.6)$$

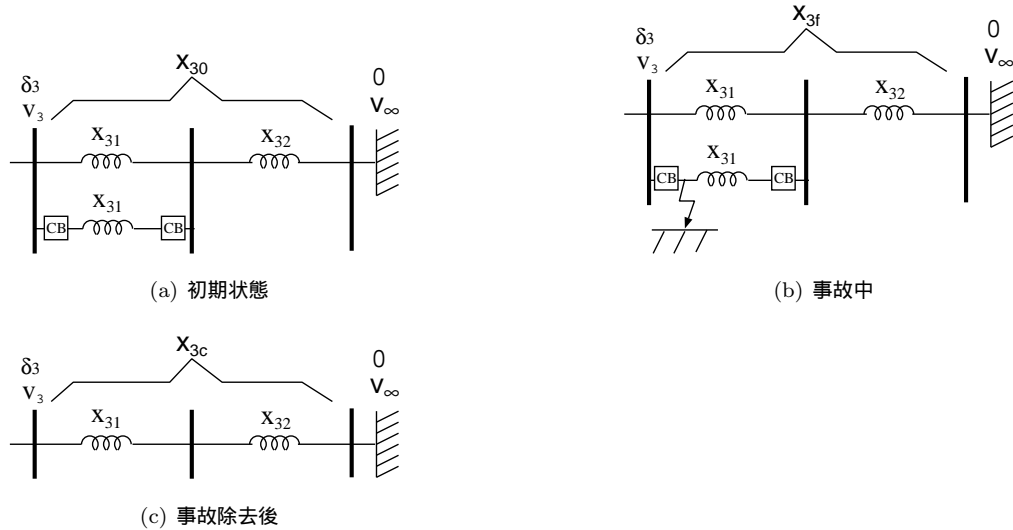


図 3.3: 送電線モデル

(IV) PV なしの電源系統モデル

図 3.4 に PV なしの電源系統モデルを示す。pu 値は系統ベース 1000[MVA]、定格電圧 500[kV] を基準とした値である。式 (3.5)、式 (3.6) より、送電線の合成リアクタンスは初期状態・事故中は 0.40[pu]、事故除去後は 0.57[pu] となる。初期状態での系統電圧 v_3 は 1.0[pu] となるように発電機の背後電圧 v_1 は決める。初期状態の状態量は添え字に 0 を付す。初期状態での同期機の出力 P_{10} 、送電電力 P_{30} は共に 1.0[pu] とする。

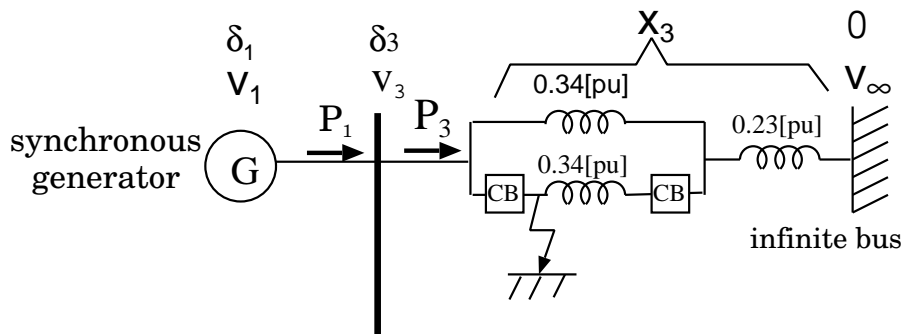


図 3.4: PV なしの電源系統モデル (1000MVA ベース)

(V) 複数の PV の集約モデル

個々の PV は、既に述べたように電流源として模擬できる。複数の PV は配電システムのような負荷システムに設置されるが、電流源とインピーダンスに分離することができる^[17]。このため、PV はインピーダンスが直列に存在しない電流源として表現した。

(VI) 電源系統モデル

図 3.5 に同期機と PV の連系した一機無限大母線系統モデルを示す。初期状態から事故除去後まで変更のないパラメータ値は図中に示す。表 3.5 に同期機運用方針 (表 3.3)、同期機モデル (表 3.1)、解析条件 (表 3.4) ごとの x_1 の値を示す。事故は、送電線リアクタンス x_3 は初期状態の 0.40[pu] から事故除去後は 0.57[pu] とした ((III) 節参照)。同期機の機械入力 $P_m = P_{10}$ は一定とし、PV は常時力率 1 の運転とした (2.2 節参照)。

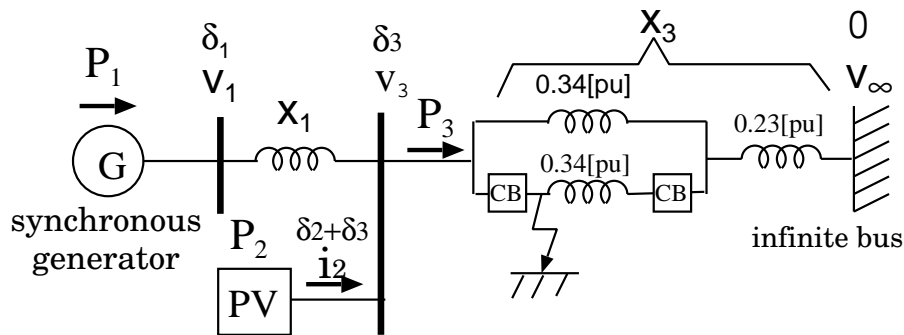


図 3.5: 電源系統モデル

表 3.5: 電源系統での条件ごとの x_1 の値 (1000[MVA] ベース)[pu]

同期機運用方針	同期機容量維持			同期機容量削減		
	同期機容量	x_1 (古典)	x_1 (詳細)	同期機容量	x_1 (古典)	x_1 (詳細)
軽負荷	0.64	0.497	0	0.14	2.273	0
送電電力増加	1.50	0.212	0	1.00	0.318	0
上記以外全て	1.00	0.318	0	0.50	1.429	0

3.2.2 負荷あり系統モデル

負荷あり系統モデルでは、ひとかたまりの発電機群と負荷群をひとつの大規模な電力系統と見なし、他の電力系統へ連系線を介して送電している状況を想定している。図 3.6 に系統モデルを示す。系統ベースは 1000[MVA] とし、定格周波数は 50[Hz] とする。負荷を含めたひとかたまりの電力系統から他の電力系統へ連系線を介して送電している状況を、より明確に想定するため、送電側の系統に負荷を追加し、図 3.6 の x_1, x_3 についても電源系統モデルよりも大きな値 (標準条件では $x_1=0.5$ [pu]。 x_3 については図 3.6 参照) とした。表 3.6 に同期機運用方針 (表 3.3)、同期機モデル (表 3.1)、解析条件 (表 3.4) ごとの x_1 の値を示す。事故は最も過酷な送電端事故一回線開放再開路なしを想定する。送電線リアクタンス x_3 は初期状態の 0.6[pu] から、事故除去後は遮断器 (CB:Circuit Breaker) が開

放されるで $0.8[\text{pu}]$ となる。本項で想定した解析条件を、表 3.3 と表 3.4 に示す。送電電力増加のケース以外では送電電力一定に固定し、 $P_{30} = 0.1[\text{pu}]$ とする。また、PV の定格出力 $P_{20} = 0.5[\text{pu}]$ 、負荷の定格 $P_{40} = 0.9[\text{pu}]$ とする。

同期機（発電機）の定格容量、出力、 x_1 については、3.3.6 節に示す。

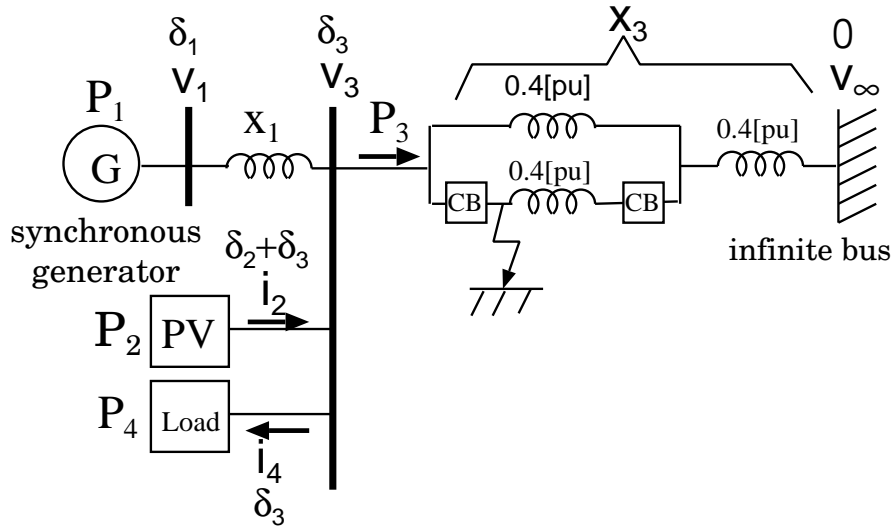


図 3.6: 負荷あり系統モデル (1000MVA ベース)

表 3.6: 負荷あり系統での条件ごとの x_1 の値 (1000[MVA] ベース)[pu]

同期機運用方針	同期機容量維持			同期機容量削減		
	同期機容量	x_1 (古典)	x_1 (詳細)	同期機容量	x_1 (古典)	x_1 (詳細)
軽負荷	0.64	0.781	0.284	0.14	3.571	1.299
送電電力増加	1.50	0.333	0.121	1.00	0.500	0.182
上記以外全て	1.00	0.500	0.182	0.50	1.000	0.364

3.2.3 検討する比較条件

解析条件として、負荷の考慮による影響、送電電力増加による影響を検討する。

負荷の考慮による影響とは、送電系統と負荷あり系統の 2 つの系統モデルに対して、 $P-\delta$ カーブや CCT への影響を検討する。

送電電力増加とは、初期状態での同期機の発電電力を PV なしの場合と同じ値とし、PV の発電電力は送電電力に上乗せする解析条件である。

3.3 発電機モデル

発電機モデルとしては、古典モデルと詳細モデルを用いた。古典モデルでは、背後電圧一定モデルを用い、等面積法により過渡安定度を評価した。詳細モデルでは、発電機モデルに大型円筒機モデルを用い、励磁モデルでは AVR に自励サイリスタ方式の制御定数整定値^[18]を用い PSS に発電電力

P の入力信号を用いる PSS モデルを用いた。调速機は PV 脱落補償時のみに用い、火力簡略型プラントモデルを用いた (図 3.8(c))(Lpt=1)^[14]。

3.3.1 古典モデル

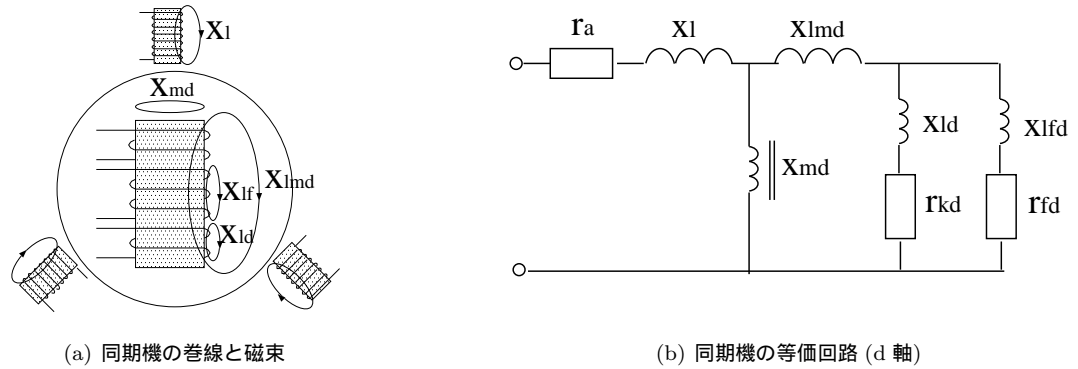


図 3.7: 同期機の原理

同期機は図 3.7(a) のように巻線と磁束から構成される^[15]。図 3.7(b) に同期機の等価回路を示す。過渡リアクタンス x'_d は、以下の式で表現される。

$$x'_d = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x_{lmd} + x_{lfd}}} \dots \dots \dots (3.7)$$

ただし、 x_l は電機子漏れ磁束、 x_{md} は主磁束、 x_{lmd} は回転子漏れ磁束である。過渡リアクタンスは界磁巻線までを考慮して電機子側から見たリアクタンスのことである。

3.3.2 同期機モデル

同期機 (+励磁系) のモデルとして、古典モデル、詳細モデルの 2 つを想定した (表 3.1)。古典モデルとは、 x'_d 背後電圧を一定とするモデルである。詳細モデルとは、発電機モデルに同期機詳細モデル、励磁系モデルに AVR&PSS を用いるモデルである。同期機詳細モデルとして、d 軸 1 個、q 軸 2 個の制動回路を持つ発電機 (大型円筒機) モデルを用いた (Lgt=5)。

3.3.3 励磁系モデル

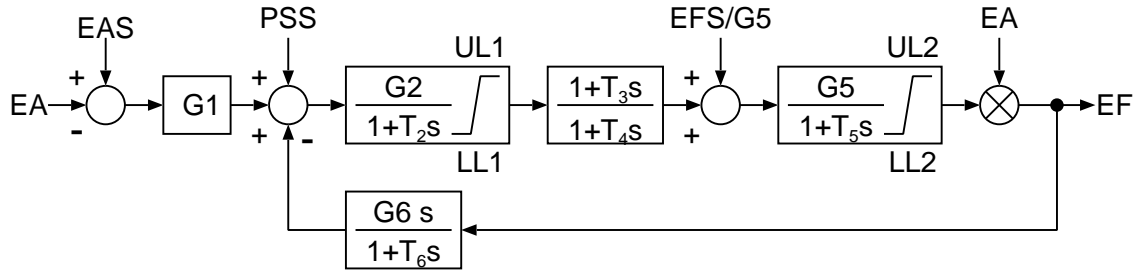
励磁系モデルでは、同期機詳細モデルに AVR(Automatic Voltage Regulator) と PSS(Power System Stabilizer) を付加して界磁電圧を制御する。AVR は自励式交流励磁機方式モデルを用い、パラメータは自励サイリスタ方式の制御定数整定値^[18]を用いた (図 3.8(a))。PSS は発電電力 P の入力信号を用いる PSS モデルを用いた (図 3.8(b))(LAT=153)^[14]。

3.3.4 调速機モデル

蒸気タービンの调速機はタービン出力、すなわち機械入力を増加・減少させる機能を持つ。タービン出力の変化は一般に過渡安定度の時間領域に比較して長い時定数を持つので、等面積法による解析では機械入力は一定とした。

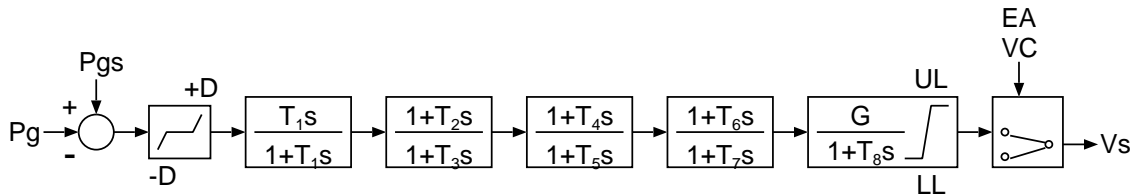
ただし、PV 脱落補償ありのケースでは、PV 脱落による PV 出力の喪失によって同期機（発電機）からこの喪失分を補償することを想定するため、同期機出力の増加を考慮した。この場合、P- δ カーブを用いた検討（第 5 章）で用いる古典モデルでは、機械入力の時間的変化を模擬しにくいいため、機械入力を便宜的にステップ状に変化させた。

第 6 章での Y 法シミュレーションによる検討では、火力簡略型プラントモデル（図 3.8(c))(L_{pt}=1)^[14]の调速機モデルを用いるが、PV 脱落補償ありのケースでは定格出力の 1.05 倍を超えて出力を出したい場合があるので、その CV サーボ上限 U は標準値である 1.05[pu] を 10.0[pu] に変更した。



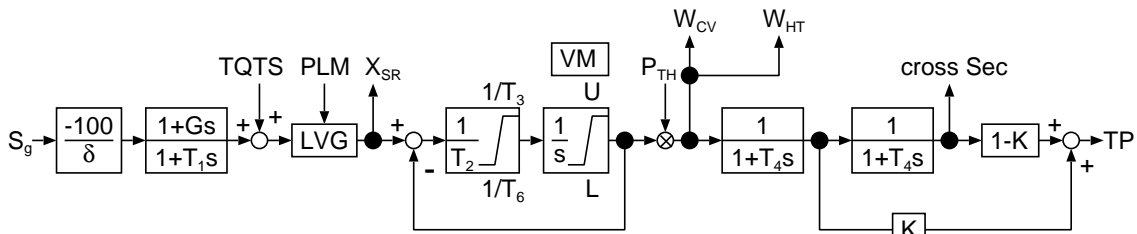
$G1=1.0, G2=150.0, T2=0.013, UL1=100.0, LL1=-100.0, T3=0.22, T4=0.5, G5=1.0, T5=0.013, UL2=5.5, LL2=-4.8, G6=0.0, T6=1.0$

(a) AVR モデル：自動サイリスタ方式



$D=0.0, T1=2.0, T2=0.07, T3=0.5, T4=0.0, T5=0.0, T6=0.0, T7=0.0, G=2.0, T8=0.02, UL=0.2, LL=-0.2$

(b) PSS モデル



$\delta=4.0, K=0.3, T1=0.2, T2=0.2, T3=0.2, T4=5.0, T5=0.25, T6=9.0, U=10.0, L=0.0, G=0.0$

(c) 火力簡略型プラントモデル

図 3.8: 交流励磁機方式 AVR と PSS の制御定数整定

3.3.5 同期機の加速減

図 3.9 に蒸気タービンの概念図を示す。火力・原子力発電ではボイラから供給された高温・高圧の蒸気エネルギーがタービンを通過することで軸を回転させるエネルギーとなる^[19]。この機械的なエネルギーによる出力を本稿では機械入力 P_m と呼ぶ。軸上には発電機が付いており、この回転エネルギーを電気エネルギーに変換して、系統へ電力を供給している。この電気エネルギーによる出力を電気出力 P_e と呼ぶ。 $P_m - P_e > 0$ のとき、軸は加速をする。加速しすぎると回転子が機械的に故障する恐れがあるため緊急停止する。 $P_m - P_e < 0$ のとき、軸は減速する。 $P_m - P_e = 0$ のとき、軸の回転速度は変わらない。

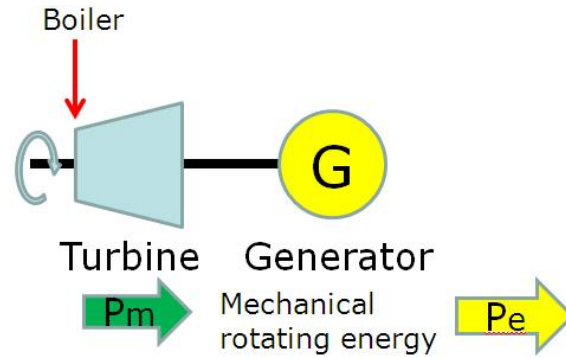


図 3.9: 蒸気タービンの概念図

3.3.6 同期機運用方針による容量の決定

同機器運用方針とは、同期機容量の決め方のことである。PV が導入されたときの同期機の運用方針として、同期機容量維持と同期機容量削減の 2 種類を想定した (表 3.3)。同期機容量維持は同期機の容量を PV がなかった時と同じだけ維持する運用方針であり、同期機容量削減は、PV の発電電力に応じて同期機の連系容量を減少させ、同期機の出力を同期機容量基準で一定とする運用方針である。

表 3.7 に解析条件と同期機容量を示す。

後述する軽負荷 (3.4 節参照) では、負荷あり系統において 1000[MVA] ベースで負荷量が 0.54[pu] となるため、送電電力の 0.1[pu] と合わせて 0.64[pu] の発電電力が必要である。同期機容量維持では、0.64[pu] の発電電力を全て同期機がまかなえるように、0.64[pu] の同期機容量が必要である。同期機容量削減では、PV が出力する 0.5[pu] の発電電力に応じて接続する同期機の容量を削減し、同期機容量は 0.14[pu] の出力に必要な 0.14[pu] となる。

送電電力増加 (3.2.3 節参照) では、電源系統、負荷あり系統のどちらにおいても、同期機の出力が 1.0[pu]、PV の出力が 0.5[pu] となり、合わせて 1.5[pu] の発電電力が必要である。したがって、同期機容量維持では、1.5[pu] の同期機容量が必要であり、同期機容量削減では、同期機容量は 1.0[pu] となる。

上記以外では、電源系統、負荷あり系統のどちらにおいても、同期機の出力が 0.5[pu]、PV の出力が 0.5[pu] となり、合わせて 1.0[pu] の発電電力が必要である。したがって、同期機容量維持では、1.0[pu] の同期機容量が必要であり、同期機容量削減では、同期機容量は 0.5[pu] となる。

同期機を接続するリアクタンス x_1 は、式 (4.42) で示すように同期機の容量によって異なる。電源系統での値を表 3.5、負荷あり系統での値を表 3.6 に示す。

表 3.7: 解析条件と同期機容量 (1000[MVA] ベース)[pu]

解析条件	同期機容量維持	同期機容量削減
軽負荷	0.64	0.14
送電電力増加	1.5	1.0
上記以外全て	1.0	0.5

3.3.7 検討する比較条件

同期機に対する 2 種類の運用条件が過渡安定度へ与える影響を検討した (表 3.3)。その運用条件とは、同期機容量の維持と削減の違い、PV 脱落補償ありなしであり、同期機容量維持で、PV 脱落補償なしを基準とした (表 3.8)。

同期機容量維持 同期機容量維持とは、PV の発電電力に関わらず PV なしと同じだけの同期機容量を維持する。

同期機容量削減 同期機容量削減とは、PV の発電電力に応じて同期機の連系容量を減少させる運用方針のことである (3.3.6 項参照)。

PV 脱落補償なし 事故及び事故除去後も同期機への機械入力は初期発電電力と同じ値で一定とする。

PV 脱落補償あり PV 脱落補償ありでは、PV の脱落により不足した電力を自系統と他系統の同期機のガバナフリーにより同量ずつ補償する (0.25[pu] の出力増加) ことを想定する。

3.4 負荷モデル

簡単のため、負荷の力率は常に 1.0 で一定とした。

負荷特性としては、標準解析条件として定インピーダンス特性とし、比較として負荷インバータ特性を持った負荷の場合を想定した。負荷インバータ特性とは、電圧が 0.83[pu] 以上であれば定電力特性であるが、0.83[pu] 未満になると定インピーダンス特性とする解析条件のことである。

負荷量は標準解析条件では 0.9[pu] とし、軽負荷としてその 6 割 (0.54[pu]) とした。これは、春や秋など中間期を想定している。

負荷脱落は、瞬時電圧低下で負荷が脱落しないのが標準解析条件であり、比較としてすべての負荷が脱落する場合を想定した。

3.4.1 検討する比較条件

負荷モデルによる解析条件として、負荷特性、負荷量、負荷脱落を想定した。

負荷インバータ特性 負荷特性は標準解析条件としては定インピーダンス特性を用いるが、インバータ特性 (2.2 節参照) をを持った負荷に変更する。

軽負荷 負荷量は標準解析条件では 0.9[pu] とするが、軽負荷ではその 6 割 (0.54[pu]) に変更する。

負荷脱落 負荷脱落は、瞬時電圧低下で負荷が脱落しないのが標準解析条件であり、比較としてすべての負荷が脱落する場合を想定した。

3.5 本章のまとめ

本章では、本論文で用いた発電機モデル、系統モデル、同期機運用条件、負荷モデルについて述べた。

発電機モデルとしては、古典モデルと詳細モデルを想定した。古典モデルでは、背後電圧一定モデルを用い、等面積法により過渡安定度を評価した。詳細モデルでは、発電機モデルに大型円筒機モデルを用い、励磁モデルでは AVR に自励サイリスタ方式の制御定数整定値^[18]を用い PSS に発電電

力Pの入力信号を用いるPSSモデルを用いた。调速機はPV脱落補償時のみに用い、火力簡略型プラントモデルを用いた(図3.8(c))(Lpt=1)^[14]。

系統モデルとしては、対象系統には電源のみが接続され無限大母線と連系されている電源系統と、対象系統内に負荷も存在し連系線を介して無限大母線と接続する負荷あり系統の2種類とした。系統に関する解析条件としては、送電電力運用方針を想定した。送電電力運用方針とは無限大母線と接続する送電線の潮流についての条件であり、PVの出力があってもその送電線潮流を一定に保つよう同期機(発電機)の出力を減少させるよう運用するのを標準とし、比較として、同期機出力は減少させずPV出力分をそのまま送電線潮流を上乗せする送電電力増加の運用方針での結果を求めた。

負荷モデルによる解析条件として、負荷特性、負荷量、負荷脱落ありなしを想定した。負荷特性としては、標準解析条件としては定インピーダンス特性とし、比較としてインバータ特性を持った負荷の場合を想定した。負荷量は0.9[pu]とし、軽負荷としてその6割(0.54[pu])とした。負荷脱落は、瞬時電圧低下で負荷が脱落しないのが標準解析条件であり、比較としてすべての負荷が脱落する場合を想定した。

同期機の運用条件として、同期機容量削減、PV脱落補償ありなしを想定した。PVの導入によってPV出力があったとしても並列する同期機(発電機)の容量を維持するのが同期機容量維持であり、同期機容量削減とはPV出力分だけ並列同期機の容量を削減することを想定した。PV脱落補償とは、瞬時電圧低下によってPVが脱落する場合に、脱落前にPV出力を補うよう並列同期機の出力を増加させることを想定した。

解析の対象とした系統モデルや解析条件をまとめて図3.10に示す。

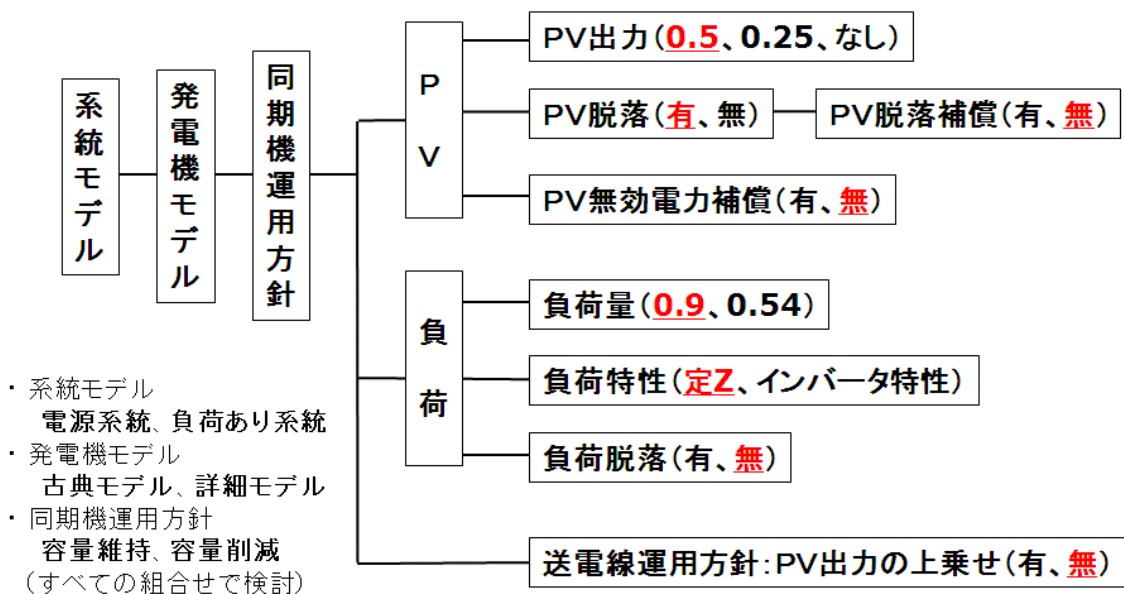


図 3.10: 解析の対象とした系統モデルや解析条件

解析条件の選択により変更するパラメータを表3.8に示す。初期状態での変数に0を、事故除去後の変数にcを付す。

表 3.8: 検討する解析条件により変更するパラメータ

sn	解析条件	変更式
0	標準解析条件	変更なし
1	PV 脱落補償あり	$P_{mc+} = P_{20}/2$
2	PV 無効電力補償	$\delta_{2c} = -\pi/2$
3	送電電力増加	$P_{10} = P_{30} + P_{40}$
4	負荷インバータ特性	if($v_3 > 0.83$) $P_4 = P_{40}$ else $P_4 = 1.2v_3$
5	軽負荷	$P_{40} = 0.54[\text{pu}]$
6	負荷脱落	$P_{4c} = 0[\text{pu}]$
7	PV 低出力	$P_{20} = 0.25[\text{pu}]$
8	PV なし	$P_{20} = 0[\text{pu}]$
9	PV 運転継続	$P_{2c} = P_{20}$

ただし、 P_{mc} :事故除去後の機械入力、 P_{20} :初期状態での PV 出力、 δ_{2c} :事故除去後の PV の出力電流位相、 P_{10} :同期機の初期出力、 P_4 :負荷の消費電力、 P_{40} :初期状態での負荷の消費電力、 P_{20} :初期状態での PV 出力、 P_{2c} :事故除去後の PV 出力

第4章 CCT 計算手法

本章では、各系統モデルでの各パラメータ値の算出方法について述べる。同期機出力は PV からの出力によって弱められることがわかった。

表 4.1: 負荷あり系統での各状態量の求め方

変数	名称	求め方 (値)	初期値
v_1	x'_d 背後電圧	$v_{30}=1.0$ となるよう調整して定める	-
v_3	系統電圧	式 (4.12) より導く	1.0[pu]
v_∞	無限大母線電圧	定数	1.0[pu]
δ_1	相差点	計算時に与えられる	-
δ_2	PV 電流位相	0[rad](ただし、無効電力補償時は $-\pi/2$ [rad])	0[rad]
δ_3	系統電圧位相	式 (4.9)	-
δ_4	負荷電流位相	0[rad]	0[rad]
P_1	同期機出力	式 (4.15)	P_{10}
P_2	PV 出力	式 (4.19)	P_{20}
P_3	送電電力	式 (4.22)	P_{30}
P_4	負荷電力	式 (4.39)	P_{40}
x_1	過渡リアクタンス	定数	0.318
x_3	送電線リアクタンス	定数	0.40

*) $v_{30}=1.0$ [pu] に 6 桁の精度で一致するまで収束計算

**）無効電力補償時は $\delta_{2c} = -\pi/2$ [rad]

4.1 電源系統

図 4.1 に電源系統モデルを示す。ある相差点 δ_1 が与えられたとき、同期機出力 P_1 、系統電圧 v_3 を算出する式を導出する。

4.1.1 系統電圧位相 δ_3 の算出

回路方程式より、

$$\frac{v_1 e^{j\delta_1} - v_3 e^{j\delta_3}}{jx_1} + i_2 e^{j(\delta_2 + \delta_3)} = \frac{v_3 e^{j\delta_3} - v_\infty}{jx_3} \dots \dots \dots (4.1)$$

式 (4.1) の分母を払って、 v_3 について左辺にまとめると、

$$v_3(x_1 + x_3) = x_3 v_1 e^{j(\delta_1 - \delta_3)} + jx_1 x_3 i_2 e^{j\delta_2} + x_1 v_\infty e^{-j\delta_3} \dots \dots \dots (4.2)$$

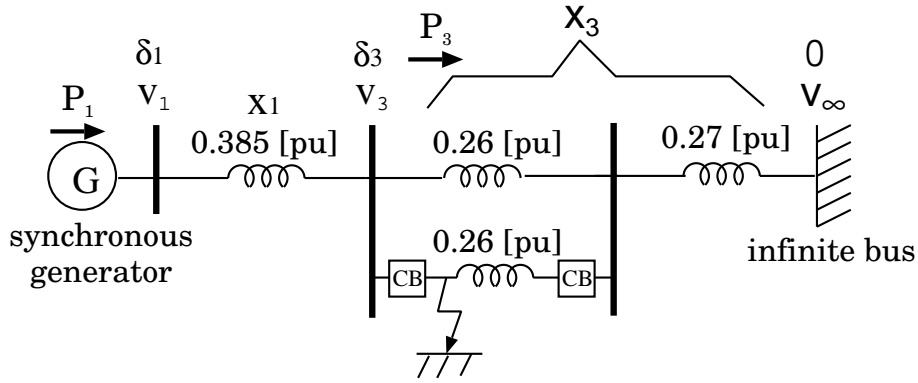


図 4.1: 電源システムモデル (再掲)

式 (4.2) より、 v_3 は式 (4.3) で表現できる。

$$\therefore v_3 = \frac{x_3 v_1 e^{j(\delta_1 - \delta_3)} + j x_1 x_3 i_2 e^{j\delta_2} + x_1 v_\infty e^{-j\delta_3}}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (4.3)$$

式 (4.3) において、虚部に注目すると、 v_3 は実数であるから、

$$\begin{aligned} x_3 v_1 \sin(\delta_1 - \delta_3) + x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 - x_1 v_\infty \sin \delta_3 &= 0 \\ x_3 v_1 (\sin \delta_1 \cos \delta_3 - \cos \delta_1 \sin \delta_3) + x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 - x_1 v_\infty \sin \delta_3 &= 0 \\ (x_3 v_1 \sin \delta_1) \cos \delta_3 - (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty) \sin \delta_3 &= -x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 \dots \dots (4.4) \end{aligned}$$

(i) $\delta_1 \neq 0$ の場合

式 (4.4) に δ_3 について角の合成を適用する。

$$Z \cos(\delta_3 - \alpha) = -x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 \dots \dots \dots (4.5)$$

ただし、

$$Z = \sqrt{(x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2} \dots \dots \dots (4.6)$$

$$\tan \alpha = -\frac{x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty}{x_3 v_1 \sin \delta_1} \dots \dots \dots (4.7)$$

(a) $-1 \leq \frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} \leq 1$ の場合、すなわち、

$$\begin{aligned} (x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2)^2 &\leq (x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2 \\ i_2 &\leq \frac{\sqrt{(x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2}}{x_1 x_3 \cos \delta_2} \dots \dots \dots (4.8) \end{aligned}$$

の場合、

$$\therefore \delta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} \right) + \alpha \dots \dots \dots (4.9)$$

(b) $\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} < -1$ または $1 < \frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z}$ の場合、ある角度 θ について、 $-1 \leq \cos \theta \leq 1$ より、解なし。

(ii) $\delta_1 = 0$ の場合

式 (4.4) に $\delta_1 = 0$ を代入して、

$$(x_3 v_1 + x_1 v_\infty) \sin \delta_3 = x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 \dots \dots \dots (4.10)$$

(a) $x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 \leq x_3 v_1 + x_1 v_\infty$ の場合

$$\delta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{x_3 v_1 + x_1 v_\infty} \right) \dots \dots \dots (4.11)$$

これより、 δ_3 が求まったので、式 (4.15) より P_1 は求まった。

(b) $x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2 \leq x_3 v_1 + x_1 v_\infty$ の場合、ある角度 θ について、 $-1 \leq \sin \theta \leq 1$ より、解なし。

以上より、 δ_3 は求まった。

4.1.2 系統電圧 v_3 の導出

系統電圧 v_3 を求める。式 (4.3) より、

$$v_3 = \frac{x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_3) - x_1 x_3 i_2 \sin \delta_2 + x_1 v_\infty \cos \delta_3}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (4.12)$$

δ_3 の導出は、式 (4.9) から求めることができる。これより、 v_3 は求まった。

4.1.3 同期機発電電力 P_1 の算出

$P_1 + jQ_1$ は電力の定義より、

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= V_1 \bar{I}_1 \\ &= v_1 e^{j\delta_1} \frac{v_1 e^{-j\delta_1} - \bar{v}_3 e^{-\delta_3}}{-jx_1} \\ &= -\frac{v_1^2}{jx_1} + \frac{v_1 \bar{v}_3 e^{j(\delta_1 - \delta_3)}}{jx_1} \dots \dots \dots (4.13) \end{aligned}$$

v_3 は実数だから $\bar{v}_3 = v_3$ なので、式 (4.13) に式 (4.3) を代入して、

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= -\frac{v_1^2}{jx_1} + \frac{v_1 e^{j(\delta_1 - \delta_3)}}{jx_1} \frac{x_3 v_1 e^{-j(\delta_1 - \delta_3)} - jx_1 x_3 i_2 e^{-j\delta_2} + x_1 v_\infty e^{j\delta_3}}{x_1 + x_3} \dots \dots (4.14) \\ &= -\frac{v_1^2}{jx_1} - \frac{x_3 v_1^2}{jx_1(x_1 + x_3)} - j \frac{v_1}{x_1} \frac{-jx_1 x_3 i_2 e^{j(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3)} + x_1 v_\infty e^{j\delta_1}}{x_1 + x_3} \end{aligned}$$

P_1 は実数なので、純虚数を払う。

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{v_1}{x_1} \frac{-x_1 x_3 i_2 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3) + x_1 v_\infty \sin \delta_1}{x_1 + x_3} \\ \therefore P_1 &= \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - i_2 x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3)}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (4.15) \end{aligned}$$

以上より、 P_1 は求まった。

4.1.4 PV 発電電力 P_2 の導出

$P_2 + jQ_2$ は電力の定義より、

$$P_2 + jQ_2 = V_2 \bar{I}_2 \dots \dots \dots (4.16)$$

$$= v_3 e^{j\delta_3} i_2 e^{-j(\delta_2 + \delta_3)} \dots \dots \dots (4.17)$$

$$= v_3 i_2 e^{-j\delta_2} \dots \dots \dots (4.18)$$

P_2 は実数であるから、

$$P_2 = v_3 i_2 \cos \delta_2 \dots \dots \dots (4.19)$$

式 (4.12) より v_3 は求まっているため、 P_2 も求まった。

4.1.5 送電電力 P_3 の導出

送電電力 P_3 は、同期機出力 P_1 、PV 出力 P_2 、送電ロス P_{loss} の和で表される。すなわち、送電電力は式 (4.20) で表現できる。

$$P_3 = P_1 + P_2 + P_{loss} \quad \dots \dots \dots (4.20)$$

ここで、送電線の抵抗成分はゼロとしてモデル化しているため、

$$P_{loss} = 0 \quad \dots \dots \dots (4.21)$$

式 (4.20)、式 (4.21) より、

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \dots \dots \dots (4.22)$$

これより、 P_3 は求まった。

4.2 負荷あり系統

図 4.2 に負荷あり系統モデルを示す。ある相差角 δ_1 が与えられたとき、同期機出力 P_1 、系統電圧 v_3 を算出する式を導出する。

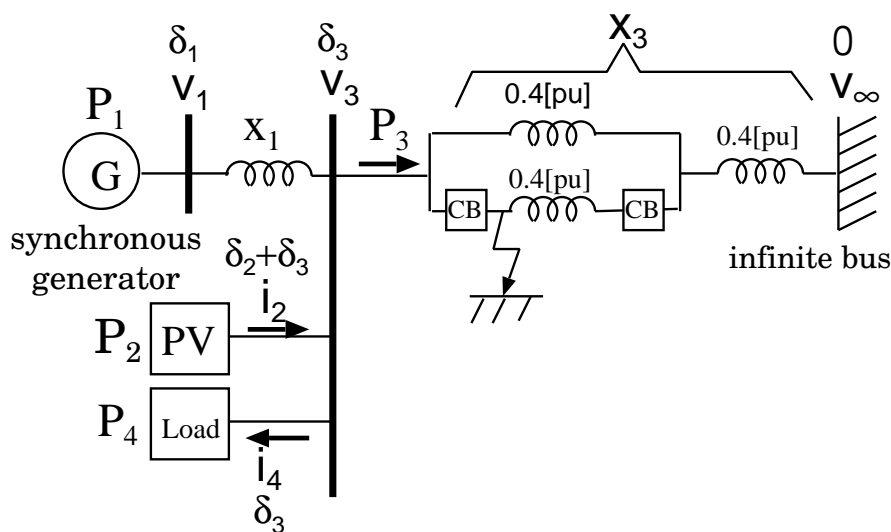


図 4.2: 負荷あり系統モデル (再掲)

電源系統 (図 3.6) との違いは、負荷 P_4 が存在することである。電源系統 (図 3.6) でのノード 3 から PV 側へ流れる合成電流 I_{4t} を考えると、

$$I_{4t} = -i_2 e^{j(\delta_2 + \delta_3)} \quad \dots \dots \dots (4.23)$$

一方、負荷あり系統図 4.2 でのノード 3 から PV 側へ流れる合成電流 I_{4l} を考えると、

$$I_{4l} = -i_2 e^{j(\delta_2 + \delta_3)} + i_4 e^{j(\delta_4 + \delta_3)} \quad \dots \dots \dots (4.24)$$

今、以下の置換を考える。

$$I_{4t} \rightarrow I_{4l} \quad \dots \dots \dots (4.25)$$

両辺に $e^{j\phi}$ を掛けても等価な置換である。

$$I_{4t}e^{j\phi} \rightarrow I_{4l}e^{j\phi} \dots \dots \dots (4.26)$$

$$-i_2e^{j(\delta_2+\delta_3+\phi)} \rightarrow -i_2e^{j(\delta_2+\delta_3+\phi)} + i_4e^{j(\delta_4+\delta_3+\phi)} \dots \dots \dots (4.27)$$

すなわち、以下の置換と等価である。

$$i_2 \cos \delta_2 + \delta_3 + \phi \rightarrow i_2 \cos \delta_2 + \delta_3 + \phi - i_4 \cos(\delta_4 + \delta_3 + \phi) \dots \dots \dots (4.28)$$

$$i_2 \sin \delta_2 + \delta_3 + \phi \rightarrow i_2 \sin \delta_2 + \delta_3 + \phi - i_4 \sin(\delta_4 + \delta_3 + \phi) \dots \dots \dots (4.29)$$

4.2.1 系統電圧位相 δ_3 の算出

これより、式 (4.28)、式 (4.9) から、

$$\delta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 (i_2 \cos \delta_2 - i_4 \cos \delta_4)}{Z} \right) + \alpha \dots \dots \dots (4.30)$$

ただし、

$$Z = \sqrt{(x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2} \dots \dots \dots (4.31)$$

$$\tan \alpha = -\frac{x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty}{x_3 v_1 \sin \delta_1} \dots \dots \dots (4.32)$$

4.2.2 系統電圧 v_3 の算出

式 (4.29)、式 (4.12) から、

$$v_3 = \frac{x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_3) - x_1 x_3 (i_2 \sin \delta_2 - i_4 \cos \delta_4) + x_1 v_\infty \cos \delta_3}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (4.33)$$

4.2.3 同期機出力 P_1 の算出

式 (4.28)、式 (4.15) から、

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - x_3 v_1 (i_2 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3) - i_4 \cos(\delta_1 - \delta_4 - \delta_3))}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (4.34)$$

4.2.4 PV 出力 P_2 の算出

式 (4.19) のまま、すなわち、

$$P_2 = v_3 i_2 \cos \delta_2 \dots \dots \dots (4.35)$$

4.2.5 負荷電力 P_4 の算出

$P_4 + jQ_4$ は電力の定義より、

$$P_4 + jQ_4 = V_4 \bar{I}_4 \dots \dots \dots (4.36)$$

$$= v_3 e^{j\delta_3} i_4 e^{-j(\delta_4+\delta_3)} \dots \dots \dots (4.37)$$

$$= v_3 i_4 e^{-j\delta_4} \dots \dots \dots (4.38)$$

P_4 は実数であるから、

$$P_4 = v_3 i_4 \cos \delta_4 \dots \dots \dots (4.39)$$

式 (4.12) より v_3 は求まっているため、 P_2 も求まった。

4.2.6 系統ベースの変換

ある系統ベース S_A での過渡リアクタンス $x_A[\text{pu}]$ を別の系統ベース S_B に変換したときの過渡リアクタンス $x_B[\text{pu}]$ は

$$S_A = \frac{V^2}{X_A} \dots \dots \dots (4.40)$$

$$S_B = \frac{V^2}{X_B} \dots \dots \dots (4.41)$$

$$\therefore x_B = x_A \frac{S_B}{S_A} \dots \dots \dots (4.42)$$

電源系統では、系統ベースでの同期機の過渡リアクタンス $x_A = 0.35[\text{pu}]$ 、標準条件での発電機の定格容量 $S_A = 1100[\text{MVA}]$ 、系統ベース $S_B = 1000[\text{MVA}]$ を代入して、系統ベースでの同期機の過渡リアクタンス x_B すなわち x_1 は以下の式で求まる。

$$x_1 = 0.35 \frac{1000}{1100} = \frac{7}{22} \simeq 0.318[\text{pu}] \dots \dots \dots (4.43)$$

負荷あり系統では同期機の過渡リアクタンス x_B と同期機のノード 1 からノード 3 までの送電線インピーダンス x_1 の合計を系統ベースで $0.5[\text{pu}]$ としたいので、系統ベースでの同期機接続インピーダンス x_1 は式 (4.44) のように求まる。

$$x_1 = 0.5 - 0.35 \frac{1000}{1000} = \frac{2}{11} \simeq 0.182[\text{pu}] \dots \dots \dots (4.44)$$

同様に、異なる発電機ベースでも、同期機の接続リアクタンス x_1 を求めた。電源系統での結果は表 3.5 のようになり、負荷あり系統での結果は表 3.6 のようになった。

4.2.7 等面積法

同期機の安定度を求める際には、等面積法という算出手法が用いられる^[15]。運動方程式より、

$$S_g \frac{\omega_0}{s} = \delta \dots \dots \dots (4.45)$$

$$\frac{dS_g}{dt} = \frac{T}{M} \dots \dots \dots (4.46)$$

ただし、 S_g : 加速を正とした、すべり ([s])

M : 同期機の慣性定数 ([s])

ω_0 : 定格角周波数 ([rad/s])

δ : 相角度 ([rad/s])

T : 入力トルクの偏差 (機械的入力トルク-電気的出力トルク)

s : 微分演算子

であることから、すべり S_g の 2 乗の時間微分より、

$$\frac{d}{dt}(S_g^2) = 2S_g \frac{dS_g}{dt} = \frac{2T}{\omega_0 M} \frac{d\delta}{dt} \dots \dots \dots (4.47)$$

上の式を積分して、

$$\therefore \frac{\omega_0 M S_g^2}{2} = \int T d\delta \dots \dots \dots (4.48)$$

事故除去後の同期機の発電電力 $P_{1c}(\delta_e) > 0$ の場合、まだ減速可能な位相差が残っており、安定である。一方、 $P_{1c}(\delta_e) < 0$ の場合、減速が間に合わずに加速し始めてしまい、不安定である。すなわ

ち、 $P_{1c}(\delta_e) = 0$ のとき、安定かどうかの臨界状態となる。このときの T_c を臨界事故除去時間 (CCT: Critical Clearing Time) という。

古典モデルでは、表 4.1 から P- δ カーブを算出し、加速エネルギーと減速エネルギーが等しくなる臨界事故除去相角 δ_c を求め、初期相角を δ_s として、同期機の運動方程式から臨界事故除去時間 T_c を求めた。

4.2.8 臨界事故除去時間の算出

臨界事故除去位相 δ_c 、初期相角 δ_s を用いて、同期機の運動方程式から臨界事故除去時間 T_c を求める。

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - 0 \dots \dots \dots (4.49)$$

事故から臨界事故除去時間 T_c 秒継続したときの臨界事故除去位相 δ_c は、

$$\delta_c = \delta_s + \int \int_0^{T_c} \frac{P_m \omega_0}{M} dt dt = \delta_s + \frac{P_m \omega_0}{2M} T_c^2 \dots \dots \dots (4.50)$$

ここで、定格角周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ だから、

$$T_c = \sqrt{\frac{M(\delta_c - \delta_s)}{\pi f_0 P_m}} \dots \dots \dots (4.51)$$

ただし、 f_0 :商用周波数 (50[Hz]) P_m :機械入力以上より、臨界事故除去時間は求まった。

第5章 古典モデルを用いた等面積法による過渡安定度の評価

本章では、同期機モデルとして古典モデルを用いて、 $P-\delta$ カーブに等面積法を適用して CCT を算出した。

PV 導入が過渡安定度へ与える影響は、前章で述べたような様々な条件によって異なってくる。このため、以下に示すような条件の組み合わせで CCT を求めた。

まず、PV モデルによる影響として、PV 出力、PV 脱落特性、事故除去後の PV の運転モードによる過渡安定度への影響を評価した。PV 出力は標準解析条件では定格出力を想定しているが、PV 低出力では PV 出力を定格出力の半分、PV なしでは PV 出力がない場合すなわち PV が接続されていない場合を想定した。PV は送電系統事故による電圧低下で脱落するすなわち出力を零とする場合を標準の解析条件とし、運転を継続する場合 (PV 運転継続) を比較対象とした。また、運転を継続する場合には、事故除去後の PV の運転モードとして、事故前と同じく有効電力のみを出力する力率 1 運転と、有効電力を出力せず接続点の電圧を維持するように進み無効電力のみを供給する場合を想定した。

次に、負荷モデルによる影響として、負荷特性、負荷量、負荷脱落による過渡安定度への影響を評価した。負荷特性としては、標準解析条件としては定インピーダンス特性とし、比較としてインバータ特性を持った負荷の場合を想定した。負荷量は $0.9[\text{pu}]$ とし、軽負荷としてその 6 割 ($0.54[\text{pu}]$) とした。負荷脱落は、瞬時電圧低下で負荷が脱落しないのが標準解析条件であり、比較としてすべての負荷が脱落する場合を想定した。

さらに、同期機の運用条件による影響として、同期機容量削減、PV 脱落補償による過渡安定度への影響を評価した。PV の導入によって PV 出力があったとしても並列する同期機 (発電機) の容量を維持するのが同期機容量維持であり、同期機容量削減とは PV 出力分だけ並列同期機の容量を削減することを想定した。PV 脱落補償とは、瞬時電圧低下によって PV が脱落する場合に、脱落前に PV 出力を補うよう並列同期機の出力を増加させることを想定した。

最後に、系統モデルによる影響として、系統モデル、送電電力運用方針による過渡安定度への影響を評価した。系統モデルとしては、対象系統には電源のみが接続され無限大母線と連系されている電源系統と、対象系統内に負荷も存在し連系線を介して無限大母線と接続する負荷あり系統の 2 種類とした。送電電力運用方針とは無限大母線と接続する送電線の潮流についての条件であり、PV の出力があってもその送電線潮流を一定に保つよう同期機 (発電機) の出力を減少させるよう運用するのを標準とし、比較として、同期機出力は減少させず PV 出力分をそのまま送電線潮流を上乗せする運用方針での結果を求めた。

本章の各節では、PV モデル、負荷モデル、同期機モデル、系統モデルによる影響とその理由につき、 $P-\delta$ カーブによる考察を加えた。また、本章の最後は、これらの影響をまとめて示した。

5.1 PV モデルによる影響

本節では PV の特性として 4 種類の解析条件を想定し、過渡安定度への影響を求めた (2.2.1 節参照)。その解析条件とは、PV なし、PV 低出力、PV 運転継続、PV 無効電力補償である (表 3.8)。標

準とした条件は、PV出力が0.5[pu]、PV脱落である。系統モデルは電源系統と負荷あり系統を対象とした。

5.1.1 PVなしによる影響

PVなしとは、PVが存在していない、同期機だけで総発電電力をまかなう解析条件である(表3.8)。同期機だけで総発電電力をまかなうため、PVが0.5[pu]出力する標準解析条件と比べて同期機の機械入力が大きくなり、結果としてCCTは短くなった。

(I) 結果の概要

表5.1にPVなしによるCCTへの影響を示す。

- PVなしでは、初期状態でのPV出力がないため、同期機の発電電力を大きくする必要がある。電源系統と負荷あり系統のいずれでも、標準解析条件では0.5[pu]からPVなしでは1.0[pu]へと増加した(基準容量は1000[MVA])。そのため初期相差角と機械入力が大きくなり、CCTは短くなった。
- PVなしではPVの影響がなくなるので、同期機運用方針に関わらず同期機容量は一定のため、CCTの差がなくなった。
- 電源系統と負荷あり系統のCCTが一致した。これはそうなるように系統定数(特に送電線インピーダンス)を定めたためである。

表 5.1: PVなしによるCCTへの影響 [s]

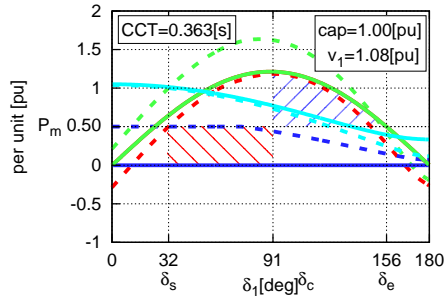
	標準解析条件	PVなし
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.117
電源系統・同期機容量削減	0.225	
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	

(II) P- δ カーブによる考察

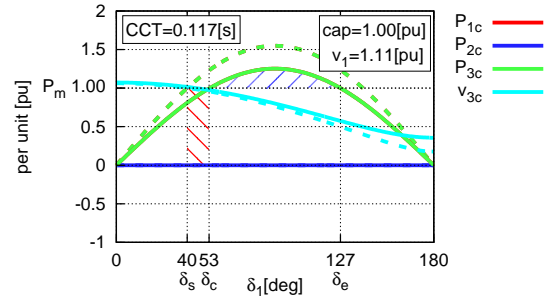
PVなしによる影響をP- δ カーブを用いて考察する。図5.1に電源系統・同期機容量維持でのP- δ カーブを示す。図5.1(a)のように標準解析条件ではCCTは0.363[s]であった。図5.1(b)のようにPV出力がなしになると初期状態での同期機出力 P_{10} が系統容量基準で0.5[pu]から1.0[pu]へと大きくなるため、初期相差角 δ_s と機械入力 P_m も同じように大きな値となるため、CCTは0.117[s]と短くなった。

図5.2に負荷あり系統・同期機容量維持でのP- δ カーブを示す。この場合も同じ理由により、標準解析条件では0.361[s]であったCCTが、PVなしでは0.117[s]と短くなった。

結局、PVなしにすると、標準解析条件でのPV出力分0.5[pu]を同期機(発電機)から追加で供給することになるので、CCTは短くなった。

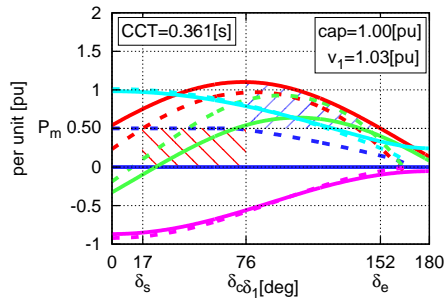


(a) 標準解析条件

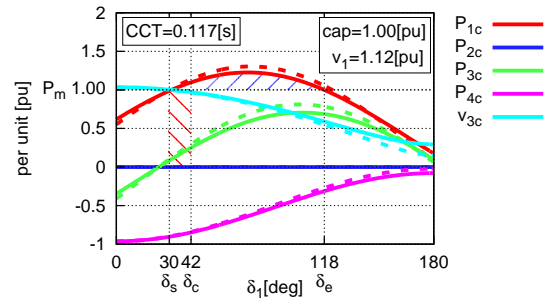


(b) PV なし

図 5.1: 電源系統・同期機容量維持での PV なしによる影響



(a) 標準解析条件



(b) PV なし

図 5.2: 負荷あり系統・同期機容量維持での PV なしによる影響

5.1.2 PV 低出力による影響

PV 低出力とは、初期状態において PV が定格出力の半分の 0.25[pu] だけ出力する解析条件である (表 3.8)。PV なしと同様に機械入力が増加するため、CCT は短くなった (表 5.2)。標準解析条件と PV なしとの中間的な状態であり、CCT も中間的な値をとった。

(I) 結果の概要

表 5.2 に PV 低出力による CCT への影響を示す。

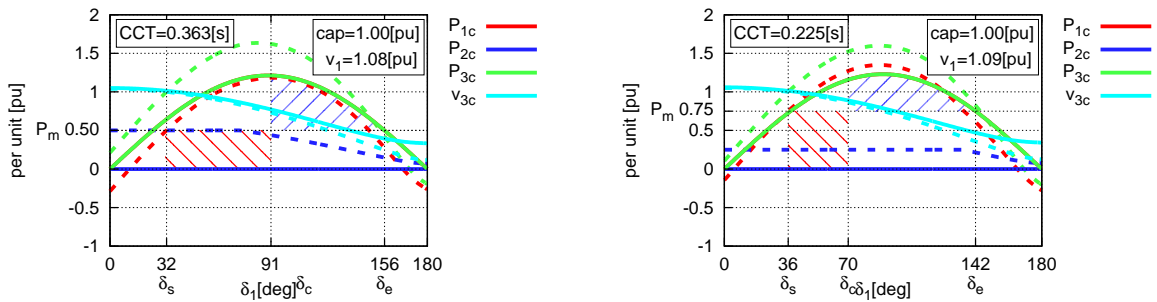
- PV 低出力の条件では、初期状態での PV 出力が標準での 0.5[pu](PV 定格出力) から 0.25[pu] へ小さくなる。送電電力を一定にするため、同期機の発電電力と機械入力を 0.5[pu] から 0.75[pu] へと大きくする必要がある。そのため初期相角も大きくなり、CCT は短くなった。
- PV の影響が弱くなり、同期機容量維持と同期機容量削減の CCT の差が縮まった。

表 5.2: PV 低出力による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 低出力	PV なし
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.225	0.117
電源系統・同期機容量削減	0.225	0.175	
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.216	
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	0.150	

(II) P- δ カーブによる考察

PV 低出力による影響を P- δ カーブを用いて考察する。図 5.3 に電源系統・同期機容量維持での P- δ カーブを示す。図 5.3(a) のように標準解析条件では CCT は 0.363[s] であった。図 5.3(b) のように PV が低出力になると初期状態での同期機出力 P_{10} が 0.5[pu] から 0.75[pu] へと大きくなるため、機械入力 P_m も大きくなり、CCT は 0.225[s] と短くなった。



(a) 標準解析条件 (再掲)

(b) PV 低出力

図 5.3: 電源系統・同期機容量維持での PV 低出力による影響

図 5.4 に電源系統・同期機容量削減・PV 低出力での P- δ カーブを示す。図 5.4(a) のように標準解析条件では CCT は 0.225[s] であった。図 5.4(b) のように PV が低出力になると、初期状態での同期機出力 P_{10} が大きくなるため、機械入力 P_m も大きくなり、CCT は 0.175[s] と短くなった。

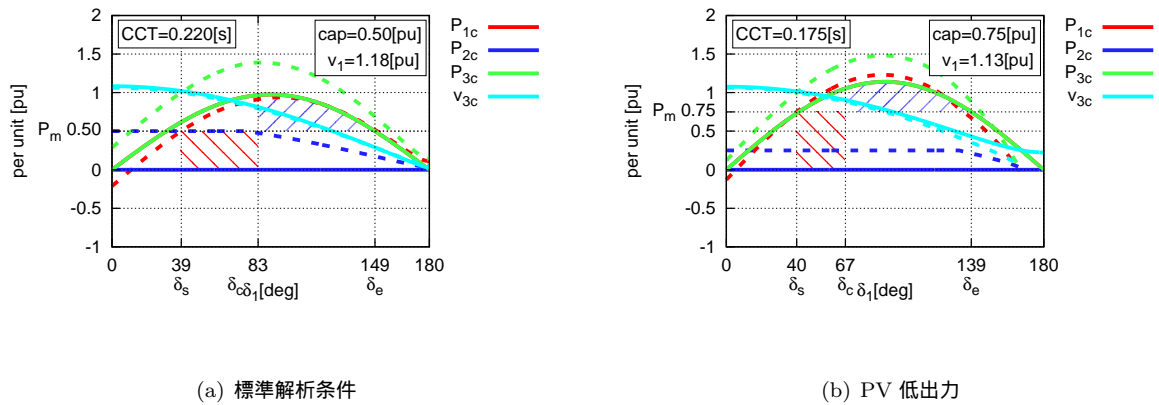


図 5.4: 電源系統・同期機容量削減での PV 低出力による P- δ カーブへの影響

5.1.3 PV 運転継続による影響

PV 運転継続とは、事故除去後も PV が運転継続する解析条件である (表 3.8)。事故除去後も PV は運転を継続するので同期機の発電電力が低下し CCT は短くなった (表 5.3)。

(I) 結果の概要

表 5.3 に PV 運転継続による CCT への影響を示す。

- PV 運転継続では、事故除去後の同期機の発電電力 P_1 が小さくなる。そのため、事故除去後の減速エネルギーが小さくなり、CCT は短くなった。

表 5.3: PV 運転継続による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 運転継続
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.269
電源系統・同期機容量削減	0.225	0.144
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.295
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	0.140

(II) P- δ カーブによる考察

PV 運転継続による影響を P- δ カーブを用いて考察する。図 5.5 に電源系統・同期機容量維持での P- δ カーブを示す。図 5.5(a) のように標準解析条件では CCT は 0.363[s] であった。図 5.5(b) のように PV が運転継続すると事故除去後の同期機出力 P_{1c} が小さくなるため、CCT は 0.269[s] と短くなった。

これをもう少し詳しく見ると、まず、図 5.5(a) では、事故除去後の同期機の出力 (P- δ カーブ) は P_{1c} であり、本来、図中の赤の実線で示されるが、送電線電力である P_{3c} で示される緑の実線と重なっている。ここでは標準解析条件では、PV が脱落するためである。

これに対し、図 5.5(b) では、PV が運転継続するため、その出力は P_{2c} の青の実線で示されるように、相边角 δ_1 が 70[deg] 程度までは 0.5[pu] で、それ以上の相边角では PV 接続点の電圧も定格より

低下するため、電圧に応じて低下している。このように、事故除去後の PV の出力が存在するため、 δ_1 に応じた同期機の出力は標準解析条件の場合に比べて低下する。

図 5.5 における同期機出力の低下量を、4.1 節の式を用いて導出する。PV 運転継続では、式 (4.15) より PV の出力電流 i_2 によって、事故除去後の発電電力 P_1 が小さくなる。以下に再掲する。

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - i_2 x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3)}{x_1 + x_3} \quad (5.1)$$

発電機出力 P_1 の減少量は上式の第 2 項で与えられる。このため、 $\delta_1 - \delta_2 - \delta_3$ を求める。 δ_2 については、PV 出力の力率は 1 のため、 $\delta_2 = 0$ である。

$\delta_1 - \delta_3$ を求めるため、式 (4.9)、式 (4.6)、式 (4.7) を再掲する。

$$\delta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} \right) + \alpha \quad (5.2)$$

$$Z = \sqrt{(x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2} \quad (5.3)$$

$$\tan \alpha = -\frac{x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty}{x_3 v_1 \sin \delta_1} \quad (5.4)$$

例えば、 $\delta_1 = \frac{\pi}{2}$ のときの減少量を求めることとする。PV 接続点の電圧が 1/1.2 (PV の最大電流は PV 定格の 1.2 [pu] とした) より低下していると仮定すると PV の電流は $i_2 = 1.2 \cdot 0.5 = 0.6$ [pu] となる。これより

$$Z = \sqrt{(x_3 v_1)^2 + (x_1 v_\infty)^2} = \sqrt{(0.57 \cdot 1.08)^2 + (0.318 \cdot 1.0)^2} \simeq 0.693 \quad (5.5)$$

$$\tan \alpha = -\frac{x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty}{x_3 v_1 \sin \delta_1} = \frac{0.318}{0.57 \cdot 1.08} \simeq 0.517 \quad (5.6)$$

$$\delta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} \right) + \alpha \quad (5.7)$$

$$\simeq \cos^{-1} \left(\frac{0.318 \cdot 0.57 \cdot 0.6}{0.693} \right) + \tan^{-1}(0.517) \quad (5.8)$$

$$\simeq \cos^{-1}(0.157) + \tan^{-1}(0.517) \simeq 1.890 [\text{rad}] \quad (5.9)$$

$$\delta_1 - \delta_3 = \frac{\pi}{2} - 1.890 = -0.319 \quad (5.10)$$

$$\therefore \cos(\delta_1 - \delta_3) \simeq \cos(-0.319) \simeq 0.945 \quad (5.11)$$

以上より、

$$\frac{i_2 x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3)}{x_1 + x_3} = \frac{0.6 \cdot 0.57 \cdot 1.1 \cdot 0.945}{0.318 + 0.57} \simeq 0.40 [\text{pu}] \quad (5.12)$$

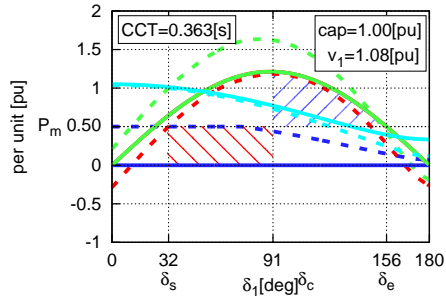
以上より、事故除去後の $\delta_1 = 90$ [deg] では 0.40 [pu] ほど、標準解析条件時の同期機出力より出力が落ちていることがわかる。

図 5.6 に電源系統・同期機容量削減・PV 運転継続での P- δ カーブを示す。図 5.6(a) のように標準解析条件では CCT は 0.225 [s] であった。図 5.6(b) のように PV が運転継続すると、事故除去後の同期機出力 P_{1c} が小さくなるため、CCT は 0.144 [s] と短くなった。

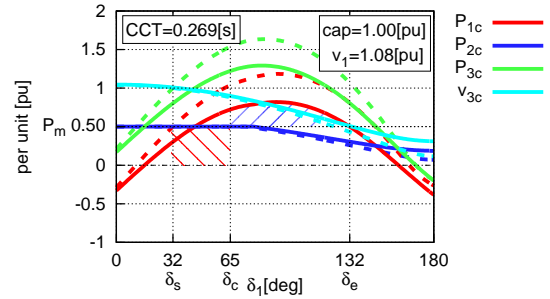
どちらの同期機運用方針でも、PV 運転継続すると CCT は短くなることがわかった。

5.1.4 PV 無効電力補償の場合

PV 無効電力補償とは、PV は脱落しないが事故除去後の PV の運転モードが変更され、出力電流位相が進相無効電力を出力する解析条件である (表 3.8)。事故除去後の無効電力補償によって系統電圧が上昇し、同期機の発電電力が高まり CCT は長くなった。

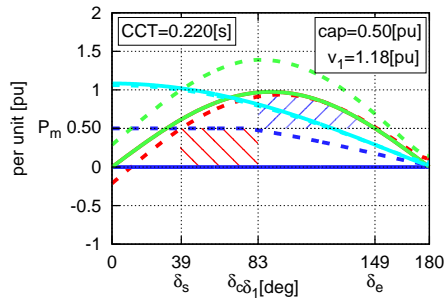


(a) 標準解析条件 (再掲)

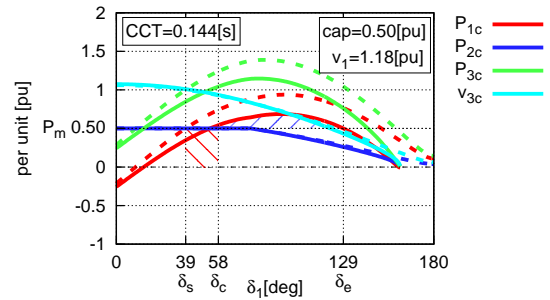


(b) PV 運転継続

図 5.5: 電源系統・同期機容量維持での PV 運転継続による P-δ カーブへの影響



(a) 標準解析条件 (再掲)



(b) PV 運転継続

図 5.6: 電源系統・同期機容量削減での PV 運転継続による P-δ カーブへの影響

(I) 結果の概要

表 5.4 に PV 無効電力補償による CCT への影響を示す。

- どの場合でも、PV 無効電力補償によって CCT は長くなった。

表 5.4: PV 無効電力補償による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 無効電力補償
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.392
電源系統・同期機容量削減	0.225	0.253
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.421
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	0.226

(II) P-δ カーブによる考察

PV 無効電力補償による影響を P-δ カーブを用いて考察する。図 5.7(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での P-δ カーブを示す。CCT は 0.363[s] であった。図 5.7(b) に図 5.7(a) を PV 無効電力補償とした解析条件での P-δ カーブを示す。PV 無効電力補償では、事故除去後に有効電力 P_2 を出す代わりに進みの無効電力 Q_2 を出している。これは、PV 出力電流の電圧に対する位相 δ_2 を $-\frac{\pi}{2}$ にすることで実現している。進みの無効電力の注入により、系統の電圧は上昇し、P-δ カーブも大きくなる。これは、式 (4.12) から説明できる。以下に再掲する。

$$v_3 = \frac{x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_3) - x_1 x_3 i_2 \sin \delta_2 + x_1 v_\infty \cos \delta_3}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (5.13)$$

PV の電流位相 δ_2 が $-\frac{\pi}{2}$ になると、第 2 項が正となり系統電圧 v_3 を大きくする。同期機出力 P_1 は、系統電圧 v_3 に注目すると、以下の式で表される。

$$P_1 = \frac{v_1 v_3 \sin(\delta_1 - \delta_3)}{x_1} \dots \dots \dots (5.14)$$

このため、系統電圧 v_3 が大きくなることは、同期機出力 P_1 が大きくなることにつながり、その結果 CCT は長くなり 0.392[s] となった。

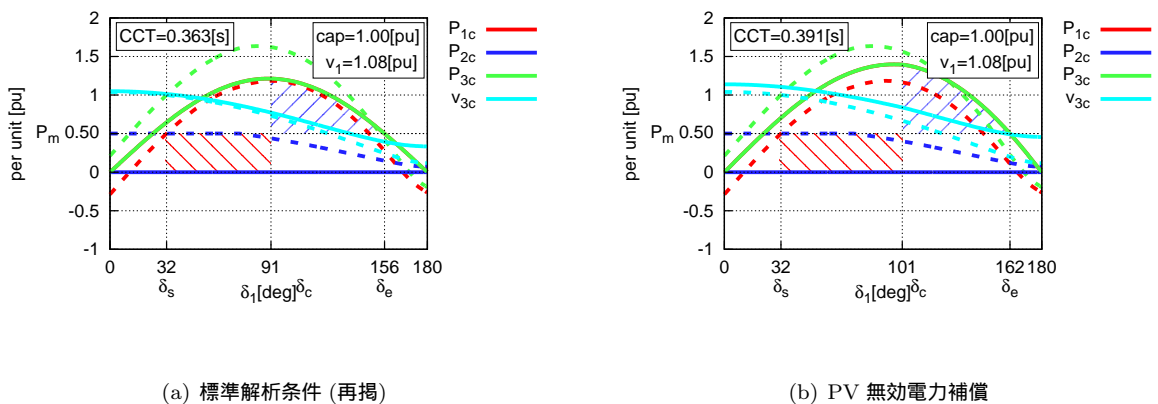


図 5.7: 電源系統・同期機容量維持での PV 無効電力補償による P-δ カーブへの影響

5.2 負荷モデルによる影響

本節では負荷に対する3つの解析条件の違いによる過渡安定度への影響を検討した(3.4節参照)その解析条件とは、負荷インバータ特性、軽負荷、負荷脱落である(表3.8)。負荷に対する検討なので、システムモデルは負荷ありシステムのみを対象とした。

5.2.1 負荷インバータ特性による影響

負荷インバータ特性とは、系統電圧が0.83[pu]以上では負荷電力は定電力特性を示し、0.83[pu]以下では定インピーダンス特性となる特性で負荷が表現できる解析条件である(表3.8)。負荷インバータ特性では標準解析条件に比べて、同期機容量維持では発電電力が増えCCTは長くなったが、同期機容量削減では系統電圧が下がりCCTは短くなった。

(I) 結果の概要

表5.5に負荷インバータ特性によるCCTへの影響を示す。

- 同期機容量維持では、負荷での消費電力が増えたため過渡安定度はよくなった。
- 同期機容量削減では、系統電圧が低下し、CCTは短くなった。

表 5.5: 負荷インバータ特性による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	負荷インバータ特性
負荷ありシステム・同期機容量維持	0.361	0.369
負荷ありシステム・同期機容量削減	0.172	0.168

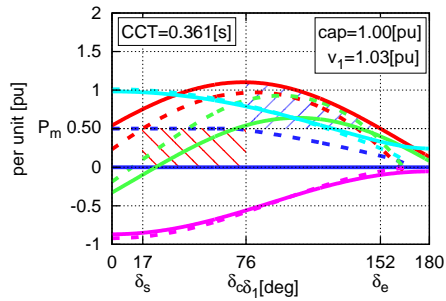
(II) P- δ カーブによる考察

負荷インバータ特性による影響をP- δ カーブを用いて考察する。図5.8(a)に負荷ありシステム・同期機容量維持・標準解析条件でのP- δ カーブを示す。CCTは0.361[s]であった。図5.8(b)のように図5.8(a)を負荷インバータ特性とした解析条件でのP- δ カーブを示す。電圧が下がったときの電力消費 P_4 が下がりにくいため、CCTは0.369[s]と長くなった。

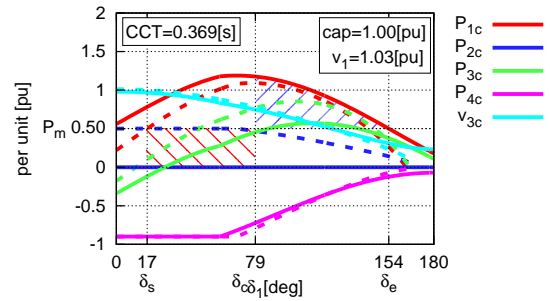
図5.9に負荷ありシステム・同期機容量削減・負荷インバータ特性でのP- δ カーブを示す。図5.9(a)のように標準解析条件ではCCTは0.172[s]であった。図5.9(b)のように負荷がインバータ特性になると、負荷電流が大きくなり電圧が下がりやすくなる(図5.24参照)ため、CCTは0.168[s]と短くなった。

5.2.2 軽負荷による影響

軽負荷とは、負荷電力が標準解析条件の6割(0.54[pu])となる解析条件である(表3.8)。軽負荷では標準解析条件に比べて、初期発電電力 P_1 すなわち機械入力 P_m が小さくなるため、どの同機器運用方針でもCCTが長くなった。

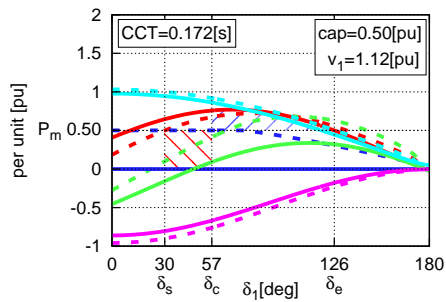


(a) 標準解析条件 (再掲)

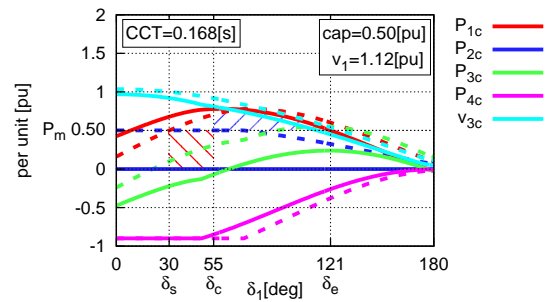


(b) 負荷インバータ特性

図 5.8: 同期機容量維持での負荷インバータ特性による P- δ カーブへの影響



(a) 標準解析条件



(b) 負荷インバータ特性

図 5.9: 同期機容量削減での負荷インバータ特性による P- δ カーブへの影響

(I) 結果の概要

表 5.6 に軽負荷による CCT への影響を示す。

- 軽負荷では、初期発電電力 P_1 すなわち機械入力 P_m が小さくなるため、CCT は長くなった。
- 同期機容量削減では、軽負荷によって同期機容量が極端に削減されたことにより系統電圧が維持されやすくなった。

表 5.6: 軽負荷による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	軽負荷
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.727
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	0.205

(II) P- δ カーブによる考察

軽負荷による影響を P- δ カーブを用いて考察する。図 5.10 に負荷あり系統・同期機容量維持での P- δ カーブを示す。図 5.10(a) のように標準解析条件では CCT は 0.361[s] であった。軽負荷にすることは、無限大母線への送電電力は一定 (0.1[pu]) で、負荷の減少分だけ同期機 (発電機) の出力も 0.5[pu] から 0.14[pu] へ低下することを意味する。したがって、軽負荷になると図 5.10(b) のように初期状態における同期機容量に対する出力が小さくなるので、CCT は 0.727[s] と非常に長くなった。

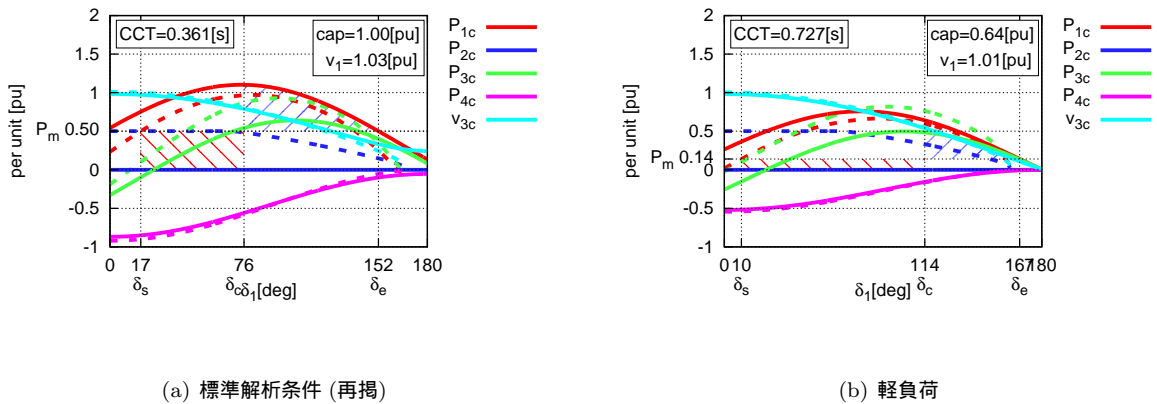


図 5.10: 同期機容量維持での軽負荷による P- δ カーブへの影響

図 5.11 に負荷あり系統・同期機容量削減・軽負荷での P- δ カーブを示す。図 5.11(a) のように標準解析条件では CCT は 0.172[s] であった。図 5.11(b) のように軽負荷になると、事故除去後における同期機の出力に対する負荷量が大きくなる。また、無限大母線による影響が強くなり、系統電圧 v_3 は小さくなりにくくなる。その結果、CCT は 0.205[s] と長くなった。

5.2.3 負荷脱落による影響

負荷脱落とは事故除去後に負荷電力が 0 となる解析条件である。標準解析条件に比べて、事故除去後の同期機出力が小さくなり CCT は短くなった。

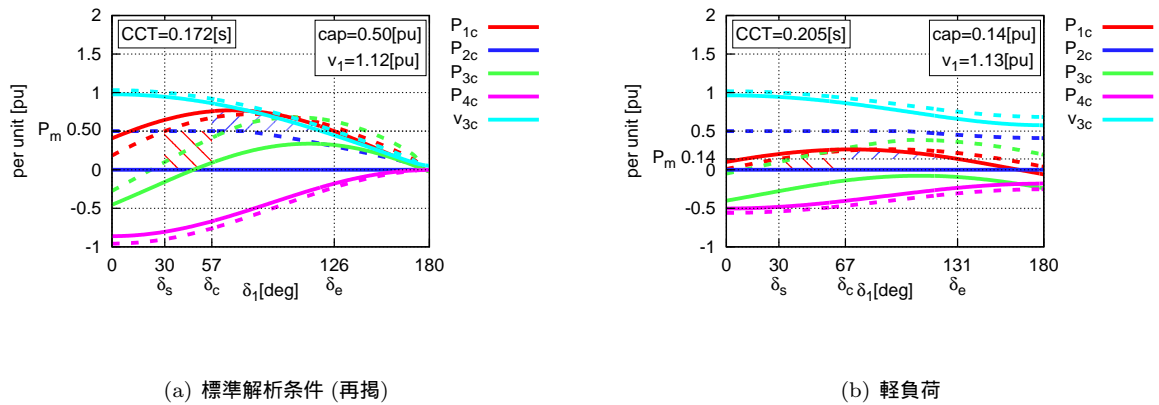


図 5.11: 同期機容量削減での軽負荷による P- δ カーブへの影響

(I) 結果の概要

表 5.7 に負荷脱落による CCT への影響を示す。

- 負荷脱落すると、同期機の発電電力は純粋な sin カーブを描き、 P_{3c} が最大となる相差角が大きくなったが、その最大値は 2 割ほど小さくなった。
- どの場合でも、負荷脱落によって CCT は短くなった。
- 同期機容量削減の場合では、PV なしの CCT より (0.117[s]) 短くなった。

表 5.7: 負荷脱落による CCT への影響 [s]

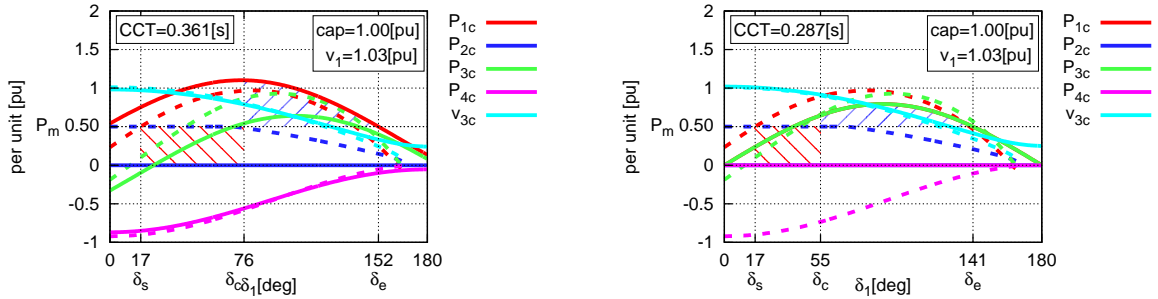
	標準解析条件	負荷脱落
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.287
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	0.109

(II) P- δ カーブによる考察

負荷脱落による影響を P- δ カーブを用いて考察する。図 5.12 に負荷あり系統・同期機容量維持での P- δ カーブを示す。図 5.12(a) の標準解析条件では CCT は 0.361[s] であった。図 5.12(b) のように負荷が脱落すると、事故除去後の同期機出力 P_{1c} の P- δ カーブが低くなるため、CCT は 0.287[s] と短くなった。PV も負荷も脱落しているため、同期機出力 P_{1c} は送電電力 P_{3c} と一致する。同期機出力 P_{1c} の P- δ カーブが低くなるのは、式 (4.34) において発電電力を増やす働きをしていた i_4 が 0 になるためである。以下に再掲する。

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - x_3 v_1 (i_2 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3) - i_4 \cos(\delta_1 - \delta_4 - \delta_3))}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (5.15)$$

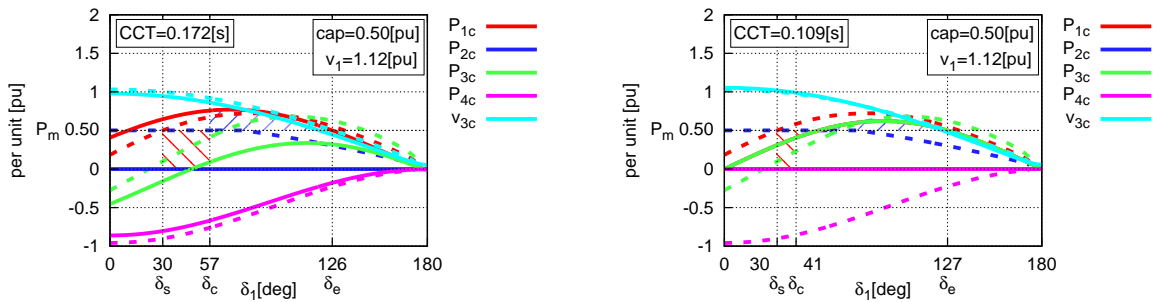
図 5.13 に負荷あり系統・同期機容量削減・負荷脱落での P- δ カーブを示す。図 5.13(a) のように標準解析条件では CCT は 0.172[s] であった。図 5.13(b) のように負荷が脱落すると、負荷電流による出力分がなくなったため P- δ カーブが低くなり、同期機の P- δ カーブの最大値が 0.6[pu] と機械入力 P_m (0.5[pu]) に接近した。このため、CCT は 0.109[s] と短くなり、その値は PV なし (図 5.1(b)) の 0.117[s] より短くなった。



(a) 標準解析条件 (再掲)

(b) 負荷脱落

図 5.12: 同期機容量維持での負荷脱落による P- δ カーブへの影響



(a) 標準解析条件 (再掲)

(b) 負荷脱落

図 5.13: 同期機容量削減での負荷脱落による P- δ カーブへの影響

5.3 同期機運用条件による影響

本節では同期機に対する 2 種類の運用条件が過渡安定度へ与える影響を検討した (2.2.1 節参照)。その運用条件とは、同期機容量の維持と削減の違い、PV 脱落補償ありなしであり、同期機容量維持で、PV 脱落補償なしを基準とした (表 3.8)。系統モデルは電源系統と負荷あり系統を対象とした。

5.3.1 同期機容量削減による影響

同期機容量削減とは、PV の発電電力に応じて同期機の連系容量を減少させる運用方針のことである (3.3.6 節参照)。同期機容量維持では、PV の発電電力に関わらず PV なしと同じだけの同期機容量を維持する。同期機容量削減では対象とする同期機の定格容量が減少するため、同期機容量維持の場合に比べて系統容量基準 (1000[MVA]) で、過渡リアクタンスが大きくなるため P- δ カーブの最大値が減少し、慣性定数が小さくなるため、どのケースでも CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 5.8 に同期機容量削減による CCT への影響を示す。

- 同期機容量を削減すると、どの解析条件でも CCT は短くなった。
- 同期機容量を削減すると、系統・解析条件によっては、初期状態・事故除去後の安定状態が存在しなくなる場合があった。

表 5.8: 同期機容量削減による CCT への影響 [s]

	同期機容量維持	同期機容量削減
電源系統・標準解析条件	0.363	0.225
負荷あり系統・標準解析条件	0.351	0.172
負荷あり系統・PV 脱落補償	0.294	-
負荷あり系統・送電電力増加	0.200	-

(II) P- δ カーブによる考察

同期機容量削減による影響を P- δ カーブを用いて考察する。

図 5.14(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での P- δ カーブを示す。図 5.14(b) に図 5.14(a) を同期機容量削減とした場合の P- δ カーブを示す。

(II-1) P- δ カーブの減少 同期機容量削減の場合、標準解析条件では系統に接続される同期機の容量が 1.0[pu] から 0.5[pu] に減少するため、系統容量基準 (1000[MVA]) での過渡リアクタンス x_1 は 0.318[pu] から 0.636[pu] と大きくなる。このため、初期状態での相差角 δ_s は 34[deg] から 42[rad] と大きくなる。事故除去後も同様に、同期機出力 P_{1c} は全体的に減少し、不安定平衡点 δ_e は 155[deg] から 148[deg] と小さくなる。

(II-2) 慣性定数の低下 同期機容量削減により、系統容量基準での慣性定数が 10[s] から 5[s] に小さくなる。式 (4.51) のように、CCT は慣性定数 M のルートに比例する。以下に再掲する。

$$T_c = \sqrt{\frac{M(\delta_c - \delta_s)}{\pi f_0 P_m}} \dots \dots \dots (5.16)$$

これにより、仮に初期相差角と臨界相差角 (加速エネルギーと減速エネルギーが等しくなる相差角) の差である $(\delta_c - \delta_s)$ が同じであっても、機械入力 P_m が系統容量基準では同じであるため、CCT は短くなることが分かる。

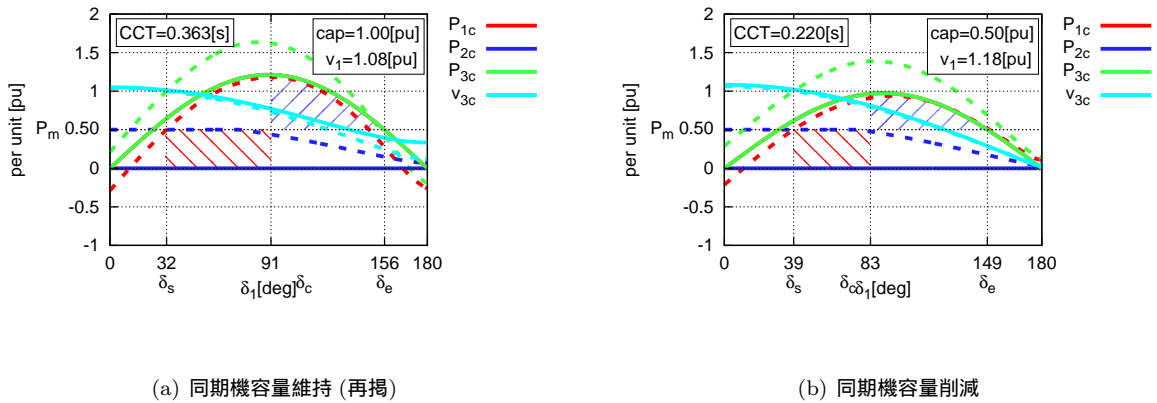


図 5.14: 同期機容量削減による P- δ カーブへの影響

5.3.2 PV 脱落補償の有無による影響

PV 脱落補償ありとは、事故による電圧低下によって PV が脱落して喪失した発電量の一部を当該同期機 (発電機) 出力の増加によって補償するのを想定した。この出力補償は、系統全体の周波数の低下により当該発電機の出力が増加し、さらには LFC (負荷周波数制御) により連系線の送電電力を事故前の電力まで復帰させることによってなされる。このように PV 脱落の出力補償は時間的には過渡安定度よりはその後の動態安定度に関わる現象ではあるが、P- δ カーブによる検討では厳しめの結果を得るために、当該同期機の出力を事故除去直後にステップ状に増加するものとして与えた。なお、その補償量は喪失した PV 発電電力の半分 (0.25[pu]) とした。その結果、標準解析条件に比べて機械入力の増加によって回転子の減速が小さくなり、CCT が短くなった。負荷あり系統での同期機容量削減では事故除去後の安定状態が存在しなかった。

(I) 結果の概要

表 5.9 に PV 脱落補償による CCT への影響を示す。

- どの場合でも、PV 脱落補償によって CCT は短くなった。
- 負荷あり系統・同期機容量削減では、事故除去後の安定状態が存在しなかった。

(II) P- δ カーブによる考察

PV 脱落補償による影響を P- δ カーブを用いて考察する。PV 脱落補償ありの場合には、事故除去後の機械入力の増加により、事故除去後の安定状態が存在しないなどの特徴が挙げられる。

表 5.9: PV 脱落補償による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 脱落補償あり
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.313
電源系統・同期機容量削減	0.225	0.158
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.294
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	-

(II-1) 事故除去後の機械入力が増加 図 5.15(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での $P-\delta$ カーブを示す。図 5.15(b) に電源系統・同期機容量維持・PV 脱落補償での $P-\delta$ カーブを示す。図 5.15(a) では機械入力は一定であるが、図 5.15(b) では事故除去後に PV 脱落による不足電力を補うため、機械入力が $0.25[\text{pu}]$ ステップ状に増加する。このため、事故除去後の減速エネルギーが小さくなり、CCT は短くなった。

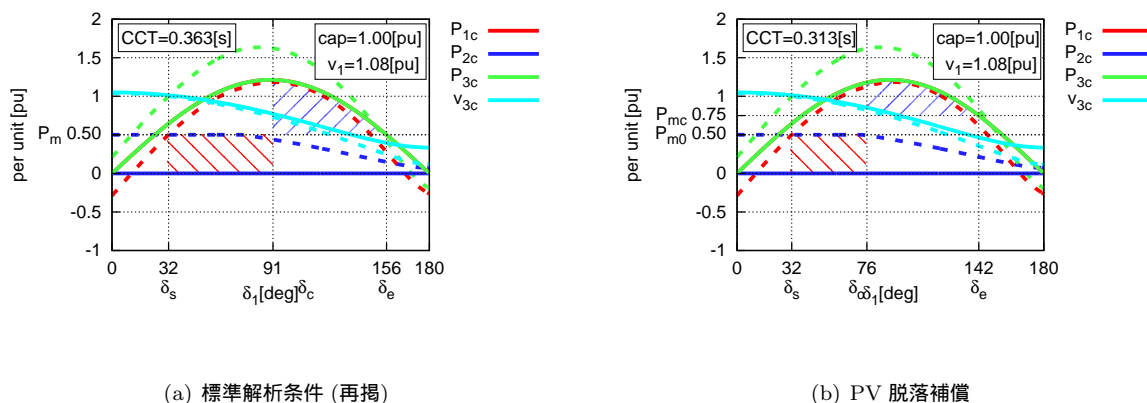


図 5.15: PV 脱落補償による $P-\delta$ カーブへの影響

(II-2) 事故除去後の安定状態が存在しない場合 図 5.16(a) に電源系統・同期機容量削減・PV 脱落補償ありでの $P-\delta$ カーブを示す。図 5.16(b) に図 5.15(a) を負荷あり系統とした場合の $P-\delta$ カーブを示す。電源系統では $P-\delta$ カーブでの最大電力が大きいため事故除去後の安定状態が存在したが、負荷あり系統では最大電力が小さいため事故除去後の安定状態が存在しなかった。

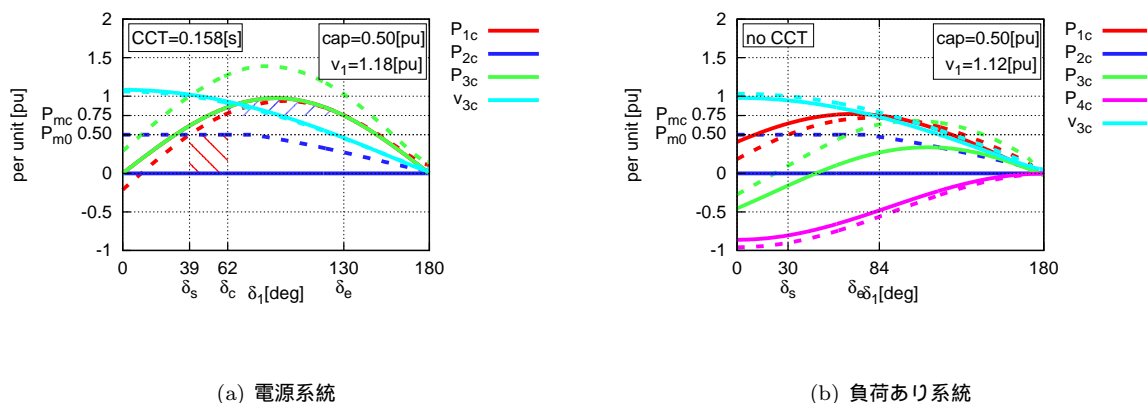


図 5.16: 同期機容量削減・PV 脱落補償ありでの系統モデルの違いによる $P-\delta$ カーブへの影響

5.4 系統モデルによる影響

本節では系統モデルと系統の運用条件の違いによる過渡安定度への影響を検討した(2.2.1節参照)。具体的な解析条件の違いとしては、系統モデルとして電源系統と負荷あり系統の違い、PV出力の送電線潮流への上乗せの有無である(表3.8)。

5.4.1 系統モデルの違いによる影響

負荷あり系統とは、電源系統に負荷を追加し、送電線リアクタンスを大きくした系統モデルである。負荷あり系統では、電源系統に比べて負荷が存在するので初期相差角が小さくなるが、送電線リアクタンスが大きくなるので $P-\delta$ カーブの最大電力が低下し、CCT は大きくは変わらなかった。

(I) 結果の概要

表 5.10 に各系統・各同機器運用方針での CCT を示す。

- 同期機容量維持では、電源系統と負荷あり系統では電源系統のほうがわずかに短い値をとった。
- 同期機容量削減では、電源系統と負荷あり系統では負荷あり系統が 2 割程度短くなった。

表 5.10: 各系統・各同機器運用方針・標準解析条件での CCT[s]

	電源系統	負荷あり系統
同期機容量維持	0.363	0.361
同期機容量削減	0.225	0.172

(II) $P-\delta$ カーブによる考察

負荷あり系統による影響を $P-\delta$ カーブを用いて考察する。図 5.17 に同期機容量維持・標準解析条件での $P-\delta$ カーブを示す。図 5.17(a) が電源系統、図 5.17(b) が負荷あり系統である。

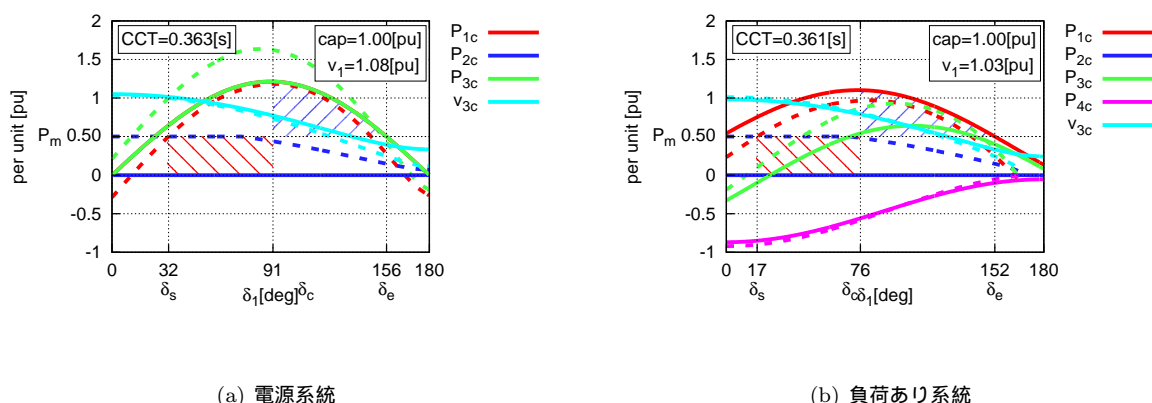


図 5.17: 同期機容量維持での系統モデルの違いによる $P-\delta$ カーブへの影響

例として、初期状態における同期機発電電力 P_1 を比較する。電源系統では発電電力 P_1 は式 (4.15) で表現できる。以下に再掲する。

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - i_2 x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3)}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (5.17)$$

一方、負荷あり系統では発電電力 P_1 は式 (4.34) で表現できる。以下に再掲する。

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1 - x_3 v_1 (i_2 \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_3) - i_4 \cos(\delta_1 - \delta_4 - \delta_3))}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (5.18)$$

(II-1) 初期相差角の減少 例えば、相差角 $\delta_1=0[\text{deg}]$ のとき、電源系統では PV の出力電流によって同期機発電電力 P_1 は負の値を取る。一方、負荷あり系統では負荷電流 i_4 (およそ 0.9[pu]) のほうが PV の出力電流 i_2 (およそ 0.5[pu]) より大きいため、同期機発電電力 P_1 は正の値を取る。このように、 δ_1 が小さい場合、負荷あり系統での発電電力 P_1 は電源系統での発電電力 P_1 より大きくなる。そのため、初期相差角は負荷あり系統の場合、電源系統に比べて小さくなった。

(II-2) 最大電力の減少 発電電力 P_1 はどちらの系統でも $\frac{v_1}{x_1+x_3}$ にほぼ比例する。

事故除去後において、電源系統は過渡リアクタンス $x_1=0.318[\text{pu}]$ 、送電リアクタンス $x_3=0.57[\text{pu}]$ であり、背後電圧 $v_1=1.10[\text{pu}]$ である。負荷あり系統は過渡リアクタンス+ノード 3 までの送電リアクタンス $x_1=0.5[\text{pu}]$ 、送電リアクタンス $x_3=0.8[\text{pu}]$ であり、背後電圧 $v_1=1.03[\text{pu}]$ である。P- δ カーブの最大電力は、次式のように求まる。

$$P_{1max} = \frac{1.10}{0.318 + 0.57} \simeq 1.24[\text{pu}] \dots \dots \dots (5.19)$$

一方、負荷あり系統では次式のように求まる。

$$P_{1max} = \frac{1.03}{0.5 + 0.8} \simeq 0.79[\text{pu}] \dots \dots \dots (5.20)$$

ただし、負荷あり系統では負荷の影響が大きく、これを考慮すれば $\delta_1=75[\text{deg}]$ で P- δ カーブの最大電力は 1.1[pu] となり、電源系統の場合よりわずかに小さくなった。

これより、同期機容量維持の場合には、負荷あり系統での CCT は、主に初期相差角の減少によりわずかに増加したと考えられる。

(II-3) 同期機容量削減時の負荷あり系統での不安定化 図 5.18 に同期機容量削減・標準解析条件での P- δ カーブを示す。図 5.18(a) に電源系統、図 5.18(b) に負荷あり系統を示す。

同期機容量削減の場合には、負荷あり系統での CCT は、P- δ カーブの最大値の減少効果が大きく、初期相差角の減少による CCT 増加効果を上回り、減少したと考えられる。

5.4.2 送電電力増加による影響

送電電力増加とは、同期機だけで PV なしと同じだけの負荷と送電電力をまかない、PV の発電電力は、送電電力に上乘せされる解析条件である (表 3.8)。標準解析条件に比べて、初期状態での発電電力 P_1 が増加するため、機械入力 P_m が大きくなり、さらに初期相差角も大きくなったため、CCT が短くなった。負荷あり系統での同期機容量削減では初期状態がなかった。

(I) 結果の概要

表 5.11 に送電電力増加による CCT への影響を示す。

- どの場合でも、送電電力増加によって CCT は短くなった。
- 負荷あり系統・同期機容量削減では、送電電力増加によって初期状態が存在しなかった。

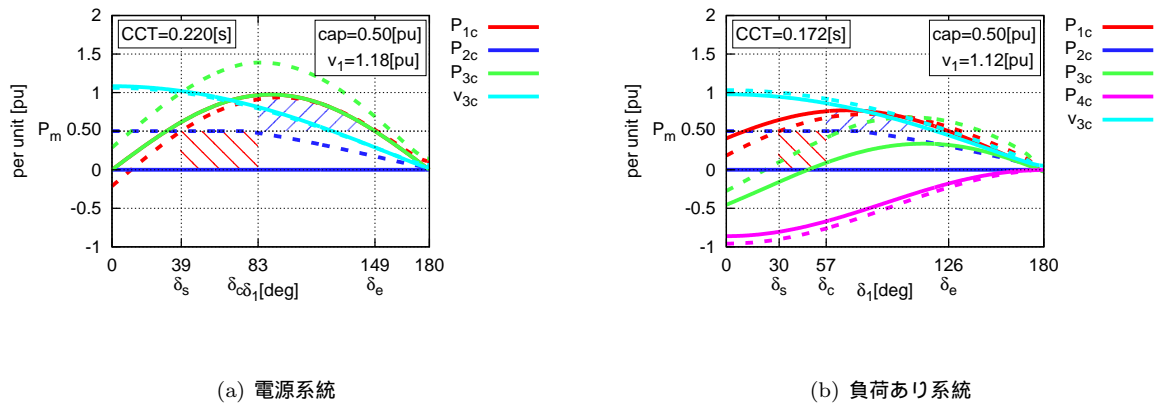


図 5.18: 同期機容量削減での系統モデルの違いによる P- δ カーブへの影響

表 5.11: 送電電力増加による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	送電電力増加
電源系統・同期機容量維持	0.363	0.190
電源系統・同期機容量削減	0.225	0.136
負荷あり系統・同期機容量維持	0.361	0.200
負荷あり系統・同期機容量削減	0.172	-

(II) P- δ カーブによる考察

送電電力増加による影響を P- δ カーブを用いて考察する。発電電力 P_1 の増加、初期状態が存在しない場合が発生するなどの特徴が挙げられた。

(II-1) 発電電力 P_1 の増加 図 5.19(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での P- δ カーブを示す。CCT は 0.363[s] である。図 5.19(b) では初期状態での同期機の発電電力 P_1 は 1.0[pu] とし、PV の発電電力 P_2 (0.5[pu]) だけ上乗せで送電している。

同期機容量維持の場合には、PV の出力がなくなる場合に備え同期機容量を標準の 1.0[pu] から 1.5[pu] と大きくした。そのため慣性定数 M 系統容量基準 (1000[MVA]) は 10[s] から 15[s] へと大きくなる。さらに、同期機の初期出力である P_m も、標準条件の 0.5[pu] から 1.0[pu] へとその増加割合が大きくなる。式 (4.51) のように、CCT は慣性定数 M のルートに比例し、機械入力 P_m のルートに反比例する。以下に再掲する。

$$T_c = \sqrt{\frac{M(\delta_c - \delta_s)}{\pi f_0 P_m}} \dots \dots \dots (5.21)$$

この影響だけで、CCT が $\sqrt{1.5}/\sqrt{2} \approx 0.87$ 倍となる (この時点で CCT は 0.311[s])。さらに、初期相角 δ_s が大きくなったことにより $\delta_c - \delta_s$ は小さくなり CCT はさらに短くなり 0.190[s] となった。

(II-2) 初期状態が存在しない場合 負荷あり系統・同期機容量削減・送電電力増加では初期状態での同期機出力 P_1 は 1.0[pu] のため、同期機容量も容量を維持しているため 1.0[pu] となる。このため、この時の P- δ カーブの最大電力は $\delta_1=81[\text{deg}]$ のとき、0.97[pu] であるので、初期出力 1.0[pu] との交点が存在しない、すなわち初期運転状態が存在しないこととなる。

同じ、同期機容量削減・送電電力増加での電源系統での P- δ カーブを図 5.20(b) に示す。電源系統では P- δ カーブの最大電力が 1.37[pu] と大きいため初期状態が存在した。

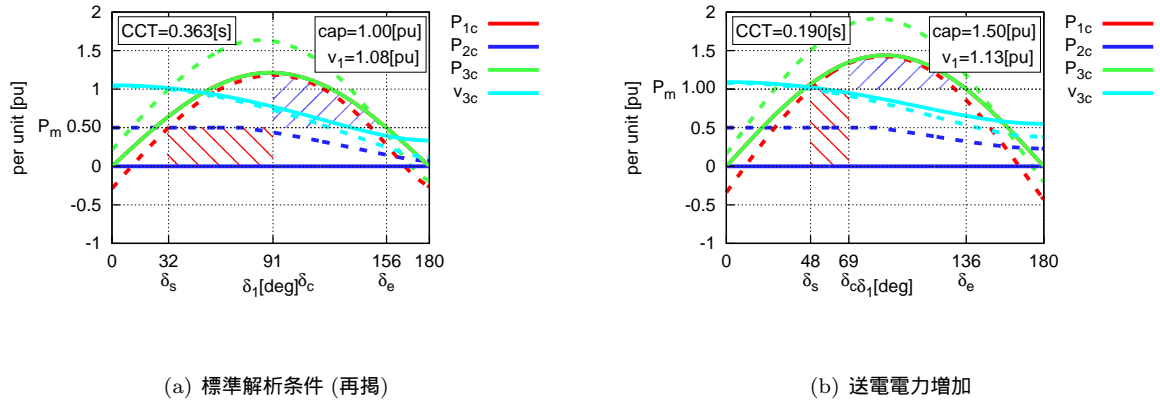


図 5.19: 送電電力増加による P- δ カーブへの影響

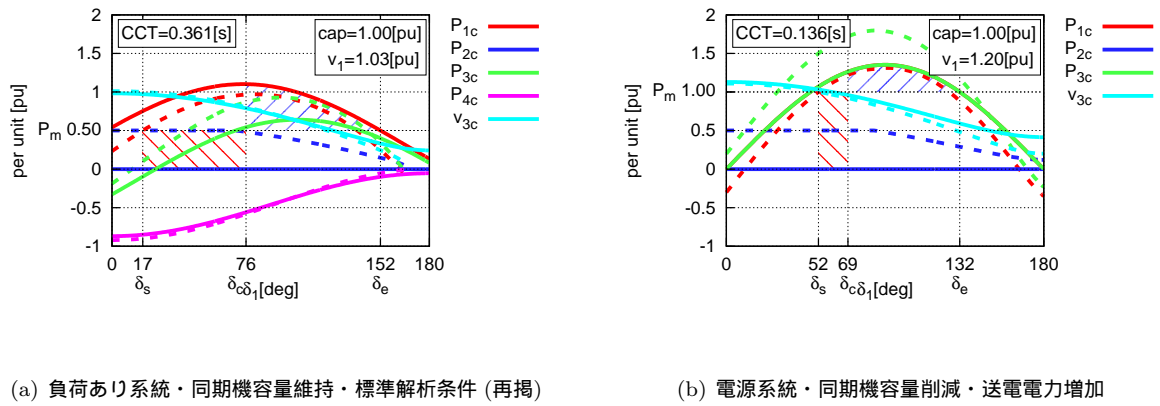


図 5.20: 負荷あり系統・同期機容量削減・送電電力増加時に初期運転状態が存在しないことを P- δ カーブを用いて説明

5.5 本章のまとめと複合的な解析条件での検討

本節では、5.1 節から 5.4 節までに述べた解析条件による過渡安定度への影響についてまとめる。すなわち、PV モデル、負荷モデル、同期機モデル、系統モデルによる影響について、それぞれの特徴を述べる。また、標準解析条件として定めなかった PV 運転継続について、標準解析条件に指定することによる影響の検討も行った。

5.5.1 結果の概要

古典モデルを用いた等面積法により求めた CCT を表 5.12 に示す。PV なしと比べて、標準解析条件では同期機容量削減とした場合でも CCT が長くなった。ただし、PV 脱落補償あり、送電電力増加では負荷系統・同期機容量削減の場合、安定解が存在しなかった。

図 5.21 に表 5.12 をグラフ化したものを示す。横軸の Case No. は表 5.12 の sn(scenario number) と対応している。trans. const. は電源系統・同期機容量維持、trans. reduce は電源系統・同期機容量削減、load const. は負荷あり系統・同期機容量維持、load reduce は負荷あり系統・同期機容量削減を意味している。水色の破線は PV なしの系統での CCT、すなわち 0.117[s] である。

表 5.12: 各系統・同期機容量方針・解析条件での CCT[s]

sn	同期機容量 系統	維持		削減	
		電源	負荷	電源	負荷
0	標準解析条件	0.363	0.361	0.225	0.172
1	PV 脱落補償あり	0.313	0.294	0.158	-
2	PV 無効電力補償	0.392	0.421	0.253	0.226
3	送電電力増加	0.190	0.200	0.136	-
4	負荷インパータ特性		0.369		0.168
5	軽負荷		0.727		0.205
6	負荷脱落		0.287		0.109
7	PV 低出力	0.225	0.216	0.175	0.150
8	PV なし	0.117			
9	PV 運転継続	0.269	0.295	0.144	0.140

(I) PV による影響

PV のモデルや出力が CCT に与える影響を、標準解析条件での CCT と比較して以下に列挙する。なお、標準解析条件として、事故除去直後に PV が脱落することを想定している。

- PV なしとは、PV が存在していない、同期機だけで総発電電力をまかなう解析条件である (表 3.8)。PV なしでは、同期機だけで総発電電力をまかなうため、PV が 0.5[pu] 出力する標準解析条件と比べて同期機の機械入力が大きくなり、CCT は短くなった。
- PV 低出力とは、初期状態において PV が定格出力の半分の 0.25[pu] だけ出力する解析条件である (表 3.8)。PV 低出力では、PV なしと同様に機械入力が増加するため、CCT は短くなった (表 5.2)。標準解析条件と PV なしとの中間的な状態であり、CCT も中間的な値をとった。

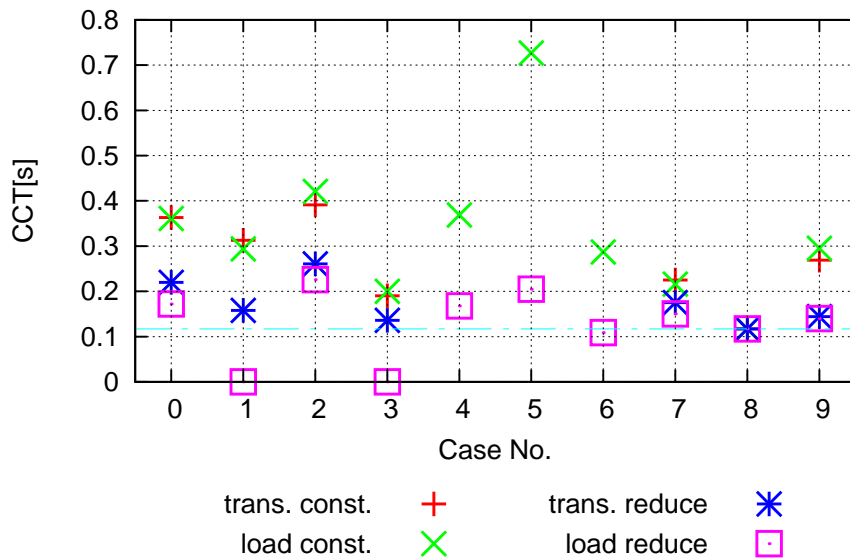


図 5.21: 各系統・同期機容量方針・解析条件での CCT[s]

- PV 運転継続とは、事故除去後も PV が運転継続する解析条件である (表 3.8)。事故除去後の PV 出力電力によって同期機の発電電力が低下し CCT は短くなった (表 5.3)。
- PV 無効電力補償とは、事故除去後の PV の運転モードが変更され、出力電流位相が進相無効電力を出力する解析条件である (表 3.8)。事故除去後の無効電力補償によって系統電圧が上昇し、同期機の発電電力が高まり CCT は長くなった。

(II) 負荷モデルによる影響

負荷が CCT に与える影響を以下に列挙する。なお、標準解析条件での負荷モデルは定インピーダンス負荷である。

- 負荷インバータ特性とは、系統電圧が 0.83[pu] 以上では負荷電力は定電力特性を示し、0.83[pu] 以下では定インピーダンス特性となるという、インバータ特性で負荷が表現できる解析条件である (表 3.8)。負荷インバータ特性では標準解析条件に比べて、同期機容量維持では発電電力が増え CCT は長くなったが、同期機容量削減では系統電圧が下がり CCT は短くなった。
- 軽負荷とは、負荷電力が標準解析条件の 6 割 (0.54[pu]) となる解析条件である (表 3.8)。軽負荷では標準解析条件に比べて、初期発電電力 P_1 すなわち機械入力 P_m が小さくなるため、どの同期機運用方針でも CCT が長くなった。
- 負荷脱落とは事故除去後に負荷電力が 0 となる解析条件である。標準解析条件に比べて、事故除去後の発電電力が小さくなり CCT は短くなった。

(III) 同期機運用条件による影響

同期機運用条件が CCT に与える影響を以下に列挙する。

- 同期機容量削減とは、PV の発電電力に応じて同期機の連系容量を減少させる同機器運用方針のことである (3.3.6 節参照)。同期機容量維持とは、PV の発電電力に関わらず PV なしと同じだけの同期機容量を維持する同期機運用方針である。同期機容量削減では、同期機容量維持に比べて過渡リアクタンスが大きいため $P-\delta$ カーブが低下し、慣性定数が小さくなるため、どのケースでも CCT は短くなった。
- PV 脱落補償ありとは、事故除去後に機械入力が増加する状態に PV 発電電力の半分 (0.25[pu]) 増えるという解析条件である。標準解析条件に比べて機械入力の増加によって回転子の減速が小さくなり、CCT が短くなった。負荷あり系統での同期機容量削減では事故除去後の安定状態が存在しなかった。

(IV) 系統モデルによる影響

系統モデルが CCT に与える影響を以下に列挙する。

- 負荷あり系統とは、電源系統に負荷を追加し、送電線リアクタンスを大きくしたモデルである。負荷あり系統では、電源系統に比べて負荷が存在するので初期相差角が小さくなるが、送電線リアクタンスが大きくなるので $P-\delta$ カーブの最大電力が低下し、CCT は大きくは変わらなかった。
- 送電電力増加とは、同期機だけで PV なしと同じだけの負荷と送電電力をまかない、PV の発電電力は、送電電力に上乗せされる解析条件である (表 3.8)。標準解析条件に比べて、初期状態での発電電力 P_1 が増加するため、機械入力 P_m が大きくなり、さらに初期相差角も大きくなったため、CCT が短くなった。

5.5.2 PV 運転継続と他の解析条件との組み合わせ

PV 運転継続とは、事故除去後も PV が運転継続する解析条件である (表 3.8)。ほとんどの解析条件では、PV 脱落を想定した解析条件での結果に比べ、事故除去後の PV 出力によって同期機の発電出力が低下し CCT は短くなった (表 5.13)。ただし、同期機容量削減・軽負荷では同期機の発電出力が増加し CCT は長くなった。

(I) 結果の概要

表 5.13 に PV 運転継続と他の解析条件を組み合わせた場合の CCT を、PV 脱落での結果と併せて示す。図 5.22 には PV 運転継続の条件のみを取り出した CCT を示す。特徴的な点として、以下が挙げられる。

- 一般的には、PV が運転継続すると PV の出力によって同期機の発電出力が低下するので、PV 脱落想定時の種々のケースと比較すると対応する CCT は短くなった。
- ただし、負荷あり系統で軽負荷・同期機容量削減では、PV の出力によって系統電圧がかえって増加し、CCT が PV 脱落時よりも長くなった。これについては、次項で考察を加える。

表 5.13: PV 運転継続と他の解析条件を組み合わせた場合の CCT[s]

sn	PV 脱落の有無	同期機容量	維持		削減	
		系統	電源	負荷	電源	負荷
0	PV 脱落	標準解析条件	0.363	0.361	0.225	0.172
1		PV 脱落補償あり	0.313	0.294	0.158	-
2		PV 無効電力補償*	0.392	0.421	0.253	0.226
3		送電電力増加	0.190	0.200	0.136	-
4		負荷インバータ特性		0.369		0.168
5		軽負荷		0.727		0.205
6		負荷脱落		0.287		0.109
7		PV 低出力	0.225	0.216	0.175	0.150
8		PV なし	0.117			
99	PV 運転継続	PV 運転継続	0.269	0.295	0.144	0.140
93		送電電力増加	-	0.073	-	-
94		負荷インバータ特性		0.332		0.165
95		軽負荷		0.667		0.225
96		負荷脱落		-		-
97		PV 低出力	0.163	0.178	0.116	0.121

*:有効電力出力は零となるが無効電力は出力する

-:CCT を算出できず (初期状態が存在しないまたは事故除去状態での解が存在しない)

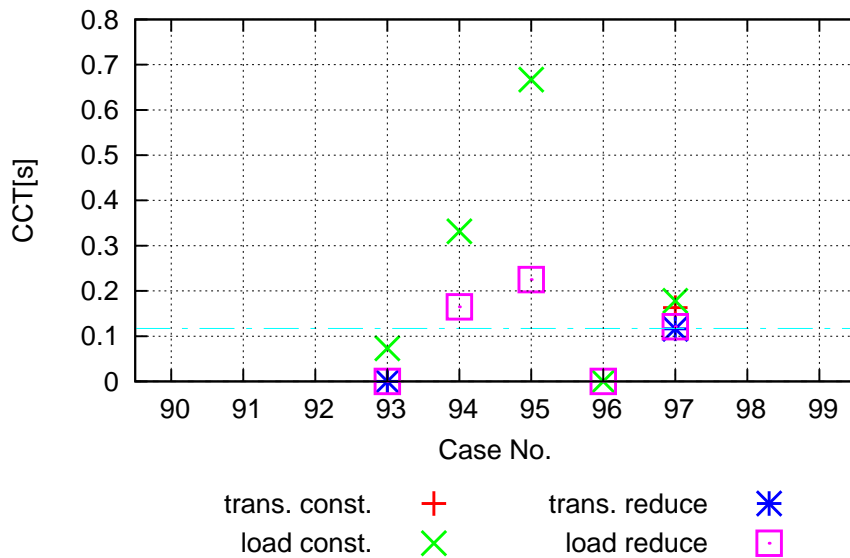
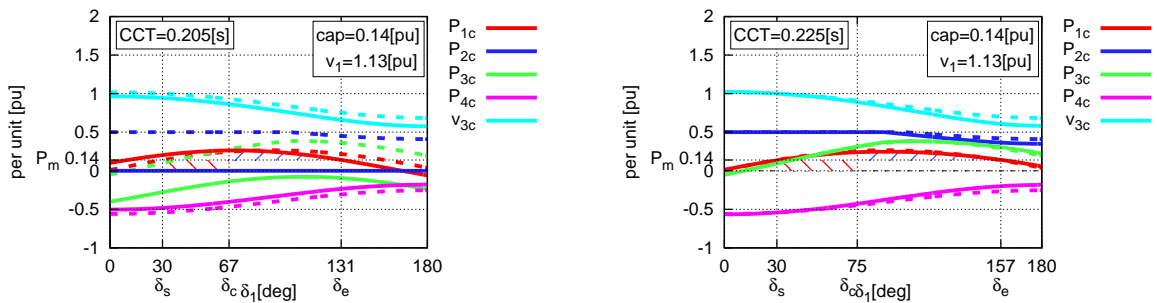


図 5.22: PV 運転継続と組み合わせ

(II) P-δ カーブによる考察

結果の概要を 2 番目の項目である、PV 運転継続の場合が脱落の場合よりも CCT が長くなる特殊な条件について考察する。

図 5.23 に負荷あり系統・同期機容量削減での PV 運転継続との組み合わせた場合の P-δ カーブを示す。図 5.23(a) のように標準解析条件では CCT は 0.205[s] であった。図 5.23(b) のように軽負荷となると CCT は長くなり、0.225[s] となった。事故除去後において、軽負荷・標準解析条件では系統電圧が下がりやすかったのに対し、PV 運転継続では系統電圧は比較的維持された。原因として、軽負荷・標準解析条件では送電電力 P_{3c} が負の値をとっていた、すなわち逆潮流が無限大母線から流れていたが、軽負荷・PV 運転継続では PV の出力も加わるため無限大母線へ向かって潮流が流れた。この潮流の方向の違いが系統の電圧に大きな影響を与えていると考えられる。このため、同期機の発電電力 P_{1c} は維持され、CCT は長くなった。



(a) sn 番号 05 : 軽負荷・標準解析条件

(b) sn 番号 95 : 軽負荷・PV 運転継続

図 5.23: 負荷あり系統・同期機容量削減での P-δ カーブ

(III) PV 出力電流と系統電圧の関係

上記 P-δ カーブによる考察を、さらに電圧に関する式 (4.33) を用いて PV 出力と系統電圧の関係について考察する。以下に式を再掲する。

$$v_3 = \frac{x_3 v_1 \cos(\delta_1 - \delta_3) - x_1 x_3 (i_2 \sin \delta_2 - i_4 \cos \delta_4) + x_1 v_\infty \cos \delta_3}{x_1 + x_3} \quad (5.22)$$

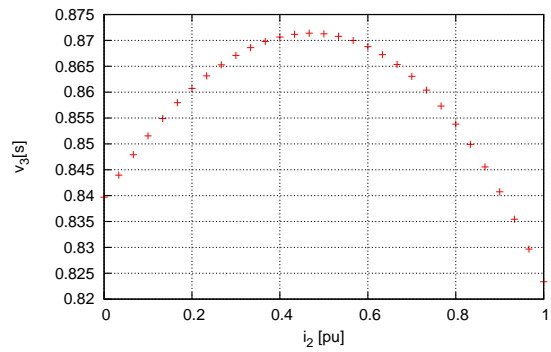
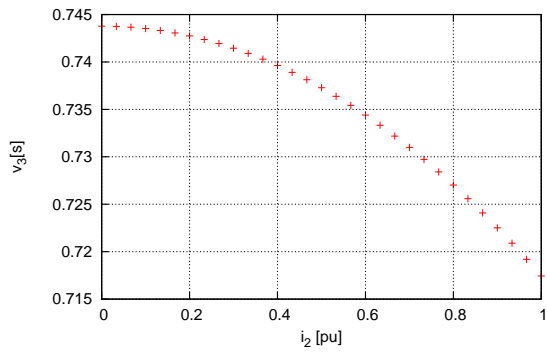
第 2 項に着目すると、PV 出力電流 i_2 が大きくなると、他の変数が変わらなければ系統電圧は下がる。しかし、系統電圧位相 δ_3 は PV 出力電流 i_2 に依存しているためその通りにならない。式 (4.9)、式 (4.6)、式 (4.7) を再掲する。

$$\delta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_3 i_2 \cos \delta_2}{Z} \right) + \alpha \quad (5.23)$$

$$Z = \sqrt{(x_3 v_1 \sin \delta_1)^2 + (x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty)^2} \quad (5.24)$$

$$\tan \alpha = -\frac{x_3 v_1 \cos \delta_1 + x_1 v_\infty}{x_3 v_1 \sin \delta_1} \quad (5.25)$$

図 5.24(a) に相差角 $\delta_1=90[\text{deg}]$ での送電系統・同期機容量維持・標準解析条件での PV 出力電流 i_2 系統電圧 v_3 の関係を示す。図 5.24(b) は図 5.11(b) を負荷系統・同期機容量削減・軽負荷とした場合である。図 5.24(a) では PV 出力電流 i_2 が増えるほど系統電圧 v_3 が低下している。図 5.24(b) では PV 出力電流 i_2 が増えると 0.5[pu] までは系統電圧 v_3 が上昇し、その後は低下している。このように、系統・同期機容量が違えば PV 出力電流 i_2 によっては系統電圧 v_3 が上昇する場合もあり、その結果過渡安定度が向上することがわかった。



(a) sn 番号 05 : 送電系統・同期機容量維持・標準解析条件

(b) sn 番号 95 : 負荷系統・同期機容量削減・軽負荷

図 5.24: 相差点 $\delta_1=90[\text{deg}]$ での系統・同期機容量の違いによる PV 出力電流 i_2 系統電圧 v_3 の関係

(IV) まとめ

本章では等面積法を用いて PV 導入時の過渡安定度へ与える影響を、CCT を求めることによって評価した。その結果は表 5.14 としてまとめて示している。この表から、第 1 波の過渡安定度を向上させる条件として、以下が挙げられる。

- PV 出力が増加しても無限大母線への送電電力を一定に保つように、接続している同期機 (発電機) の出力を減少させる。逆に言えば、PV の出力をそのまま上乘せして送電電力を増加させると安定度は悪化する。
- ただし、接続している同期機 (発電機) の容量は減少させない。
- 上記 2 条件の下では、PV の出力は大きいほど安定化する。
- 瞬時電圧低下による PV の脱落に関しては、脱落したほうが安定化する。
- 上記の過渡安定度への影響の傾向は、ここで想定した 2 種類の系統モデルでは同じであった。

上記の傾向において、PV の脱落に関しては留意が必要である。すなわち、PV 脱落が発生すると発電電力が不足して周波数が低下する。この低下を補うようにガバナフリーの発電機からは出力が増加するが、この増加量の配分によっては送電線の電力を増加させ安定度を悪化させることもありうる。これは純粋な過渡安定度とは言えないので、上記の過渡安定度へ与える影響としては取り上げなかった。

表 5.14: 等面積法による解析条件の CCT への影響のまとめ

解析条件	CCT への影響	
同期機容量方針	容量維持	> 容量削減
系統モデル	電源系統	≈ 負荷あり系統
PV 脱落の有無*	脱落あり	> 運転継続
PV の出力	出力大	> 出力小
送電電力	一定	> 上乘せ

*: 特殊な条件では傾向が逆転することがある

第6章 発電機詳細モデルを用いた Y 法シミュレーションによる過渡安定度の評価

本章では、同期機モデルとして励磁系を考慮した詳細モデルを用いて、Y 法シミュレーションによって CCT を算出した。また、5 章での同期機モデルとして古典モデルを用いて、等面積を適用した結果と比較した。

古典モデルでは背後電圧を一定としている。詳細モデルでは制動回路を考慮しているため AVR と PSS による界磁電圧制御は背後電圧の安定化に貢献するが、背後電圧一定とはならない。

等面積法では PV はインバータ特性として模擬しているが、Y 法にはインバータ特性が存在しないため、電流源モデルで模擬している。

等面積法では機械入力の増加はステップ状としているが、Y 法では调速機モデルを用いて機械入力の増加は緩やかになるというモデルを用いた。

解析条件による過渡安定度への影響の傾向としては、等面積法で導いた傾向と詳細モデルで導いた傾向は共通することが多かった。

CCT は古典モデルで求めた値より、詳細モデルで求めた値のほうが短くなった。ただし、PV 脱落補償による影響では CCT が詳細モデルの方が古典モデルより長くなった。

なお、本稿で用いる Y 法シミュレーション結果では、横軸が時間、縦軸は同期機出力 P_1 、端子電圧 EF 、背後電圧 v_1 、界磁電圧 EF (ただし、値が大きいため $1/10$ している)、は左軸の pu 値 [pu] を用いる。同期機の相差点 δ_1 は右軸の相差点 [deg] を用いる。

6.1 PV モデルによる影響

本節では PV の特性として 3 種類の解析条件を想定し、過渡安定度への影響を求めた (2.2.1 節参照)。その解析条件とは、PV なし、PV 低出力、PV 運転継続である (表 3.8)。標準とした条件は、PV 出力が $0.5[\text{pu}]$ 、PV 脱落である。等面積法で解析した PV 無効電力補償は、Y 法では負荷モデルとして電圧低下後に無効電力補償に切り替えるモデルが存在しないため、解析していない。システムモデルは電源システムと負荷ありシステムを対象とした。

6.1.1 PV なしによる影響

PV なしとは、PV が存在していない、同期機だけで総発電電力をまかなう解析条件である (表 3.8)。同期機だけで総発電電力をまかなうため、PV が $0.5[\text{pu}]$ 出力する標準解析条件と比べて同期機の機械入力が大きくなり、結果として CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 6.1 に PV なしによる CCT への影響を示す。

- PV なしでは、初期状態での PV 出力がないため、同期機の発電電力を大きくする必要がある。電源系統と負荷あり系統のいずれでも、標準解析条件では 0.5[pu] から PV なしでは 1.0[pu] へと増加した (基準容量は 1000[MVA])。そのため初期相差角と機械入力が大きくなり、CCT は短くなった。
- PV なしでは PV の影響がなくなるので、同期機運用方針に関わらず同期機容量は一定のため、CCT の差がなくなった。
- 電源系統と負荷あり系統では CCT が負荷あり系統の方が長くなった (系統モデルによる影響で考察)。

表 6.1: PV なしによる CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV なし
電源系統・同期機容量維持	0.317	0.092
電源系統・同期機容量削減	0.187	
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.117
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV なしによる影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.1(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] であった。図 6.1(b) に PV なしとすると初期状態での同期機出力 P_{10} が系統容量基準で 0.5[pu] から 1.0[pu] へと大きくなるため、初期相差角 δ_s と機械入力 P_m も同じように大きな値となるため、初期相差角 δ と機械入力 P_m も同じように大きな値となるため、CCT は 0.092[s] と短くなった。

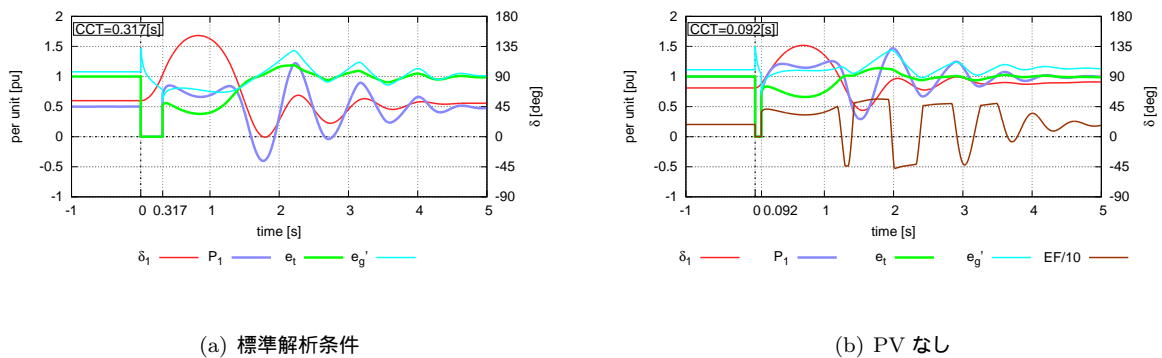


図 6.1: 電源系統・同期機容量維持での PV なしによる影響

6.1.2 PV 低出力による影響

PV 低出力とは、初期状態において PV が定格出力の半分の 0.25[pu] だけ出力する解析条件である (表 3.8)。PV なしと同様に機械入力が増加するため、CCT は短くなった (表 6.2)。標準解析条件と PV なしとの中間的な状態であり、CCT も中間的な値をとった。

(I) 結果の概要

表 6.2 に PV 低出力による CCT への影響を示す。

- PV 低出力の条件では、初期状態での PV 出力が標準での 0.5[pu](PV 定格出力) から 0.25[pu] へ小さくなる。送電電力を一定にするため、同期機の発電電力と機械入力を 0.5[pu] から 0.75[pu] へと大きくする必要がある。そのため初期相差角も大きくなり、CCT は短くなった。
- PV の影響が弱くなり、同期機容量維持と同期機容量削減の CCT の差が縮まった。

表 6.2: PV 低出力による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 低出力	PV なし
電源系統・同期機容量維持	0.317	0.182	0.092
電源系統・同期機容量削減	0.187	0.137	
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.192	0.117
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.137	

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.2(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] となった。図 6.2(b) のように PV 低出力とすると、初期状態での同期機出力 P_{10} が 0.5[pu] から 0.75[pu] へと大きくなるため、機械入力 P_m も大きくなり、CCT は短くなり 0.182[s] となった。

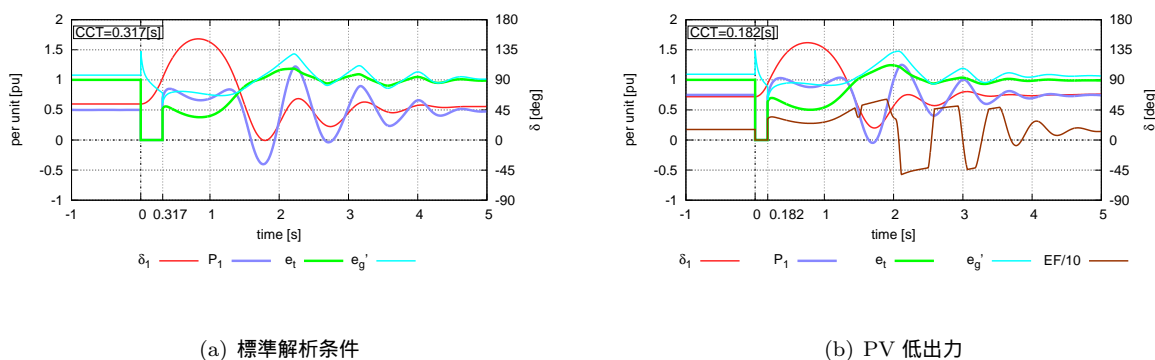


図 6.2: 電源系統・同期機容量維持での PV 低出力による影響

6.1.3 PV 運転継続による影響

PV 運転継続とは、事故除去後も PV が運転継続する解析条件である (表 3.8)。事故除去後も PV は運転を継続するので同期機の発電電力が低下し CCT は短くなった (表 6.3)。

(I) 結果の概要

表 6.3 に PV 運転継続による CCT への影響を示す。

- PV 運転継続では、事故除去後の同期機の発電電力 P_1 が小さくなる。そのため、事故除去後の減速エネルギーが小さくなり、CCT は短くなった。

表 6.3: PV 運転継続による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 運転継続
電源系統・同期機容量維持	0.317	0.247
電源系統・同期機容量削減	0.187	0.137
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.297
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.137

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 運転継続による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.3(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] となった。図 6.3(b) に電源系統・同期機容量維持・PV 運転継続での Y 法シミュレーション結果を示す。事故除去後の PV の出力によって同期機出力 P_1 は小さくなった。例えば極大値は 0.88[pu] から 0.76[pu] へと小さくなった。そのため、CCT は短くなり 0.247[s] となった。

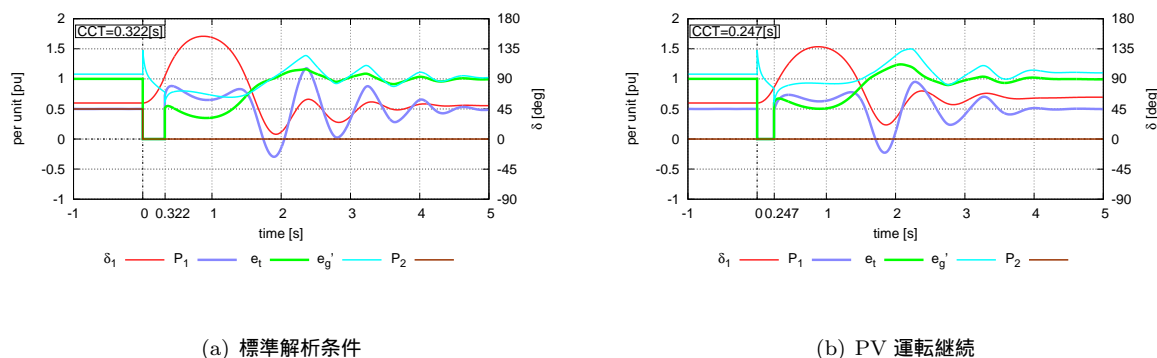


図 6.3: 電源系統・同期機容量維持での PV 運転継続による影響

6.2 負荷モデルによる影響

本節では負荷に対する 3 つの解析条件の違いによる過渡安定度への影響を検討した (3.4 節参照) その解析条件とは、負荷インバータ特性、軽負荷、負荷脱落である (表 3.8)。負荷に対する検討なので、システムモデルは負荷ありシステムのみを対象とした。

6.2.1 負荷インバータ特性による影響

負荷インバータ特性とは、系統電圧が 0.83[pu] 以上では負荷電力は定電力特性を示し、0.83[pu] 以下では定インピーダンス特性となる特性で負荷が表現できる解析条件である (表 3.8)。負荷インバータ特性では標準解析条件に比べて、同期機容量維持では発電電力が増え CCT は長くなったが、同期機容量削減では系統電圧が下がり CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 6.4 に負荷インバータ特性による CCT への影響を示す。

- 同期機容量維持では、負荷での消費電力が増えたため過渡安定度はよくなった。
- 同期機容量削減では、系統電圧が低下し、CCT は短くなった。

表 6.4: 負荷インバータ特性による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	負荷インバータ特性
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.341
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.142

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.4(a) に負荷あり系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.322[s] となった。図 6.4(b) のように図 6.4(a) を負荷インバータ特性とすると、事故除去後の負荷消費電力 P_4 が大きくなり同期機出力 P_1 も大きくなった結果、CCT はわずかに長くなり 0.341[s] となった。なお、負荷インバータ特性では定インピーダンス特性と比べて、電圧の上下に消費電力が追従しないため電圧の安定化に貢献せず、同期機の動揺の減衰が遅くなった。

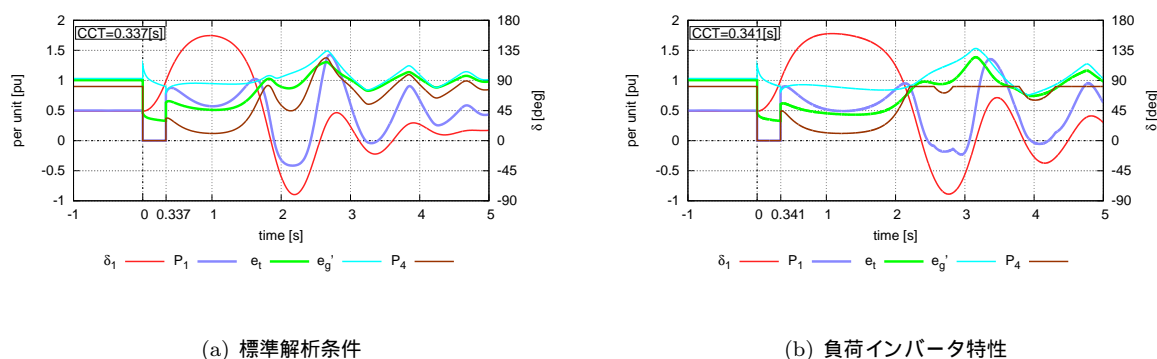


図 6.4: 負荷あり系統・同期機容量維持での負荷インバータ特性による影響

図 6.5(a) に負荷あり系統・同期機容量削減・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.147[s] となった。図 6.5(b) のように図 6.5(a) を負荷インバータ特性とすると、系統電圧が図 6.5(a) では δ が 90[deg]($t=0.19$ [s]) のとき端子電圧が 0.75[pu] であったのに対し、 δ が 90[deg]($t=0.20$ [s]) のとき 0.70[pu] と低くなった。この結果、CCT は短くなり 0.142[s] となった。

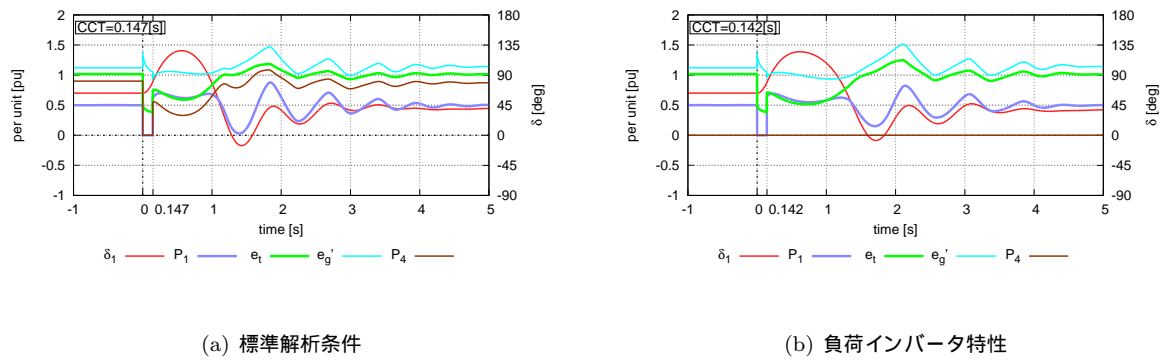


図 6.5: 負荷あり系統・同期機容量削減での負荷インバータ特性による影響

6.2.2 軽負荷による影響

軽負荷とは、負荷電力が標準解析条件の6割(0.54[pu])となる解析条件である(表3.8)。軽負荷では標準解析条件に比べて、初期発電電力 P_1 すなわち機械入力 P_m が小さくなるため、どの同機器運用方針でもCCTが長くなった。

(I) 結果の概要

表6.5に軽負荷によるCCTへの影響を示す。

- 軽負荷では、初期発電電力 P_1 すなわち機械入力 P_m が小さくなるため、CCTは長くなった。
- 同期機容量削減では、軽負荷によって同期機容量が極端に削減されたことにより系統電圧が維持されやすくなった。

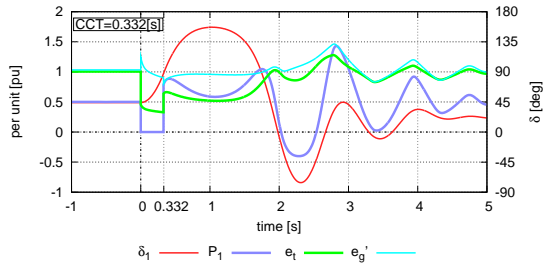
表 6.5: 軽負荷による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	軽負荷
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.737
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.182

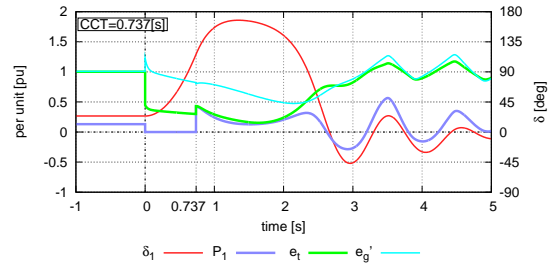
(II) Y法シミュレーション結果による考察

軽負荷による影響をY法シミュレーション結果を用いて考察する。図6.6(a)に負荷あり系統・同期機容量維持・標準解析条件でのY法シミュレーション結果を示す。CCTは0.337[s]となった。図6.6(b)のように軽負荷になると、同期機容量に対して初期状態での出力 P_1 が小さくなり、初期相角 δ_1 も小さくなる。このためCCTは長くなり0.737[s]となった。

図6.7(a)に負荷あり系統・同期機容量削減・標準解析条件でのY法シミュレーション結果を示す。CCTは0.147[s]となった。図6.7(b)に軽負荷とすると、同期機出力に対する負荷電力が大きくなり、背後電圧 e_g' が事故除去後に低下しなくなった。その結果、CCTは0.182[s]と長くなった。

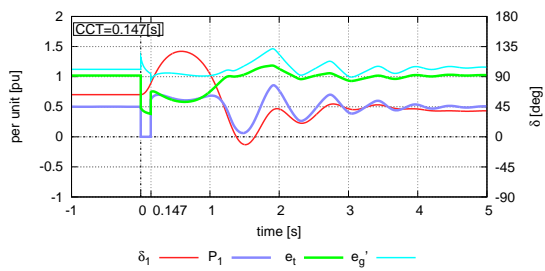


(a) 標準解析条件

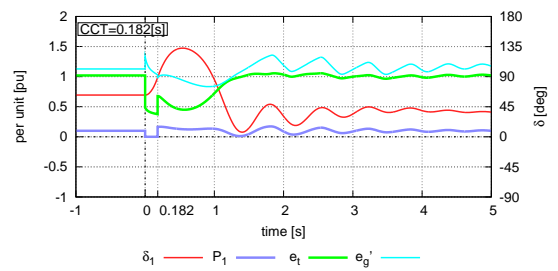


(b) 軽負荷

図 6.6: 負荷あり系統・同期機容量維持での軽負荷による影響



(a) 標準解析条件



(b) 軽負荷

図 6.7: 負荷あり系統・同期機容量削減での軽負荷による影響

6.2.3 負荷脱落による影響

負荷脱落とは事故除去後に負荷電力が0となる解析条件である。標準解析条件に比べて、事故除去後の同期機出力が小さくなり CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 6.6 に負荷脱落による CCT への影響を示す。

- 負荷脱落によって事故除去後の背後電圧がパルス状に小さくなった。
- 同期機の最大発電電力が小さくなり、CCT は短くなった。

表 6.6: 負荷脱落による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	負荷脱落
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.287
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.117

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.8(a) に負荷あり系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.337[s] となった。図 6.8(b) に負荷あり系統・同期機容量維持・負荷脱落での Y 法シミュレーション結果を示す。事故除去後の同期機出力 P_1 の P- δ カーブが低くなるため、CCT は短くなり 0.287[s] となった。

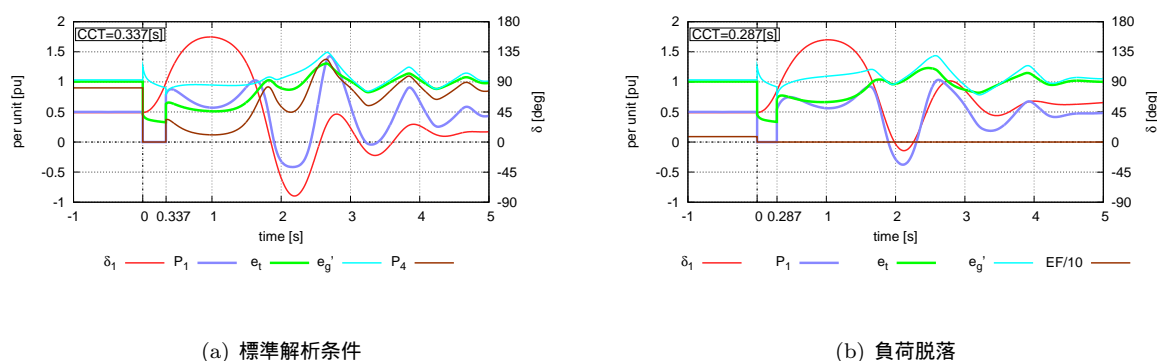


図 6.8: 負荷あり系統・同期機容量維持での負荷脱落による影響

6.3 同期機運用条件による影響

本節では同期機に対する 2 種類の運用条件が過渡安定度へ与える影響を検討した (2.2.1 節参照)。その運用条件とは、同期機容量の維持と削減の違い、PV 脱落補償ありなしであり、同期機容量維持で、PV 脱落補償なしを基準とした (表 3.8)。

6.3.1 詳細モデルの考慮による影響

詳細モデルとは、発電機モデルに同期機詳細モデル、励磁系モデルに AVR&PSS を用いるモデルである (3.3.2 節参照)。古典モデルと比べて同期機の x'_d 背後電圧が低下するため、事故除去後の同期機の出力が小さくなり、CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 6.7 に詳細モデルによる CCT への影響を示す。

- 詳細モデルでは、初期相差角 δ は大きな値となった。これは、詳細モデルでは相差角が q 軸までの角度を表しているためである。
- 詳細モデルでは、背後電圧 e'_g は事故発生時にはステップ状に増加し、事故除去直後ではステップ状に減少した。これは、同期機詳細モデルでは系統との接続が x'_d 背後電圧ではないためである。
- 詳細モデルでは、AVR と PSS の動作により界磁電圧を制御して端子電圧を 1.0[pu] にするよう動作する。しかし、事故除去直後の背後電圧の低下は防げず、古典モデルより CCT が短くなった。
- 負荷あり系統・PV なしでは詳細モデルと古典モデルで CCT が変わらなかった。これは、詳細モデルでは调速機モデルを考慮しているおり、事故時の回転子の角周波数の増加により機械入力が低下したためである。

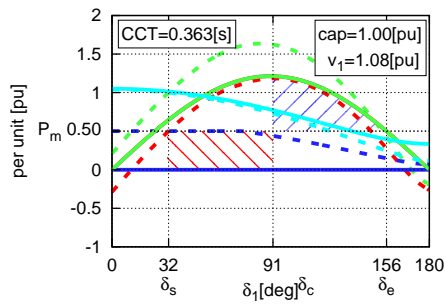
表 6.7: 詳細モデルによる CCT への影響 [s]

	古典モデル	詳細モデル
電源系統・同期機容量維持・標準解析条件	0.363	0.317
電源系統・同期機容量削減・標準解析条件	0.220	0.187
負荷あり系統・同期機容量維持・標準解析条件	0.361	0.337
負荷あり系統・同期機容量削減・標準解析条件	0.172	0.147
負荷あり系統・PV なし	0.117	0.117

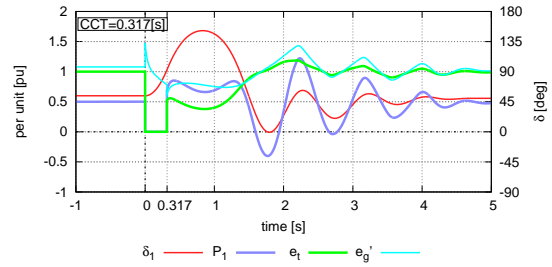
(II) Y 法シミュレーション結果による考察

詳細モデルによる影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.9(a) のように電源系統・同期機容量維持・標準解析条件・古典モデルに等面積法を適用して求めた CCT は 0.363[s] であった。古典モデルでは背後電圧は一定としているが、図 6.9(b) のように詳細モデルとして Y 法シミュレーションによって求めると、事故除去後の背後電圧 e'_g が低下するため同期機出力 P_1 が低下し、CCT は 0.312[s] と短くなった。

図 6.9 に負荷あり系統・PV なしでの Y 法シミュレーション結果を示す。事故直後にタービン出力 TP がわずかに低下していることがわかる。これにより、古典モデルと比べて事故後の機械入力はわずかに減少 (加速エネルギーが減少) するが、背後電圧も低下するため事故除去後の同期機出力も減少 (減速エネルギーも減少) し、CCT は結果的に一致し 0.117[s] となった。



(a) 標準解析条件での P- δ カーブ



(b) 詳細モデルでの Y 法シミュレーション結果

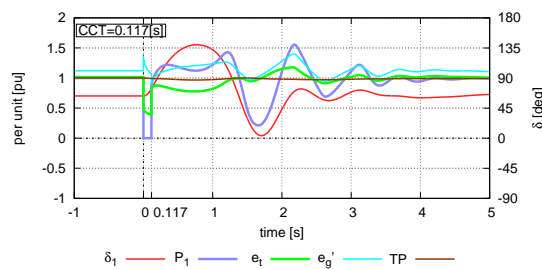


図 6.9: 負荷あり系統・PV なしでの Y 法シミュレーション結果

6.3.2 同期機容量削減による影響

同期機容量削減とは、PV の発電電力に応じて同期機の連系容量を減少させる運用方針のことである (3.3.6 節参照)。同期機容量維持では、PV の発電電力に関わらず PV なしと同じだけの同期機容量を維持する。同期機容量削減では対象とする同期機の定格容量が減少するため、同期機容量維持の場合に比べて系統容量基準 (1000[MVA]) で、過渡リアクタンスが大きくなるため P- δ カーブの最大値が減少し、慣性定数が小さくなるため、どのケースでも CCT は短くなった。

(I) 結果の概要

表 6.8 に同期機容量削減による CCT への影響を示す。

- 同期機容量を削減すると、どの解析条件でも CCT は短くなった。
- 同期機容量を削減すると、等面積法では系統・解析条件によっては、初期状態・事故除去後の安定状態が存在しない場合でも Y 法では解が存在する場合があった。

表 6.8: 同期機容量削減による CCT への影響 [s]

	同期機容量維持	同期機容量削減
電源系統・標準解析条件	0.317	0.187
負荷あり系統・標準解析条件	0.337	0.147
負荷あり系統・PV 脱落補償	0.332	0.142
負荷あり系統・送電電力増加	0.192	0.117

(II) Y法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.10(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] となった。図 6.10(b) のように同期機容量削減とすると、古典モデルで示したように、事故除去後の P- δ カーブも低くなる傾向にある。Y 法シミュレーションにおいても同様の傾向が見られ、事故除去後の同期機の発電電力 P_1 は同期機容量維持では 0.43[s] 付近で極大値 0.88[pu] であったのに対し、同期機容量削減では 0.28[s] 付近で極大値 0.80[pu] であった。また、同期機容量削減によって慣性定数も 10[s] から 5[s] へと小さくなった。この結果、CCT は短くなり 0.187[s] となった。

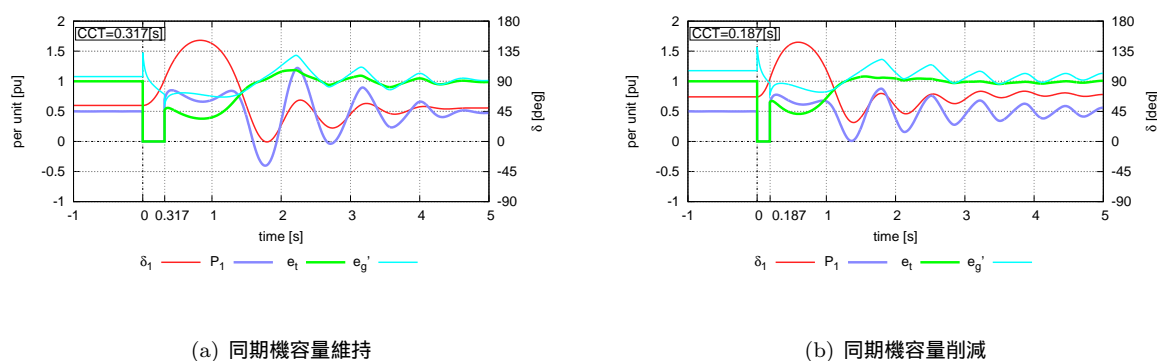


図 6.10: 電源系統・標準解析条件での同期機容量削減による影響

図 6.11(a) に負荷あり系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。図 6.11(b) のように同期機容量削減となると、事故除去後の P- δ カーブの低下は負荷あり系統においても確認され、CCT は 0.147[s] と短くなった。電源系統より短くなったのは、事故除去後直後の同期機の発電電力の極大値が、電源系統では 0.80[pu] まで達したのに対し、負荷あり系統では 0.70[pu] までしか達しなかったためである。この傾向は等面積法においても確認された。

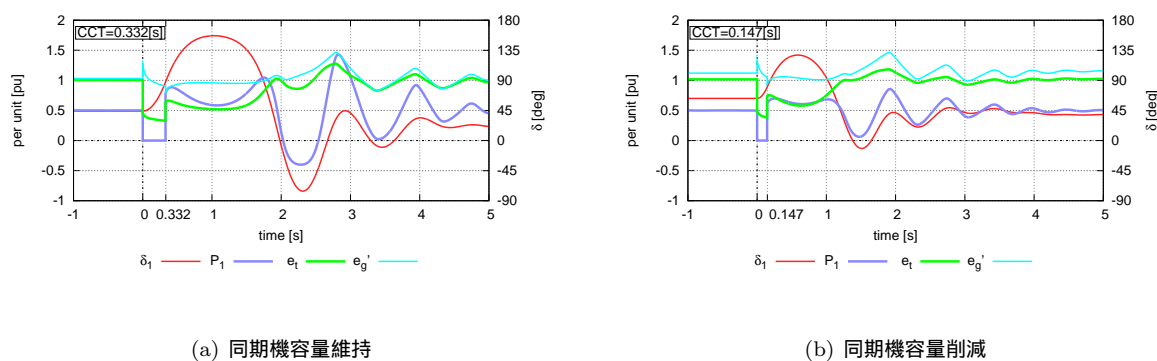


図 6.11: 負荷あり系統・標準解析条件での同期機容量削減による影響

6.3.3 PV 脱落補償による影響

PV 脱落補償ありとは、事故による電圧低下によって PV が脱落して喪失した発電量の一部を当該同期機 (発電機) 出力の増加によって補償するのを想定した。この出力補償は、系統全体の周波数の低下により当該発電機の出力が増加し、さらには LFC(負荷周波数制御) により連系線の送電電力を

事故前の電力まで復帰させることによってなされる。このように PV 脱落の出力補償は時間的には過渡安定度よりはその後の動態安定度に関わる現象ではあるが、P- δ カーブによる検討では厳しめの結果を得るために、当該同期機の出力を事故除去直後にステップ状に増加するものとして与えた。なお、その補償量は喪失した PV 発電電力の半分 (0.25[pu]) とした。その結果、標準解析条件に比べて機械入力が増加によって回転子の減速が小さくなり、CCT が短くなった。負荷あり系統での同期機容量削減では事故除去後の安定状態が存在しなかった。

(I) 結果の概要

表 6.9 に PV 脱落補償による CCT への影響を示す。

- どの場合でも、PV 脱落補償によって CCT は短くなった。
- 負荷あり系統・同期機容量削減では、事故除去後の安定状態が存在しなかった。

表 6.9: PV 脱落補償による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	PV 脱落補償あり
電源系統・同期機容量維持	0.317	0.317
電源系統・同期機容量削減	0.187	0.187
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.332
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.142

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

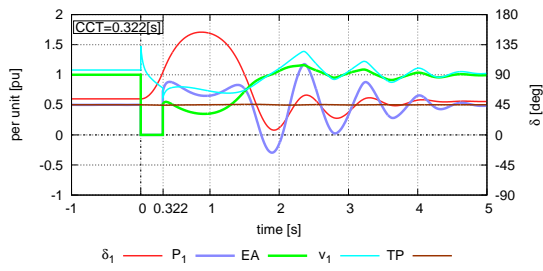
PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.12(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] となった。図 6.12(b) のように PV 脱落補償としても、CCT は長くなり、0.317[s] と長くなった。調速機モデルを用いただけで長くなったため、PV 脱落補償のためではなく調速機モデルの影響であろう。タービン出力 TP は事故除去後に増加しているのがわかる。

図 6.14(a) に長時間でのシミュレーション結果を示す。タービン出力 TP は 0.75[pu] になるまでゆっくりと増加をし、25[s] 付近ではほぼ到達している。等面積法では CCT が短くなったのに Y 法シミュレーションでは変わらなかったのは、機械入力の変化の時定数が長く、過渡安定度に影響するような 1 秒未満の変化はわずかであったためである。

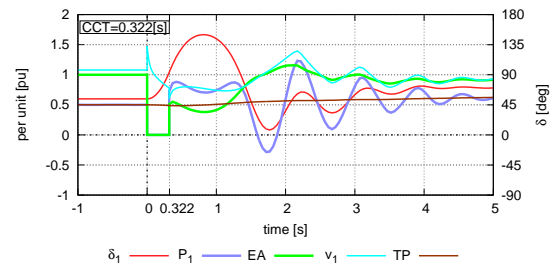
図 6.13(a) に電源系統・同期機容量削減・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.187[s] となった。図 6.13(b) のように PV 脱落補償としても、CCT は変わらず 0.187[s] となった。図 6.14(b) に長時間でのシミュレーション結果を示す。同期機容量削減でも同様に、タービン出力 TP は 0.75[pu] になるまでゆっくりと増加をし、25[s] 付近ではほぼ到達している。タービン出力 TP が事故除去後に増加しているのがわかる。

6.4 系統モデルによる影響

本節では系統モデルと系統の運用条件の違いによる過渡安定度への影響を検討した (2.2.1 節参照)。具体的な解析条件の違いとしては、系統モデルとして電源系統と負荷あり系統の違い、PV 出力の送電線潮流への上乗せの有無である (表 3.8)。

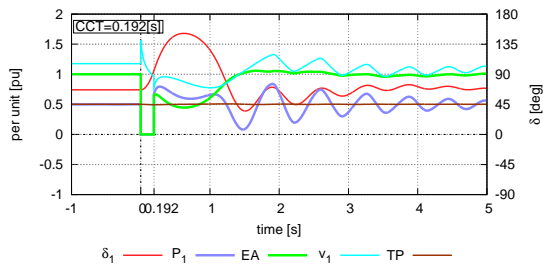


(a) 標準解析条件

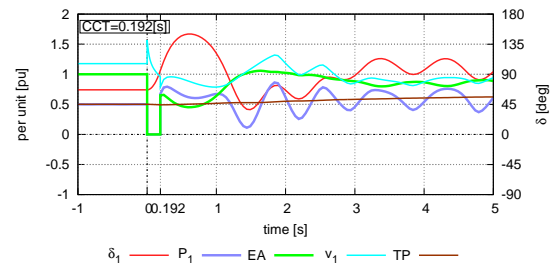


(b) PV 脱落補償

図 6.12: 電源系統・同期機容量維持での PV 脱落補償による影響

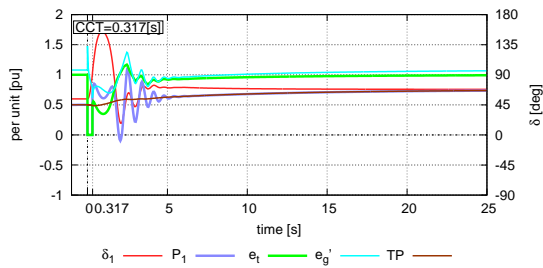


(a) 標準解析条件

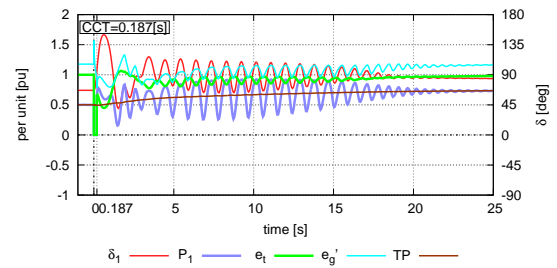


(b) PV 脱落補償

図 6.13: 電源系統・同期機容量削減での PV 脱落補償による影響



(a) 同期機容量維持



(b) 同期機容量削減

図 6.14: 電源系統・PV 脱落補償での長時間の Y 法シミュレーション結果

6.4.1 系統モデルの違いによる影響

負荷あり系統とは、電源系統に負荷を追加し、送電線リアクタンスを大きくした系統モデルである。負荷あり系統では、電源系統に比べて負荷が存在するので初期相差角が小さくなるが、送電線リアクタンスが大きくなるので $P - \delta$ カーブの最大電力が低下し、CCT は大きくは変わらなかった。

(I) 結果の概要

表 6.10 に各系統・各同機器運用方針での CCT を示す。

- 系統モデルを負荷あり系統とすると、PV なしと同期機容量維持・標準解析条件では CCT が長くなったが、同期機容量削減では短くなった。

表 6.10: 各系統・各同機器運用方針・標準解析条件での CCT[s]

	電源系統	負荷あり系統
同期機容量維持・標準解析条件	0.317	0.337
同期機容量削減・標準解析条件	0.187	0.147
PV なし	0.092	0.117

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.15(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。臨界事故除去時間 CCT は 0.317[s] となった。図 6.15(b) のように負荷あり系統とすると端子電圧 EF は事故中でも 0.4[pu] 付近となった。これは、事故発生地点が発電端ではなく、負荷あり系統と無限大母線との連系線の送電端であるためである。臨界事故除去時間 CCT は 0.337[s] となり、電源系統での結果より短くなった。

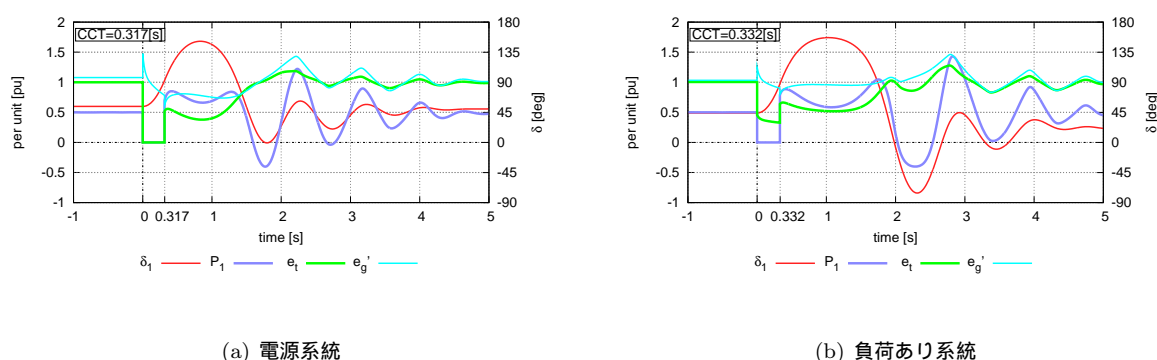


図 6.15: 同期機容量維持・標準解析条件での系統モデルによる影響

6.4.2 送電電力増加による影響

送電電力増加とは、同期機だけで PV なしと同じだけの負荷と送電電力をまかない、PV の発電電力は、送電電力に上乗せされる解析条件である (表 3.8)。標準解析条件に比べて、初期状態での発電

電力 P_1 が増加するため、機械入力 P_m が大きくなり、さらに初期相差角も大きくなったため、CCT が短くなった。負荷あり系統での同期機容量削減では初期状態がなかった。

(I) 結果の概要

表 6.11 に送電電力増加による CCT への影響を示す。

- どの場合でも、送電電力増加によって CCT は短くなった。
- 負荷あり系統・同期機容量削減では、送電電力増加によって初期状態が存在しなかった。

表 6.11: 送電電力増加による CCT への影響 [s]

	標準解析条件	送電電力増加
電源系統・同期機容量維持	0.317	0.162
電源系統・同期機容量削減	0.187	0.112
負荷あり系統・同期機容量維持	0.337	0.192
負荷あり系統・同期機容量削減	0.147	0.117

(II) Y 法シミュレーション結果による考察

PV 低出力による影響を Y 法シミュレーション結果を用いて考察する。図 6.16(a) に電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での Y 法シミュレーション結果を示す。CCT は 0.317[s] となった。図 6.16(b) のように送電電力増加とすると、同期機容量維持によって、同期機の容量は 1.5 倍、すなわち 1000[MVA] から 1650[MVA] となったため、事故除去後の同期機出力 P_1 は大きくなった。初期状態での同期機出力 P_1 すなわち機械入力は 0.5[pu] から 1.0[pu] となり、初期相差角 δ_1 は 71[deg] 大きくなったため、CCT は短くなり 0.162[s] となった。

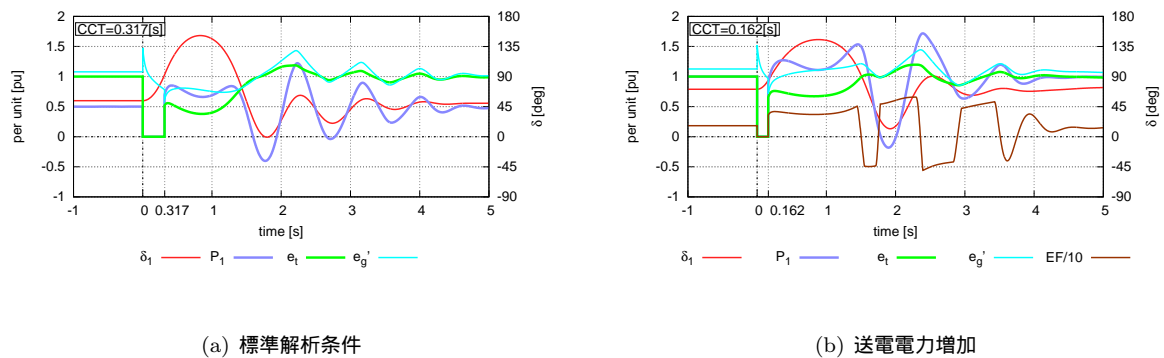


図 6.16: 電源系統・同期機容量維持での送電電力増加による影響

6.4.3 まとめ

本章では Y 法シミュレーションを用いて PV 導入時の過渡安定度へ与える影響を、CCT を求めることによって評価した。詳細モデルにより求めた CCT を等面積法による結果とあわせて表 6.12 にまとめて示す。古典モデルと詳細モデルによる解析結果の違いとして、以下が挙げられる。

- 詳細モデルでは事故除去後の背後電圧が低下するため、ほとんどの解析条件では CCT は短い値をとった。
- PV 脱落補償では、詳細モデルでタービン出力が増加する時定数は長いため、CCT 面での標準解析条件との差はほとんどなかった。すなわち、等面積法で求めた CCT より Y 法シミュレーションで求めた CCT は長くなった。

上記の違いを除けば、詳細モデルを用いた各解析条件による影響は、古典モデルを用いた場合での影響 (表 5.14) と傾向が同じであった。すなわち、各解析条件が過渡安定度へ与える影響のほとんどは、古典モデルで説明可能であることがわかった。

表 6.12: 古典モデル・詳細モデルでの各系統・同期機容量方針・解析条件での CCT[s]

同期機容量	維持				削減			
	電源系統		負荷あり系統		電源系統		負荷あり系統	
同期機モデル	詳細	古典	詳細	古典	詳細	古典	詳細	古典
標準解析条件	0.317	0.363	0.337	0.361	0.187	0.220	0.147	0.172
PV 脱落補償あり	0.317	0.313	0.332	0.294	0.187	0.158	0.142	-
PV 無効電力補償		0.391		0.421		0.261		0.226
送電電力増加	0.162	0.190	0.192	0.200	0.112	0.136	0.117	-
負荷インバータ特性			0.341	0.369			0.142	0.168
軽負荷			0.737	0.727			0.182	0.205
負荷脱落			0.287	0.287			0.117	0.109
PV 低出力	0.182	0.225	0.192	0.216	0.137	0.175	0.137	0.150
PV なし	0.092	0.117	0.117	0.117	0.092	0.117	0.117	0.117
PV 脱落なし	0.247	0.269	0.297	0.295	0.137	0.144	0.137	0.140

第7章 結論

本章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題を述べる。

7.1 本研究の成果

本研究の成果として、PVの導入された系統での同期機出力を算出するP- δ カーブの式を導出したことと、様々な解析条件でCCTを算出したことが挙げられる。

CCTの算出結果からは、PV導入時の同期機の運用方針やPV出力の大小、送電電力の運用方針などがCCTへ与える影響が明らかとなった。同期機容量削減では、同期機容量維持と比べて系統基準での過渡リアクタンスが大きいためP- δ カーブが低下し、さらに慣性定数が小さくなるため、どのケースでもCCTは短くなった。PVなしでは、同期機だけで総発電電力をまかなうため、標準解析条件と比べて同期機の機械入力が大きくなり、CCTは短くなった。これらの傾向のほとんどはP- δ カーブの式から説明が可能である。

たとえば、導出した式よりPVの運転継続では、PV脱落に比べ、同期機出力がPVの出力によって小さくなるので減速エネルギーが少なくなり安定度が悪化することがわかる。

7.2 今後の課題

本論文は基礎検討であり、検討した系統モデルや解析条件は極めて限定的であった。PVが大量導入された系統での過渡安定度をより詳細に検討するため、今後は以下のような系統モデル・解析条件で考慮していかなければならないと考えている。

- 電気学会の提供するより詳細な系統モデルを用いて、地域的な脱落現象を考慮したモデルにする。
- 配電系統モデルをより詳細に検討し、太陽光発電の連系点での電圧特性を考慮したモデルにする。
- PVモデルをPCS内部の動作に注目した詳細モデルにする。
- 脱調現象だけでなく、電圧安定性、周波数安定性に着目した検討をする。

謝辞

本研究を行うに当たり、谷口治人特任教授を始めとする谷口研究室の皆様、馬場旬平准教授を始めとする馬場研究室の皆様に変にお世話になりました。大変に恵まれた研究環境であったと思います。

谷口治人特任教授には、直接のご指導と多くの貴重なご助言をいただきました。感謝しても感謝しきれません。情報系学部出身の私に、電力の基礎を一から教えていただきました。特に、週に1度の打ち合わせでは私の発表に多くの指摘やコメントをくださり、未熟だった私にわかりやすく教えていただきました。論文提出前には、原稿をチェックしていただき、一字一句丁寧に修正をしていただきました。他の研究室を見ても、ここまで丁寧な指導をしてくださる教員はいないと思います。このような素晴らしい教員に担当していただき、幸せでした。

太田豊特任助授には、打ち合わせの時に積極的に様々なアイデアを出していただきました。太田先生の前向きな姿勢は、いつも見ても勇気づけられました。例えば、論文提出前でも大丈夫、大丈夫とって執筆をし、提出期限に間に合わせるといったことが度々ありました。ギリギリになってもきっちり仕上げるのは、さすが太田先生だなと思いました。

中島達人特任准助授にも、打ち合わせの時に積極的に様々なアイデアを出していただきました。中島先生は何を相談しても親身になって答えてくださり、安心出来る存在でした。例えば、日射計設置の予算について質問すると、機材代だけでなく作業員と作業員を支える事務員の給料分もあるんだよと、わかりやすく説明してくださいました。研究に関しても、潮流計算の算出式の検算をしていただきました。気づかない間にそっと確認をしていただけて、大変嬉しかったです。

馬場旬平准助授には、研究室生活の面倒を見ていただいたり発表練習で多くのご指摘を頂きました。馬場先生はパワエレだけでなく電子工作やパソコンの知識も豊富で、問題があってもすぐ解決していただけました。年度始めには課題を出していただき、電力変換の基礎となる知識を学ぶことができました。馬場先生は毎朝早くから出勤なさったり、学生からの質問にすぐさま答えてくださるので疑問を残さず研究することができました。

石下美奈子さんには、学会や見学会での交通費の精算など多くの雑務をしていただきました。打ち合わせの度にお茶を用意して下さったり、事務手続きの流れをプリントを作って説明して下さったりなど、きめ細かな配慮が嬉しかったです。お酒はお召になれないのに、積極的に飲み会にいらして話しかけてくださり、楽しむことができました。

玉岡徳子さんには、研究室での身の回りの世話をしていただき、また世間話に付き合ってくださいました。お子さんの話だったり、料理の話だったり、研究室の過去の話だったり様々な話をできて楽しかったです。玉岡さんの歯に衣着せぬ発言に対して私が苦言を呈することもありましたが、ひとつの冗談として受け取ってください。女性の少ない研究室では、玉岡さんのように細かな気配りができる方は貴重であり、癒されました。

卒業生に対しても、感謝を表します。

西岡英祥氏には、料理のレポーターの広さや手際の良さと趣味の広さに驚かされました。趣味が合う人は研究室では珍しかったので、そういう話ができて楽しかったです。一緒に遊んだボードゲームや残していただいた小説はどれも面白かったです。

伊藤悠氏には、研究室は違いましたがクールなキャラでありながらゲーム好きで一緒にボードゲームなどをして遊んでいただきました。趣味は普段は隠しておき、分かる人とだけ趣味の話をするといったポリシーは私にも必要なポリシーだと思いました。

谷口・馬場研究室のお互いの研究に助言しあうという雰囲気は居心地がよく、自分に合った研究室にこれて幸せに感じます。2年間、ありがとうございました。機会があれば訪ねたいと思いますので、今後ともよろしくお願いします。

さて、ここからは研究室の学生一人ひとりに対しても、メッセージを贈ろうと思います。あくまでも私の個人的な意見ですので、談笑のネタにでもしていただけたら幸いです。

下田英介氏には、社会人としての生活や清水建設についてなどお話していただきました。とても話しやすい方だったので、安心して会話に加わることができました。お見合いの話など楽しい話題に尽きない方で、下田氏のような楽しい社会人になれたらと思います。

今中政輝氏には、多くの会話を通して環境問題や社会問題について教えてもらいました。駒場時代からの友人というもあり、安心して話せる方でした。今中氏は親身に話を聞いてくれるので、本音を語ることができよかったです。

河内駿介氏には、多くの勉強や研究での疑問を解決してもらいました。河内氏はわからないことがあって悩んでいると話しかけてくれ、解決の糸口を提案してくれることが多かったです。彼のような真面目で賢い人物がいる限り、馬場研究室は安泰だと思います。

森政人氏には、共に別の研究室からの学生ということで親近感を持って会話してもらいました。彼は一見真面目な性格ですが、話せば明るく積極的な人であり、帰宅路が途中まで一緒なのもあり話す時間が長かったです。聞き上手であり、私の意見を彼の言葉で確認してくれることが多く、話しやすかったです。彼と知りあえてよかったです。

恩田祐輔氏には、自動車の仕組みについて多く教えてもらいました。彼のような車好きは電気系には珍しく、車関連の話を聞かせてもらいました。また、彼を慕う後輩も多いようで、活発に活動している姿にいつも驚かされました。

千貫智幸氏には、谷口研究室の後輩として初めての人であり、打ち合わせの時のしっかりとした調査や熱心な説明に驚かされました。彼はとても真面目であり、TA やアルバイトをしつつも勉強と研究を同時並行で行うタフな人でした。時間がなくなると泊まることも多く、疲労が溜まっている時は心配でした。一方で、ボードゲームなどに熱中しすぎる面もあり、楽しくゲームもできてよかったです。ただ、C 言語は使わない、家から近い会社じゃないとダメだなど、一度言い出したら人の話を聞かなくなる頑固な性格があり、会話に困ってしまう場面もありました。好みや得意不得意はあるとは思いますが、何に対しても意欲的に行動して欲しいと思います。彼の修士論文は面白そうなテーマですので、最後までまとまるか楽しみです。執筆時は妥協なく徹夜などして書きそうですので、どうかお体は大切にしてください。

萩原裕人氏には、時間が空いた時に話し相手になっていただきました。とても話しやすい人であり、多くの楽しい時間を共有できたと思います。聞き上手であり、後輩の手伝いなどもよくやる優しい先輩だと思います。北海道の研究会では、一緒に意欲的に歩きまわったりしてくれて楽しかったです。今後も研究頑張ってください。

森昭斗氏には、ゆとりある心構えの手本を見せてもらいました。努力すべき時は努力し、そうでないときは楽をするという緩急ある態度は新鮮でした。彼のようなマイペースな人物が将来大物になるのかなとも思います。今後も余裕を持った生活をしつつ、研究も頑張ってください。

服部圭佑氏には、関西のノリを教えてもらいました。彼は冗談が大好きで、日常会話で多くの冗談を言って皆を楽しませてくれました。時には冗談が過ぎて人に不快な思いをさせることもありましたが、それもいい思い出です。マヨネーズは苦手なのですが料理も得意そうなので、来年も料理をやってくれるのではないかと期待をしています。

江川光氏には、研究室でのうまい振る舞い方を見せてもらった気がします。彼もまた聞き上手であり、先輩の学生の言う事を守り指示通りにするので、多くのことを教えてもらっていると思います。部活が忙しかったりしましたが、うまく研究をまとめることができよかったです。加藤研に

行っても、先輩からの指示を受けつつ、後輩にも教えられるよう頑張ってください。

手操亮裕氏には、妥協のない真面目な仕事ぶりを見せてもらいました。彼はとても真面目でありやるべき事をきっちりとしていましたが、反面やり過ぎることも多かったと思います。手を抜くべきところで手を抜かないと、いつか倒れそうで見ても心配でした。趣味は合い、そういった話もできて楽しかったです。今後は時間に余裕もできると思うので、もっと楽しく生活をして欲しいと思います。

紹介しきれませんでしたが、横山先生を始めとする横山研の皆様にも感謝を表します。特に、同期の4人である、ものまねがおもしろかった相原氏、手を抜きつつも仕事が早い清水氏、手を抜きすぎて常に逆境に身を置く宮原氏、いつでも話しかけてくれた吉原氏には、多くの楽しい時間を共有できました。

最後に、私はこの研究室にこれほど本当によかったと思います。心強い仲間と、楽しい時間を共有できたことは、私の財産だと思います。これからもここでの経験を胸に、頑張っていきます。短い2年間ではありましたが、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Wikipedia, "太陽電池 - Wikipedia", <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E9%9B%BB%E6%B1%A0>, 2011年1月23日取得
- [2] Wikipedia, "地球温暖化 - Wikipedia", <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E6%B8%A9%E6%9A%96%E5%8C%96>, 2011年1月23日取得
- [3] IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, "Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008", Report IEA-PVPS T1-18, p5, 2009
- [4] 経済産業省, "長期エネルギー需給見通し(再計算)", 2009-8
- [5] 資源エネルギー庁, "月間最大電力(一般電気事業者)", 2009
- [6] 経済産業省, "資料3 太陽光発電の導入シナリオの試算", 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会(第34回)資料, 2009
- [7] 谷口治人, "エネルギー・資源", VOL.31, No.2, 2010
- [8] 原子力安全保安院 電力安全課, "平成20年度 電気保安統計", p.11, 2008
- [9] Cheng-Chieh Shen, "A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 2, APRIL 2007
- [10] Tan Tiam Yun, "A model of PV generation suitable for stability analysis", IEEE Transactions on Energy Conversion, v 19, n 4, p748-755, December 2004
- [11] Minwon Park, "a novel simulation method for PV power generation systems using real weather conditions", ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No.01TH8570), p 526-30 vol.1, 2001
- [12] S. Achilles, "Transmission System Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics", NREL/SR-581-42300, 2008
- [13] 小林 広武, "太陽光発電用パワーコンディショナの瞬低回復時の運転安定化方式", 電力中央研究所報告, R09015, 2010
- [14] 電力中央研究所, "-電中研 電力系統安定度解析システム-L法・Y法・S法プログラム解説書(H19公開バージョン)", 2009
- [15] 谷口 治人, "電力システム解析 -モデリングとシミュレーション-", 電気学会, ISBN978-4-274-20748-8, p. 19, 2009
- [16] 長谷川 淳 他, "電力系統工学", 電気学会, ISBN4-88686-232-2, pp. 65-66, 2002
- [17] 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系統の縮約に関する一考察", 電気学会全国大会論文集(2011-03)(発表予定)

- [18] 電気学会, ”同期機励磁系の仕様と特性”, 電気学会技術報告, vol 536, p50 (1995-2)
- [19] 谷口 治人, ”電力システム解析 -モデリングとシミュレーション-”, 電気学会, ISBN978-4-274-20748-8, p. 49, 2009

発表文献

本人による発表

1. 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, K. M. Liyanage, ” 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 -電流源表現の場合-”, 平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (2010-09)
2. 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, K. M. Liyanage, ” 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 -等面積法による考察-”, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-10-113 PSE-10-112 (2010-09)
3. 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, ” 負荷の影響を考慮した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”, 電気学会電力系統技術研究会資料, PSE-11-013 (2011-01)
4. 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, ” 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”, 電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会資料, PE-11-023/PSE-11-040/SPC-11-077 (2011-03) (発表予定)
5. 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, ” 同期機詳細モデルを考慮した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”, 電気学全国大会論文集 (2011-03) (発表予定)

共同研究者による発表

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系統の縮約に関する一考察”, 電気学会全国大会論文集 (2011-03) (発表予定)

付録A P- δ カーブの見方

図 A.1 に送電系統・同期機容量維持・標準解析条件での P- δ カーブを示す。実線は事故除去後の値であり、破線は初期状態での値である。

同期機容量維持のため過渡リアクタンス x_1 は送電系統での基準値の 0.318[pu] である。初期状態では、同期機出力 P_1 は初期相差点 $\delta_s=32[\text{deg}]$ で 0.5[pu] となっている。PV 出力 P_2 も初期相差点で 0.5[pu] である。送電電力 P_3 は、負荷や送電ロスがないため P_1 と P_2 の和になり、1.0[pu] である。系統電圧 v_3 は、1.0[pu] となっておりこれは背後電圧 v_1 がそうなるように値、今回であれば 1.08[pu] をとっているためである。

事故中では、同期機出力 P_1 は 0 であり、機械入力 P_m によって赤の左上から右下方向への斜線領域の面積だけ回転子は加速をする。

事故除去後では、同期機出力 P_{1c} と機械入力 P_m の差だけ、青の左下から右上方向への斜線領域の面積だけ回転子は減速をし、不安定平衡点相差点 δ_e でちょうど加速部分の面積と減速部分の面積が一致する。同期機出力 P_{1c} は PV 脱落によって同じ相差点あたりの出力が増加し、送電電力 P_{3c} のカーブと一致した。PV 出力 P_{2c} は脱落によって出力が 0 となった。系統電圧 v_{3c} は、出力電流の減少により v_3 よりわずかに低い値をとった。

等面積法の結果、臨界事故除去相差点 δ_c は 76[deg] であり、臨界事故除去時間 CCT は 0.313[s] となった。

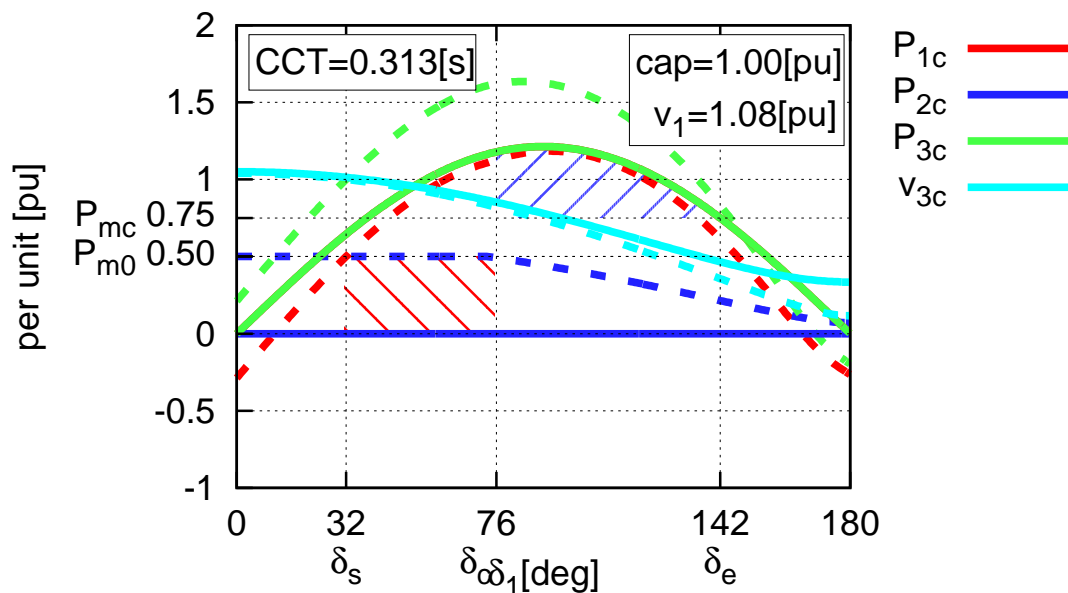


図 A.1: 電源系統・同期機容量維持・標準解析条件での P- δ カーブ

付録B 等面積法による臨界故障時間CCTの導出過程

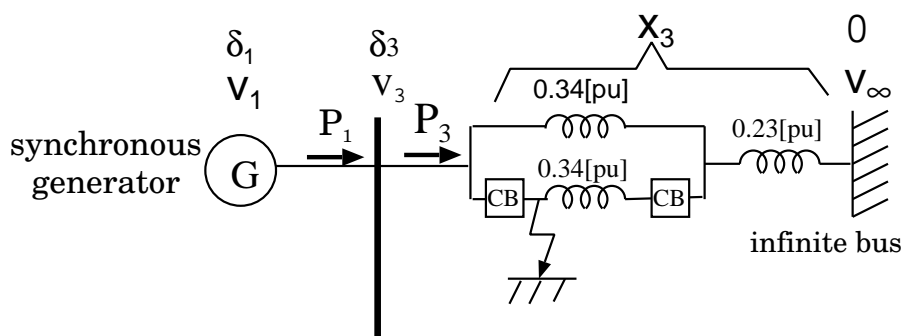


図 B.1: 電源系統モデル

(-1) P- δ カーブの算出 図 A.1 において、PV の出力電流 $i_2 = 0$ かつ初期状態において、同期機の発電電力 P_1 は端子電圧 v_1 、無限大母線電圧 v_∞ を用いて相差角 δ_1 の関数として以下のように表現される。

$$P_1 = \frac{v_1 v_\infty \sin \delta_1}{x_1 + x_3} \dots \dots \dots (B.1)$$

P- δ 曲線はサインカーブの形となる (図 B.2)。送電線のリアクタンスは、事故前は $x_3 = 0.3$ 、事故除去後は $x'_3 = 0.4$ と大きくなる。そのため、ある相差角 δ_1 において、事故除去後の同期機の発電電力 P_{1c} は事故発生前の同期機の発電電力 P_1 より小さな振幅となる。

(-2) 初期相差角 δ_s 、終端相差角 δ_e の算出 電流源が存在しない場合、同期機の発電電力が全体の発電電力である。すなわち、

$$P_{30} = P_{10} \dots \dots \dots (B.2)$$

初期状態の同期機の発電電力 P_{10} はサインカーブとなり、回転子への機械入力 P_m は、初期状態の送電電力 $P_{30}(=1.0[\text{pu}])$ と等しくなる。すなわち、

$$P_{10} = P_m = 1.0[\text{pu}] \dots \dots \dots (B.3)$$

これより、初期相差角 δ_s は、同期機の発電電力 $P_1=1.0[\text{pu}]$ となるような相差角 δ_1 のことであり、式 (B.1) より算出することができる (図 B.3)。

$$\delta_s = \sin^{-1} \left(\frac{(x_1 + x_3)P_m}{v_1 v_\infty} \right) \dots \dots \dots (B.4)$$

式 (B.4) を計算して、 $40[\text{deg}]$ となる。大きな値となる理由は、系統事故に弱いピーク負荷運転時を想定しているためである。

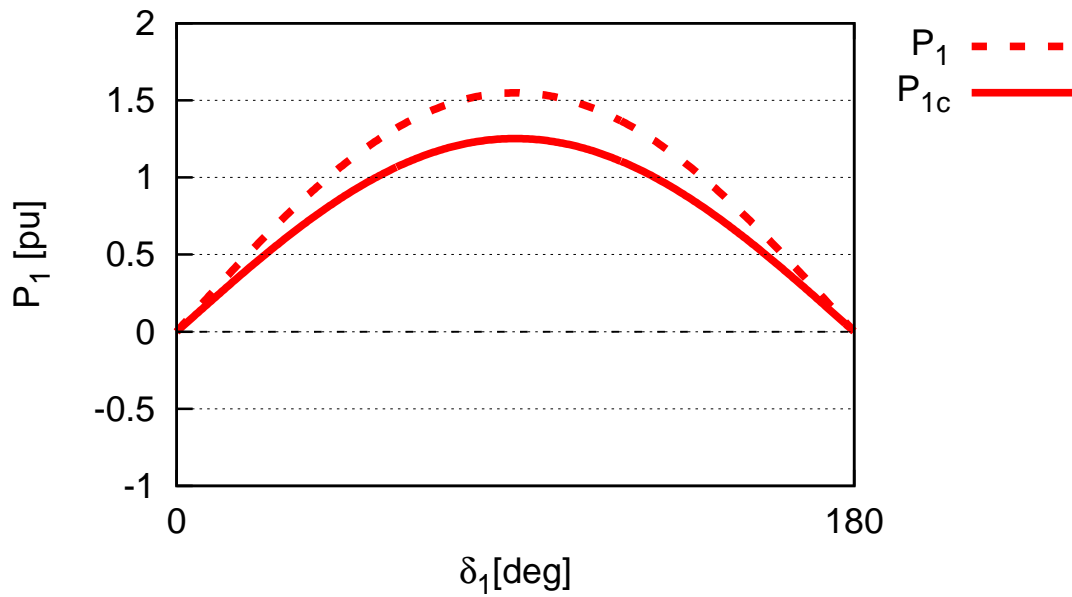


図 B.2: P- δ カーブ (PV なし)

さて、不安定平衡点相角度 δ_e は $P_{1c}=1.0[\text{pu}]$ となるような相角度 δ_1 のとき、臨界位相となる。 δ_e は以下の式より、求めることができる。

$$\delta_s = \sin^{-1} \left(\frac{(x_1 + x'_3)P_m}{v_1 v_\infty} \right) \dots \dots \dots (B.5)$$

この結果、 δ_e は $127[\text{deg}]$ となった。

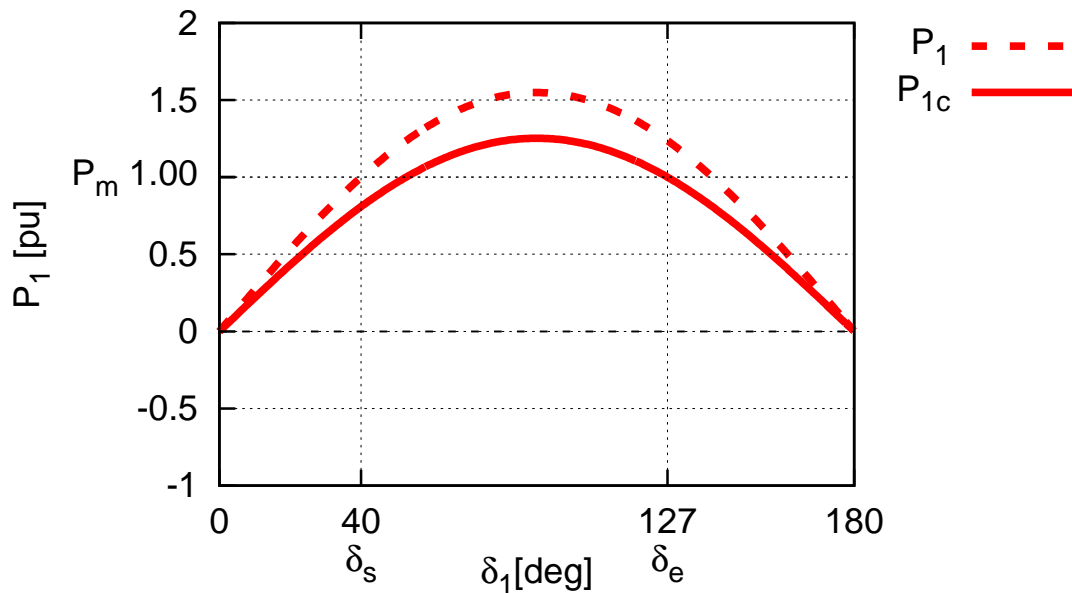


図 B.3: P- δ カーブと初期相角度 δ_s 、不安定平衡点相角度 δ_e (PV なし)

(-3) 臨界事故除去位相 δ_c の算出 臨界事故除去位相 δ_c を求める。

等面積法とは、回転子の加速エネルギー（赤字斜線領域面積）と減速エネルギー（青字斜線領域面積）が等しくなるような相差点 δ_1 、すなわち臨界事故除去位相 δ_c を求めることで臨界事故除去時間 CCT を算出する手法である。

$$\int_s^c (P_m - 0) d\delta - \int_c^e (P_{1c} - P_m) d\delta = 0 \quad \dots \dots \dots (B.6)$$

本研究では式 (B.6) を小数点 6 桁の精度で満たす δ_c を NR 法を適用して、臨界事故除去位相 δ_c を求めた。その結果、53[deg]であった。

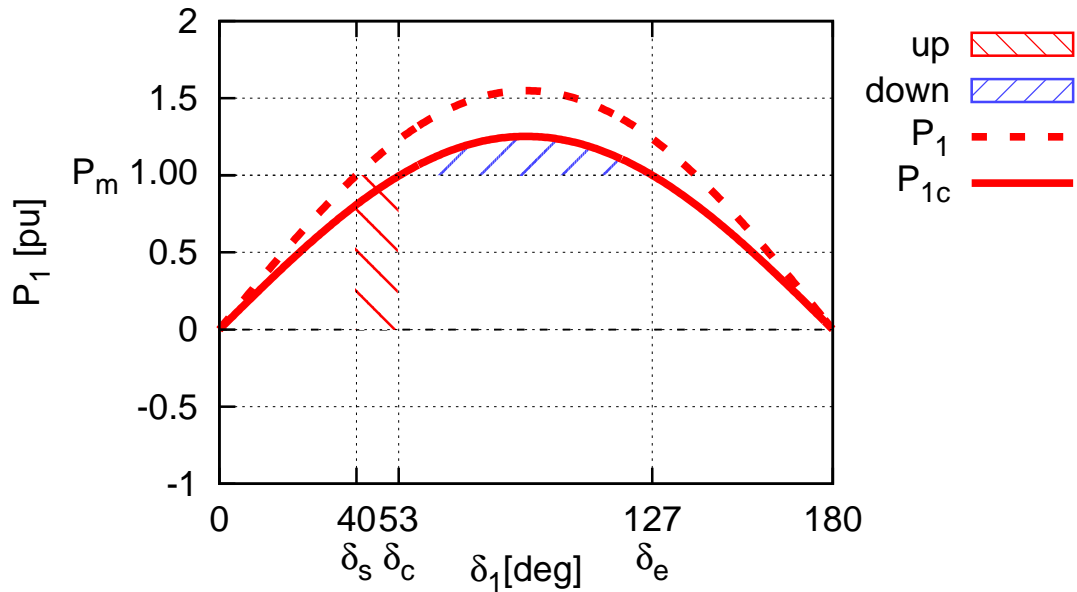


図 B.4: P- δ カーブと臨界事故除去相差点 δ_s (PV なし)

(-4) 臨界事故除去時間 T_c の算出 以上より求めた機械入力 P_m 、初期相差点 δ_s 、不安定平衡点相差点 δ_e を式 (B.7) に代入して、臨界事故除去時間 T_c は求まる。

$$T_c = \sqrt{\frac{M(\delta_c - \delta_s)}{\pi f_0 P_m}} \quad \dots \dots \dots (B.7)$$

ただし、慣性定数 M は 10[s]、商用周波数 f_0 は 50[Hz] とする。以上より、臨界事故除去時間は 0.117[s] と求まった。