



修士論文

有効・無効電力注入による
電力系統過渡安定度向上効果の
比較に関する基礎検討

平成20年2月4日提出

指導教員 馬場 旬平 准教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻

学籍番号 66437

高木 隆志

内容梗概

現在、電力系統における事故に伴う発電機の脱調抑制を目的とした電力機器として、無効電力のみ制御可能な無効電力補償装置が普及している。これに対し、将来の実用化に向けて有効・無効電力共に制御可能な高性能エネルギー貯蔵装置の応用機器の導入が検討され始めている。この動きは、一般に系統安定化制御において有効電力による系統安定化制御が無効電力に比べ効果的であると考えられているためである。しかし、実際に有効電力が無効電力に対して系統の安定化性能が大きいのか、有効電力を利用した系統安定化制御を行った場合に無効電力に比べどの程度効果的であるかという比較検討はこれまで余り行われてこなかった。従って、エネルギー貯蔵装置を用いた系統安定化制御の基礎となる有効電力の効果・特性を理解することで、より効果的な系統安定化制御の手法を考案できると期待される。

本研究は、エネルギー貯蔵装置を用いた効果的な系統安定化制御を行う方策の獲得のため、特に系統事故による発電機の一波脱調の抑制、即ち過渡安定度の向上を目的とした有効・無効電力制御による系統安定化制御の性能評価を目的としている。その基礎的な段階として、事故後の一定期間に原則一定の有効電力・無効電力を系統に注入することで系統安定化制御を行い、その安定化性能の定量的な評価を行うものである。検討方法は、電力系統における現象を再現し、得られた結果を定量的に評価するものである。シミュレーション計算機によるデジタルシミュレーションを基本とし、一部では電子回路型の電力系統シミュレータ装置を用いたアナログシミュレーションの両面から検討を行った。

まず、有効電力・無効電力を単体で用いることで最も基礎的な有効電力・無効電力の安定化性能の比較検討を行った。これにより電力系統安定化制御における有効電力・無効電力の特性・効果を把握したが、同時に有効電力による系統安定化制御に問題があることも確認した。この系統安定化制御における有効電力の問題点を解決し、より効果的に利用するために、有効・無効電力を同時に出力する方法、発電機界磁電圧を制御する方法、そして有効電力を安定的に出力を変化させる方法の3つの方法でさらに検討を行った。

以上、本論文では有効電力・無効電力注入による電力系統安定化効果の基礎について報告した。その結果、有効電力は無効電力に対して系統安定化制御の効果が高いことが確認した。また、有効電力を効果的に活用することで、有効・無効電力同時出力において、無効電力のみによる系統安定化制御に比べ概ね2倍以上の安定化性能が得られることが確認された。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	電力系統安定化制御の原理	3
2.1	電力系統安定化の基礎原理 [2]	3
2.2	電力系統安定化のための電力制御	4
第3章	シミュレーションによる検討の手法	7
3.1	計算機シミュレーションによる検討の方法	7
3.2	電子回路型電力系統シミュレータを用いた検討の手法	19
3.3	シミュレーション結果の評価・解析方法	22
第4章	有効電力による系統安定化制御効果の基礎検討	25
4.1	有効電力または無効電力を用いた系統安定化制御	25
4.2	有効電力による系統安定化制御の限界	27
4.3	本章のまとめ	31
第5章	有効・無効電力同時出力の安定化性能の検討	32
5.1	計算機シミュレーションによる検討結果	32
5.2	電子回路型電力系統シミュレータを用いた検討結果	34
5.3	有効電力の影響が系統設定によって変化する理由	37
5.4	本章のまとめ	41
第6章	発電機界磁電圧の制御を考慮した場合の系統安定化効果の検討	42
6.1	AVRの制御方法及び導入時の計算機シミュレーション手法	42
6.2	AVRを導入した場合の有効・無効電力同時出力の安定化性能	43
6.3	本章のまとめ	46
第7章	有効・無効電力の最適出力配分制御の検討	47
7.1	最適出力配分制御の方法	47
7.2	最適出力配分制御による系統安定化制御の効果	48
7.3	本章のまとめ	49

第 8 章	結論	50
8.1	本論文の成果	50
8.2	今後の課題	50

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年の増大し続ける電力需要に対し、電力の安定供給のために発電・送電設備は大規模・大容量化の一途をたどっている。このような大容量の発電設備は出力の大きな変動が困難であり、また高効率運転のためにも定出力運転が望ましい。しかし、電力需要の面からは年々の負荷率の低下も問題になっており、既存の設備を十分且つ有効に活用するため電力系統におけるエネルギー（電力）貯蔵装置の重要性が増してきている。

一方、今日では産業界や我々の生活のあらゆる部分に電気は深く関わっている。従って、電力系統における事故はもちろんのこと、瞬時電圧低下（瞬低）・周波数変動等の些細な状態変動によって引き起こされる社会的影響は極めて大きく、良質且つ安定な電力供給は現代社会に不可欠なものとなっている。近年では従来の電力機器の発展だけでなく高性能エネルギー貯蔵装置の応用研究も進み、電力系統におけるトラブルの影響を抑制する機能を持ったものが検討・実用化されている。近年研究されている電力系統用のエネルギー貯蔵装置には、高性能二次電池、電気二重層キャパシタ、フライホイールや超電導磁気エネルギー貯蔵装置等を用いたものがあるが、電力系統に应用するためには図 1.1 のような諸元を持つ必要があるとされている [1]。

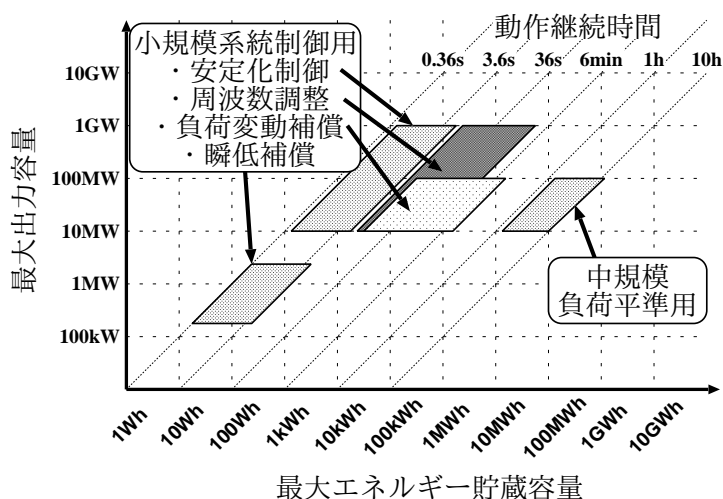


図 1.1: 系統制御用エネルギー貯蔵装置に求められる性能

本研究では、各種系統制御の中から系統事故の抑制に主眼をおく。系統事故の抑制の分野では、従来は無効電力のみ制御可能な無効電力補償装置が導入されてきた。現在では有効・無効電力共に制御可能なエネルギー貯蔵装置の応用機器の導入が検討され始めてはいるものの、

未だ実用化には至っていない。この動きは、一般に系統安定化制御において有効電力による系統安定化制御が無効電力に比べ効果的であると考えられているためである。しかし、実際に系統安定化制御において有効電力が無効電力に対して系統の安定化性能が大きいのか、またどの程度効果的であるかという比較検討はこれまで余り行われてこなかった。従って、エネルギー貯蔵装置を用いた系統安定化制御の基礎となる有効電力の効果・特性を理解することで、より効果的な系統安定化制御の手法を考案できると期待している。

1.2 研究の目的

本研究は、エネルギー貯蔵装置を用いた効果的な系統安定化制御を行う方策の獲得のため、特に系統事故による発電機の一歩脱調¹の抑制、即ち過渡安定度の向上を目的とした有効電力・無効電力制御による系統安定化制御の性能評価を目的としている。

その基礎的な段階として、事故後の一定期間に原則一定の有効電力・無効電力を系統に注入することで系統安定化制御を行い、その安定化性能の定量的な評価を行う。これにより、系統安定化制御における無効電力に対する有効電力の効果、及び有効電力を用いた場合に無効電力のみの場合に対してどの程度安定化制御が向上するかを検討する。

1.3 本論文の構成

まず、1章では序論として本研究の背景、目的について述べた。

2章では電力系統安定化制御の原理についてまとめ、電力制御による系統安定化の概要を説明する。

3章では電力制御を用いた系統安定化制御の検討を行うための計算機シミュレーション方法、電子回路型電力系統シミュレータによる実験方法、そして評価・検討方法について説明する。

4章では、計算機シミュレーションを利用して系統安定化制御における有効電力の効果について最も基礎的な検討を行う。

5章では、計算機シミュレーション及びシミュレータ装置を用いた実験の両面から、有効電力・無効電力を同時に出力した場合に出力配分によって系統安定化制御の効果がどのように変化するかを検討する。

6章では、系統安定化制御においてより効果的に有効電力を活用するために発電機界磁電圧の制御を導入し、有効電力の効果がどのように変化するかを検討する。

7章では、有効電力による系統安定化制御の効果を最大限に発揮するため、有効電力・無効電力の出力配分が最も効果的になるような制御を検討し、評価する。

最後に8章で本研究の成果をまとめ、結論を述べると共に、今後の課題を示す。

¹事故後の相边角動揺の一歩目で発電機が脱調すること。

第2章 電力系統安定化制御の原理

2.1 電力系統安定化の基礎原理 [2]

電力系統の安定性を議論する場合、大きくわけて定態安定度と過渡安定度の2種類の考え方が存在する。定態安定度は安定平衡点近傍での微小な擾乱に対する安定度、過渡安定度は大きな擾乱が生じたときの安定度をそれぞれ意味する。本論文においては系統事故による発電機の一歩脱調の抑制を検討しているため、過渡安定度で議論する必要がある。

過渡安定度は大域的な安定性を扱うため、その解析は電力の非線形性を考慮する必要があり、容易ではない。しかし、解析対象が系統事故発生直後の短時間での発電機の同期はずれであれば、発電機の制御系の応答は十分に伝達されず、その間発電機はある程度内部電圧を維持した一定の電圧源であると考えることができ、解析モデルは簡単化することができる。以下では、過渡安定度の基本的な解析方法である等面積法を用いて系統安定化制御の原理を説明する。ただし、等面積法は一機無限大母線系統（または二機）でのみ適用できる方法である。

発電機慣性時定数を M 、発電機回転子角速度を ω 、相差点を δ 、機械的入力を P_m 、電気的出力を P_e とおいたとき、発電機回転子の運動方程式は最も単純な形式として式 (2.1) のように表せる。

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.2)$$

式 (2.1) より、電力の需給バランスが崩れることで発電機回転子の乱調が発生することが分かる。従って、発電機の乱調・脱調を議論する場合、電力の需給バランスを合わせることで角速度・相差点を安定させることが系統安定化制御の基本となる。

次に、式 (2.1) の両辺に $d\delta/dt$ をかけると、

$$M \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\delta}{dt} P_a \quad (2.3)$$

式 (2.3) の左辺について、

$$M \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} M \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right\} = \frac{dE}{dt} \quad (2.4)$$

$$\frac{dE}{dt} = P_a \frac{d\delta}{dt} \quad (2.5)$$

$$E = \int dE = \int P_a d\delta \quad (2.6)$$

従って、 P_m と P_e の差を δ で積分すれば発電機回転子の加速エネルギーが分かる。

今、図 2.1 に示すように一機無限大母線系統における 2 回線送電のうち 1 回線で三相短絡事故が発生し、事故回線を開放して事故が除去された場合を想定する。図 2.2 は、各状態での電力相差角曲線を示している。事故中の P_e は極めて小さくなり、事故が除去される間に動いた δ_c までに系統に与えられた加速エネルギーが E_1 で表されている。事故除去後減速に使うことができる最大のエネルギーは E_2 である。従って、 $E_1 < E_2$ なら安定、 $E_1 = E_2$ のときに安定限界となり、 $E_1 > E_2$ ならば発電機は脱調してしまう。以上より、発電機の一歩脱調抑制のための系統安定化制御は発電機回転子の加速エネルギーで議論できることが分かる。

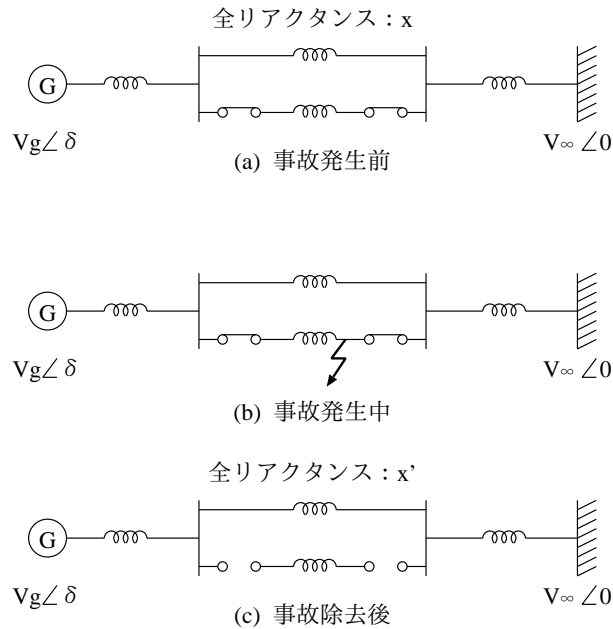


図 2.1: 系統構成と事故のシーケンス

2.2 電力系統安定化のための電力制御

前節の基礎原理から、系統事故に伴う発電機の脱調を抑制するためには、事故発生後に生じる加速エネルギーより大きな減速エネルギーが系統に備わっていれば良いことが分かった。しかし、事故発生前に発電機が高出力で運転されていたり、事故の除去に時間がかかってしまった場合、加速エネルギー過多となり発電機の脱調を抑制できなくなってしまう。もし、事故発生中の加速エネルギーを抑制したり、事故除去後の減速エネルギーを増加させることができれば、系統自体が持つ減速エネルギーが不足する場合でも発電機の一歩脱調を抑制することができる。この役目を負うのが系統安定化装置による電力制御である。以下では、電力制御による系統安定化制御の原理を説明する。

式 (2.6) より加速エネルギー E は加速電力 P_a の積分値である。過渡安定度解析の前提である発電機制御系の応答が十分ではないことから、発電機の機械的入力 P_m は一定と考えることができる。従って、式 (2.1) より加速電力 P_a は発電機出力 P_e のみに依存することになり、加速エネルギーは発電機出力 (= 系統での消費電力) によって制御可能であることが分かる。

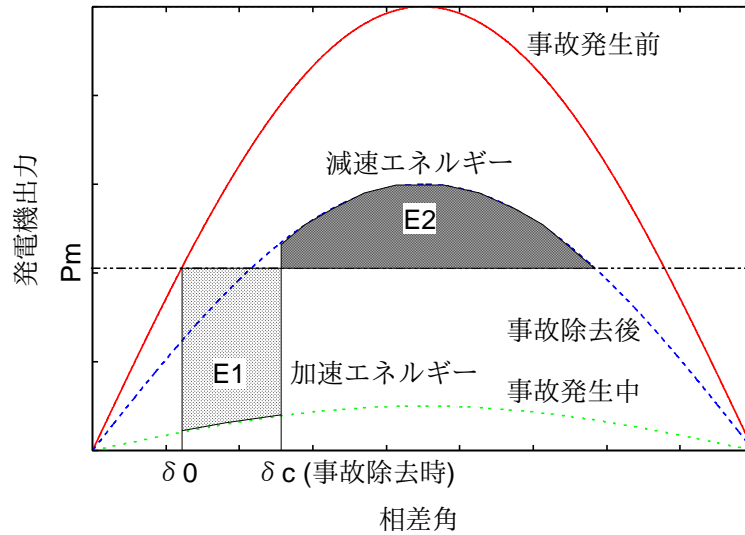
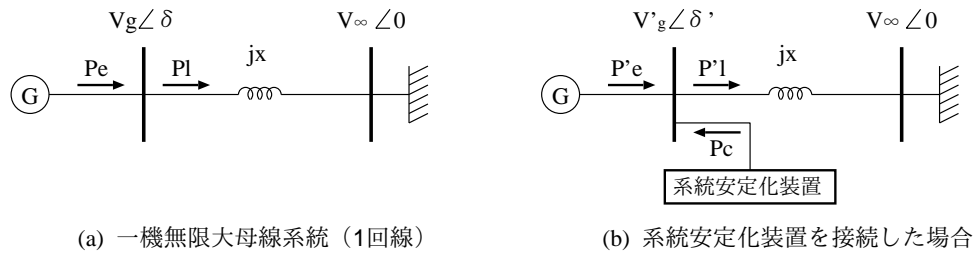


図 2.2: 等面積法による過渡安定度の考え方

一方、図 2.3 の (a) の一機無限大母線系統において発電機出力 P_e は、発電機と無限大母線の電圧・相边角及び 2 点間のインピーダンスを用いて以下のように表せる。

$$P_e = \frac{V_g V_\infty \sin \delta}{x} \quad (2.7)$$

式 (2.7) より V_∞, x は一定値であることから、発電機出力は V_g, δ に依存することが分かる。



(a) 一機無限大母線系統 (1回線)

(b) 系統安定化装置を接続した場合

図 2.3: 一機無限大母線系統

ここで、図 2.3 の (b) のように発電機端子に系統安定化装置を接続し、系統に対して有効・無効電力を注入する場合を考える。電力系統においては無効電力の制御によって電圧を制御することができる。従って、系統安定化装置から遅れの無効電力を系統に注入すれば発電機端子電圧は低下し、進みの無効電力を注入すれば上昇させることができる。これを利用すれば式 (2.7) の V_g が制御できるため、結果として発電機出力を制御することができる。ただし、相边角 δ は制御できないため、必ずしも発電機出力を十分に上昇させられるとは限らない。

次に、系統安定化装置から系統に対して有効電力を注入する場合を考える。図 2.3 において流れる電力の関係式は以下になる。

$$\begin{cases} (a) \text{ の場合} : P_e = P_1 \\ (b) \text{ の場合} : P'_e = P'_1 - P_c \end{cases} \quad (2.8)$$

式(2.8)は有効電力を注入した直後であれば $P_1 = P_1'$ である。従って、有効電力を注入した場合は V_g, δ の制御によって発電機出力を制御するのではなく、直接的に発電機出力の制御が行えることが分かる。即ち、系統安定化装置から有効電力を放出すれば発電機出力は低下し、吸収すれば発電機出力を上昇させることができる。

以上より、有効・無効電力を系統に注入することによって発電機出力が制御できるため、系統事故が発生した場合に有効・無効電力の制御を行えば系統安定化制御を行うことができる。また、発電機出力の制御において無効電力は間接的、有効電力は直接的に関与するため、一般に有効電力が系統安定化制御において効果的であると考えられている。

第3章 シミュレーションによる検討の手法

本研究における有効・無効電力注入による電力系統安定化制御に関する検討の方法は、系統事故及びその系統安定化制御に伴う過渡動揺を主に計算機シミュレーションによるデジタルシミュレーションで再現し、得られた結果を定量的に評価するものである。また、一部の検討においては計算機シミュレーションの現実との整合性を確認すべくシミュレータ実験装置を用いたアナログシミュレーションも用いて、デジタル・アナログの両面から検証を行っている。

本章では、計算機シミュレーション及びシミュレータ装置を用いた解析手法、及び解析における基本的な設定、そして評価・検討方法について説明する。

3.1 計算機シミュレーションによる検討の方法

3.1.1 同期機の基礎理論 [3]

同期機の基本式

同期機に流れる電流は固定子巻線や励磁電流だけでなく、回転子表面に埋め込まれた制動巻線やスロットのくさび、及び積層されていない回転子鉄心中に誘起されるうず電流などがある。これらの電流の多くは連続媒質の中を分布して流れているため、その挙動を明らかにすることは容易ではない。従って、一般的には図 3.1 のように、直軸に 1 つ集中制動回路、横軸に 1 つもしくは 2 つの集中制動回路を仮想してその効果を近似的に表現している。図 3.1 の k_d , k_q , g 回路がそれらを表したもので、いずれも短絡回路を形成し、各回路とも抵抗とインダクタンスから構成されている。

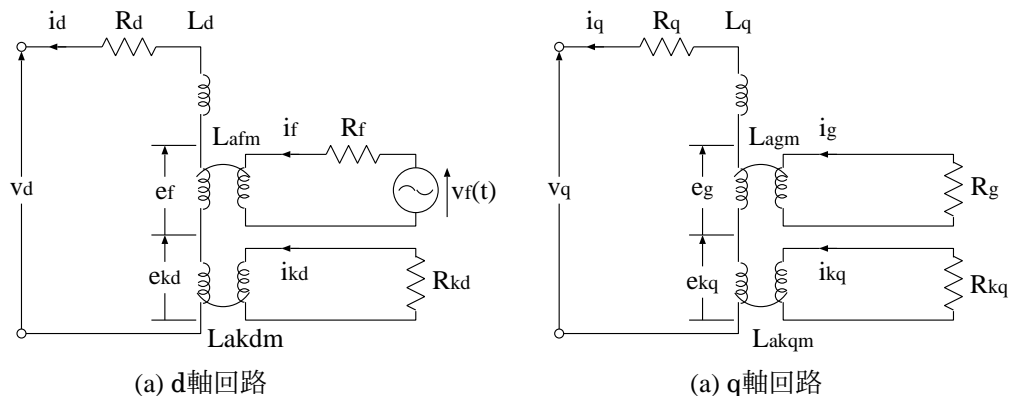


図 3.1: 同期機制動回路の等価表現

上記で仮想した制動回路を含めて、各巻線での鎖交磁束数を求めると以下のように表せる。

$$\begin{cases} \phi_d(t) = -L_d i_d(t) + L_{afm} i_f(t) + L_{akdm} i_{kd}(t) \\ \phi_q(t) = -L_q i_q(t) + L_{agm} i_g(t) + L_{akqm} i_{kq}(t) \\ \phi_0(t) = -L_0 i_0(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \phi_f(t) = -L_{afm} i_d(t) + L_{ff} i_f(t) + L_{fkd} i_{kd}(t) \\ \phi_g(t) = -L_{agm} i_q(t) + L_{gg} i_g(t) + L_{gkq} i_{kq}(t) \\ \phi_{kd}(t) = -L_{akdm} i_d(t) + L_{fkd} i_f(t) + L_{kdkd} i_{kd}(t) \\ \phi_{kq}(t) = -L_{akqm} i_q(t) + L_{gkq} i_g(t) + L_{kqkq} i_{kq}(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

ただし、図中に表示して無いインダクタンスは次の通り。

L_{ff} : f 回路の自己インダクタンス , L_{fkd} : f, kd 回路間の相互インダクタンス

L_{gg} : g 回路の自己インダクタンス , L_{gkq} : g, kq 回路間の相互インダクタンス

L_{kdkd} : kd 回路の自己インダクタンス , L_{kqkq} : kq 回路の自己インダクタンス

また、電圧、電流の関係式は以下ようになる。

$$\begin{cases} v_d(t) = p\phi_d(t) - R i_d(t) - \phi_q(t) p\theta(t) \\ v_q(t) = p\phi_q(t) - R i_q(t) - \phi_d(t) p\theta(t) \\ v_0(t) = p\phi_0(t) - R i_0(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} v_f(t) = p\phi_f(t) + R_f i_f(t) \\ v_g(t) = p\phi_g(t) + R_g i_g(t) \\ v_{kd}(t) = p\phi_{kd}(t) + R_{kd} i_{kd}(t) \\ v_{kq}(t) = p\phi_{kq}(t) + R_{kq} i_{kq}(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

$p = d/dt$ であり、R は各巻線の抵抗である。以上の式は Park の式と呼ばれ、同期機の代表的なモデルである。

機器定数を用いた Park の式と等価回路

式 (3.1) ~ (3.4) の各式を見ると、零軸回路は d, q 軸回路と完全に分離しており、他と独立に扱うことができる。零軸回路以外の関係式を見ると、5 個の抵抗と 12 個のインダクタンスの 17 個の定数により表されている。しかし、一般に同期機の特性を表すために用いられる機器定数は、1 個の抵抗、6 個のインダクタンスと 4 個の時定数の計 11 個の定数であるため、17 個の定数を全部決定することができない。一般の同期機表現に用いられる機器定数は次の

ように定義される。

- L_d : f 及び kd 回路を開放した時の d 軸コイルインダクタンス
(d 軸同期インダクタンス)
- L'_d : f 回路を短絡、kd 回路を開放した状態での見かけの d 軸コイルインダクタンス
(d 軸過渡インダクタンス)
- L''_d : f 及び kd 回路を短絡した状態での見かけの d 軸コイルインダクタンス
(d 軸初期過渡インダクタンス)
- T'_{d0} : d 及び kd 回路を開放した時の i_f の減衰時定数
(d 軸開路時定数)
- T''_{d0} : d 回路を開放、j 回路を短絡したときの i_{kd} の減衰時定数
(d 軸開路初期時定数)

L_d は通常の d 軸インダクタンスと同じ値である。また、q 軸回路の L_q , L''_q , L'_q , T'_{q0} , T''_{q0} についても同様に定義される。

これらの一般的な機器定数を用いて Park の式を表すための仮定として、d 軸上に存在する 3 つの d, f, kd 巻線が 1 つの 3 巻線変圧器を構成すると考える。このように考えれば、3 つの巻線は図 3.2 のように表現することができる。図 3.2 において、 r_f , l_f は d 巻線からみた f 回路の抵抗分、インダクタンス分であり、 r_{kd} , l_{kd} は d 巻線からみた kd 回路の抵抗分、インダクタンス分である。また、 L_1 は d 軸固定子巻線の漏れインダクタンスである。

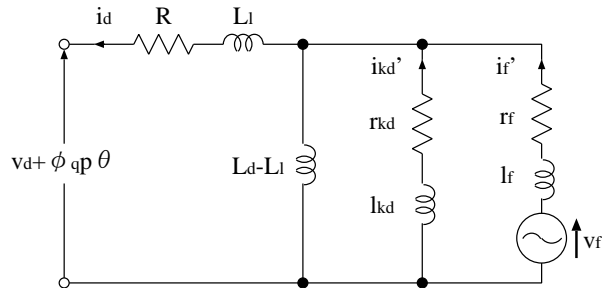


図 3.2: d 軸等価回路

等価回路が決定したので、上記の機器定数の定義を元に回路の各値を表現する。

$$\left\{ \begin{array}{l} l_f = \frac{(L'_d - L_1)(L_d - L_1)}{L_d - L'_d} \\ l_{kd} = \frac{(L''_d - L_1)(L'_d - L_1)}{L'_d - L''_d} \\ r_f = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \frac{(L_d - L_1)^2}{L_d - L'_d} \\ r_{kd} = \frac{(L'_d - L_1)^2}{(L'_d - L''_d) T''_{d0}} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} i'_f(t) = \frac{L_{afm}}{L_d - L_l} i_f(t) \\ i'_{kd}(t) = \frac{L_{akdm}}{L_d - L_l} i_{kd}(t) \\ v'_f(t) = \frac{L_d - L_l}{L_{afm}} v_f(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

q 軸等価回路についても以上と同様に導くことができる。

Park の式の別の表現

式 (3.6) によって得られた $i'_f(t)$, $i'_{kd}(t)$ は電流に等価な値であり、実際に回路を流れる電流値ではない。しかし、これらの厳密な値を求める必要は無いため、次の新しい変数を用いて実際の電流 $i_f(t)$, $i_{kd}(t)$, $i_g(t)$, $i_{kq}(t)$ の代わりに用いることにする。

$$\begin{cases} e_{q1} = \omega_0 L_{afm} i_f(t) \\ e_{q2} = \omega_0 L_{akdm} i_{kd}(t) \\ e_{d1} = -\omega_0 L_{agm} i_g(t) \\ e_{d2} = -\omega_0 L_{akqm} i_{kq}(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

方程式の形を整えるため、次の鎖交磁束数に等価な値も導入することにする。

$$\begin{cases} e'_q(t) = \frac{\omega_0 L_{afm}}{L_{ff}} \phi_f(t) \\ e''_q(t) = \frac{\omega_0 L_{akdm}}{L_{kdkd}} \phi_{kd}(t) \\ e'_d(t) = \frac{\omega_0 L_{agm}}{L_{gg}} \phi_g(t) \\ e''_d(t) = \frac{\omega_0 L_{akqm}}{L_{kqkq}} \phi_{kq}(t) \end{cases} \quad (3.8)$$

以上の等価値を用いて式 (3.1) ~ (3.4) の発電機の基本式 (Park の式) を書き換えると以下のようなになる。

$$\begin{cases} \omega_0 \phi_d(t) = -\omega_0 L_d i_d(t) + e_{q1}(t) + e_{q2}(t) \\ \omega_0 \phi_q(t) = -\omega_0 L_q i_q(t) - e_{d1}(t) - e_{d2}(t) \\ \omega_0 \phi_0(t) = -\omega_0 L_0 i_0(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e'_q(t) = -\omega_0 (L_d - L'_d) i_d(t) + e_{q1}(t) + \frac{L_d - L'_d}{L_d - L_1} e_{q2}(t) \\ e''_q(t) = \frac{\omega_0 (L_d - L'_d)}{K_d} i_d(t) + \frac{1}{K_d} e_{q1}(t) + e_{q2}(t) \\ e'_d(t) = -\omega_0 (L_q - L'_q) i_q(t) + e_{d1}(t) + \frac{L_q - L'_q}{L_q - L_1} e_{d2}(t) \\ e''_d(t) = \frac{\omega_0 (L_q - L'_q)}{K_q} i_q(t) + \frac{1}{K_q} e_{d1}(t) + e_{d2}(t) \\ K_d = 1 + \frac{(L'_d - L_1)(L''_d - L_1)}{(L'_d - L''_d)(L_d - L_1)} \\ K_q = 1 + \frac{(L'_q - L_1)(L''_q - L_1)}{(L'_q - L''_q)(L_q - L_1)} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_d(t) = \frac{d\phi_d(t)}{dt} - \phi_q(t) \frac{d\theta(t)}{dt} - R i_d(t) \\ v_q(t) = \frac{d\phi_q(t)}{dt} - \phi_d(t) \frac{d\theta(t)}{dt} - R i_q(t) \\ v_0(t) = \frac{d\phi_0(t)}{dt} - R i_d(t) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_f \omega_0 (L_d - L_1)}{N_a R_f} v_f(t) = T'_{d0} \frac{de'_q(t)}{dt} + e_{q1}(t) \\ T'_{q0} \frac{de'_d(t)}{dt} + e_{d1}(t) = 0 \\ T''_{d0} \frac{de''_q(t)}{dt} + \frac{(L'_d - L_1)^2}{K_d (L'_d - L''_d)(L_d - L_1)} = 0 \\ T''_{q0} \frac{de''_d(t)}{dt} + \frac{(L'_q - L_1)^2}{K_q (L'_q - L''_q)(L_q - L_1)} = 0 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

ただし、 N_a, N_f はそれぞれ固定子巻線、励磁巻線の巻数である。

発電機の内部を表す微分方程式

発電機慣性時定数を M 、発電機制動時定数を D 、回転子位置角を δ 、50Hz 時の角速度を ω_0 、そして回転子の入力トルク、出力トルクをそれぞれ T_m, T_e とおくと、動揺方程式とも呼ばれる発電機回転子の運動方程式は以下のように表せる。

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = T_m - T_e \quad (3.13)$$

上式を連立一階微分方程式の形に変形すると以下ようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_0 \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{M} \left[\frac{\omega_0}{\omega(t)} P_m(t) - \frac{\omega_0}{\omega(t)} P_e(t) - D \{\omega(t) - \omega_0\} \right] \end{array} \right. \quad (3.14)$$

次に、式 (3.10), (3.12) をまとめた発電機内部回路における鎖交磁束数の等価値の微分方程式をまとめる。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{de'_q(t)}{dt} &= \frac{1}{T'_{d0}} \left[e_f(t) + \frac{(L_d - L'_d)(L'_d - L''_d)}{(L'_d - L_1)^2} K_d e''_q(t) - \left\{ 1 + \frac{(L_d - L'_d)(L'_d - L''_d)}{(L'_d - L_1)^2} \right\} e'_q(t) \right. \\ &\quad \left. - \omega(t) \frac{(L_d - L'_d)(L''_d - L_1)}{(L'_d - L_1)} i_d(t) \right] \\ \frac{de''_q(t)}{dt} &= -\frac{1}{T''_{d0} K_d} \{ K_d e''_q(t) - e'_q(t) + \omega(t) (L'_d - L_1) i_d(t) \} \\ \frac{de'_d(t)}{dt} &= \frac{1}{T'_{q0}} \left[-\frac{(L_q - L'_q)(L'_q - L''_q)}{(L'_q - L_1)^2} K_q e''_d(t) + \left\{ 1 + \frac{(L_q - L'_q)(L'_q - L''_q)}{(L'_q - L_1)^2} \right\} e'_d(t) \right. \\ &\quad \left. - \omega(t) \frac{(L_q - L'_q)(L''_q - L_1)}{(L'_q - L_1)} i_q(t) \right] \\ \frac{de''_d(t)}{dt} &= -\frac{1}{T''_{q0} K_q} \{ K_q e''_d(t) - e'_d(t) + \omega(t) (L'_q - L_1) i_q(t) \} \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

3.1.2 計算機シミュレーション方法

続いて前節の同期機の基礎理論を用いて系統事故の計算機シミュレーションを行うが、図 3.3 に示すような幾つかの手順を追って計算を進めて行く必要がある。以下では、このフローチャートを基に具体的な式を示しながら計算機シミュレーション方法を解説する。

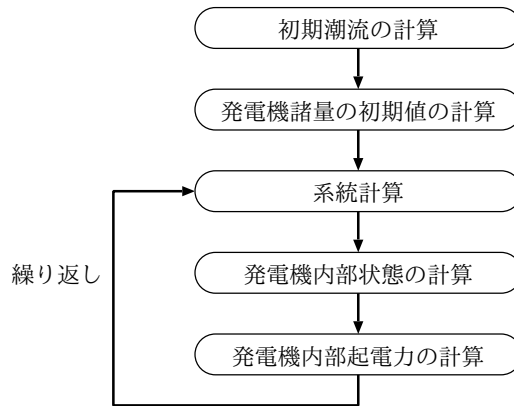


図 3.3: 計算機シミュレーションの計算手順

初期潮流の計算

まず、系統事故による擾乱が加わる以前の初期潮流を求める必要がある。本研究では対象系統を一機無限大母線系統としており、最初に自身で決定すべき項目は無限大母線電圧 $\dot{V}_\infty = V_\infty \angle 0$ 及び、発電機端子電圧 $\dot{V}_G = V_G \angle \theta$ である。ここで θ は、無限大母線電圧に対する発電機端子

電圧の相差角である。無限大母線とは電圧・周波数がほぼ一定である巨大な電力システムを模擬した母線であり、理想的に電圧の大きさ・周波数は一定として扱うことができる母線である。さらに、 $\dot{V}_\infty (= V_{\infty D} + jV_{\infty Q})$, $\dot{V}_G (= V_{GD} + jV_{GQ})$ から発電機電流 $\dot{I}_G (= I_{GD} + jI_{GQ})$ を求めることができる。

次に、 \dot{V}_G, \dot{I}_G が決定されると、図 3.4 に示すように基準軸となる D 軸から測った回転子位置の初期値 δ_0 の値が次式により求められる。ただし、R は発電機電機子抵抗であるが、本研究では簡単のため抵抗値は無視することにする。

$$\dot{E}_q = \dot{V}_G + (R + j\omega_0 L_q) \dot{I}_G \quad (3.16)$$

$$\delta_0 = \angle \dot{E}_q \quad (3.17)$$

なお、図 3.4 に示すように D-Q 座標はシステムの座標であり基準角速度 ω_0 で回転する座標軸、d-q 座標は発電機回転子の座標であり角速度 ω で回転している座標軸とする。また、D, Q の大文字下付き文字は D-Q 座標での表現、d, q の小文字下付き文字は d-q 座標での表現とする。

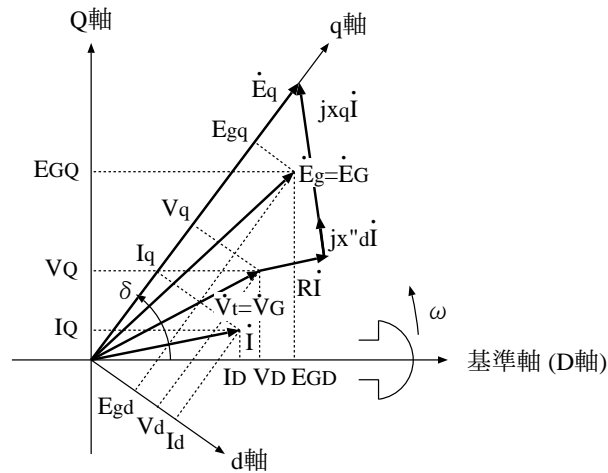


図 3.4: 基準座標軸上に表現した発電機の電圧・電流ベクトル図

発電機諸量の初期値の計算

初期回転子位置 δ_0 が決まったため、d-q 座標における次の諸量を求めることができる。

$$\begin{cases} i_{d0} = \text{Re} \left[\dot{I}_G \exp \left\{ j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_0 \right) \right\} \right] \\ i_{q0} = \text{Im} \left[\dot{I}_G \exp \left\{ j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_0 \right) \right\} \right] \\ v_{d0} = \text{Re} \left[\dot{V}_G \exp \left\{ j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_0 \right) \right\} \right] \\ v_{q0} = \text{Im} \left[\dot{V}_G \exp \left\{ j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_0 \right) \right\} \right] \end{cases} \quad (3.18)$$

次に、界磁起電力 e_{f0} は以下のように表せる。4章の解析においては発電機の励磁装置の出力は一定として考えるため、シミュレーション中の界磁起電力はこの初期値のまま一定とす

る。6章では界磁起電力の制御を考慮した検討を行うが、詳細は6章内で述べることにする。

$$e_{f0} = v_{q0} + \omega_0 L_d i_{d0} \quad (3.19)$$

上式において、発電機の角速度の初期値 $\omega(t=0)$ は 50Hz 時の角速度 ω_0 に等しい。また、発電機の電氣的出力 $P_e(t)$ の初期値 P_{e0} は、

$$P_{e0} = v_{d0} i_{d0} + v_{q0} i_{q0} \quad (3.20)$$

で与えられる。界磁起電力と同様に発電機の调速器 (GOV : Governor) の出力も一定として考えるため、この電氣的出力 P_{e0} の初期値が初期機械的入力 P_m となり、 P_m は一定値となる。

また、各巻線の磁束鎖交数を表す仮想的な電圧 $e'_q(t)$, $e''_q(t)$, $e'_d(t)$, $e''_d(t)$ の初期値は次のように計算される。

$$\begin{cases} e'_{q0} = v_{q0} + \omega_0 L'_d i_{d0} \\ e''_{q0} = \frac{1}{K_d} \{ e'_{q0} - \omega_0 (L'_d - L_1) i_{d0} \} \\ e'_{d0} = \omega_0 (L_q - L'_q) i_{q0} \\ e''_{d0} = \frac{1}{K_q} \omega_0 (L_q - L_1) i_{q0} \end{cases} \quad (3.21)$$

系統計算：系統各部の電圧・電流の計算

まず、D-Q 座標で表現された発電機内部起電力 \dot{E}_G を計算する必要があるが、これは以下に示す d-q 座標で計算する内部誘起電圧 e_{gd} , e_{dq} から求められる。

$$\begin{cases} e_{gd} = K_q \frac{L'_q - L''_q}{L'_q - L_1} e''_d + \frac{L''_q - L_1}{L'_q - L_1} e'_d \\ e_{gq} = K_d \frac{L'_d - L''_d}{L'_d - L_1} e''_q + \frac{L''_d - L_1}{L'_d - L_1} e'_q \end{cases} \quad (3.22)$$

従って、以下の D-Q 座標における内部起電力が導かれる。

$$\begin{cases} E_{GD} = e_{gd} \sin \delta + e_{gq} \cos \delta \\ E_{GQ} = -e_{gd} \cos \delta + e_{gq} \sin \delta \end{cases} \quad (3.23)$$

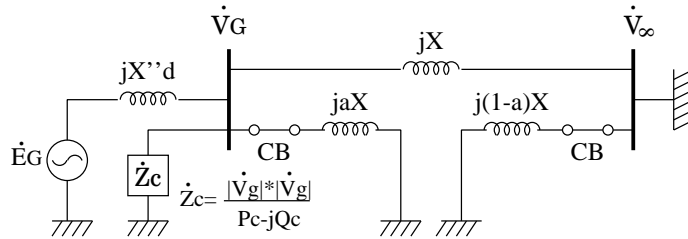


図 3.5: 理論解析における三相地絡事故発生以降の系統図

D-Q 座標における内部起電力 \dot{E}_G が求まると、後は系統のインピーダンスから発電機電流 \dot{I}_G 、発電機端子電圧 \dot{V}_G と発電機出力 P_c を計算することができる。電力系統のインピーダンスは、事故の状況や制御の状況などにより変化する。図 3.5 は、一機無限大母線系統 (二回線) において一回線で三相地絡事故発生が発生した時の事故発生以降のインピーダンスの分布の様子を示している。CB は遮断器 (Circuit Breaker) である。 X_d'' は発電機の d 軸初期過渡リアクタンス、 X は送電線一回線のリアクタンス、 a ($0 \leq a \leq 1$) は送電線での事故点の位置をそれぞれ示す。 Z_c は系統安定化装置の入出力値により決定されるインピーダンスであり、 P_c を有効電力制御入出力値、 Q_c を無効電力制御入出力値として、接続端子である発電機端子電圧 \dot{V}_G を用いて以下のように決定される。

$$\dot{Z}_c = \frac{|\dot{V}_G|^2}{P_c - jQ_c} \quad (3.24)$$

以下で事故後の各状況における系統計算で発電機端子電圧及び電流を求める過程を示す。なお理論解析においては、送電線抵抗、発電機電機子抵抗は無視している。

三相地絡事故発生中 電力制御は行っていないため、図 3.5 の Z_c は存在しない。従って、この時のインピーダンスの様子は図 3.6 のようになる。発電機端子における電流の関係式は以下ようになる。

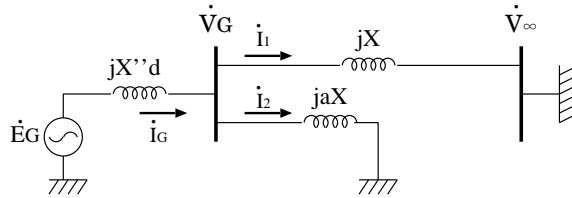


図 3.6: 三相地絡事故発生中の系統図

$$\dot{I}_G = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (3.25)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{E}_G - \dot{V}_G}{jX_d''} = \frac{\dot{V}_G - \dot{V}_\infty}{jX} + \frac{\dot{V}_G}{jaX} \quad (3.26)$$

これより、発電機電流 \dot{I}_G が求められる。

$$\begin{cases} I_{GD} = \frac{(1+a)E_{GQ}}{(1+a)X_d'' + aX} \\ I_{GQ} = -\frac{(1+a)E_{Gd} - a}{(1+a)X_d'' + aX} \end{cases} \quad (3.27)$$

従って、以下の通り発電機端子電圧 \dot{V}_G が求められる。

$$\begin{cases} V_{GD} = E_{GD} + X_d'' I_{GQ} \\ V_{GQ} = E_{GQ} - X_d'' I_{GD} \end{cases} \quad (3.28)$$

三相地絡事故発生中に電力制御を行う場合 この状況では、図 3.5 における発電機端子に接続する全てのリアクタンスを考慮する必要がある。従って、この時のインピーダンスの様子は図 3.7 のようになる。発電機端子における電流の関係式は以下ようになる。

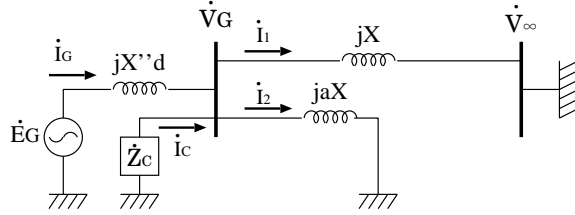


図 3.7: 三相地絡事故発生中に電力制御を行う場合の系統図

$$\dot{I}_G + \dot{I}_c = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (3.29)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{E}_G - \dot{V}_G}{jX''_d} + \frac{P_c - jQ_c}{\dot{V}_G} = \frac{\dot{V}_G - \dot{V}_\infty}{jX} + \frac{\dot{V}_G}{jaX} \quad (3.30)$$

式 (3.30) を V_{GD} について解いていくと、以下のような 2 次方程式が得られる。

$$A_1 V_{GD}^2 + B_1 V_{GD} + C_1 = 0 \quad (3.31)$$

$$\begin{cases} A_1 = -\frac{\{aX + (1+a)X''_d\} (X''_d{}^2 + 2XX''_d E_{GD} + X^2 |\dot{E}_G|^2)}{(X''_d + XE_{GD})^2} \\ B_1 = -\frac{\{aX + (1+a)X''_d\} 2aX^2 X''_d E_{GQ} P_c}{(X''_d + XE_{GD})^2} + \frac{aXX''_d E_{GQ} + aX^2 |\dot{E}_G|^2}{X''_d + XE_{GD}} + aX''_d \\ C_1 = -\frac{\{aX + (1+a)X''_d\} X^2 X''_d{}^2 P_c^2}{(X''_d + XE_{GD})^2} + \frac{aX^2 X''_d E_{GQ} P_c}{X''_d + XE_{GD}} + aXX''_d Q_c \end{cases} \quad (3.32)$$

これより、 V_{GD} は 2 次方程式の 2 解のうち小さい方の解のみを取り、以下のように求められる。

$$V_{GD} = \frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1} \quad (3.33)$$

従って、式 (3.33) の結果を用いて以下のように V_{GQ} が求められる。

$$V_{GQ} = \frac{XE_{GQ} V_{GD} + XX''_d P_c}{X''_d + XE_{GD}} \quad (3.34)$$

最後に、求めた発電機端子電圧 \dot{V}_G を用いて発電機電流 \dot{I}_G を求める。

$$\begin{cases} I_{GD} = \frac{E_{GQ} - V_{GQ}}{X''_d} \\ I_{GQ} = -\frac{E_{GD} - V_{GD}}{X''_d} \end{cases} \quad (3.35)$$

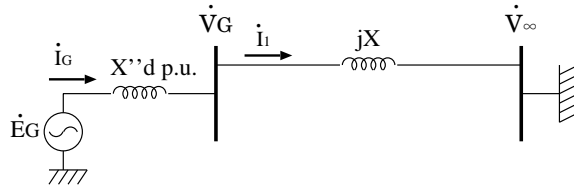


図 3.8: 三相地絡事故回線開放後の系統図

三相地絡事故回線開放後 事故回線は開放され、また電力制御も行っていないので、この時のインピーダンスの様子は図 3.8 のようになる。発電機端子における電流の関係式は以下のようになる。

$$I_G = I_1 \quad (3.36)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{E}_G - \dot{V}_G}{jX_d''} = \frac{\dot{V}_G - \dot{V}_\infty}{jX} \quad (3.37)$$

これより、発電機電流 \dot{I}_G が求められる。

$$\begin{cases} I_{GD} = \frac{E_{GQ}}{X_d'' + X} \\ I_{GQ} = -\frac{E_{GD} - 1}{X_d'' + X} \end{cases} \quad (3.38)$$

従って、以下の通り発電機端子電圧 \dot{V}_G が求められる。

$$\begin{cases} V_{GD} = E_{GD} + X_d'' I_{GQ} \\ V_{GQ} = E_{GQ} - X_d'' I_{GD} \end{cases} \quad (3.39)$$

三相地絡事故回線開放後に電力制御を行う場合 事故回線開放後では図 3.5 の CB が開放されるため、aX のリアクタンスは発電機端子に接続されないことになる。従って、この時のインピーダンスの様子は図 3.9 のようになる。発電機端子における電流の関係式は以下のようになる。

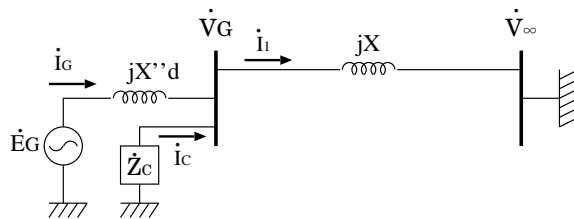


図 3.9: 三相地絡事故回線開放後に電力制御を行う場合の系統図

$$\dot{I}_G + \dot{I}_c = \dot{I}_1 \quad (3.40)$$

$$\Leftrightarrow \frac{E_G - V_G}{jX_d''} + \frac{P_c - jQ_c}{\dot{V}_D} = \frac{V_G - V_\infty}{jX} \quad (3.41)$$

式 (3.41) を V_{GD} についてまとめると、以下のような 2 次方程式が得られる。

$$A_2 V_{GD}^2 + B_2 V_{GD} + C_2 = 0 \quad (3.42)$$

$$\begin{cases} A_2 = -\frac{(X + X_d'')(X_d''^2 + 2XX_d''E_{GD} + X^2|\dot{E}_G|^2)}{(X_d'' + XE_{GD})^2} \\ B_2 = -\frac{(X + X_d'')2X^2X_d''E_{GQ}P_c}{(X_d'' + XE_{GD})^2} + \frac{XX_d''E_{GD} + X^2|\dot{E}_G|^2}{X_d'' + XE_{GD}} + X_d'' \\ C_2 = -\frac{(X + X_d'')X^2X_d''^2P_c^2}{(X_d'' + XE_{GD})^2} + \frac{X^2X_d''E_{GQ}P_c}{X_d'' + XE_{GD}} + XX_d''Q_c \end{cases} \quad (3.43)$$

これより、 V_{GD} は 2 次方程式の 2 解のうち小さい方の解のみを取り、以下のように求められる。

$$V_{GD} = \frac{-B_2 - \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{2A_2} \quad (3.44)$$

従って、式 3.44 の結果を用いて以下のように V_{GQ} が求められる。

$$V_{GQ} = \frac{XE_{GQ}V_{GD} + XX_d''P_c}{X_d'' + XE_{GD}} \quad (3.45)$$

最後に、求めた発電機端子電圧 \dot{V}_G を用いて発電機電流 \dot{I}_G を求める。

$$\begin{cases} I_{GD} = \frac{E_{GQ} - V_{GQ}}{X_d''^2} \\ I_{GQ} = -\frac{E_{GD} - V_{GD}}{X_d''^2} \end{cases} \quad (3.46)$$

発電機内部状態の微分方程式の計算

今、k 回目の繰り返し計算、即ち $t = k\Delta t$ における諸量に (k) の上添字をつけるとすると、ここまでで発電機内部起電力 $\dot{E}_G^{(k)}$ 、発電機端子電圧 $\dot{V}_G^{(k)}$ 及び発電機電流 $\dot{I}_G^{(k)}$ 、そして回転子位置 $\delta^{(k)}$ が求まったことになる。これより、現在の発電機出力 $P_e^{(k)}$ を求めることができる。

$$P_e^{(k)} = \text{Re} \left[\dot{V}_G^{(k)} \cdot \bar{\dot{I}}_G^{(k)} \right] \quad (3.47)$$

さらに、ここから式 (3.14) を用いて現在の発電機回転子の回転速度及び回転子位置角を求めることができる。

$$\begin{cases} \omega^{(k)} = \omega^{(k-1)} + \Delta t \left[\frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{\omega^{(k-1)}} - D \left\{ \omega^{(k-1)} - \omega_0 \right\} \right] \frac{1}{M} \\ \delta^{(k)} = \delta^{(k-1)} + \Delta t \left(\omega^{(k)} - \omega_0 \right) \omega_0 \end{cases} \quad (3.48)$$

次に、今求めた $\delta^{(k)}$ を用いて D-Q 座標で表現された $\dot{V}_G^{(k)}$, $\dot{I}_G^{(k)}$ を d-q 座標で表現された \dot{v} ($= v_d + jv_q$), \dot{i} ($= i_d + ji_q$) に回転し変換する。

ここで、式 (3.15) から発電機内部回路の鎖交磁束の等価電圧を計算する。

$$\begin{cases} e'_q{}^{(k)} = e'_q{}^{(k-1)} + \Delta t \left[e_f(t) + \frac{(L_d - L'_d)(L'_d - L''_d)}{(L'_d - L_1)^2} K_d e''_q(t) - \left\{ 1 + \frac{(L_d - L'_d)(L'_d - L''_d)}{(L'_d - L_1)^2} \right\} e'_q(t) \right. \\ \quad \left. - \omega(t) \frac{(L_d - L'_d)(L''_d - L_1)}{(L'_d - L_1)} i_d(t) \right] \frac{1}{T'_{d0}} \\ e''_q{}^{(k)} = e''_q{}^{(k-1)} - \Delta t \{ K_d e''_q(t) - e'_q(t) + \omega(t) (L'_d - L_1) i_d(t) \} \frac{1}{T''_{d0} K_d} \\ e'_d{}^{(k)} = e'_d{}^{(k-1)} + \Delta t \left[-\frac{(L_q - L'_q)(L'_q - L''_q)}{(L'_q - L_1)^2} K_q e''_d(t) + \left\{ 1 + \frac{(L_q - L'_q)(L'_q - L''_q)}{(L'_q - L_1)^2} \right\} e'_d(t) \right. \\ \quad \left. - \omega(t) \frac{(L_q - L'_q)(L''_q - L_1)}{(L'_q - L_1)} i_q(t) \right] \frac{1}{T'_{q0}} \\ e''_d{}^{(k)} = e''_d{}^{(k-1)} - \Delta t \{ K_q e''_d(t) - e'_d(t) + \omega(t) (L'_q - L_1) i_q(t) \} \frac{1}{T''_{q0} K_q} \end{cases} \quad (3.49)$$

系統基準座標での発電機内部起電力の計算

ここまでで発電機の内部状態が分かったので、d-q 座標における発電機内部誘起電圧が計算できる。

$$\begin{cases} e_{gd} = K_q \frac{L'_q - L''_q}{L'_q - L_1} e''_d + \frac{L''_q - L_1}{L'_q - L_1} e'_d \\ e_{gq} = K_d \frac{L'_d - L''_d}{L'_d - L_1} e''_q + \frac{L''_d - L_1}{L'_d - L_1} e'_q \end{cases} \quad (3.50)$$

従って、現在の回転子位置角から以下の D-Q 座標における発電機内部起電力が導かれる。

$$\begin{cases} E_{GD} = e_{gd} \sin \delta + e_{gq} \cos \delta \\ E_{GQ} = -e_{gd} \cos \delta + e_{gq} \sin \delta \end{cases} \quad (3.51)$$

これで 3.1.2 節の系統計算に戻り、繰り返し試行を行うことで過渡動揺の連続的なシミュレーションを進めていくことが可能となる。

3.2 電子回路型電力系統シミュレータを用いた検討の手法

3.2.1 シミュレータ装置の概要

今日では電力系統に発生する種々の現象を模擬し、解析するために計算機を用いたデジタルシミュレーションが行なわれている。これは現象の高精度解析が可能となる反面、実系統に発生する連続現象を離散的にしかとらえられないという欠点もある。そこで過渡的な連続

現象を再現するためにアナログシミュレーションが用いられており、本学においても電子回路型電力系統シミュレータが導入されている。

本学において導入されたシミュレータ装置は発電機 2 台、送電線 8 台（50km モデル 6 台、20km モデル 2 台）をはじめとし、負荷、無限大母線、遮断器などの各種電力機器を電子回路を用いて模擬したものであり、略称を TNS（Transient Network Simulator）と称する。TNS の定格は 線間電圧 6.12V、相電流 10mA ~ 100mA（可変）であり、接続する機器の定格はこの範囲内に設定される。なお、本論文で述べる実験においては、相電流定格を 20mA と設定した。

3.2.2 シミュレータ装置における系統安定化装置の構成

TNS において有効電力・無効電力による系統安定化に関する実験を行なうためには、実際のエネルギー貯蔵装置を用いた装置を導入する必要がある。しかし、上記の通り TNS の定格値は実際の電力系統に比べ低いものとなっており、小型の実験用装置であっても電力変換器の損失や電圧低下が無視できないものになると考えられるため、TNS の定格範囲に収まる装置が必要とされる。そこで系統安定化装置の模擬装置として交流電流アンプを導入し、有効電力・無効電力制御を行なうこととした。TNS 用模擬系統安定化装置の構成を図 3.10 に示す。

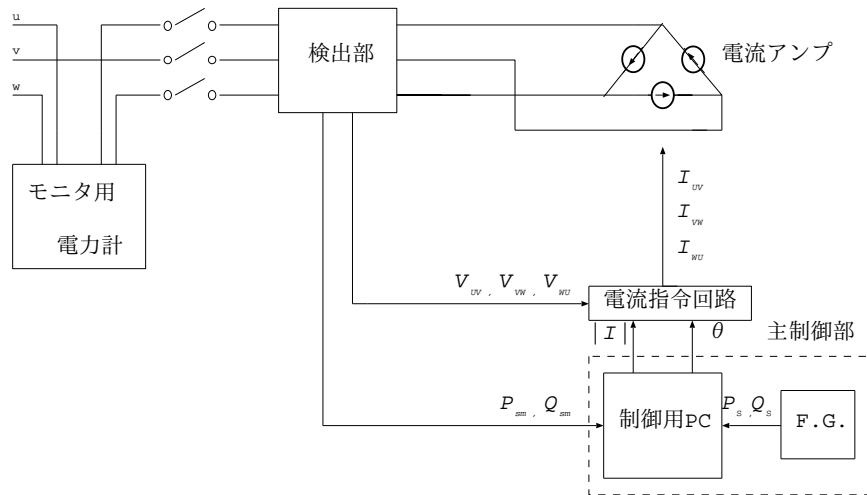


図 3.10: TNS 用系統安定化装置の構成

エネルギー貯蔵装置による系統安定化装置を交流電流源と考え、3 台の結線された電流アンプにより模擬する。系統安定化装置が出力する有効電力、無効電力指令値は式 (3.52), (3.53) で決定する。

$$P_{\text{ref}} = K_{\text{ip}} \int (P_s - P_{\text{sm}}) dt + P_s \quad (3.52)$$

$$Q_{\text{ref}} = K_{\text{iq}} \int (Q_s - Q_{\text{sm}}) dt + Q_s \quad (3.53)$$

P_s : 有効電力設定値, P_{sm} : 有効電力現在値,
 Q_s : 無効電力設定値, Q_{sm} : 無効電力現在値,

K_{ip}, K_{iq} : 定数

ここで、系統安定化装置設置端の uv 間線間電圧を位相の基準にとり、

$$V_{uv} = |V| \sin \omega t \quad (3.54)$$

$$I_{uv} = |I| \sin(\omega t + \theta) \quad (3.55)$$

とすると、

$$P_{\text{ref}} = 3|V||I| \cos \theta \quad (3.56)$$

$$Q_{\text{ref}} = 3|V||I| \sin \theta \quad (3.57)$$

となる。したがって、

$$|I| = \frac{1}{3|V|} \sqrt{P_{\text{ref}}^2 + Q_{\text{ref}}^2} \quad (3.58)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{\text{ref}}}{\sqrt{P_{\text{ref}}^2 + Q_{\text{ref}}^2}} \right) \quad (3.59)$$

となることより、電流アンプへの指令値を式 (3.58) および (3.59) で計算された $|I|$, θ を用いて、

$$I_{uv} = |I| \sin(\omega t + \theta) \quad (3.60)$$

$$I_{vw} = |I| \sin\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.61)$$

$$I_{wu} = |I| \sin\left(\omega t + \theta + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.62)$$

という信号を与えることにより、有効電力・無効電力同時制御が可能となる。

式 (3.58) および (3.59) までの計算は制御用 PC で行ない、電流アンプへの出力指令はオペアンプおよび乗算回路を用いて構成されたアナログコントローラを用いて行なう。

アナログコントローラでは、電圧より位相が θ ずれ、大きさが $|I|$ である三相電流を出力するため、以下のような演算を行なう。

系統安定化装置設置端電圧 V_{uv} , V_{vw} , V_{wu} および $|I|$, θ を入力としてとりこむ。まず V_{uv} , V_{vw} , V_{wu} を α - β 変換する。

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{uv} \\ V_{vw} \\ V_{wu} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

次にこれを (2次元平面上で) θ 回転させる。

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha'} \\ V_{\beta'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

これを逆 α - β 変換して、3次元平面上で V_{uv}, V_{vw}, V_{wu} に比べ位相が θ だけずれた信号 $I'_{uv}, I'_{vw}, I'_{wu}$ ができる。

$$\begin{bmatrix} I'_{uv} \\ I'_{vw} \\ I'_{wu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha'} \\ V_{\beta'} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

これより、電流アンブへの入力信号 I_{uv}, I_{vw}, I_{wu} が次式によって作成される。

$$I_{uv} = |I| \cdot I'_{uv} \quad (3.66)$$

$$I_{vw} = |I| \cdot I'_{vw} \quad (3.67)$$

$$I_{wu} = |I| \cdot I'_{wu} \quad (3.68)$$

3.3 シミュレーション結果の評価・解析方法

3.3.1 系統安定化制御の方法

無効電力補償装置は無効電力のみを制御することができ、エネルギー貯蔵装置応用機器は有効電力・無効電力を両方同時に制御を行うことが可能である。また、実際の装置を想定した場合いずれも電力変換器の容量制約の範囲内であれば自由に出力の大きさを変更することができる。系統状態によって出力を変化させ効果的に安定化制御を行うことが可能であり、さらに有効電力・無効電力のそれぞれに適切な制御を行うことも可能であると考えられる。しかし、現時点ではこれらは未検討の内容であること、最も基礎的な有効電力・無効電力による系統安定化制御の効果を検討したいと考えている。従って、系統安定化制御のための出力電力は原則一定とする。

系統事故発生直後の短時間には発電機の制御系は十分には伝達されないという、過渡安定度の基本的な議論の前提がある。従って、本研究のシミュレーションは事故除去後も暫く継続するが、シミュレーション終了まで発電機制御系の効果は無視し、原則として発電機の機械的入力 P_m 一定、発電機界磁電圧一定とする。これにより過渡安定度の基礎的な検討が可能であるのと同時に、発電機自体が持つ制動効果以外の系統安定化機能は全て無視することができるため、系統安定化装置のみによる安定化性能の評価・検討を行うことができる。

3.3.2 電力系統・発電機の諸元

検討する電力系統は図 3.5 に示すような送電線を二回線とした一機無限大母線系統である。送電線リアクタンス X や事故点箇所を示す a は解析におけるパラメータとして様々な値を設定し検討する。表 3.1, 3.2 には本研究で扱う送電線リアクタンス・事故点位置・初期発電機出力のパターンとその設定の名称の一覧をまとめる。これらの全系統設定は、系統安定化装置による制御が行われない場合は発電機が一波脱調をしてしまう設定としている。なお、計算機シミュレーションとシミュレータ実験で扱う系統が異なっているのは、シミュレータ装置の仕様上計算機シミュレーションと同じ条件設定で再現することができないためであり、傾向として同じであるかどうかを検討するものである。その他、発電機諸元を示す具体的な定数は表 3.3 に示す通りである。

3.3.3 系統事故及び電力制御のシーケンス

系統事故のシーケンスについて説明する。時刻 $t=0$ sec で二回線の送電線のうち一回線の任意の場所にて三相地絡が発生する。続いて、 $t=0.3$ sec で送電線の遮断器が動作し事故回線を両端で開放する。事故回線開放後の $t=0.3$ sec 以降では遮断された事故回線の再閉路は行

表 3.1: 計算機シミュレーションで扱う系統設定一覧

名称	送電線リアクタンス X [p.u.]	事故点位置 a	初期発電機出力 P_e [p.u.]
系統設定 1-2-2	0.240	0.250	0.800
系統設定 1-2-3	0.240	0.250	0.900
系統設定 2-1-1	0.360	0.167	0.700
系統設定 2-1-2	0.360	0.167	0.800
系統設定 2-1-3	0.360	0.167	0.900
系統設定 2-2-2	0.360	0.250	0.800
系統設定 2-2-3	0.360	0.250	0.900
系統設定 2-3-2	0.360	0.333	0.800
系統設定 2-3-3	0.360	0.333	0.900

表 3.2: シミュレータ実験で扱う系統設定一覧

名称	送電線リアクタンス X [p.u.]	事故点位置 a	初期発電機出力 P_e [p.u.]
系統設定 a-c-a	0.240	0.500	0.600
系統設定 b-a-a	0.360	0.167	0.606
系統設定 b-b-a	0.360	0.333	0.608
系統設定 b-c-a	0.360	0.500	0.604
系統設定 b-c-b	0.360	0.500	0.702

わず、送電線は一回線のままとする。また、系統安定化制御のための電力出力は事故継続中のみ行うことにする。即ち、 $t=0$ sec から $t=0.3$ sec の間のみ一定の有効電力・無効電力の入出力を行う。これは電力出力が一定値であるため、系統状態（系統インピーダンス等）が変わると求められる電力値が変化してしまい、一定電力での系統安定化制御の効果が分かりにくくなると考えたためである。以上のシーケンスを表した概念図を図 3.11 に示す。

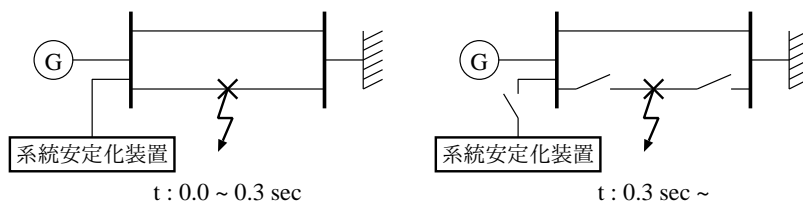


図 3.11: 解析における事故及び電力制御のシーケンス

3.3.4 安定化性能の評価方法

本研究は発電機の一歩脱調の抑制ため、系統に電力を注入することによって相差角動揺の安定化制御を行うものである。2章で説明した通り、過渡安定度は一般に発電機回転子の加

表 3.3: 計算機シミュレーションで用いる発電機モデル定数と各種定数

定数	値	
	解析時間	10.0 sec
dT	サンプリング間隔 (計算機)	0.100 msec
	電力制御間隔 (実験)	0.400 msec
	計測間隔	1.00 msec
M	慣性時定数	7.40 sec
D	制動時定数	0.00 sec
X _l	漏れリアクタンス	0.225 p.u.
X _d	直軸同期リアクタンス	1.70 p.u.
X' _d	直軸過渡リアクタンス	0.350 p.u.
X'' _d	直軸初期過渡リアクタンス	0.250 p.u.
T' _{d0}	直軸開路時定数	4.85 sec
T'' _{d0}	直軸開路初期時定数	0.0420 sec
X _q	横軸同期リアクタンス	1.70 p.u.
X' _q	横軸過渡リアクタンス	0.350 p.u.
X'' _q	横軸初期過渡リアクタンス	0.250 p.u.
T' _{q0}	横軸開路時定数	1.00 sec
T'' _{q0}	横軸開路初期時定数	0.204 sec

速エネルギーを用いて議論されるため、本研究でもこれに従い安定化性能の指標として加速エネルギーに相当する値を導入する。まず、 $\Delta\omega$ を角速度の基準値からの偏差とすると、発電機回転子の最も単純な運動方程式は以下のように表せる。

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (3.69)$$

式 (3.69) の右辺を時間で積分すれば、回転子の加速エネルギー相当の値となる。従って、本研究では電力出力が $T = 0.3$ sec の間だけであることを考慮して、以下の加速エネルギー指標 E_a を導入する。

$$E_a = \int_0^T (P_m - P_e) dt \quad (3.70)$$

式 (3.70) より、安定化性能が高い場合は加速エネルギーが抑えられるため、指標が小さくなることがわかる。また、この指標により各系統における一波脱調の抑制するための加速エネルギーの最大値等も議論でき、系統のおよその過渡安定度も把握できると考えられる。

第4章 有効電力による系統安定化制御効果の基礎検討

4.1 有効電力または無効電力を用いた系統安定化制御

有効電力の無効電力に対する系統安定化制御の効果を評価するため、有効電力または無効電力の一方のみを出力し、系統事故に伴う発電機の一波脱調の抑制するための最小の出力を検討する。本章での検討は計算機シミュレーションによってのみ行う。

まず、表 4.1 には各系統設定において事故発生時に系統安定化制御を行わなかった場合の指標 E_a の値を示す。表 4.1 より指標 E_a に関して以下のことが読み取れる。

表 4.1: 事故発生時に系統安定化制御を行わない場合の指標 E_a の値

系統設定	E_a
1-2-2	0.146
1-2-3	0.167
2-1-1	0.146
2-1-2	0.168
2-1-3	0.191
2-2-2	0.146
2-2-3	0.167
2-3-2	0.129
2-3-3	0.148

- 初期発電機出力が高いほど指標 E_a が増加する
- 送電線長が長いほど指標 E_a が増加する
- 事故点位置が発電機に近いほど指標 E_a が増加する

以上より、過渡安定度が低い系統ほど指標 E_a が高い値をとるため、系統設定 1-2-2, 2-1-1, 2-2-2 が最も安定的であり、系統設定 2-1-3 が最も不安定な系統であることが分かる。

次に、有効電力または無効電力の一方のみで発電機の脱調抑制を図った場合の出力電力の最小値、脱調を抑制可能な指標 E_a の限界値、系統安定化制御を行わない場合からの指標 E_a の減少量をそれぞれ表 4.2 示す。さらに表 4.2 では、エネルギー貯蔵装置を想定した有効電力出力の場合に吸収されたエネルギー量 E も示している。

表 4.2 より脱調抑制可能な指標 E_a の安定限界値についての所見をまとめると以下の通りである。

表 4.2: 有効電力または無効電力による系統安定化制御を行った場合の一波脱調抑制のための最小出力電力と安定限界となる指標 E_a の値

系統設定	P_c [p.u.]	E [p.u. · sec]	Q_c [p.u.]	安定限界 E_a	抑制量 ΔE_a
1-2-2	-0.043	0.0129	0.062	0.143	-0.003
1-2-3	-	-	0.838	0.133	-0.034
2-1-1	-0.176	0.0528	0.351	0.131	-0.015
2-1-2	-	-	1.494	0.121	-0.047
2-1-3	-	-	2.976	0.109	-0.088
2-2-2	-0.339	0.1017	0.597	0.121	-0.025
2-2-3	-	-	1.581	0.110	-0.057
2-3-2	-0.086	0.0258	0.147	0.122	-0.007
2-3-3	-	-	0.881	0.111	-0.037

- 初期の発電機出力が高いほど、指標 E_a の安定限界値が低下する。
- 送電線長が長いほど、指標 E_a の安定限界値が低下する。
- 事故点位置が発電機に近いほど、指標 E_a の安定限界値が低下する。

以上より、通常時の系統の過渡安定度が低いほど指標 E_a の安定限界値が低下していることが分かる。しかし、系統安定化制御を行わない場合に指標 E_a が等しかった系統設定 1-2-2, 2-1-1, 2-2-2 においても、系統設定により指標 E_a の安定限界値・最小出力電力が異なっていることが分かる。従って系統安定化制御の効果を検討する場合、通常時の系統の過渡安定度の高低だけではなく、様々な系統設定で比較検討する必要があるといえる。

次に、表 4.2 より有効電力と無効電力による安定化性能についての所見をまとめる。

- 有効電力出力の場合には半数が空欄であり、多くの場合で系統安定化制御が行えない。
- 無効電力出力の場合は理論的には全ての系統設定で脱調の抑制が可能であるが、系統設定 2-1-2, 2-1-3, 2-2-3 では安定化出力が 1.0 p.u. を超えているため、現実的には一波脱調抑制が困難であると思われる。
- 有効電力出力によって脱調抑制が行える場合は、有効電力の方が無効電力に比べ脱調抑制のための出力電力が小さく抑えられている。

(1), (3) より、有効電力出力では系統安定化制御が行えない場合が多いが、系統安定化制御が行える場合には無効電力出力よりも安定化性能が高いことが伺える。

一方、有効電力出力において空欄が多数存在するのは、実際に出る出力電力を大きくしても一波脱調の抑制ができないためである。しかし、これは特定の状況では有効電力が系統安定化制御の効果を発揮しないのではなく、一波脱調を抑制するために有効電力出力を大きくしていくと計算機シミュレーションが途中で止まってしまうためである。次節ではこの原因について検討する。

4.2 有効電力による系統安定化制御の限界

4.2.1 計算機シミュレーションの中断の原因

図 4.1 に系統設定 1-2-2 において有効電力のみを出力した場合の発電機端子電圧の大きさ $|\dot{V}_G|$ の計算機シミュレーション結果を示す。 $P_c = -0.25$ [p.u.] から $P_c = -0.45$ [p.u.], $P_c = -0.50$ [p.u.] と有効電力出力の大きさを増加させていくと、三相地絡事故が起きている時刻 0.0 ~ 0.3 sec の間で電圧降下が徐々に大きくなっていくことが見て取れる。そして、入力する有効電力が $P_c = -0.50$ [p.u.] の時には、途中で電圧波形が途切れていることが分かる。これが前節で問題となった有効電力出力時に発生する計算機シミュレーション中断の現象である。

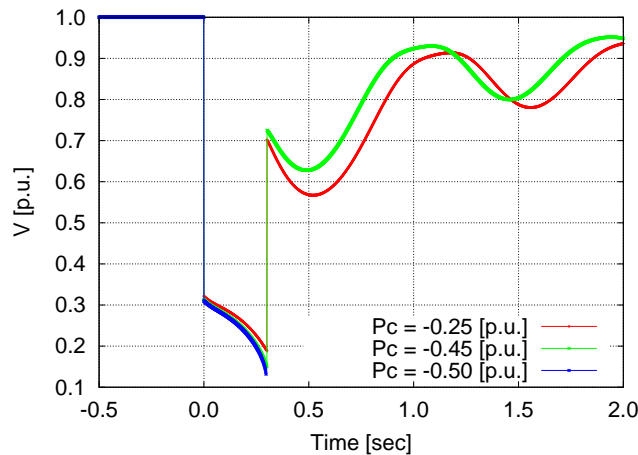


図 4.1: 系統設定 1-2-2 において有効電力出力による系統安定化制御を行ったときの発電機端子電圧の大きさ $|\dot{V}_G|$ の計算機シミュレーション結果

電圧波形が途中で途切れてしまう現象の理由を考える。まず、計算機シミュレーションが止まってしまう現象の原因には、途中計算において解が発散してしまったり、虚数解で出てしまうことが考えられる。上記シミュレーションの結果から、有効電力 $P_c = -0.50$ [p.u.] 出力時に電圧波形が途切れる正確な時刻は 0.297 sec であった。計算機シミュレーション手法の章を振り返り、この時刻に解が定まらなくなるような計算を行っていることを考えれば、それは系統計算であると考えられる。この時刻の系統計算は事故継続中且つ電力制御を行う 3.1.2 節の (2) の計算に当たり、ここから解の有無が考えられる式は式 (3.31) となる。式 (3.31) は単純な 2 次方程式であるため、実数解が存在するための条件は式 (3.32) を用いて以下のように表せる。

$$B_1^2 - 4A_1C_1 \geq 0 \quad (4.1)$$

従って、計算が途中で止まってしまったのは、この条件式が負となり発電機端子電圧 \dot{V}_G の解が存在しなくなったためである。

ここで、式 (4.1) の条件式が実際にどのようなケースで負になり、電圧の実数解が存在しなくなるかを検討する。系統設定 2-2-2 において有効電力 $P_c = -0.50$ [p.u.] を入力するケースを考える。まず、D-Q 座標における発電機の内部起電力のなす角を形式的に ϕ ($= \angle \dot{E}_G$) とおく。

この ϕ をパラメータとし、内部起電力の大きさ $|\dot{E}_G|$ を変化させたときの条件式 $B_1^2 - 4A_1C_1$ の値の動きを図 4.2 に示す。

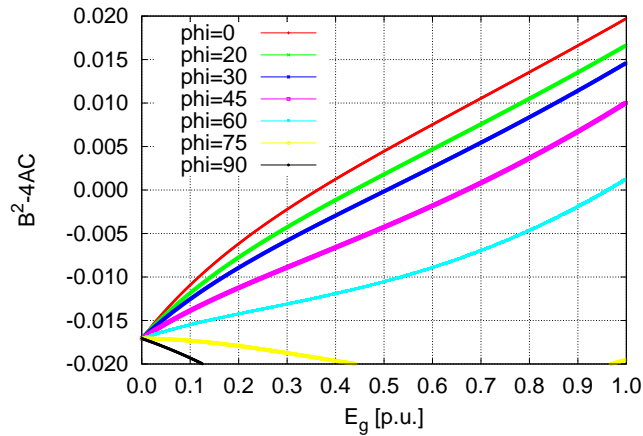


図 4.2: 系統設定 2-2-2 において $P_c = -0.50$ [p.u.] で制御したときの二次方程式の解の条件式 ($B_1^2 - 4A_1C_1$) が取る値の変化

図 4.2 は 1 つの系統設定のみでの値の変化ではあるが、全般に言えることとして以下の 2 点 が有効電力による系統安定化制御が困難な状況であることが分かった。以下では、その対応策についても簡単にまとめる。

- 発電機の内部起電力 $|\dot{E}_G|$ が低い

三相地絡事故が発生すると事故発生地点の電圧はほぼ 0 となり、発電機の端子電圧が大きく低下し、それに伴い発電機内部起電力も大きく低下してしまう。これらの電圧の低下は事故点位置が発電機に近いほど顕著になる。また、図 4.1 のように有効電力出力を増加させると装置の接続点の電圧がやや低下してしまうため、内部起電力がさらに低下してしまう。そのため、特に内部起電力が低下してしまう場合は、低下を抑制するために進み無効電力を系統に与える等の対応が必要になる。

- 内部起電力の相差角 ϕ が大きい

ϕ が大きくなるということは、発電機回転子の角速度の動揺・偏差が大きいことに等しい。従って、発電機回転子の加速エネルギーを抑えるためには十分な安定化出力で系統安定化制御を行わなければならないことになる。しかし、有効電力出力を増加させれば発電機内部起電力が低下してしまうため、再び上記の内部起電力の問題に影響を受けることになる。

以上より、発電機の一歩脱調の抑制を考えた場合、有効電力のみでは安定的に系統安定化制御を行うことができないことが分かる。しかし、表 4.2 から有効電力が無効電力に対し安定化性能が高いであろうことは確認されている。従って、有効電力の効果を十分に活用するためには、無効電力を補助的に利用する等の対策が必要であると考えられる。

4.2.2 有効電力出力の限界が示す意味

前節より、有効電力によって系統安定化制御を行う場合、発電機の内部起電力が低い場合・内部起電力の相差角が大きい場合で計算機シミュレーションが中断してしまうことを確認した。本節では電力系統における有効電力出力の限界が示す本質的な意味を考える。

本研究で用いた計算機シミュレーションにおける系統図を流れる電力などを加えて書き直すと図 4.3 のようになる。ただし、系統安定化装置は系統に電力を注入する方向を正としている。ここで、送電線に流れる電力の表現と同様にして、図 4.3 の発電機内部起電力と端子電圧から発電機出力 P_e を表すと以下ようになる。ただし、 ϕ, θ はそれぞれ発電機内部起電力と端子電圧の相差角である。

$$P_e = \frac{E_G V_G \sin(\phi - \theta)}{X_d''} \quad (4.2)$$

上式において $|\sin(\phi - \theta)| \leq 1$ であることから、発電機出力が取りうる最大値 $P_{e\max}$ は以下のように表すことができる。

$$P_{e\max} = \frac{E_G V_G}{X_d''} \quad (4.3)$$

この値は発電容量であり、発電可能な最大出力が発電機内部起電力と端子電圧の 2 つの変数によって決定されることが分かる。

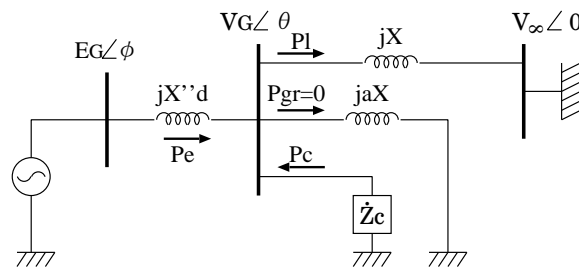


図 4.3: 計算機シミュレーションにおける事故発生中の系統図

発電機出力と系統で消費される負荷は等しい値である。従って、図 4.3 から事故回線の送電電力 P_{gr} が 0 であることを考慮すると、発電機端子回りの電力の関係式は以下のように表すことができ、これは常時成立する等式となる。

$$P_e = -P_c + P_l \quad (4.4)$$

ただし、 P_l は式 (4.2) と同様に以下のように表せる。

$$P_l = \frac{V_G V_\infty \sin \theta}{X} \quad (4.5)$$

上述した通り、発電容量は系統状態の変化に伴う内部起電力と端子電圧の変化によって時々刻々変化する値である。通常時には発電容量は発電機出力に対して大きい値であり、十分なマージンを取って運転されている。しかし、送電線で三相地絡事故が発生している場合には図 4.4 のように発電容量は急激に低下する。一方、有効電力出力 $-P_c$ は制御可能な値であり、出力容量の範囲内であれば自由に变化させることが可能である。従って $-P_c$ を大きくしすぎ

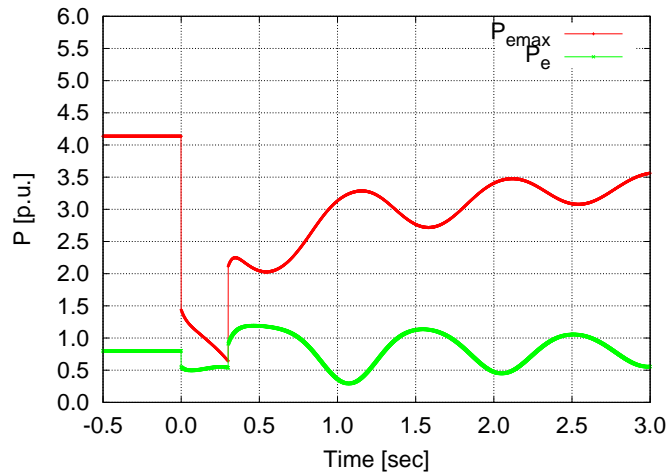


図 4.4: 正常に系統安定化制御を行えた場合の発電電力と発電容量の時間変化

てしまった場合、発電機出力 (= 消費電力) が発電容量 P_{emax} を超えてしまい、式 (4.4) が成立しなくなる可能性がある。この状態が有効電力出力の限界の意味する所であり、電力系統が制御不能な異常状態に達してしまうということである。有効電力の出力限界に達した場合の発電電力と発電容量の計算機シミュレーション結果を図 4.5 に示す。系統安定化制御が終了するはずの $t=0.3$ sec に達する前に $P_{emax} < P_e$ となった時点で計算機シミュレーションが中断してしまっていることが分かる。

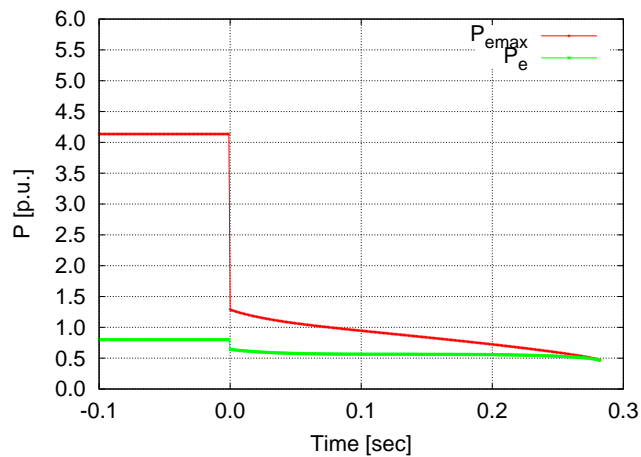


図 4.5: 有効電力の出力限界に達した場合の発電電力と発電容量の時間変化

前節から、有効電力出力をより活用するためには無効電力を出力する等の対策が必要があると述べた。これは、本質的には系統安定化装置から進みの無効電力出力を系統に注入し発電機端子電圧を上昇させることで、式 (4.3) より発電容量を向上させることができるため、有効電力出力の出力可能な範囲が拡大できるということである。また、これに伴い有効電力出力による系統安定化制御の効果も増大することも考えられる。

4.3 本章のまとめ

4.3.1 系統安定化制御における有効電力の効果

本章では、有効電力または無効電力を単体で出力した場合の安定化性能の比較を行った。有効電力による系統安定化制御では、発電容量の制約が存在するために十分な制御量を出力できず、発電機の一歩脱調を抑制できない場合が多いことが分かった。また、発電容量を超えた有効電力を出力してしまうと系統が制御不能な不安定状態に至ってしまう現象も確認された。しかし、有効電力の安定化性能が無効電力に比べ高いことが伺えたため、さらなる検討によって実証していく必要がある。

4.3.2 安定的・効果的な有効電力の活用方法

4.2節で示したように、有効電力を用いて十分に系統安定化制御を行うためには出力限界に達しないように出力する必要がある。以下では、有効電力を安定的・効果的に活用するための方法について提案し、次章以降で検討する。

1. 発電容量を回復させる

- 系統安定化装置のみによる方法として、有効電力を主体的に出力しながら、安定化出力の一部を無効電力で出力することで、電圧降下抑制効果に伴う発電容量の回復により有効電力の出力限界を拡大することができると考えられる。
- 本章では AVR の効果を見逃したが、実系統の発電機には AVR が導入されているのが一般的であり、AVR によって界磁電圧を制御することで事故時の発電機内部起電力・端子電圧の低下を抑制することができる。従って、AVR を導入すれば発電容量の低下を抑制することが可能であり、有効電力の出力限界を拡大することができると考えられる。

2. 発電容量の制約を回避する

- 有効電力・無効電力を同時に出力し、且つ常に有効電力の出力限界条件を考慮しながら発電容量の限界に達しないように有効電力・無効電力を制御すれば、必ず安定的に有効電力による系統安定化制御が行えると考えられる。

以上の方策は、有効電力の出力限界を回避することで有効電力を安定的に活用する方法の提案である。安定的に高い出力配分で有効電力を系統に注入できるようになれば、より高い安定化性能が得られる可能性もある。

第5章 有効・無効電力同時出力の安定化性能の検討

4.3.2節より、有効電力の効果的な利用法の一つとして発電容量の回復のために無効電力が必要であることを述べた。本章では有効・無効電力を同時出力することを前提として、様々な系統設定において有効・無効電力の出力配分によって安定化性能及び有効電力の特性がどのように変化するかを検討する。本章での検討は計算機シミュレーション・シミュレータ実験装置の両面から行う。計算機シミュレーションとシミュレータ実験装置では系統設定などが異なっているが、シミュレータ装置の仕様上計算機シミュレーションと同じ条件でシミュレーションができないため、同じものを再現するのではなく傾向としてアナログシミュレーションがデジタルシミュレーションと一致するかを確認したいと考えている。

様々な系統状態において出力配分による系統安定化の効果を比較・検討を行うため、送電線長（送電線リアクタンス X ）、初期発電機出力 P_{e0} ($= P_m$)、事故点位置 a 、そして安定化出力 S_c の4つのパラメータのうち1つだけが異なる条件において、有効・無効電力の出力配分の違いによる安定化性能の違いを確認する。ただし、安定化出力 S_c とは $S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}$ を満たす値である。

5.1 計算機シミュレーションによる検討結果

5.1.1 事故点位置のみが異なる場合

送電線長・初期発電機出力が等しく、事故点位置のみが異なる系統設定 2-1-2, 2-2-2, 2-3-2 において、出力容量を $S_c = 1.0$ [p.u.] に固定し有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.1 に示す。

図 5.1 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 事故点位置が発電機端子に近いほど有効電力の出力限界が小さい。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

5.1.2 初期発電機出力のみが異なる場合

送電線長・事故点位置が等しく、初期発電機出力のみが異なる系統設定 2-1-1, 2-1-2, 2-1-3 において、安定化出力を $S_c = 1.2$ [p.u.] に固定し有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.2 に示す。

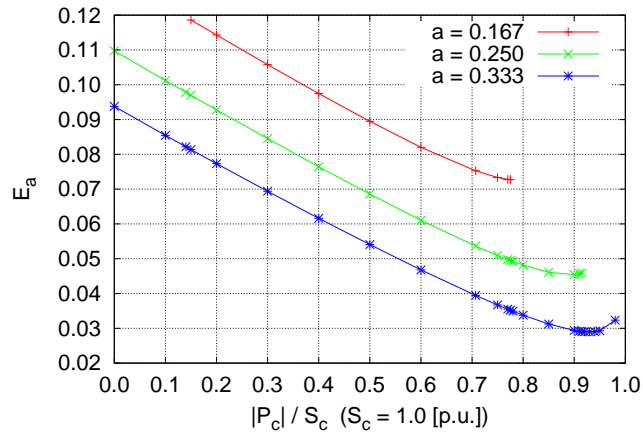


図 5.1: 事故点位置のみが異なる場合において安定化出力 1.0 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分による指標 E_a の変化

図 5.2 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 初期発電機出力が高いほど有効電力の出力限界が小さい。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

5.1.3 送電線長のみが異なる場合

事故点位置、初期発電機出力が等しく、送電線長のみが異なる系統設定 1-2-2, 2-2-2 において、出力容量を $S_c = 1.0$ [p.u.] に固定し有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.3 に示す。

図 5.3 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 送電線長の長短では有効電力の出力限界に変化は表れない。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

5.1.4 安定化出力のみが異なる場合

図 5.4 には、系統設定 2-1-2 において安定化出力を 0.50, 0.75, 1.00 [p.u.] としたとき、有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を示す。

図 5.4 より得られた知見を以下にまとめる。

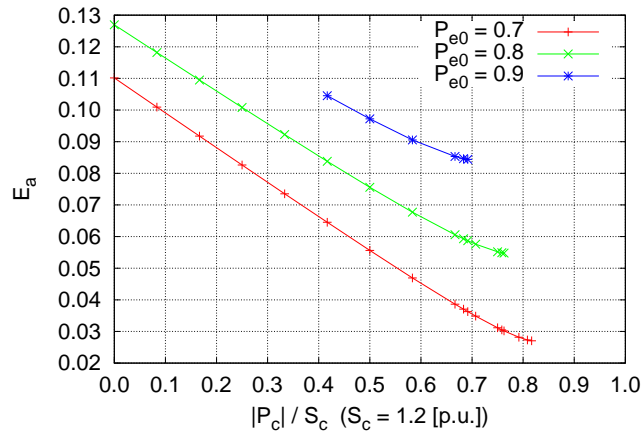


図 5.2: 初期発電機出力のみが異なる場合において安定化出力 1.2 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分による指標 E_a の変化

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 安定化出力を増加させていくと有効電力の出力限界が小さくなる。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

5.2 電子回路型電力系統シミュレータを用いた検討結果

計算機シミュレーションで検討した内容について、シミュレータ装置を用いた実験によって実証を行う。始めに、シミュレータ実験での有効電力の出力限界状態について説明したあと、有効・無効電力同時出力の安定化性能の検討を行う。

5.2.1 実験における有効電力の出力限界状態

系統崩壊が発生した場合、計算機シミュレーションにおいては計算が中断してしまった。検討に入る前に、シミュレータ実験において有効電力の出力限界に達した場合には何が起こるかを説明する。図 5.5 には、系統設定 a-c-a において、 $P_c = -1.0$ p.u., $Q_c = 0.0$ p.u. で有効電力のみを出力して系統安定化制御を行った場合の発電機出力の時間変化を示す。 $t = 0.0$ sec に事故が発生した直後、有効電力出力の安定化性能により発電機出力はやや増加し、以降徐々に低下していく。ここまでは通常の変化であるが、事故除去前の $0.2 < t < 0.3$ sec の間には急に発電機出力が低下する様子が伺える。この異常な変化がシミュレータを用いた実験における有効電力の出力限界状態の様子である。

4.2 節で説明したように、有効電力の出力限界に達した場合には発電容量が大きく低下し、発電機出力はほぼ 0 に等しくなると考えられる。従って、図 5.5 に示すように系統崩壊が発生すると発電機出力が急に低下するのは妥当な変化といえる。また、有効電力の出力限界に

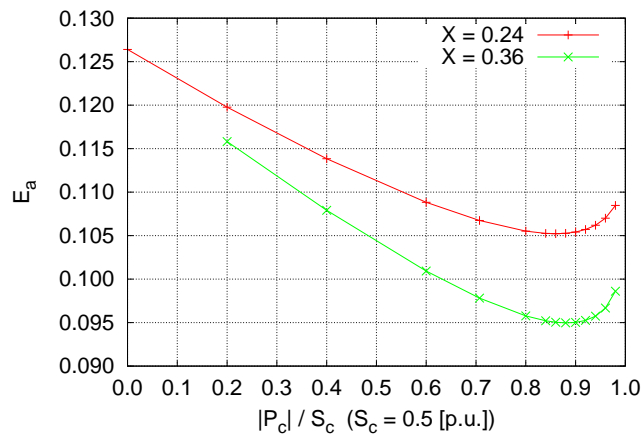


図 5.3: 送電線長のみが異なる場合において安定化出力 0.5 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分に対する指標 E_a の変化

達した場合の発電機端子電圧、出力電流は図 5.6 に示す通りであり、出力限界に達すると発電機端子電圧は突然上昇し、発電機出力電流は急激に減少している。以上から、現実には有効電力の出力限界に達した場合、系統全体が制御不能な不安定な状態に陥ることが確認できる。

5.2.2 事故点位置のみが異なる場合

送電線長、初期発電機出力が等しく、事故点位置のみが異なる系統設定 b-a-a, b-b-a, b-c-a において、出力を $S_c = 1.2$ [p.u.] に固定し有効と無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.7 に示す。

図 5.7 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 事故点位置が発電機端子に近いほど有効電力の出力限界が小さい。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

以上より、実験結果からは計算機シミュレーションと同様の知見が得られた。

5.2.3 初期発電機出力のみが異なる場合

送電線長、事故点位置が等しく、初期発電機出力のみが異なる系統設定 b-c-a, b-c-b において、出力を $S_c = 1.2$ [p.u.] に固定し有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.8 に示す。

図 5.8 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。

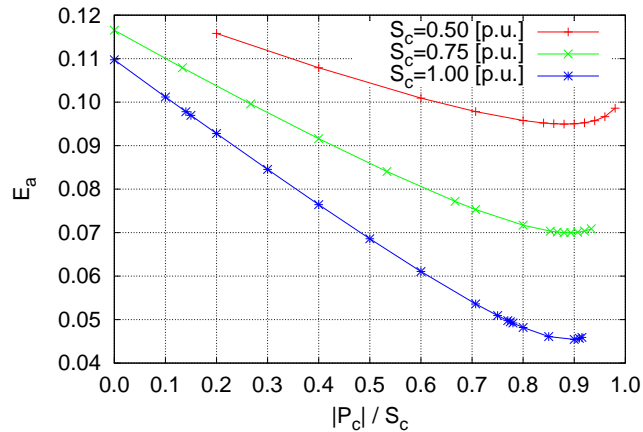


図 5.4: 系統設定 2-1-2 において安定化出力の大きさのみを変化させて系統安定化制御を行ったときの出力配分に対する指標 E_a の変化

2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 初期発電機出力が高いほど有効電力の出力限界が小さい。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

以上より、実験結果からは計算機シミュレーションと同様の知見が得られた。

5.2.4 送電線長のみが異なる場合

事故点位置、初期発電機出力が等しく、送電線長のみが異なる系統設定 a-c-a, b-c-a において、出力を $S_c = 1.2$ [p.u.] に固定し有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を図 5.9 に示す。

図 5.9 より得られた知見を以下にまとめる。

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 送電線長の長短では有効電力の出力限界に変化は表れない。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

以上より、実験結果からは計算機シミュレーションと同様の知見が得られた。

5.2.5 安定化出力のみが異なる場合

最後に、系統設定 a-c-a において安定化出力のみが異なる場合の比較を行う。図 5.10 に、系統設定 a-c-a において安定化出力を 0.75, 1.00, 1.20 [p.u.] の 3 つの場合で有効・無効電力の出力配分を変更して系統安定化制御を行ったときの指標 E_a の変化を示す。

図 5.10 より得られた知見を以下にまとめる。

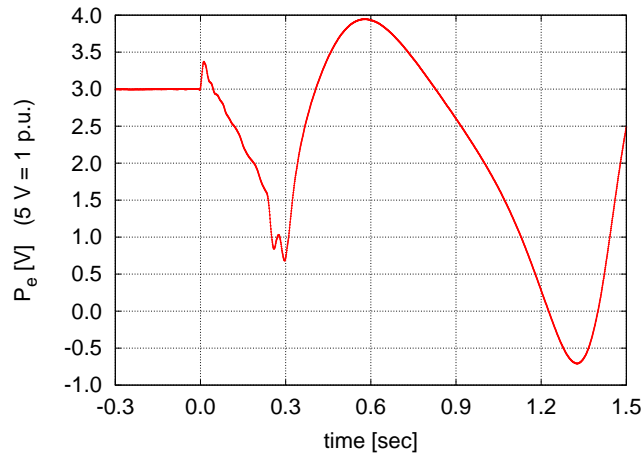


図 5.5: 有効電力の出力限界に達した場合の発電機出力の変化

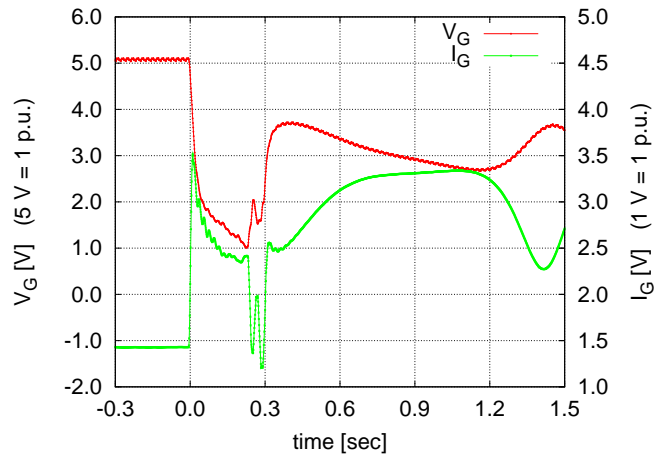


図 5.6: 有効電力の出力限界に達した場合の発電機端子電圧と出力電流の変化

1. いずれの場合も有効電力の出力配分を高くしていくと安定化性能が向上する。
2. いずれの場合も有効電力の出力配分が高すぎると出力限界に達する。
3. 安定化出力を増加させていくと有効電力の出力限界が小さくなる。
4. いずれの場合も有効電力の出力限界付近で最大の安定化性能を取る。

以上より、実験結果からは計算機シミュレーションと同様の知見が得られた。

5.3 有効電力の影響が系統設定によって変化する理由

計算機シミュレーションによる検討とシミュレータ装置によって得られた結果の傾向が一致した。従って、本研究で用いた計算機シミュレーションのモデルがある程度現実においても通用すると考えることができる。

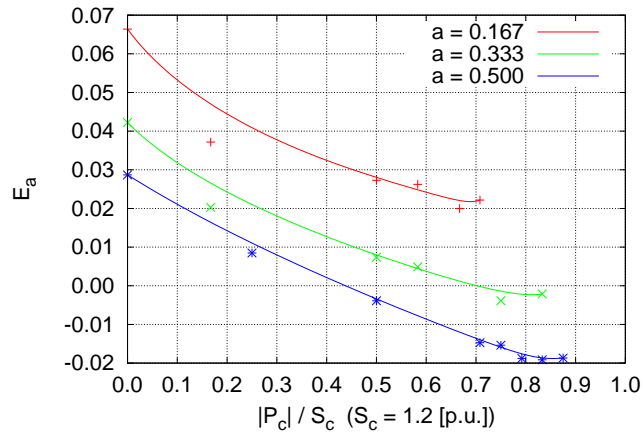


図 5.7: 事故点位置のみが異なる場合において安定化出力 1.2 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分による指標 E_a の変化

本節では、有効電力の影響が系統設定によって変化する理由を検討する。まず、主に検討結果から得られた有効電力の出力限界に関する知見を改めて以下にまとめる。

1. 事故点位置が発電機に近いほど有効電力の出力限界が小さい。
2. 事故前の初期発電機出力が高いほど有効電力の出力限界が小さい。
3. 送電線長の長短では有効電力の出力限界は変化しない。
4. 安定化出力が大きいほど有効電力の出力限界が小さい。
5. 有効電力の出力限界となる点は同時に安定化性能を最大とする最適出力配分に近い。

これら有効電力の影響が系統設定により変化が生じた原因を検討するため、特に出力限界に関係する三相地絡事故発生時の発電容量の低下量を評価する指標を導入する。発電容量の低下指標 E_s を次のように表すことにする。ただし、 E_G は発電機内部起電力の大きさ (E_{G0} は初期値)、 V_G は発電機端子電圧の大きさ (V_{G0} は初期値)、 T は事故継続時間、 X_d'' は発電機モデルの初期過渡リアクタンスである。

$$E_s = \int_0^T \left(\frac{E_{G0}V_{G0} - E_GV_G}{X_d''} \right) dt \quad (5.1)$$

式 (5.1) は発電容量の低下量を評価したものであり、発電容量の低下量が大きいほど E_s の値も大きくなる。この指標を各系統設定において系統安定化制御を行わない場合について求めた一覧を表 5.1 に示す。表 5.1 には加速エネルギー指標 E_a も併せて載せている。

表 5.1 より、加速エネルギー指標 E_a によって表された過渡安定度と発電容量の低下指標 E_s が必ずしも連動していないことが分かる。従って、系統の過渡安定度によって有効電力の出力限界が影響を受けるとは言えないことが分かる。

一方、比較検討を行った条件の違いから、表 5.1 の結果を踏まえて原因を検討する。

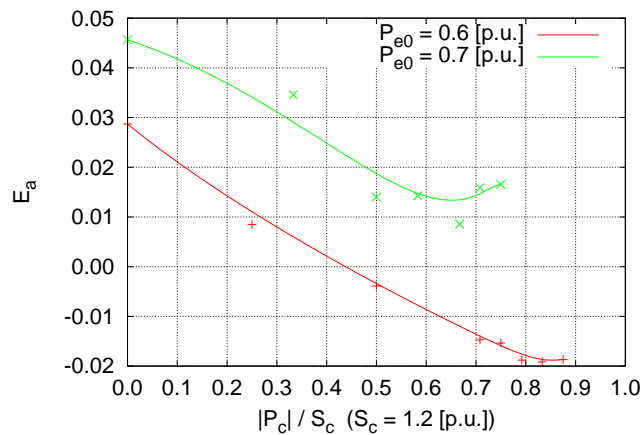


図 5.8: 初期発電機出力のみが異なる場合において安定化出力 1.2 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分による指標 E_a の変化

表 5.1: 各系統設定における発電容量指標

系統設定	E_a	E_s
1-2-2	0.146	0.945
1-2-3	0.167	0.954
2-1-1	0.146	0.987
2-1-2	0.168	0.996
2-1-3	0.191	1.007
2-2-2	0.146	0.906
2-2-3	0.167	0.917
2-3-2	0.129	0.831
2-3-3	0.148	0.841

- 事故点位置の違い

事故点位置が発電機に近いほど発電機端子から見た系統インピーダンスは小さくなるため、事故発生時の電圧降下が大きくなる。従って、事故点位置が発電機に近いほど発電容量が低下し易いことから、有効電力の出力限界が低下する。これは表 5.1 の結果通りである。また、有効電力が出力し難くなったことで有効電力の安定化性能も低下したものと考えられる。

- 初期発電機出力の違い

初期発電機出力が高いほど事故電流は大きくなる。そのために発電機電圧が大きく低下し、発電容量は低下する。これは表 5.1 の結果通りである。従って、初期発電機出力が高いほど有効電力の出力限界が低下し、さらに有効電力が出力し難くなったことで有効電力の安定化性能も低下したものと考えられる。

- 送電線長の違い

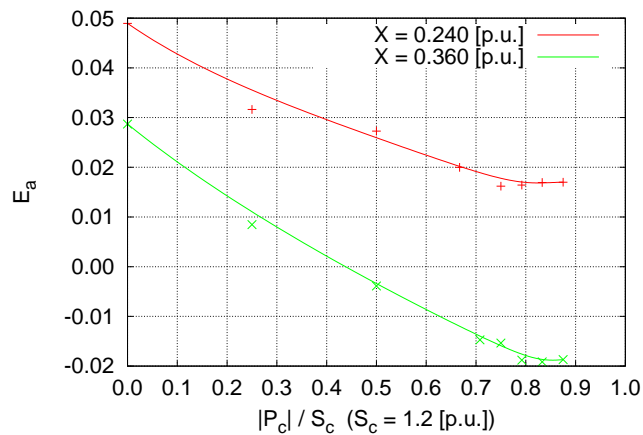


図 5.9: 送電線長のみが異なる場合において安定化出力 1.2 p.u. で系統安定化制御を行ったときの出力配分に対する指標 E_a の変化

送電線長が長いほど発電機端子から見た系統インピーダンスは大きくなるため、電圧降下は小さくなる。従って、送電線長が長いほど発電容量は低下しないことになり、表 5.1 の結果通りとなる。これより、送電線長が長いほど有効電力の出力可能配分が拡大するはずであるが、図 5.3, 5.9 の通り送電線長には依存しない結果が得られた。送電線長の長短を問わず発電機内部リアクタンスは一定であるが、送電線長の長短によって系統インピーダンスに対する内部リアクタンスの比率は変化する。通常、有効電力出力によって電圧が若干低下するが、送電線長が短い場合は発電機内部リアクタンスのインピーダンスの比率が大きくなるため、有効電力出力に伴う電圧降下が増加し発電容量が低下してしまうものと考えられる。従って、結果として送電線長の違いによる有効電力の出力可能配分に変化が生じず、同様にして有効電力による安定化性能も変化しなかったと考えられる。

- 安定化出力の違い

系統設定は同じであるため発電容量の変化は無関係である。従って、発電容量の変化は基本的に等しく有効電力の出力可能配分には依存しないため、最適出力配分に変化が表れなかったものと考えられる。しかし、実際発電容量の変化には殆ど差が生じていないが、出力可能配分に差が生じている。これは、有効電力出力に伴って電圧が若干低下するため、有効電力出力が大きいほど発電容量が低下し、有効電力・無効電力の出力配分が等しい場合でも安定化出力が大きいほど有効電力の出力可能配分が小さくなるものと考えられる。

以上より、有効電力の出力限界と有効・無効電力の最適出力配分は概ね系統安定化制御を行わない場合の発電容量に依存し、またこの 2 点は常に近くに存在していることが分かった。従って、有効電力を安定に出力範囲で可能な限り大きく出力すれば最も有効電力を効果的に利用できる方法になると考えられる。

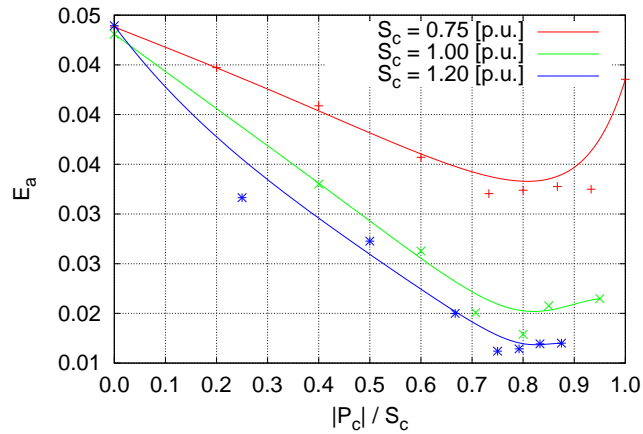


図 5.10: 系統設定 a-c-a において安定化出力の大きさのみを変化させて系統安定化制御を行ったときの出力配分に対する指標 E_a の変化

5.4 本章のまとめ

検討を行った全ての系統で、無効電力のみで系統安定化制御を行った場合に対し、有効電力の出力配分を増加させていくと安定化性能が上昇していくことが確認できた。従って、発電機の一歩脱調抑制に関しては有効電力の方が無効電力に対し安定化性能が高いことが実証された。

一方、有効電力・無効電力同時出力時に安定化性能を最大にさせる最適出力配分、及び有効電力の出力限界は共に近い値をとることが確認できた。従って、有効電力の出力限界に達しない範囲で安定的に出力できる最大の有効電力をとる場合には、概ね安定化性能が最大となる有効・無効電力の最適出力配分になると考えられる。

第6章 発電機界磁電圧の制御を考慮した場合の系統安定化効果の検討

4.3.2節より、発電機のAVRによる界磁電圧の制御を考慮した場合、無効電力の効果と同様に三相地絡事故に伴う発電容量の低下を抑制できるため、有効電力の出力可能配分が拡大し、有効電力を用いた場合の安定化性能が向上するであろうと述べた。本章ではAVRの制御を考慮した上で、前章と同様に有効電力・無効電力の出力配分による安定化性能の検討を計算機シミュレーションによって行う。従って、解析・評価における設定事項は、界磁電圧が一定でない点以外は全て4章での設定と同じである。

6.1 AVRの制御方法及び導入時の計算機シミュレーション手法

AVRの動作を説明する。AVRは主に発電機端子電圧の低下を検知し、界磁電圧を上昇させることで発電機内部起電力・端子電圧の低下を抑制することができる装置である。従って、三相地絡事故発生中の発電機内部起電力・端子電圧の低下を抑制することで発電容量を回復できるため、有効電力出力の出力可能配分を拡大できると考えられる。本研究におけるAVRの制御方法については、図6.1のように非常に単純なモデルで扱うことにする。

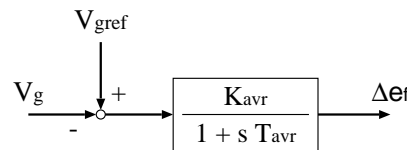


図 6.1: AVRの制御ブロック図

Δe_f を界磁電圧偏差、 K_{AVR} を制御ゲイン、 T_{AVR} を制御の時定数、 V_{G0} 、 V_G をそれぞれ発電機端子電圧の大きさの初期値と現在値おくと以下の通りであり、

$$\Delta e_f = \frac{K_{AVR}}{T_{AVR}s + 1} (V_{G0} - V_G) \quad (6.1)$$

この式を微分方程式で表せば以下ようになる。

$$\frac{de_f(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{AVR}} \{e_f(t) + K_{AVR}V_G - (e_{f0} + K_{AVR}V_{G0})\} \quad (6.2)$$

この微分方程式から得られた $e_f(t)$ を式(3.49)に代入して計算を行えば、AVRの効果を考慮した計算機シミュレーションを行うことができる。

6.2 AVRを導入した場合の有効・無効電力同時出力の安定化性能

検討における AVR の定数は表 6.1 のように 2 パターンを設定する。いずれも時定数は等しく、電圧降下補償量のゲインを増加させただけである。これにより、AVR の有無や効果の強さによって、最適出力配分や系統崩壊点にどのような変化が生じるかを検討する。まず、AVR を導入した系統において系統安定化制御を行わない場合の加速エネルギー指標 E_a の一覧を表 6.2 に示す。

表 6.1: 導入した AVR の係数

名称	K_{AVR}	T_{AVR}
AVR 1	5.0	0.01
AVR 2	10.0	0.01

表 6.2: AVR を導入した系統において系統安定化制御を行わない場合のエネルギー指標の変化

系統設定	AVR 無し	AVR 1		AVR 2	
	E_a	E_a	脱調抑制	E_a	脱調抑制
1-2-2	0.146	0.136		0.125	
1-2-3	0.167	0.156	×	0.146	
2-1-1	0.146	0.138		0.130	
2-1-2	0.168	0.160	×	0.152	×
2-1-3	0.191	0.184	×	0.176	×
2-2-2	0.146	0.137	×	0.127	
2-2-3	0.167	0.157	×	0.148	×
2-3-2	0.129	0.119		0.109	
2-3-3	0.148	0.138	×	0.128	

表 6.2 より、AVR を導入し、効果を強めると一律に E_a が減少していることが分かる。さらに、AVR を導入していない場合には発電機が一波脱調してしまう系統設定であっても、AVR の同期化力向上に伴う過渡安定度の向上により一波脱調を防ぐことができている場合が多い。

次に、AVR を導入した場合の有効電力・無効電力の最適出力配分と系統崩壊点への影響を検討する。AVR の制御効果が最大である AVR2 を用いても発電機が一波脱調してしまう 3 つの系統設定 2-1-2, 2-1-3, 2-2-3 において、有効電力・無効電力同時出力で系統安定化制御を行う。それぞれ系統設定 2-1-2 の場合を図 6.2、2-1-3 の場合を図 6.3、2-2-3 の場合を図 6.4 に示す。

3 つの系統設定において AVR の有無と効果の強さが異なる場合で有効電力・無効電力の出力配分を変化させた。図 6.2, 6.3, 6.4 から分かるように、AVR を導入し、その効果を強めていくと、過渡安定度の向上によって全ての系統設定で全体的な指標 E_a は低下する。しかし、期待していた AVR の電圧降下抑制に伴う最適出力配分はほとんど見られなかった。また、有効電力の出力限界点の変化についても AVR の効果を強めていくと若干有効電力の出力可能配分が拡大しているが、目立った変化とは言い難い。

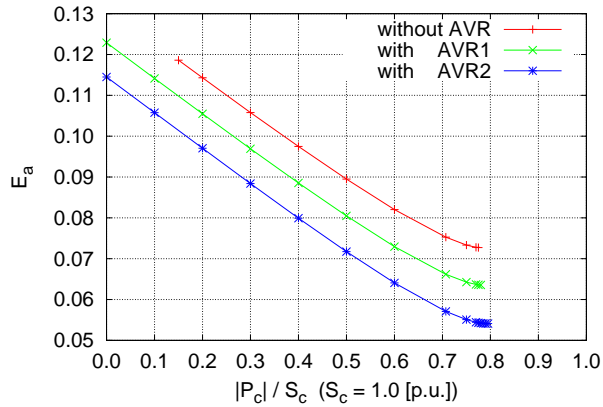


図 6.2: 系統設定 2-1-2 において AVR の有無をパラメータとして出力容量 1.0 p.u. で有効電力・無効電力の出力配分を変化させたときのエネルギー指標 E_a の変化

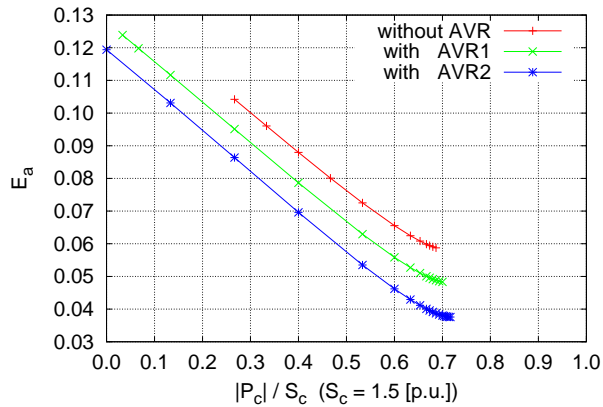


図 6.3: 系統設定 2-1-3 において AVR の有無をパラメータとして出力容量 1.5 p.u. で有効電力・無効電力の出力配分を変化させたときのエネルギー指標 E_a の変化

ここで、AVR の効果を別の角度から確認するため、上記 3 つの系統設定における発電容量 P_{emax} の時間変化を示す。図 6.5 には系統設定 2-1-2 において $P_c = -0.750$ [p.u.], $Q_c = 0.661$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化、図 6.6 には系統設定 2-1-3 において $P_c = -1.00$ [p.u.], $Q_c = 1.12$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化、図 6.7 には系統設定 2-2-3 において $P_c = -0.80$ [p.u.], $Q_c = 0.60$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化をそれぞれ示す。図 6.2, 6.3, 6.4 の出力配分による指標 E_a の変化の結果から予想できる通り、図 6.5, 6.6, 6.7 において電力を出力している $0.0 < t < 0.3$ [sec] の期間での発電容量は、AVR を導入している場合でもほとんど変化がないことが分かる。しかし、 $t > 0.3$ [sec] 以降の事故回線遮断後では AVR による電圧降下抑制に伴う発電容量の回復が顕著に現れている。

これらの現象は 5 章のまとめによって説明することができると考えられる。AVR を導入しても発電機の一歩脱調を防げなかった系統設定 2-1-2, 2-1-3, 2-2-3 は、特に事故点位置が発電

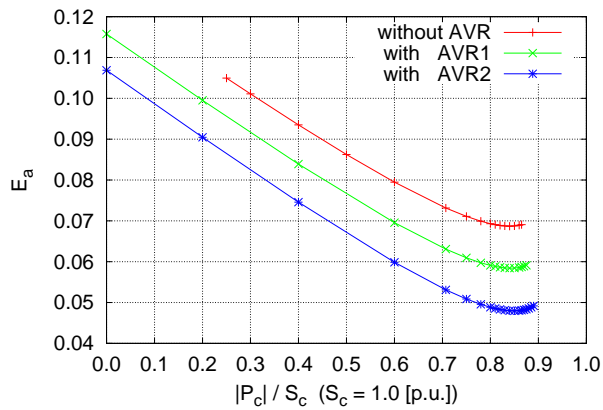


図 6.4: 系統設定 2-2-3 において AVR の有無をパラメータとして出力容量 1.0 p.u. で有効電力・無効電力の出力配分を変化させたときのエネルギー指標 E_a の変化

機から近く、また特に初期発電機出力が大きい系統であり、三相地絡事故による発電容量の低下が特に激しい系統であった。即ち見た目の系統リアクタンスが小さくなっている系統であり、電圧向上効果が薄い系統であったため AVR による効果が小さかったものと思われる。従って、無効電力によっても発電容量を回復できない系統では AVR によっても同様に発電容量を回復することは困難であるといえる。

また、以上の結果より AVR によっても有効電力の出力限界が充分には回復しなかったため、三相地絡事故発生時には発電容量の回復という方法が期待できないと考えることができる。

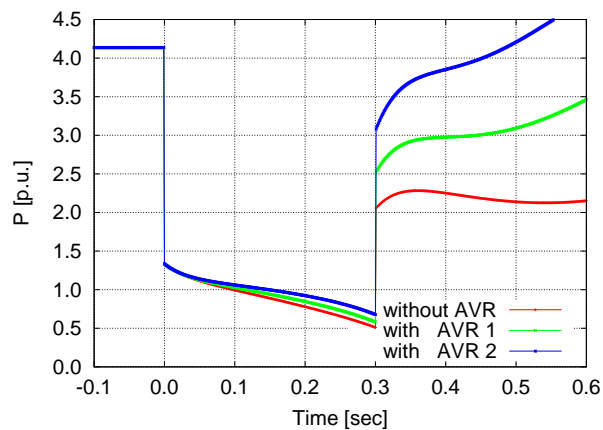


図 6.5: 系統設定 2-1-2 において AVR の有無をパラメータとして $P_c = -0.750$ [p.u.], $Q_c = 0.661$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化

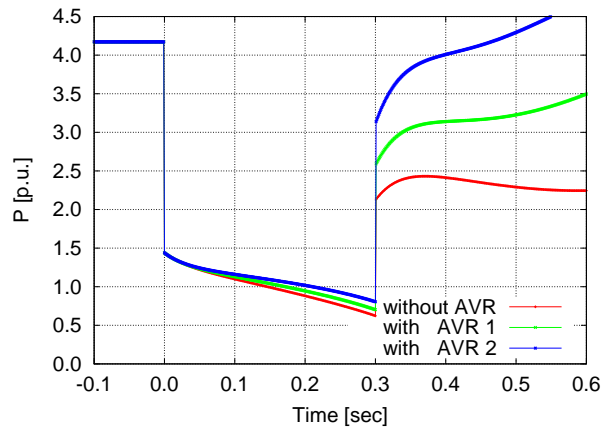


図 6.6: 系統設定 2-1-3 において AVR の有無をパラメータとして $P_c = -1.00$ [p.u.], $Q_c = 1.12$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化

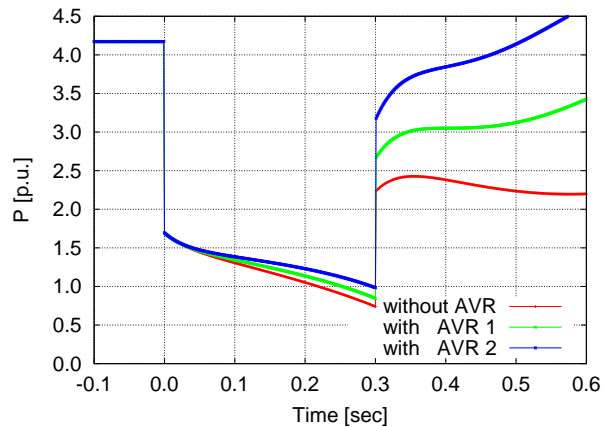


図 6.7: 系統設定 2-2-3 において AVR の有無をパラメータとして $P_c = -0.80$ [p.u.], $Q_c = 0.60$ [p.u.] で系統安定化制御を行ったときの発電容量の時間変化

6.3 本章のまとめ

検討の結果より、AVR が導入されている場合にはシステムの過渡安定度は向上することが確認できた。しかし、事故発生時の系統インピーダンスのバランスにより事故点位置が発電機に近い場合、初期発電機出力が高い場合等では、AVR による事故発生中での電圧降下抑制の効果は余り発揮されない。従って、発電容量がほとんど回復せず有効電力の出力限界に変化は現れないことが確認された。ただし、AVR を導入しても発電容量が回復せず有効電力の出力限界が拡大しないということは、同時に有効電力を効果的に利用する方法として発電容量の回復は相応しくないとと言える。

第7章 有効・無効電力の最適出力配分制御の検討

本章では、有効・無効電力同時出力において常に有効電力の出力限界を避けて系統安定化制御を行うために、有効・無効電力の出力配分を連続的に制御する方法とその効果の検討を行う。条件設定は4章の基礎検討の場合と同様とし、発電機の界磁電圧も再び一定とする。また、有効・無効電力の出力配分は変化させるが安定化出力(皮相電力)は一定のままとする。以上の検討は計算機シミュレーションによって行う。

7.1 最適出力配分制御の方法

系統安定化制御時に系統が制御不能な状態に至る条件は、本質的には系統安定化装置による有効電力吸収量が大き過ぎてしまい発電機出力が発電容量を上回る場合である。しかし、計算機シミュレーションにおいては式(4.1)の条件式の値が0以下になる場合として容易に検討することができる。以下では、最適出力配分制御を導入した場合の計算機シミュレーション方法について説明する。

まず、有効電力の出力限界の条件式(4.1)が含まれる発電機端子電圧を求める式(3.31)以外は通常の計算機シミュレーションと同様の計算を行う。式(3.31)の係数となる式(3.32)の3つの値に含まれる変数は、発電機内部起電力と系統安定化制御のための出力電力であるが、前ステップの計算から発電機内部起電力は既知の値であるため、事実上有効・無効電力の入力値のみで実数解の存在条件が決定できることが分かる。従って、有効・無効電力を任意に設定し条件式(4.1)が0となる点を探せば、この時の出力配分が有効電力の出力限界に達する出力配分と求めることができる。

実際、任意に有効・無効電力を設定して出力限界点を見つけることは難しいため、次のような方法で求める。基本的に安定化性能の高い有効電力を優先的に出力したいため、まず $P_c = -S_c, Q_c = 0$ として予め設定した安定化出力 S_c の全てを有効電力で出力することにする。ここで条件式(4.1)が0以上の値を取れば、そのまま $P_c = -S_c, Q_c = 0$ を決定値とする。しかし、多くの場合 $P_c = -S_c$ の場合は条件式が負になってしまうため、 P_c の値を少し減少させて S_c から Q_c を計算し、新たな P_c, Q_c を用いて再び条件式に代入する。これを繰り返して最初に条件式が0以上となった P_c, Q_c を有効電力の出力限界点と決定する。これより、有効電力をできる限り出力する制御が可能となる。

5章の図5.1~5.10の結果より、安定化性能は有効・無効電力の出力配分に対してV字型の曲線を得ることが伺える。従って、一般に有効電力のみで制御できた場合においても、無効電力を多少加えた方が安定化性能が向上すると考えられるため、経験的にこれまでに決定した P_c を5%減じた値を実際に出力する有効電力と決定する。また、出力容量 S_c より計算した無効電力 Q_c を実際の出力値とする。以上の作業を繰り返すことで有効・無効電力の最適出

力配分制御を行うことができる。

7.2 最適出力配分制御による系統安定化制御の効果

実際に有効・無効電力の最適配分制御を用いて系統安定化制御を行った計算機シミュレーションにおける発電機出力及び安定化出力の変化を図 7.1 に示す。ただし、図 7.1 は系統設定 2-1-2 において、安定化出力 1.0 p.u. で系統安定化制御を行った場合である。時刻 $t=0.0$ の事故発生すると有効電力の出力配分を高くして系統安定化制御を行うが、時間と共に有効電力の出力配分は低下し、無効電力の出力配分が増加していることが分かる。これまでに分かっているように、事故発生中は時間と共に電圧が低下し、また角速度の動揺が大きくなっていくことから、発電機の発電容量が低下し有効電力の出力可能配分が減少するため、このような変化が起きていると考えられる。

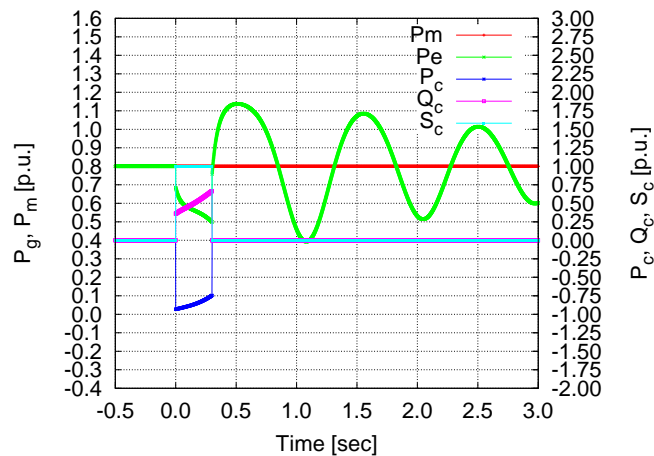


図 7.1: 系統設定 2-1-2 において安定化出力 1.0 p.u. として最適出力配分制御を用いた系統安定化制御を行ったときの各種電力波形

最適出力配分制御を行った場合の安定化性能を確認するため、表 4.2 を参考に無効電力出力と同様の安定化出力で有効・無効電力の最適出力配分制御を行った場合に、系統安定化制御を行わない場合からどの程度エネルギー指標 E_a が抑制されたかを表 7.1 にまとめる。

有効電力を主体として系統安定化制御を行っているため、無効電力に対して安定化性能が大きく向上することは予測できたが、有効・無効電力の最適出力配分制御は無効電力出力に対して 2 倍以上の加速エネルギーの抑制を行っていることが確認できた。これより、最適出力配分制御は実現可能であり、尚且つ十分な安定化性能を持つことが分かった。

次に、最適出力配分制御を用いて発電機の一歩脱調抑制のための安定化出力の最小値を検討する。各系統設定において系統安定化制御を行った場合に、発電機の一歩脱調が抑制できる最小の安定化出力を表 7.2 に示す。

表 7.2 より、有効電力出力のみで系統安定化制御を行った場合よりも最適出力配分制御を行った場合の方が安定化出力が低く済んでいる。従って、これまでに検討した通り純粋な有効電力出力よりも無効電力を最適なバランスで配分することで安定化性能がさらに向上することが確認できた。また、表 7.2 より無効電力のみの場合に対して概ね半分以下の安定化出

表 7.1: 等しい安定化出力で無効電力出力と有効・無効電力最適出力配分制御を行った場合の指標 E_a の抑制量

系統設定	安定化出力 [p.u.]	加速エネルギー指標抑制量 ΔE_a	
		無効電力のみ	有効・無効電力
1-2-2	0.070	0.003	0.006
1-2-3	0.850	0.035	0.064
2-1-1	0.400	0.016	0.041
2-1-2	1.500	0.047	0.142
2-1-3	3.000	0.082	0.639
2-2-2	0.600	0.025	0.060
2-2-3	1.600	0.057	0.154
2-3-2	0.150	0.007	0.015
2-3-3	0.900	0.038	0.089

表 7.2: 発電機の一波脱調を抑制するために必要な安定化出力最小値

系統設定	有効電力 [p.u.]	無効電力 [p.u.]	有効・無効電力 [p.u.]
1-2-2	0.043	0.062	0.037
1-2-3	-	0.828	0.457
2-1-1	0.175	0.351	0.150
2-1-2	-	1.494	0.557
2-1-3	-	2.976	1.034
2-2-2	0.338	0.597	0.275
2-2-3	-	1.581	0.698
2-3-2	0.086	0.146	0.076
2-3-3	-	0.881	0.437

力で系統安定化制御が実現できているため、最適出力配分制御は無効電力のみの場合に対して概ね 2 倍以上の安定化性能があることが伺える。

7.3 本章のまとめ

有効・無効電力の最適出力配分制御の方法及びその効果について検討した。本研究で導入した方法による最適出力配分制御を用いることで、一切有効電力の出力限界に達すること無く、且つ無効電力出力のみの場合に対して概ね 2 倍以上の安定化性能を引き出すことが可能であることが分かった。

6 の検討から分かるように、有効電力の活用法としては発電容量の回復は期待できない結果となったため、本章の検討が本研究で最も効果的な有効電力の活用法となる。

第8章 結論

8.1 本論文の成果

本論文では、有効電力・無効電力注入による電力系統安定化制御のための基礎検討を行うため、三相地絡事故により発生する発電機の一波脱調を一定の有効電力・無効電力により系統安定化制御を行い、その特性の評価・検討を行った。本論文の目的である系統安定化制御における有効電力の無効電力に対する効果、及び効果の比較に関して次の結論が得られた。

- 有効電力は無効電力に対して系統安定化効果が高い。
- 有効電力を最大限に活用するように有効・無効電力の最適出力配分制御を用いた場合、無効電力のみの場合に対し約2倍の安定化性能が期待できる。

上記の検討の中で得られたその他の知見について以下にまとめる。

- 有効電力のみ、または有効電力の出力配分が多い場合には、発電機出力が発電容量を超えてしまい、系統が制御不能な不安定状態に陥る。
- 有効電力の出力限界は系統設定によって異なり、系統の電圧変化に伴う発電容量の変化に依存する。
- 上記に関連して、AVRを導入した場合でも系統事故による電圧降下が大きい状況では、電圧の回復効果は余り表れず、有効電力の出力限界を十分に拡大するための方法とはならない場合がある。

8.2 今後の課題

本論文は基礎検討であり、検討における状況設定には限定的な部分が多かった。有効電力・無効電力制御を用いた効果的な系統安定化制御の実現に向け、今後は以下のように様々な状況・条件を考慮しなければならないと考えている。

- 事故発生時のみだけでなく、事故回線除去後も系統安定化制御を継続。
- 安定化出力の制御を行い、系統の状況に見合った積極的な電力制御。
- 系統安定化装置の出力容量やエネルギー貯蔵容量を考慮。
- これらの検討をシミュレータ実験で実証。

参考文献

- [1] 今井 孝二 監修 : 「パワーエレクトロニクスハンドブック」 R & D プランニング、2002 年
- [2] 長谷川 淳、斎藤 浩海、大山 力、北 裕幸、三谷 康範 : 「電力系統工学」 オーム社、2002 年
- [3] 関根 泰次 : 「電力系統過渡解析論」 オーム社、1984 年

発表文献

1. 仁田 旦三、高木 隆志、馬場 旬平、「一定有効電力・無効電力注入による電力系統安定化効果の基礎検討」、平成 20 年電気学会全国大会（発表予定）

謝辞

本研究において、馬場旬平准教授には終始適切な御指導と御助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

昨年御退職された仁田旦三教授には研究内容に関して御助言を頂き、深く感謝致しております。

私と同じエネルギー貯蔵装置の電力系統応用の研究に従事していた博士課程3年の米津武則氏には、研究内容や実験装置等基本的な内容から懇切丁寧に教えて頂き、深く感謝申し上げます。

研究全般にわたって御助言、御協力を頂きました、修士課程2年の西川勝也氏、鈴木公三氏、マークエイズリー氏、修士課程1年の菊池卓郎氏、広橋滋人氏、学部4年西岡英祥氏、伊藤悠氏に謹んで感謝の意を表します。

研究室事務補佐員の玉岡徳子さんには研究生活全般において多大な協力を頂きました。ここに謹んで謝意を表します。

ここにこうして修士論文を提出できるに至ったのは、本当に多くの方々の御指導、御協力のおかげです。重ねて深く感謝申し上げます。