

電力システムのモデリングとシミュレーション
に関する研究

2003年3月

熊本大学大学院自然科学研究科

左 敦定

目次

第 1 章 序章	… 1
1.1. 本研究の背景と目的	… 1
1.2. 本論文の内容	… 2
第 2 章 シミュレーション技術	… 5
2.1. MATLAB の概要	… 5
2.2. 実時間シミュレーションに必要なツール	… 6
2.2.1 Real Time Workshop	… 6
2.2.2 ControlDesk	… 7
2.2.3 Real Time Interface (RTI)	… 7
2.3. オフラインシミュレーション	… 8
2.4. DSP ボードによる実時間シミュレーション	… 8
2.5. AD/DA インターフェースを介した並列シミュレーション	… 9
2.6. コンピュータネットワークを介した実時間並列シミュレーション	… 9
第 3 章 可変速発電機の瞬時値ベースモデリングと実時間シミュレーション	… 10
3.1. はじめに	… 10
3.2. 可変速発電機の詳細モデル	… 11
3.3. 例題系統	… 19
3.4. 実時間シミュレーション	… 20
3.5. アナログシミュレータ試験	… 26
3.6. まとめ	… 28
第 4 章 可変速発電機による電力系統の安定度向上効果の検証	… 30
4.1. はじめに	… 30
4.2. くし型四機無限大母線系統	… 30
4.3. 励磁制御システム	… 31

4.3.1. 同期発電機の励磁制御系	… 31
4.3.2. 可変速機の励磁制御系	… 32
4.3.3. ファジー論理型励磁制御系	… 33
4.4. シミュレーション結果とその検討	… 36
4.5. まとめ	… 42
第 5 章 ECS を用いた単独システムの自動発電制御	… 44
5.1. はじめに	… 44
5.2. 例題系統	… 45
5.2.1. 太陽光発電システム	… 46
5.2.2. 風力発電システム	… 46
5.2.3. ディーゼル発電システム	… 46
5.2.4. 電力貯蔵装置 ECS	… 47
5.3. 自動発電制御	… 47
5.3.1. ディーゼル発電ユニットによる通常型 AGC	… 47
5.3.2. ECS とディーゼルユニットとの協調型 AGC	… 48
5.4. 例題系統のモデリング	… 49
5.4.1 ディーゼル発電機と風力発電機モデル	… 50
5.4.2 風車モデル	… 51
5.4.3 太陽光発電システムモデル	… 52
5.4.4 ECS モデル	… 53
5.5. シミュレーション結果	… 54
5.5.1 通常型 AGC でのシミュレーション結果	… 54
5.5.2 ECS による AGC でのシミュレーション結果（無遅延）	… 56
5.5.3 ECS による AGC でのシミュレーション結果（有遅延）	… 57
5.6. まとめ	… 63
第 6 章 単独システムにおける自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用	… 64
6.1. はじめに	… 64

6.2. 例題系統	… 64
6.3. ECS とディーゼルユニットとの協調型 AGC	… 65
6.4. マルチエージェントシステムの適用	… 67
6.5. シミュレーション結果	… 70
6.6. まとめ	… 76
第 7 章 総括	… 77
参考文献	… 80
謝辞	… 83

図目次

図 3.1	ASG モジュールのブロック図	… 13
図 3.2	送電ネットワークモジュールのブロック図	… 13
図 3.3	バンドパスフィルタがない場合の電圧・電流信号	… 14
図 3.4	バンドパスフィルタの振幅位相特性	… 15
図 3.5	バンドパスフィルタがある場合の電圧・電流信号	… 15
図 3.6	PWM 型インバータ	… 16
図 3.7	サイクロコンバータ	… 18
図 3.8	通常型交流励磁制御ブロック	… 19
図 3.9	一機無限大母線系統	… 19
図 3.10	実時間シミュレーションシステムの構成	… 21
図 3.11	実時間シミュレーション中の可変速発電機の表示画面	… 21
図 3.12	起動時の応答波形	… 23
図 3.13	出力調整 (0~1pu) 時の応答波形	… 23
図 3.14	三相地絡事故時	… 23
図 3.15	機械的入力 of ステップ変化時 ($\pm 0.1pu$)	… 23
図 3.16	励磁周波数設定値 of ステップ変化時 ($\pm 0.1Hz$)	… 24
図 3.17	端子電圧設定値 of ステップ変化時 ($\pm 0.05pu$)	… 24
図 3.18	三相地絡事故時の端子電圧と電機子電流	… 24
図 3.19	並列計算時の 1 サンプル時間遅れの影響	… 25
図 3.20	三相地絡事故時の応答波形 (PWM 型インバータ)	… 26
図 3.21	アナログシミュレータとの接続図	… 27
図 3.22	二機無限大母線系統	… 27
図 3.23	三相地絡事故時(左)と同期機遮断時の応答(右)	… 28
図 4.1	くし型四機無限大母線系統	… 31
図 4.2	ユニット 1 の励磁制御系	… 31
図 4.3	ユニット 2 の励磁制御系	… 32
図 4.4	ユニット 3 の励磁制御系	… 32

図 4.5	ユニット 4 の励磁制御系	… 32
図 4.6	可変速発電機の励磁制御系	… 32
図 4.7	位相平面図	… 33
図 4.8	位相角 θ に関するメンバーシップ関数	… 34
図 4.9	距離に関するメンバーシップ関数	… 35
図 4.10	ファジー論理型交流励磁制御系	… 35
図 4.11	可変速発電機モジュールとアナログシミュレータの接続	… 36
図 4.12	アナログシミュレータ試験の写真	… 36
図 4.13	同期投入時の可変速発電機の応答波形	… 38
図 4.14	ケース 1 における SG ユニット 1 の応答波形	… 39
図 4.15	ケース 4 における SG ユニット 1 の応答波形	… 39
図 4.16	ケース 7 における ASG ユニット 1 の応答波形	… 40
図 4.17	ケース 10 における ASG ユニット 1 の応答波形	… 41
図 4.18	ユニット 1 の限界極限電力	… 42
図 5.1	単独システムの構成	… 45
図 5.2	ディーゼルユニットによる AGC 制御系	… 48
図 5.3	ECS の充放電制御	… 48
図 5.4	ディーゼルユニット協調制御系	… 49
図 5.5	例題システムのモデル	… 50
図 5.6	太陽光発電システムブロック図	… 53
図 5.7	ECS ブロック図	… 54
図 5.8	ディーゼルで自動発電制御(ランダム負荷変動)	… 55
図 5.9	ディーゼルで自動発電制御(ランプ負荷変動)	… 55
図 5.10	ディーゼルで自動発電制御(周期的負荷変動)	… 56
図 5.11	提案方式による自動発電制御(ランダム負荷変動)	… 56
図 5.12	提案方式による自動発電制御(ランプ負荷変動)	… 57
図 5.13	提案方式による自動発電制御(周期的負荷変動)	… 57
図 5.14	($T_{delay} = 10\text{ms}$, $K_P = 60$, $K_I = 10$)	… 58
図 5.15	($T_{delay} = 20\text{ms}$, $K_P = 40$, $K_I = 10$)	… 58

図 5.16	$(T_{delay} = 30\text{ms}, K_P = 30, K_I = 10)$	… 59
図 5.17	$(T_{delay} = 40\text{ms}, K_P = 25, K_I = 10)$	… 59
図 5.18	$(T_{delay} = 50\text{ms}, K_P = 20, K_I = 10)$	… 59
図 5.19	$(T_{delay} = 60\text{ms}, K_P = 18, K_I = 10)$	… 60
図 5.20	$(T_{delay} = 70\text{ms}, K_P = 16, K_I = 10)$	… 60
図 5.21	$(T_{delay} = 80\text{ms}, K_P = 14, K_I = 10)$	… 60
図 5.22	設定遅延時間での平均周波数偏差	… 62
図 5.23	設定遅延時間での最大周波数偏差	… 62
図 6.1	単独システムの構成	… 65
図 6.2	ECS の充放電制御	… 66
図 6.3	協調制御のためのディーゼルユニット出力調整部	… 67
図 6.4	情報伝送の仕組み	… 68
図 6.5	単独システムのシミュレータブロック	… 68
図 6.6	制御実行エージェント	… 69
図 6.7	AGC 制御策定エージェント	… 70
図 6.8	提案方式による自動発電制御(ランダム負荷変動)	… 72
図 6.9	提案方式による自動発電制御(ランプ負荷変動)	… 72
図 6.10	提案方式による自動発電制御(周期的負荷変動)	… 73
図 6.11	ディーゼルで自動発電制御(ランダム負荷変動)	… 73
図 6.12	ディーゼルで自動発電制御(ランプ負荷変動)	… 74
図 6.13	ディーゼルで自動発電制御(周期的負荷変動)	… 74
図 6.14	コンピュータネットワークによる情報伝送遅延時間	… 75

表目次

表 3.1	スイッチングロジック	… 18
表 3.2	例題系統の定数	… 20
表 4.1	PSS の設置状況	… 37
表 5.1	例題系統の定数	… 45
表 5.2	平均周波数偏差	… 61
表 5.3	最大周波数偏差	… 61
表 6.1	平均周波数偏差	… 75
表 6.2	最大周波数偏差	… 75

第 1 章 序章

1.1. 本研究の背景と目的

近年、電気エネルギーは社会生活のあらゆる面に利用されており、日常生活に不可欠なものとして、その需要も年々増加の一途をたどっており、エネルギー資源の減少と環境問題などの問題はますます深刻になってくる。太陽光、風力、地熱、燃料電池などの新エネルギーは環境に負担を与えなく、環境にやさしいクリーンなエネルギーであるという観点から大きく期待され、米国や欧州諸国において実用化が推進されている。

また、平成 12 年 3 月に電気事業法が改正され、電力会社に限られていた電気の卸売が自由化された。この改正により誰もが IPP (Independent Power Producer) 「独立電気事業者」として電気を電力会社に卸売りできるようになった。これに伴い安価で小規模な分散型電源設備が注目を集めている。

電力システムの運用は、経済性と信頼性を考慮して広域にわたり連系されている。このような大規模かつ複雑化された電力システムにおいて、安定かつ高品質で不断な電気エネルギー（周波数・電圧の変動が少なく、停電が少ない電気エネルギー）の供給のためには、電力システムの安定度を向上させるさまざまな新技術が導入されつつある。しかしながら、電力システムにおける新技術導入に際しては、電力システムに何らかの影響を与え、万が一その安定性が保たれなくなる恐れがあるために、実システムでの実験的検証がほとんど許可されないことが現状である。そこで、導入しようとする新技術については、シミュレーションによる検証試験を徹底的に行い、その信頼性を十分に検証する必要がある。つまり、実電力システムのモデルを構築し、それに基づくシミュレーションがとて必要であり、またそれが新技術導入の際に不可欠な検証手段となる。言うまでもないが、シミュレーション結

果の信頼性を高めるために、使用するモデルを構築する際に、その精度に十分な注意を払わなければならない。もし、モデリングの精度があまり低いものであれば、それに基づくシミュレーションの結果が無意味なものになってしまう可能性は十分考えられる。したがって、電力システムにおける新技術を利用する新たな制御システムのプロトタイプ的设计に際して、モデリングとシミュレーションに関する研究は非常に重要なものであると考えられる。

本研究では、三相瞬時値ベースの詳細モデルを用いて実時間シミュレーションを実現するための方式、さらにそのモジュール化を実現しアナログシミュレータとの実時間並列シミュレーションを可能としている。また、モジュール化する際に、AD/DA変換インターフェースによる高調波問題およびその解決方法について明らかにしている。さらに、マルチエージェント方式を採用した分散電源の協調運用にかかわるコンピュータネットワークに接続される複数のパーソナルコンピュータによる実時間並列シミュレーション方式を提案・検証している。本研究で提案するシミュレーション方式により、可変速発電機（交流励磁を採用した新型発電機）の導入による電力システム安定性向上効果の検証、電気二重層キャパシタで構成される新型電力貯蔵システム（Energy Capacitor System（ECS））と風力・太陽光発電システム、ディーゼル発電システムなどの分散電源とのマルチエージェント方式による協調運用方式の検証を行っている。

1.2. 本論文の内容

本論文の構成は7章からなっている。以下に各章の内容についての要約を述べる。

第1章は序章として、本研究に関わる電力システムのモデリングと実時間シミュレーションに関する歴史的背景について概略を述べ、本研究の目的を示した。

第 2 章では、シミュレーションの幾つか方式について述べている。

第 3 章では、パーソナルコンピュータ（PC）により構成する可変速発電機モジュールをアナログシミュレータに接続して可変速発電機による電力システムの安定性向上効果について検証するため、Matlab/Simulink 環境下で可変速発電機の三相瞬時値ベースモデリング手法について述べている。また、構成した可変速発電機の詳細モデルをモジュール化する場合の問題点とその解決法についても述べている。

第 4 章では、開発した PC ベース可変速発電機モジュールを用いて九州電力（株）総合研究所にあるアナログシミュレータとの並列運転による実時間シミュレーションを行い、可変速発電機導入後の多機電力システムの安定性向上効果について明らかにしている。また、これまで通常の同期発電機を対象としてその有効性の検証を進めてきたファジー論理型励磁制御を可変速発電機の交流励磁制御部に採用した場合の効果についても述べている。

第 5 章では、ECS を用いた単独システムの自動発電制御を提案し、ディーゼル発電ユニットと ECS との情報伝送遅延時間を遅延時間設定ブロックで模擬して、実時間シミュレーションにより提案する自動発電制御方式の有効性を明らかにしている。また、情報伝送遅延時間が制御性能に与える影響についても明らかにしている。

第 6 章では、太陽光発電システム、風力発電システム、ディーゼル発電システム、および電力貯蔵のための Energy Capacitor System (ECS) を有する単独システムを対象としてマルチエージェント方式による自動発電制御を提案し、コンピュータネットワークに接続された二台のパーソナルコンピュータによる実時間シミュレーションを行うことにより、提案する自動発電制御方式の有効性を明らかにしている。

第7章は総括として、本研究で得られた成果をまとめている。

なお、電力系統の時間領域でのシミュレーションを効率的に行うためのプログラムは Matlab/Simulink および Power System Blockset を用いて作成した。また各種試験で利用したモジュールなどのハードウェアには、A/D、D/A 変換インターフェースを有する DSP ボードを実装したパーソナルコンピュータを用いている。

第 2 章 シミュレーション技術

電力システムに用いるシミュレーションソフトウェアは EMTP-ATP、Matlab/Simulink、MPSAP、NETOMAC、PSASP、EUROSTAG などが挙げられる。本研究では、Matlab/Simulink を用いて電力システムのモデリングとシミュレーションを行っている。また、シミュレーションを行う際に、実現する方式によりオフラインシミュレーション、DSP ボードによるスタンドアロン実時間シミュレーション、AD/DA 変換インターフェースを介した並列実時間シミュレーションとコンピュータネットワークを利用したマルチエージェント型並列実時間シミュレーションなどに分けることができる。

2.1. MATLAB の概要

Matlab(Matrix Laboratory) とは、問題とその解を数学的な記法で表現できる分野において簡便な使用環境のなかで、高性能な数値計算機能、多彩な可視化機能と、プログラミング機能を備えている技術計算用の高性能なソフトウェアである。従来のようにプログラミングしなくとも、問題とその解をちょうど数学的に書くように表示できる、使いやすい環境になっている。基本データ要素は行列で、配列宣言する必要がなく、Fortran、Basic、C といった言語でプログラムを記述するのに必要な時間と比べ、Matlab はより短い時間で各種シミュレーションプログラムの開発が可能となる。

Simulink はブロック線図インターフェースとコアになっている MATLAB の数値計算、グラフィクス、言語機能を用いてダイナミックシステムのモデル化、シミュレーションするためのプログラムである。モデルを定義するために、Simulink は block diagram ウィンドウを開き、マウスのクリックアンドドラッグ操作を用い

て、ブロック線図を作成し、修正していく。これは、言語やプログラムで微分方程式や差分方程式を作成する必要があったこれまでのプログラムとは大きく異なっている。シミュレーションの進行状態は、シミュレーションの実行とともに表示することができ、最終的な結果は、シミュレーションが終了したとき Matlab のワークスペースに転送され、利用することができる。

Power System Blocksetは、Simulink環境で電力システムのモデリングとシミュレーションを実行するための最先端の設計ツールであり、電力の発電、送電、および配電のモデリングに適したプログラムである。自動車、航空機、製造工場などの商用電力分野に見られる、複雑な独立型電力システムの開発に最適であり、そのブロックライブラリには電力系統内で使われる標準的なコンポーネントやデバイス、たとえば抵抗やコンデンサといった回路素子やダイオードやGTOのスイッチング素子、さらにモータやインバータといった電気機器などを表現したSimulinkブロックが用意されており、これらを組み合わせて回路を構成することでシミュレーションが行える。

2.2. 実時間シミュレーションに必要なツール

本研究では、実時間シミュレーションを行うにあたり、Real Time Workshop を用いて実時間演算を行っている。Real Time Workshop を用いることにより、実時間シミュレーションを容易に行うことができる。また dSPACE 社の ControlDesk を用いることで、パラメータ値をオンラインで変更することができる。

2.2.1 Real Time Workshop

Real Time Workshop は、Matlab と Simulink をともに使い、Simulink モデルから直接 C コードを生成して、リアルタイムシステムとスタンドアロンシミュレーションを含む種々の環境で実行

できるプログラムを構築するものである。この Real Time Workshop を使用することによって、リモートプロセッサ上でリアルタイムで Simulink モデルを実行でき、さらにホストマシン上または外部コンピュータ上で高速にスタンドアロンシミュレーションを実行することが可能となる。

2.2.2 ControlDesk

ControlDesk は DSP ボードに実装された Simulink モデルを実時間でシミュレーションを行う時に、さまざまな管理機能を有している非常に便利な操作ツールであり、試験マネージャ機能やグラフィカルなプラットフォームマネージャ機能に加え、仮想計器のセットや、パラメータエディタ、基本的なテストの自動化機能を持っている。試験マネージャは、集中データ管理機能に基づき、試験データを完璧に扱うことができる。また、仮想計器をドラッグアンドドロップすることにより、美しい計器パネルを簡単に構築でき、対応するモデル上の変数を割り付けることができる。これによってシミュレーションを行う際に、制御パラメータの変更や、各発電システムの起動や停止などシミュレーション中に自由に行うことが可能である。また、モニタ機能を有しており、必要な波形を自由に観測することが可能であり、そのデータは Matlab のデータ形式として保存することが可能である。

2.2.3 Real Time Interface (RTI)

Real Time Interface (RTI) は、Simulink の環境にハードウェア特有のブロックライブラリを追加したものであり、Simulink モデルを DSP ボードなどのリアルタイムハードウェアで実行できるようにするためのツールである。Real Time Interface を利用することで、Simulink モデルを dSPACE のプロトタイプハードウェアに自動実装することができ、その際にプログラミングに関する

ソフトウェア的な専門知識を全く必要としない。もちろん C コードで記述されたモデルを組み込むことも可能である。

dSPACE の Real Time Interface は完全に Matlab/Simulink と統合化されており、モデルと対応する I/O チャンネルを接続するための I/O ブロックセットも提供している。Matlab/Simulink のモデルはグラフィカルにシステムに統合され、I/O ブロックをドラッグアンドドロップすることで、リアルタイムハードウェアに接続される。

2.3. オフラインシミュレーション

ここで、オフラインシミュレーションとはシミュレーションソフトウェアを利用して、コンピュータ上で例題システムのモデルを構成し、シミュレーションを行うことを意味する。この場合、シミュレーションの速さは例題システムモデルの計算量、計算方法及びコンピュータの計算能力により変わってくる。言い換えれば、例題システムモデルの計算量は比較的軽い場合、シミュレーションの進み具合は実時間より早くなり、逆に計算量は重い場合には実時間より遅くなる。

2.4. DSP ボードによる実時間シミュレーション

ここで、DSP ボードによる実時間シミュレーションを DSP ボード上でスタンドアロン実時間シミュレーションを行うことを意味する。Matlab/Simulink 環境下で構成した例題システムモデルを Real Time Workshop によりコンパイルし、また Real Time Interface を利用することで、DSP ボードに実装し、DSP ボード上で実時間シミュレーションを行うことが可能となる。ただし、例題システムモデルの計算刻み時間(シミュレーションのサンプリング時間)は、DSP ボードの計算能力を超えないように設定する必要がある。

2.5. AD/DA インターフェースを介した並列シミュレーション

もし例題システムの計算量は DSP ボードの計算能力を超えるならば、ひとつの DSP ボード上で実時間シミュレーションができなくなり、DSP ボードが装着された複数のコンピュータが必要となる。この場合、例題システムモデルを幾つかの子モデルに分割し、それぞれのコンピュータ上の DSP ボードに実装し、複数のコンピュータによる実時間並列シミュレーションが可能となる。ただし、コンピュータ間の信号やり取りは DSP ボードの AD/DA 変換インターフェースを介して行うことになる。

2.6. コンピュータネットワークを介した実時間並列シミュレーション

また、近年コンピュータネットワーク環境が整備されてきて、大学間または大学と会社間での共同シミュレーションも行えるようになりつつある。この場合、両側のコンピュータは長距離で DSP ボードの AD/DA 変換インターフェースを介した接続が不可能になる。この問題を解決する方法として、コンピュータネットワークを利用したマルチエージェント型の実時間並列シミュレーションが提案されている。2.5 節で述べているコンピュータ間の信号やり取りは DSP ボードの AD/DA 変換インターフェースではなく、コンピュータネットワークを介して行うことになる。

第3章 可変速発電機の瞬時値ベースモデリングと実時間シミュレーション

3.1. はじめに

電源構成としての原子力発電比率の増加に伴い、深夜軽負荷時における負荷周波数制御(LFC: Load Frequency Control)ユニットの調整容量不足のため負荷周波数制御(LFC)が困難になりつつある。この周波数調整容量を確保するために、揚水運転時に負荷周波数制御(LFC)が可能となる可変速揚水発電機が系統に導入されつつある。可変速揚水発電電動機(以下可変速発電機(ASG: Adjustable Speed Generator)とする)では、回転子に三相励磁巻き線が備えられ、低周波数の三相交流励磁方式が採用される。応答の速いインバータやサイクロコンバータなどによる交流励磁を行うため、回転子の回転速度を可変とすることが可能である。また、発電時においても交流励磁制御による回転速度の調整により有効電力と無効電力を独立に制御できるため、電力システムの過渡安定度の向上にも大きく寄与できる^{(12)~(16)}。

本研究では、アナログシミュレータとの並列運転により、可変速発電機導入後の電力システムの安定性向上効果に関する検証を目的として、可変速発電機モジュールを Matlab/Simulink^{(2)~(4)}環境下でパーソナルコンピュータ上に構成している。可変速発電機モデルとしては瞬時値ベースモデルを採用し、より詳細なシミュレーションを可能としている。このモデルを A/D、D/A 変換インターフェースを有する DSP (Digital Signal Processor) ボード⁽⁵⁾に実装することにより、本文で提案する可変速発電機モジュールによる実時間シミュレーションを可能としている。さらに、本モジュールの動作確認のために、別のパーソナルコンピュータ上に構成した送電ネットワークモジュールに A/D、D/A 変換を介して接続することにより、例題とする一機無限大母線系統を構成し、

これら 2 台のパーソナルコンピュータの並列計算による実時間シミュレーション方式を提案している。この実時間シミュレーションにより、さらに大規模なシステムを対象とした場合の複数のパーソナルコンピュータを用いた並列計算による実時間シミュレーション方式の問題点およびその解決法についても明らかにし、より複雑なシステムの実時間シミュレーションにも対応できるようにしている。最後に、二機無限大母線システムを例題として、アナログシミュレータを用いた本可変速発電機モジュールの動作確認試験についてまとめている。

3.2. 可変速発電機の詳細モデル

可変速発電機の回転子と固定子はともに三相巻き線を有しており、その動特性は電氣的方程式と回転子の運動方程式で表すことができる。三相瞬時値ベースの電圧・電流の関係を示す電氣的方程式は式(3-1)で記述される。

$$V = \frac{d}{dt}(L \cdot I) + R \cdot I \quad (3-1)$$

ここで、電圧ベクトル V は三相端子電圧と三相交流励磁電圧からなり、電流ベクトル I は三相電機子電流と三相交流励磁電流からなる。 L と R はそれぞれ可変速発電機の巻線インダクタンスと巻き線抵抗により構成される行列を表している。電圧ベクトル V と電流ベクトル I は式(3-2)と式(3-3)で与えられる。式(3-1)に含まれる行列 L と R の詳細は式(3-4)と式(3-5)に示している。

$$V = [V_a, V_b, V_c, V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}]^T \quad (3-2)$$

$$I = [I_a, I_b, I_c, I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}]^T \quad (3-3)$$

ただし、

V_a, V_b, V_c : 三相端子電圧瞬時値 (V)

V_{fa}, V_{fb}, V_{fc} : 三相励磁電圧瞬時値 (V)

I_a, I_b, I_c : 三相電機子電流瞬時値 (A)

I_{fa}, I_{fb}, I_{fc} : 三相励磁電流瞬時値 (A)

$$L = \begin{bmatrix} L_s & -M/2 & -M/2 & M \cdot \cos\theta & M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) & M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) \\ -M/2 & L_s & -M/2 & M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) & M \cdot \cos\theta & M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) \\ -M/2 & -M/2 & L_s & M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) & M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) & M \cdot \cos\theta \\ M \cdot \cos\theta & M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) & M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) & L_r & -M/2 & -M/2 \\ M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) & M \cdot \cos\theta & M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) & -M/2 & L_r & -M/2 \\ M \cdot \cos(\theta-2\pi/3) & M \cdot \cos(\theta+2\pi/3) & M \cdot \cos\theta & -M/2 & -M/2 & L_r \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$R = \text{diag}[R_s, R_s, R_s, R_r, R_r, R_r] \quad (3-5)$$

ただし、

L_s, L_r : 電機子と回転子巻線の自己インダクタンス (H)

M : 電機子と回転子巻線間の最大相互インダクタンス (H)

R_s, R_r : 電機子と回転子巻線の抵抗 (Ω)

θ : 回転子の位相角 (rad)

回転子の運動方程式は式(3-6)で表される。なお、式(3-7)は可変速発電機の電氣的出力の計算式である。

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_b}{2 * H} \left[\frac{\omega_b}{\omega_r} (P_m - P_e) - D \cdot (P/2) (\omega_r + \omega_c - \omega_b) \right] \quad (3-6)$$

$$P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (3-7)$$

ただし、

P_m : 機械的入力 (p.u.)

P_e : 電氣的出力 (p.u.)

H : 慣性定数 (sec)

D : 制動係数

P : 極数

ω_r : 回転子角速度 (rad/s)

ω_c : 交流励磁角周波数 (rad/s)

ω_b : 同期角速度 (rad/s)

上に記述している式を基にして Matlab/Simulink 環境下で構成した可変速発電機モジュールの Simulink ブロックは図 3.1 に示され、固定子巻き線と回転子巻き線の電圧と電流の関係式を表す電気系 (Electrical Equations) ブロック、回転子の運動方程式 (Mechanical Equations) を表す機械系ブロック、交流励磁システム (AC Excitation System) ブロック、A/D 変換と D/A 変換インタ

一フェースブロックから構成されている。A/D 変換部の入力信号は三相端子電圧信号であり、D/A 変換部の出力信号は三相電機子電流信号である。図 3.2 には一機無限大母線系統の送電ネットワークモジュールの Simulink ブロックを示す。その構成は無限大母線 (Infinite Bus) を表す三相交流電源、送電線路 (Line)、A/D 変換と D/A 変換インターフェースブロックからなり、Matlab 環境下で、Simulink および Power System Blockset により作成したものである。すなわち、この送電ネットワークの電圧・電流の関係は三相瞬時値ベースの微分方程式により記述されている。

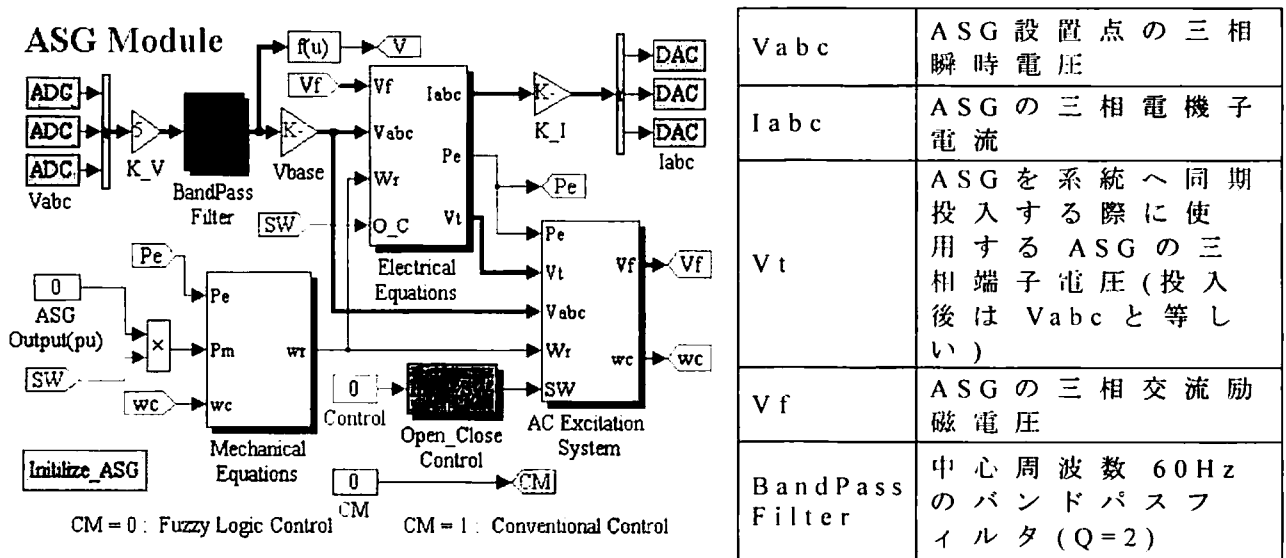


図 3.1 ASG モジュールのブロック図

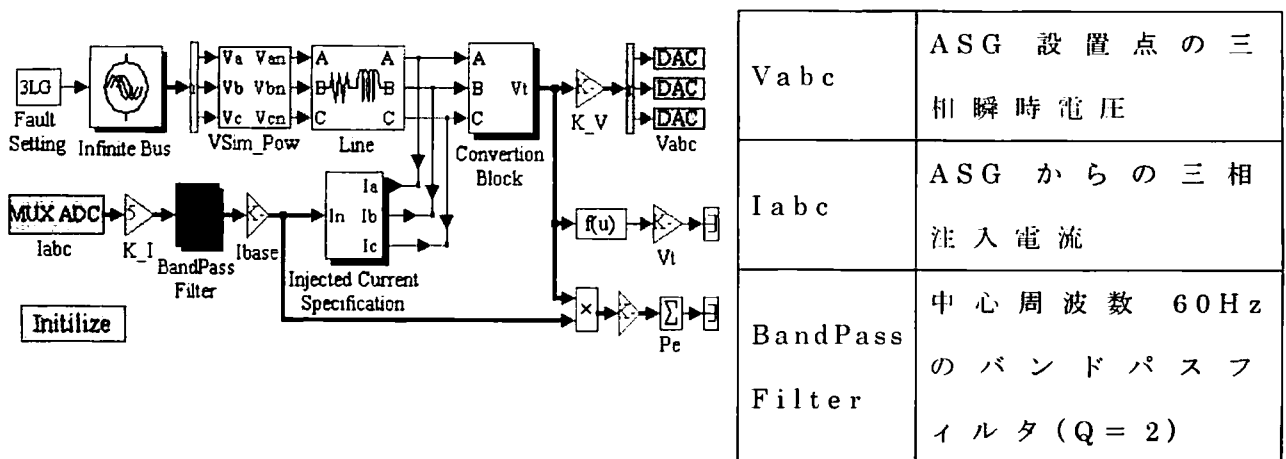


図 3.2 送電ネットワークモジュールのブロック図

これら 2 台の P C ベースモジュールを A/D 変換及び D/A 変換インターフェースにより接続し、これら 2 台のモジュールの並列計算により実時間シミュレーションを実現している。したがって、両モジュール間での信号のやり取りは、予め指定したシミュレーションのサンプリング間隔で実施されることになり、高調波成分を含む信号が両モジュールに入力されることになる。さらに、可変速発電機および送電ネットワークを 1 台のモジュールにより実現した場合と較べると 1 サンプルの時間遅れが発生することになる。ここで、この高調波成分の影響を除くために図 3.1 および図 3.2 において、A/D 変換による外部信号入力部にはバンドパスフィルタ (Band Pass Filter) ブロックを別に設置している。このバンドパスフィルタがない場合、可変速発電機モジュールの中で計算された電機子電流信号を D/A 変換し、送電ネットワークモジュールに入力すると、図 3.3 下図に示すようなステップ的に変化する離散的な正弦波になる。ただし、この各ステップの長さは可変速発電機モジュールの計算刻み時間と等しい。このような電流を送電ネットワークモジュールに注入した場合、電機子電流注入点、すなわち可変速発電機接続点での三相瞬時電圧には、図 3.3 上図のように大きな高調波成分が含まれることになり、可変速発電機モジュールは正しく動作しなくなる。

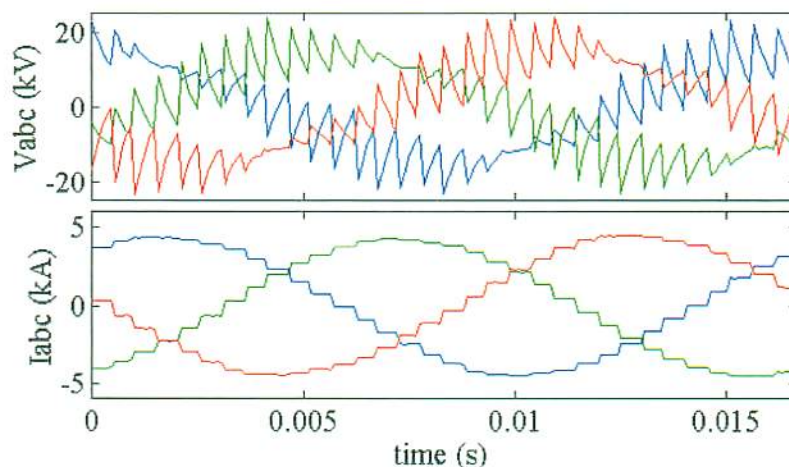


図 3.3 バンドパスフィルタがない場合の電圧・電流信号

この問題を解決するため、各モジュールの A/D 変換による外部信号入力部に、図 3.4 に示す振幅位相特性を有するバンドパスフィルタを設置している。ただし、系統周波数 60 Hz を中心周波数とし、系統周波数 60 Hz 付近での位相のずれを極力小さくなるように設定している。このバンドパスフィルタの設置することにより、各モジュールの電圧・電流信号は図 3.5 に示されるようになり、高調波成分の影響を除くことが可能となった。

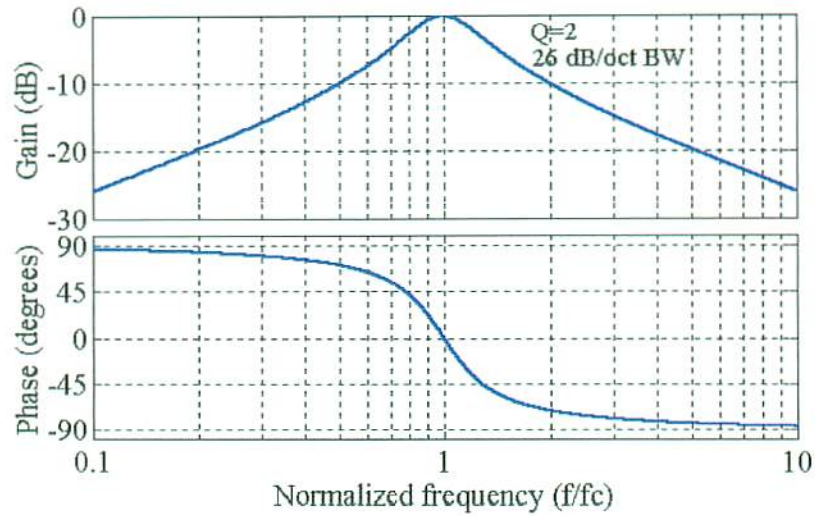


図 3.4 バンドパスフィルタの振幅位相特性

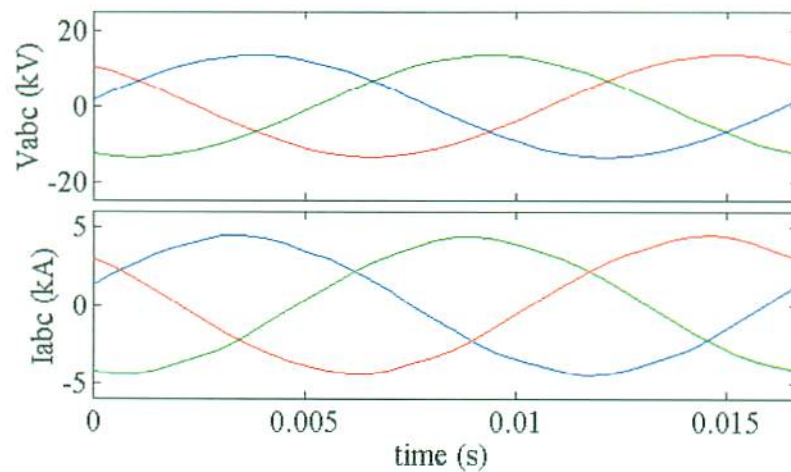


図 3.5 バンドパスフィルタがある場合の電圧・電流信号

交流励磁装置として用いるPWM型インバータのSimulinkブロックを図3.6に示す。基本構成として、電源変換部(AC-DC Converter)、信号生成部(Signal Generator)、パルス幅変調部(Pulse Width Modulator)とスイッチングブリッジ(Switching Bridge)からなる。可変速発電機の端子からの三相交流電圧 V_{abc} をAC-DCコンバータにより直流電圧 V_{dc} に整流し、スイッチングブリッジの電源としている。ここでは、三相全波整流方式を想定し、直流電圧 V_{dc} を式(3.8)にて与えている。また、三相励磁電圧の振幅指令値 Ma と励磁周波数指令値 ω_c により、交流励磁用の三相基準正弦波は式(3.9)で与えられ、これらの基準信号は信号生成部で生成されている。この三相基準正弦波をパルス幅変調部でキャリア三角波と比較することにより、スイッチングブリッジ部へとスイッチング制御指令が出力される。これらの制御により、三相励磁電圧の振幅および周波数の指令値に応じた三相低周波交流励磁電圧 V_f (V_{fa} , V_{fb} , V_{fc}) が生成されている。

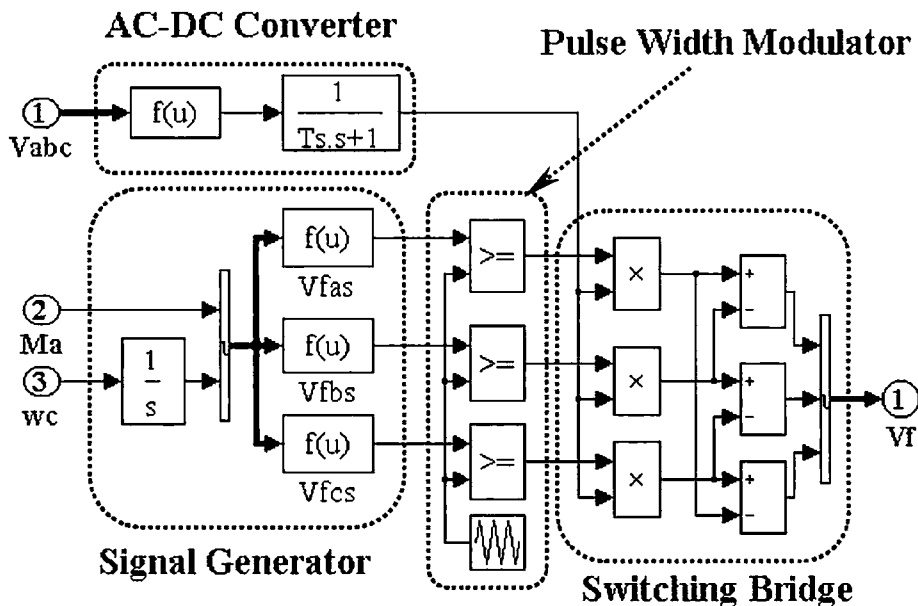


図 3.6 PWM 型インバータ

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2 - V_a V_b - V_a V_c - V_b V_c} \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} V_{fas} &= Ma \cdot \sin(\omega_c t) \\ V_{fbs} &= Ma \cdot \sin(\omega_c t - 2\pi/3) \\ V_{fcs} &= Ma \cdot \sin(\omega_c t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3-9)$$

本研究では、PWM型インバータを交流励磁装置として採用した場合と比較するため、サイクロコンバータのモデルもMatlab/Simulink環境下で構成している。図3.7にサイクロコンバータのSimulinkブロックを示す。図にも示されるとおり、サイクロコンバータはスイッチングロジック(Switching Logic)ブロック、スイッチングブリッジ(Switching Bridge)と点弧角生成部(Firing Angle Generator)により構成されている。可変速発電機の端子からの三相交流電圧 V_{abc} はスイッチングブリッジの交流電源としている一方、スイッチングロジックブロックで V_{abc} を利用して表3.1に示すスイッチングロジックにより、スイッチングブリッジ中の通電素子が決められ、点弧角生成部でそれらの通電素子の点弧角が決定されている。この点弧角は可変速発電機交流励磁制御部からの三相励磁電圧の振幅指令値 Ma と励磁周波数指令値 ω_c により、式(3-10)で与えられる。図3.7中のSW_PとSW_Nはそれぞれ正群ブリッジと負群ブリッジのスイッチング制御信号を表し、alf_a, alf_b, alf_cはそれぞれ式(3-10)に示す点弧角 α_{fa} , α_{fb} , α_{fc} に対応している。

$$\begin{aligned} \alpha_{fa} &= \arccos(Ma \cdot \sin(\omega_c t)) \\ \alpha_{fb} &= \arccos(Ma \cdot \sin(\omega_c t - 2\pi/3)) \\ \alpha_{fc} &= \arccos(Ma \cdot \sin(\omega_c t + 2\pi/3)) \end{aligned} \quad (3-10)$$

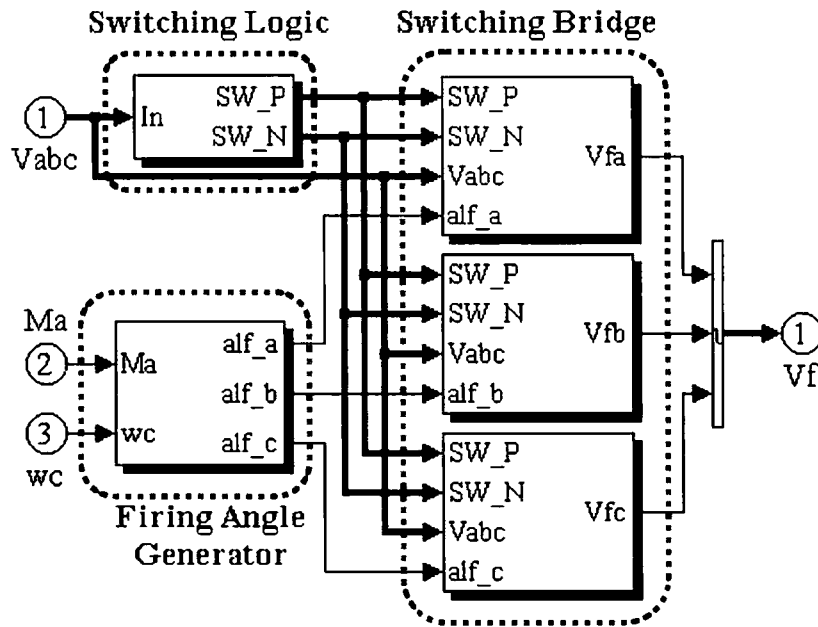


図 3.7 サイクロコンバータ

表 3.1 スイッチングロジック

Condition of inputs			Positive bridge switching logic (SW_P)			Negative bridge switching logic (SW_N)		
$v_a \geq v_c$	$v_b \geq v_a$	$v_c \geq v_b$	Sa	Sb	Sc	Sa	Sb	Sc
0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1	1	0	0

図 3.8 に通常型交流励磁制御系のブロックを示す。PI 制御ループにより構成される自動電圧調整器 (AVR: Automatic Voltage Regulator)、リセットフィルタ、一時遅れと位相補償回路により構成される電力系統安定化装置 (PSS: Power System Stabilizer)

と自動励磁周波数調整器 (AFR: Automatic Frequency Regulator) により構成されている。AVRは入力される可変速発電機の端子電圧を目標値に調整するように交流励磁電圧の大きさ指令値 M_a を計算するものであり、PSSは可変速発電機の動揺を抑制するために交流励磁電圧の大きさ指令値を補正するものである。また、AFRは可変速発電機を外部系統と同期運転させるために、可変速発電機の交流励磁周波数を調整するものである。

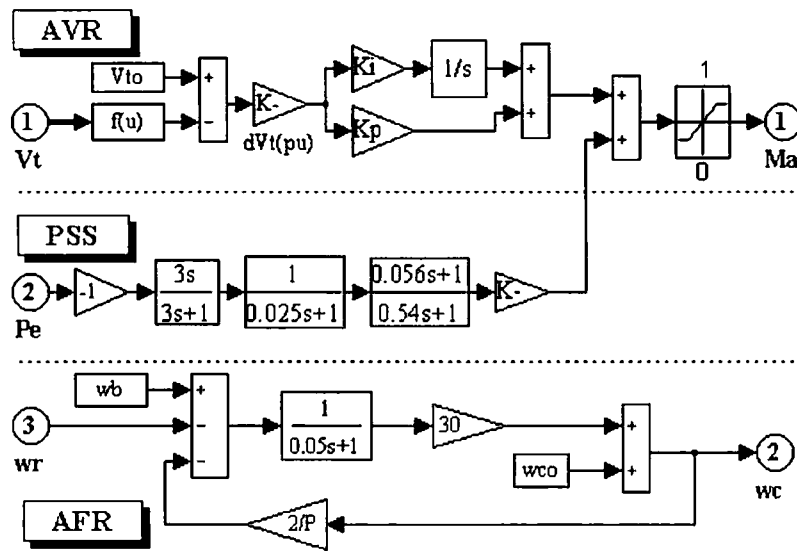


図 3.8 通常型交流励磁制御ブロック

3.3. 例題系統

本研究では、例題系統として図 3.9 に示すように可変速発電機により構成した一機無限大母線系統を使用している。例題系統定数は表 3.2 に示す。

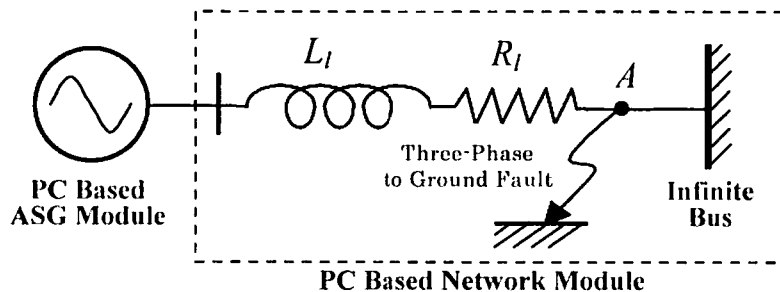


図 3.9 一機無限大母線系統

また、この一機無限大母線系統を用いて、以下の各ケースを対象として、可変速発電機モジュールと送電ネットワークモジュールの並列計算による実時間シミュレーションを実施している。

- (1) 可変速発電機の起動時
- (2) 可変速発電機の出力設定変更時
- (3) A点での4サイクル継続する3相地絡事故時
- (4) 機械的入力ofステップ変化時
- (5) 励磁周波数のステップ変化時
- (6) 端子電圧設定値のステップ変化時

表 3.2 例題系統の定数

可変速発電機定数：

容量	360 MVA
定格電圧	16.5 kV
固定子自己インダクタンス	$L_s = 0.0028$ (H/相)
固定子抵抗	$R_s = 8.3188e^{-4}$ (Ω /相)
回転子自己インダクタンス	$L_r = 0.0028$ (H/相)
回転子抵抗	$R_r = 8.3188e^{-4}$ (Ω /相)
相互インダクタンス	$M = 0.0025$ (H)
巻線比	$a = 0.2$
極数	$P = 12$
慣性定数	$H = 4.18094$ (s)

線路定数：

インダクタンス	$L_l = 0.0004$ (H)
抵抗	$R_l = 0.0151$ (Ω)

3.4. 実時間シミュレーション

例題系統を対象とした実時間シミュレーション時のシステム構成を図 3.10 に示している。図に示されるように可変速機モジュ-

ルの中で計算された 3 相電機子電流信号 (I_a 、 I_b 、 I_c) は DA 変換及び AD 変換インターフェースを介してネットワークモジュールに入力され、接続点での 3 相端子電圧信号 (V_a 、 V_b 、 V_c) は DA 変換、AD 変換を介して可変速発電機モジュールにフィードバックされることになる。

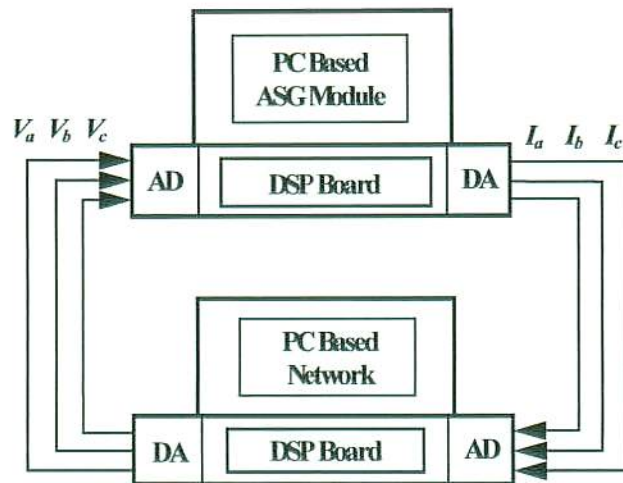


図 3.10 実時間シミュレーションシステムの構成

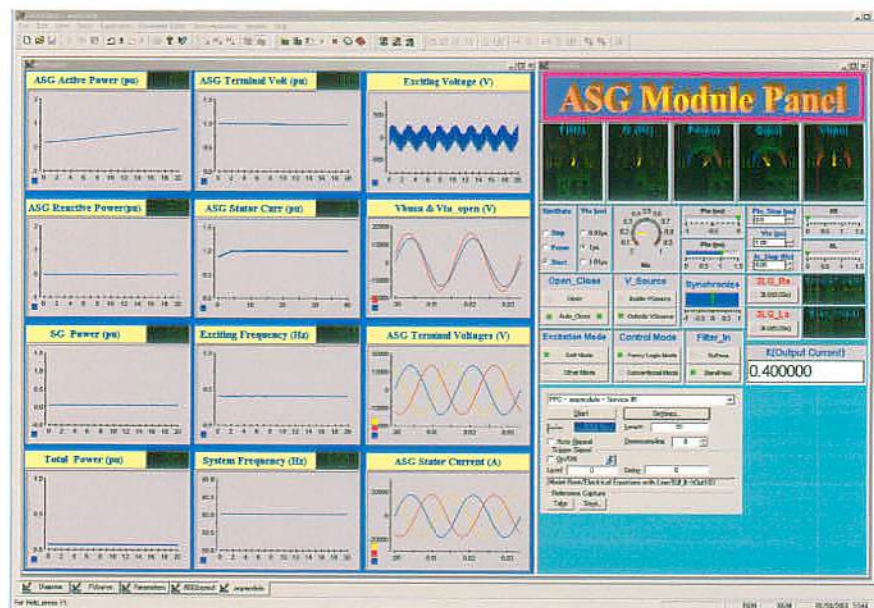


図 3.11 実時間シミュレーション中の可変速発電機の表示画面

図 3.11 に ControlDesk で作成した実時間シミュレーション中の可変速発電機モジュールの表示画面を示す。左側の観測部では

計測したい信号を実時間で観測することができ、また MATLAB 形式のデータファイルとして保存することもできる。右側の設定部で制御系の変更などを含めた可変速発電機の運転状態設定を変えることができる。

図 3.12 から図 3.17 に先述のケース(1)からケース(6)およびケース(6)における実時間シミュレーション時の応答波形を示す。ただし、交流励磁装置としてはサイクロコンバータを用いている。図中、上から可変速発電機の端子電圧、有効電力、無効電力、系統周波数、励磁周波数および励磁電圧(一相分)の波形を示している。図 3.12 に示すケース(1)の可変速発電機起動時のシミュレーションでは、可変速発電機モジュールの端子電圧の瞬時値と送電ネットワークモジュールにおける系統側電圧の瞬時値との比較により可変速発電機の送電システムへの同期投入を実現している。図 3.13 に可変速発電機の出力を 0pu から 1pu に調整した場合の応答波形を示している。図に示されるように可変速発電機の出力は徐々に設定値に移行し、システムには大きな変動が見られなかった。図 3.14 に示す三相地絡事故時の応答波形では、可変速発電機の出力を 1pu と設定しても、事故後およそ 4s 間の過渡状態を経てまた安定状態になっていることが分かる。図 3.15 と図 3.17 に示す機械的入力のステップ変化時と端子電圧設定値のステップ変化時の応答波形においては、可変速発電機の出力 P と端子電圧 V_t はそれらの指令値に従い速やかに移行していることが分かる。図 3.16 に交流励磁周波数設定値のステップ変化時の応答波形を示す。図に示しているように、可変速発電機の無効電力 Q は励磁周波数の変化に応じて変化するため、端子電圧にはやや大きな変動が現れているが、端子電圧はまだ 0.95pu から 1.05pu の制限範囲内に入っていることが分かる。

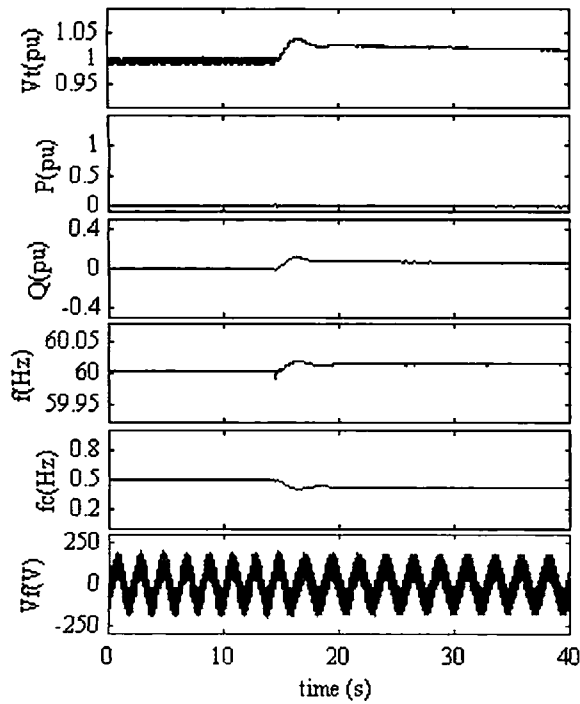


図 3.12 起動時の応答波形

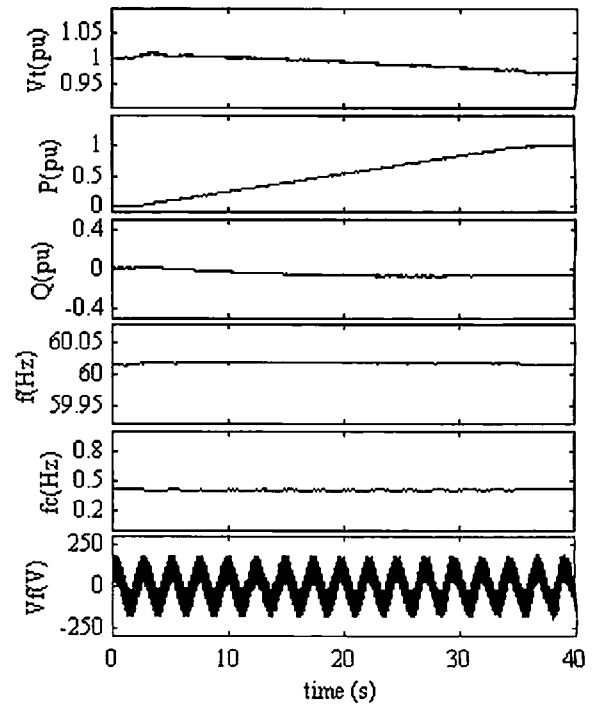


図 3.13 出力調整 (0~1 pu) 時の応答波形

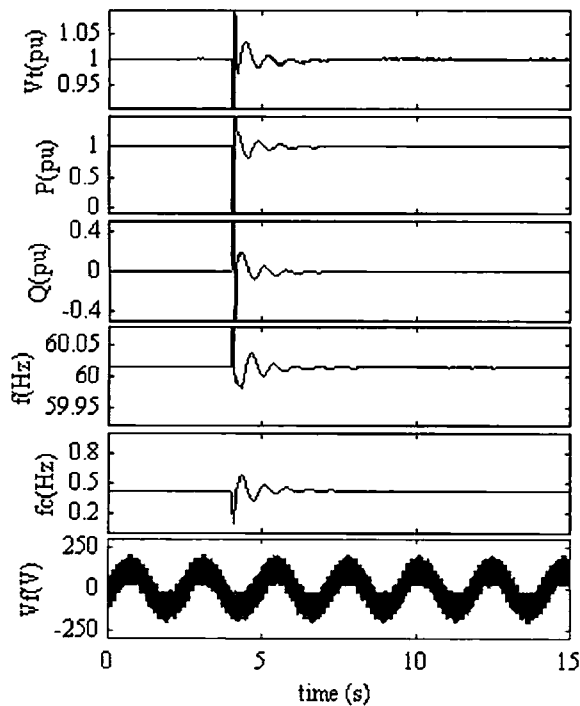


図 3.14 三相地絡事故時

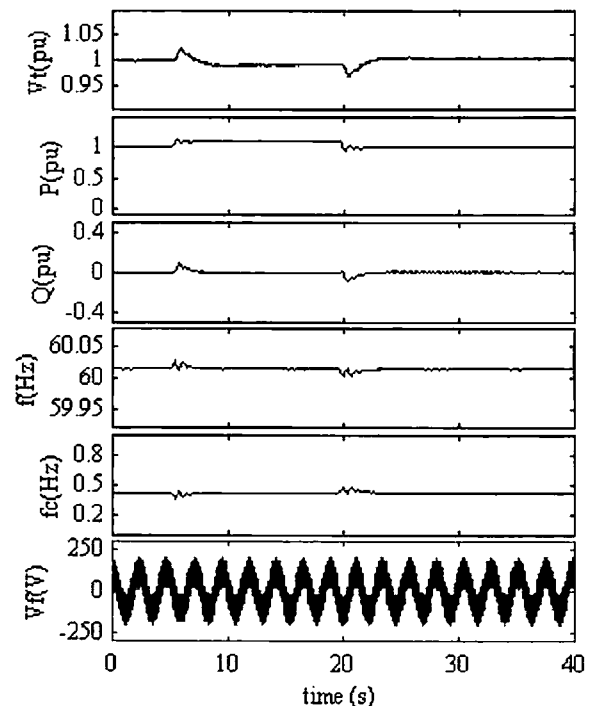


図 3.15 機械的入力のステップ変化時 (± 0.1 pu)

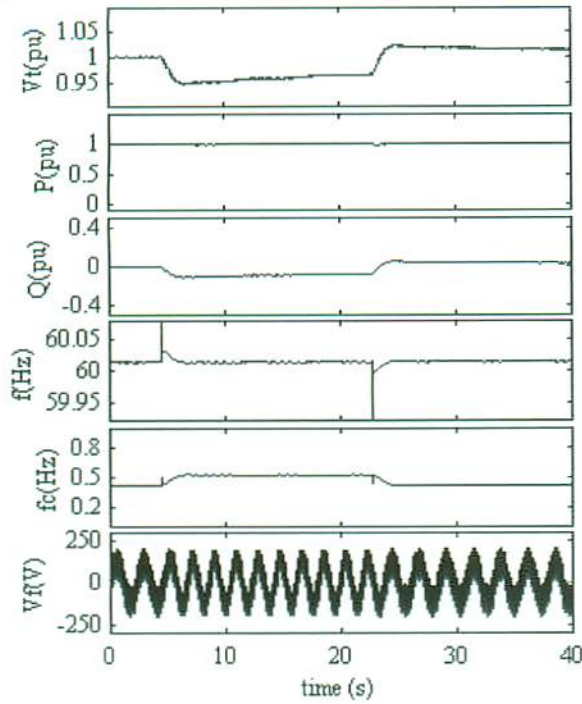


図 3.16 励磁周波数設定値のステップ変化時 ($\pm 0.1\text{Hz}$)

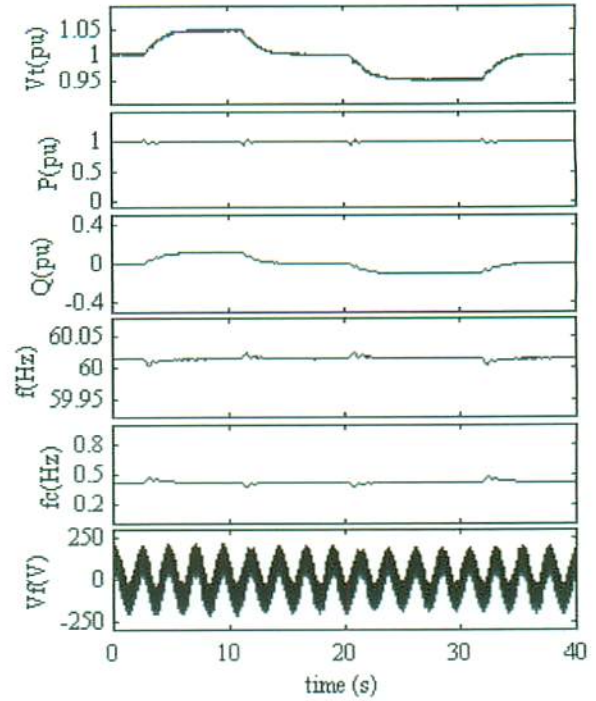


図 3.17 端子電圧設定値のステップ変化時 ($\pm 0.05\text{pu}$)

参考のため、図 3.18 に三相地絡事故時の三相端子電圧および三相電機子電流の瞬時値変化の様子を示している。

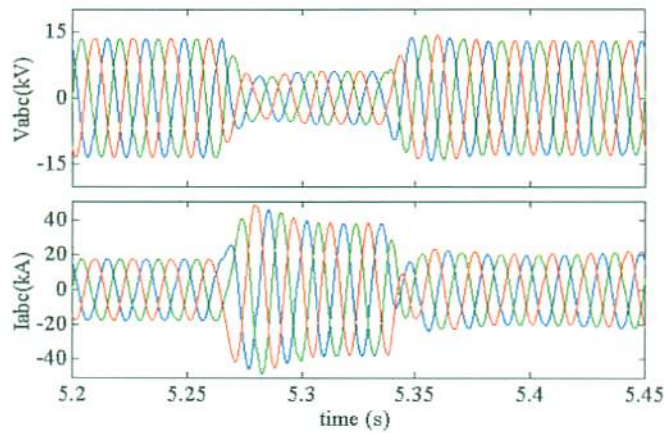


図 3.18 三相地絡事故時の端子電圧と電機子電流

また、2 台の PC ベースモジュールの並列計算において、A/D 変換及び D/A 変換インターフェースを介した信号のやり取りがあるため、1 サンプル時間遅れは発生することになる。本研究では、

この 1 サンプル時間遅れの影響についても調べた。図 3.19 には、例題系統を対象とした実時間シミュレーションを 1 台のパーソナルコンピュータ上で実施した場合と 2 台パーソナルコンピュータの並列計算により実施した場合の比較を示す。上は可変速機の出力、下は端子電圧の波形を示している。外乱としては、ケース(3)の三相地絡事故を想定している。なお、1 台のパーソナルコンピュータ上での実時間シミュレーションでは、A/D 変換及び D/A 変換インターフェースを介した信号のやり取りがないため 1 サンプルの時間遅れは発生しないこと、また、バンドパスフィルタも必要とされないことに留意しておく必要がある。

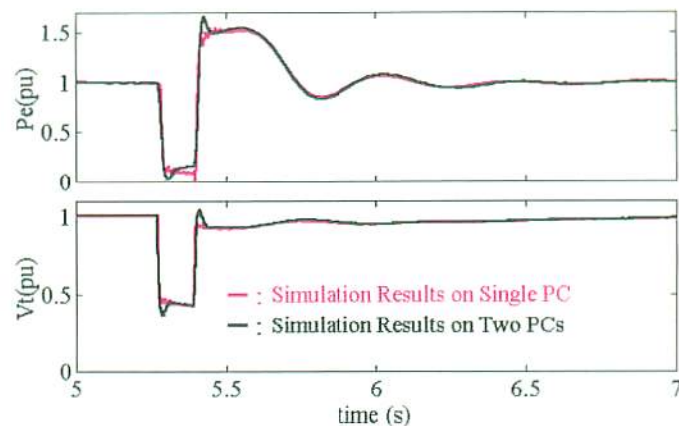


図 3.19 並列計算時の 1 サンプル時間遅れの影響

図 3.19 に示されるように、これらのシミュレーション結果には大きな差異は認められない。したがって、今回提案する並列計算による実時間シミュレーション方式により、対象となる系統規模が拡大した場合でも、複数台のパーソナルコンピュータを A/D 変換及び D/A 変換インターフェースを介して接続し、それらのパーソナルコンピュータの並列計算により実時間シミュレーションの実行が可能であることが明らかとなった。

図 3.20 は PWM 型インバータにより交流励磁を行った場合の三相地絡事故時の応答波形である。図 3.14 との比較により PWM 型インバータによる交流励磁方式とサイクロコンバータによる交流

励磁方式との間には大きな差異のないことが分かる。

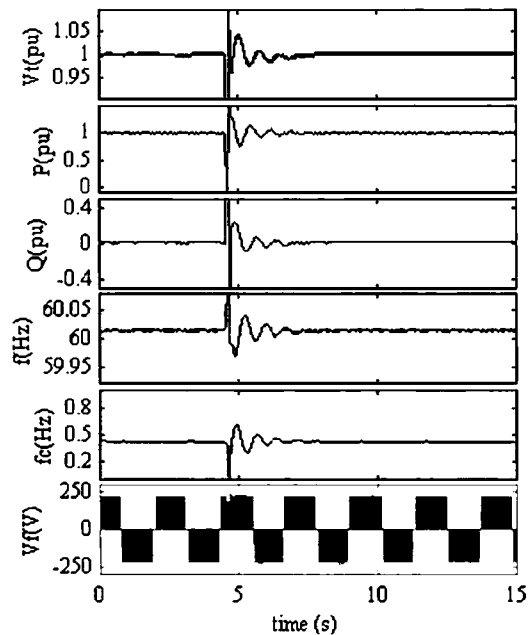


図 3.20 三相地絡事故時の応答波形
(PWM型インバータ)

3.5. アナログシミュレータ試験

開発した可変速発電機モジュールの動作を実験的に確認するため、九州電力(株)総合研究所のアナログシミュレータに接続して、可変速発電機モジュール評価試験を行った。

図 3.21 に可変速発電機モジュールとアナログシミュレータとの接続方式を示す。図に示すように、可変速発電機モジュール接続点の三相瞬時電圧信号 V_a 、 V_b 、 V_c は A/D 変換インターフェースを介して可変速発電機モジュールに入力され、可変速発電機モジュールの中で計算された三相瞬時電機子電流信号 I_a 、 I_b 、 I_c は D/A 変換インターフェースを介して、電流指示値として電流アンプに入力されアナログシミュレータに電流を注入することになる。また、可変速発電機の系統への投入に際しては、可変速発電機端子電圧と系統側電圧の位相を比較することにより同期投入を可能としている。

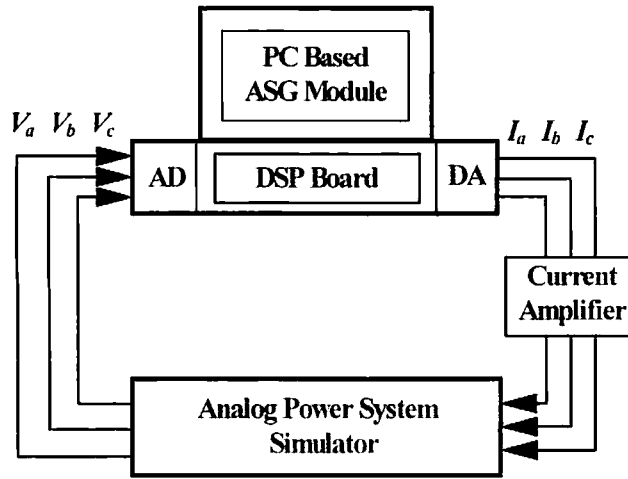
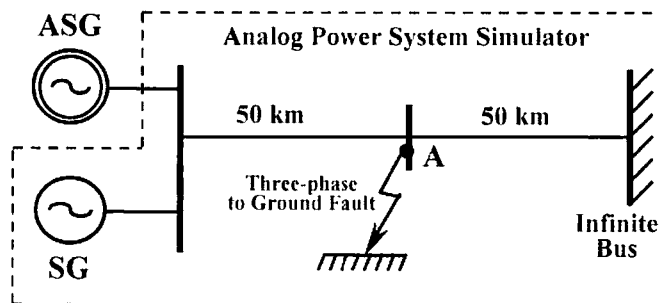


図 3.21 アナログシミュレータとの接続図

例題システムとしては図 3.22 に示す可変速発電機および同期発電機により構成される二機無限大母線システムを用いている。図中、ASG は本研究で開発した PC ベース可変速発電機モジュール、虚線に囲まれた部分はアナログシミュレータを表す。アナログシミュレータ試験結果の代表例を図 3.23 に示す。図中上から可変速発電機に並列した同期発電機の有効電力と可変速発電機の有効電力、系統周波数、交流励磁周波数、交流励磁電圧（一相分）、端子電圧の波形を示している。外乱としては、送電線路の真ん中に 4 サイクル継続する三相地絡事故および同期発電機の系統からの遮断を想定している。本アナログシミュレータ試験では、可変速発電機の交流励磁方式としてはサイクロコンバータを使用している。



SG : 同期発電機 ASG : 可変速発電機

図 3.22 二機無限大母線系統

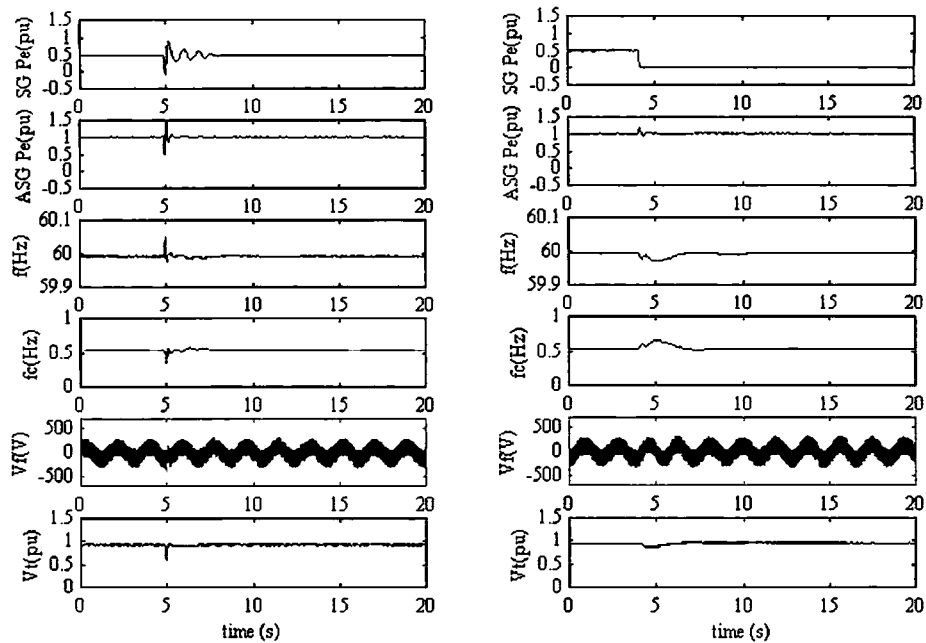


図 3.23 三相地絡事故時(左)と同期機遮断時の応答(右)

図 3.23 に示されるように、三相地絡事故時において、同期発電機の出力量 (SG Pe(pu)) と可変速発電機の出力量 (ASG Pe(pu)) の二つ波形を比較すれば分かるように、同期発電機と比べて可変速発電機のほうはより安定していることが明らかとなった。また、同期発電機を 0.5 pu の動作点で遮断時の波形に示されるように同期発電機を遮断しても、可変速発電機には大きな出力変動が見られないことが分かる。

3.6. まとめ

Matlab/Simulink 環境下で三相瞬時値ベースの可変速発電機モジュールを開発し、DSP ボードを実装したパーソナルコンピュータ上での実時間シミュレーションを可能とした。開発した可変速発電機モジュールの動作確認のため、この可変速発電機モジュールを別のパーソナルコンピュータ上に構成した送電ネットワークモジュールに接続し、一機無限大母線系統を例題系統として並列計算による実時間シミュレーション方式を提案している。並列計算

時におけるこれらのパーソナルコンピュータ間での離散的な信号のやり取りに起因する高調波の問題に関しては、バンドパスフィルタの付加により解決可能なことを、また1サンプルの時間遅れに関しても1台パーソナルコンピュータ上での例題システムのシミュレーション結果との比較により問題のないことを明らかにした。さらに、二機無限大母線システムを例題システムとした九州電力(株)総合研究所におけるアナログシミュレータとの並列運転による実時間シミュレーションにより、開発した可変速発電機モジュールの動作確認を完了した。

第4章 可変速発電機による電力システムの安定度向上効果の検証

4.1. はじめに

本章では、パーソナルコンピュータを基にして開発した可変速発電機モジュールと九州電力（株）総合研究所にあるアナログシミュレータとの並列運転により、可変速発電機導入後の電力システムの安定度向上効果に関する検証⁽³³⁾⁻⁽³⁴⁾を行っている。また、これまで通常の同期発電機を対象としてその有効性の検証を進めてきたファジー論理型励磁制御⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁸⁾を可変速発電機の交流励磁制御部に採用した場合の効果について検証するために、ファジー論理型励磁制御装置(FLAVR+FLPSS)を用いた交流励磁制御系を構成している。可変速発電機モジュールについては、三相瞬時値ベースモデルを Matlab/Simulink 環境下でパーソナルコンピュータ上に構成し、A/D および D/A 変換インターフェースを有する DSP (Digital Signal Processor) ボードに実装することにより、より詳細な実時間シミュレーションを可能としている⁽²⁹⁾⁻⁽³²⁾。

4.2. くし型四機無限大母線系統

可変速発電機を多機系統に導入した場合の安定性向上効果を実験的に検証するため、例題系統として図 4.1 に示すくし型四機無限大母線系統を考えている。アナログシミュレータ試験ではユニット 2、ユニット 3、ユニット 4 の各ユニットの出力設定はそれぞれ 0.4 pu、0.6 pu、0.6 pu と固定し、ユニット 1 の出力設定を変更して試験を行っている。また、外乱として、ユニット 3 とユニット 4 間の二回線中一回線の A 点で三相地絡事故を想定し、事故回線は事故後 4 サイクルで遮断されるものとしてユニット 1 の安定限界極限電力を調べている。また、アナログシミュレータ上に構成されたもともとの四機系統ではユニット 1 からユニット 4 まではすべて同期発電機であるが、可変速発電機導入後の安定度向

上効果を評価するために、ユニット1の同期発電機を容量の等しい可変速発電機に置き換えて、シミュレーションを実施し同様に安定限界極限電力を調べている。

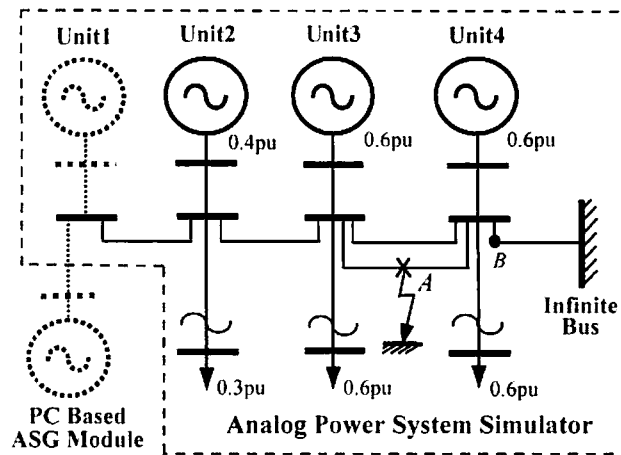


図 4.1 くし型四機無限大母線系統

4.3. 励磁制御システム

4.3.1 同期発電機の励磁制御系

アナログシミュレータ上に構成された各ユニットの励磁制御系を図 4.2 から図 4.5 に示す。ユニット1とユニット4には自励式励磁制御システムが、また、ユニット2とユニット3には他励式励磁制御システムが備えられている。また、各ユニットに設置する電力系統安定化装置（PSS）の組み合わせにより、ユニット1とユニット4にはそれぞれ二通りの PSS パラメータ（図 4.2 における PSS1 と PSS1*、図 4.4 における PSS4 と PSS4*）が用意されている。

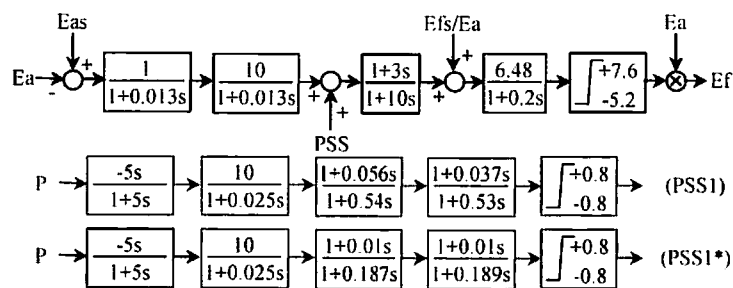


図 4.2 ユニット1の励磁制御系

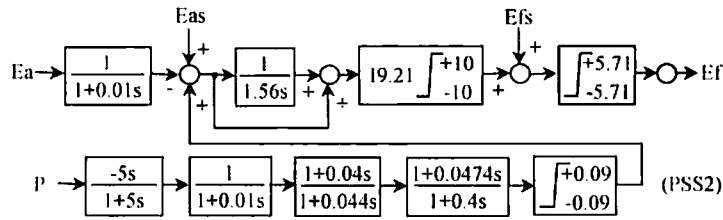


図 4.3 ユニット 2 の励磁制御系

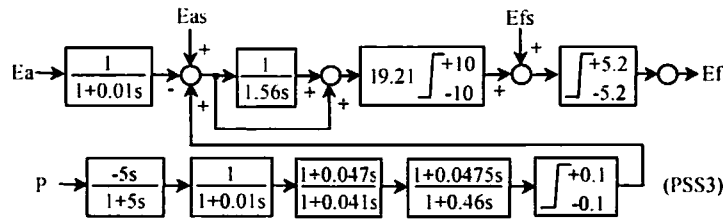


図 4.4 ユニット 3 の励磁制御系

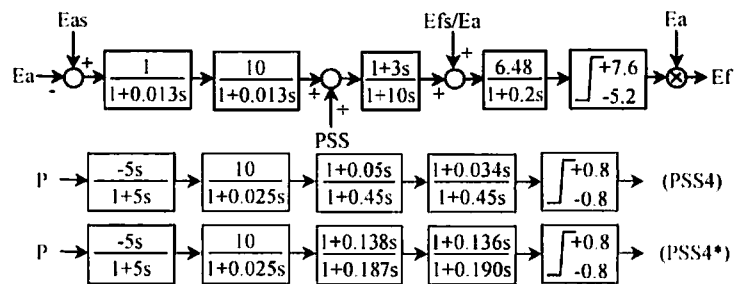


図 4.5 ユニット 4 の励磁制御系

4.3.2 可変速発電機の励磁制御系

可変速発電機の交流励磁制御系を図 4.6 に示す。図中に、 M_a と ω_c は交流励磁電圧の大きさ指令値と角周波数指令値であり、交流励磁装置であるサイクロコンバータあるいは PWM 型インバータに入力される。

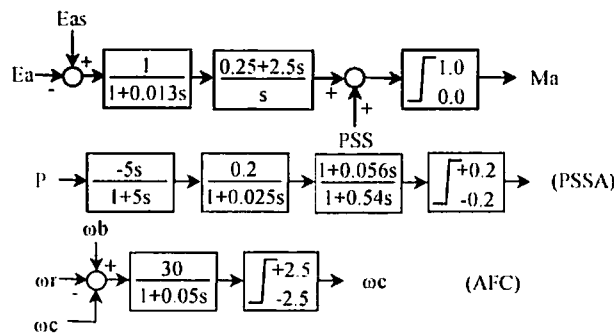


図 4.6 可変速発電機の励磁制御系

また、アナログシミュレータ試験において、ユニット1として
いる同期発電機あるいは可変速発電機の励磁制御系にファジー論
理型制御方式を採用した場合についても検証している。

4.3.3 ファジー論理型励磁制御系

これまで通常の同期発電機を対象としてその有効性の検証を進
めてきたファジー論理型励磁制御を交流励磁制御部に採用した場
合の効果について検証するために、ファジー論理型励磁制御装置
(FLAVR+FLPSS)を用いた交流励磁制御系を構成している。

可変速発電機の動作状態は図 4.7 に示す位相平面上の点 $p(k)$
として与えられる。定常状態での動作点は図中の原点 O となる。
なお、発電機動作点は位相平面極座標情報により以下の式 (4.1)
で与えられる。

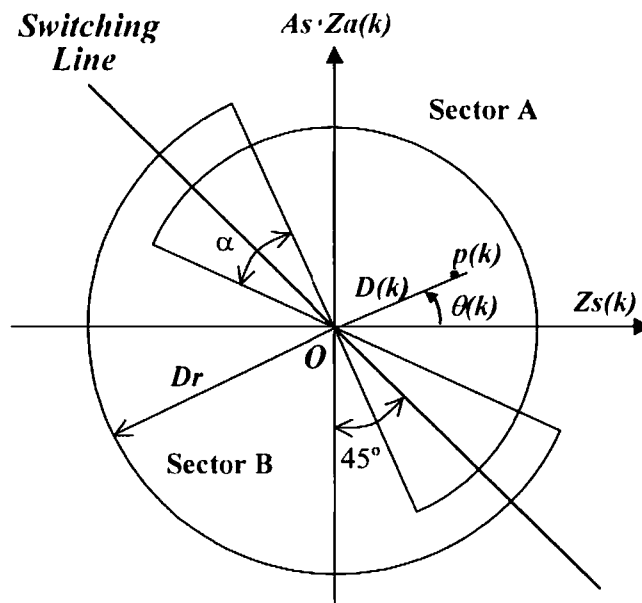


図 4.7 位相平面図

$$D(k) = \sqrt{Zs(k)^2 + (As \cdot Za(k))^2} \quad (4.1)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}(As \cdot Za(k) / Zs(k))$$

ただし、ファジー論理型 PSS (FLPSS)では、 $Za(k)$ は角加速度情
報を表し、 $Zs(k)$ は角速度偏差情報を表しており、それぞれ制御対

象発電機の有効出力信号よりフィルタリングにより導出される。また、ファジー論理型 AVR (FLAVR) では $Z_a(k)$ は発電機端子電圧偏差の微分情報を表し、 $Z_s(k)$ は発電機端子電圧偏差情報を表している。なお、 A_s は $Z_a(k)$ に対するスケール係数であり、可変パラメータである。

図 4.7 に示す位相平面は切り替え線 (Switching Line) により 2 つの領域に分けられる。FLPSS では、図中、Sector A は減速制御領域であり、Sector B は加速制御領域である。これらの領域は重なり角 α を有している。これらの領域は台形型メンバーシップ関数を用いて図 4.8 のように表現することができる。図において、減速制御領域はメンバーシップ関数 $N(\theta(k))$ 、加速制御領域はメンバーシップ関数 $P(\theta(k))$ で表されている。ただし、図 4.8 では重なり角 $\alpha = 90^\circ$ としている。図 4.9 に距離に関するメンバーシップ関数を示す。これらのメンバーシップ関数により FLPSS 制御信号 $U(k)$ は式 (4-2) で与えられる。

$$\begin{aligned}
 U(k) &= \frac{N(\theta(k)) - P(\theta(k))}{N(\theta(k)) + P(\theta(k))} \cdot G(D(k)) \cdot U_{\max} \\
 &= [2N(\theta(k)) - 1] \cdot G(D(k)) \cdot U_{\max}
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

ただし、 U_{\max} は制御信号の最大値を表す。

FLAVR において、Sector A は励磁電圧を上げる領域であり、Sector B は励磁電圧を下げる領域である。FLAVR の電圧制御信号が FLPSS と同様に式 (4-2) で導出される。

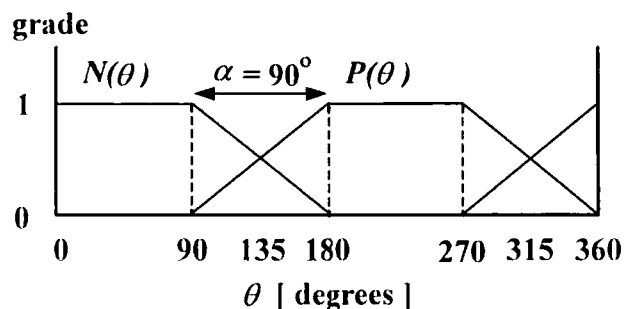


図 4.8 位相角 θ に関するメンバーシップ関数

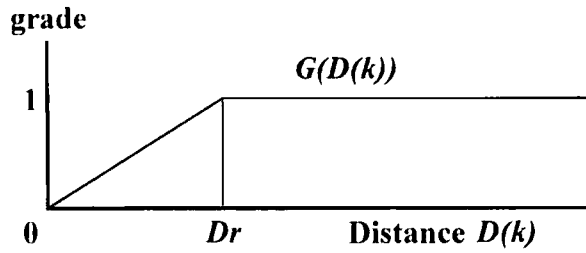


図 4.9 距離に関するメンバシップ関数

構成したファジィ論理型交流励磁制御系のブロックを図 4.10 に示す。FLAVR は、従来の AVR の機能を有するものである。入力信号として発電機端子電圧 V_t を入力し、基準電圧 V_{to} との差をとることで、端子電圧偏差情報および端子電圧偏差の時間微分情報が算出され、これら二つの情報を用いてファジィ制御則に従い電圧制御信号 U_v を得ている。FLPSS は、従来の PSS 機能を有するものであり、入力信号として発電機有効出力 P_e を用い、リセットフィルタ、積分器、リセットフィルタを通すことにより発電機角加速度情報 Z_a 、発電機角速度偏差情報 Z_s を求め、ファジィ制御則に従い発電機動揺抑制のための制御信号 U_d を算出している。電圧制御信号 U_v と PSS 信号 U_d により交流励磁電圧の大きさ指令値 Ma を決定している。なお、AFR は通常型と同様としている。

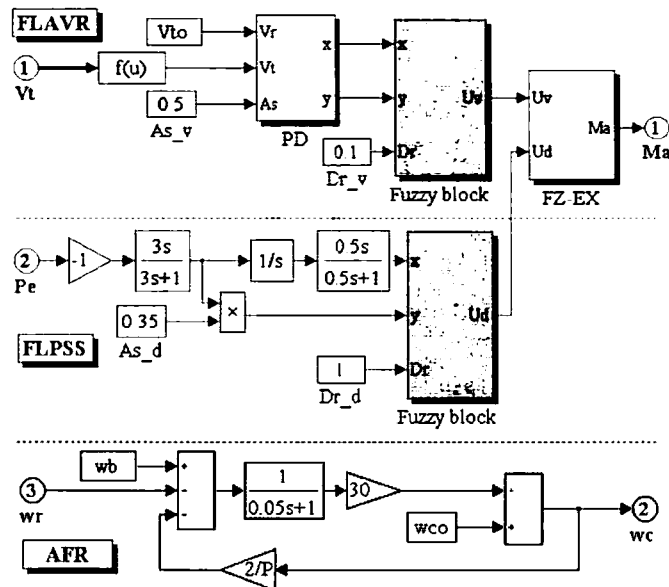


図 4.10 ファジィ論理型交流励磁制御系

4.4. シミュレーション結果とその検討

図 4.11 に可変速発電機モジュールのアナログシミュレータへの接続方式を示す。図に示されるように、アナログシミュレータとの接続点での三相瞬時値電圧信号 V_a 、 V_b 、 V_c は AD 変換により可変速発電機モジュールに入力され、可変速発電機の三相瞬時値電機子電流信号 I_a 、 I_b 、 I_c は DA 変換を介して電流指示値として電流アンプに入力されアナログシミュレータに電流を注入することになる。また可変速発電機の系統への投入に際しては、発電機端子電圧と系統側電圧の位相の比較により同期投入を可能としている。図 4.12 に九州電力(株)総合研究所におけるアナログシミュレータ試験時の外観写真を示す。

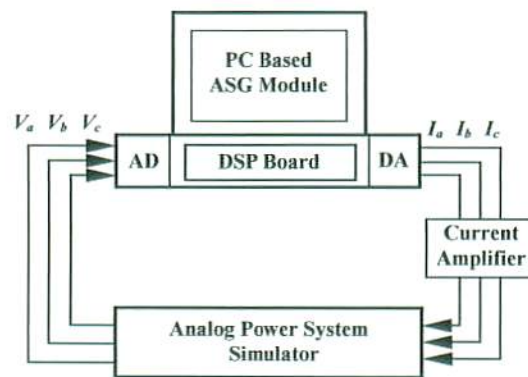


図 4.11 可変速機モジュールとアナログシミュレータの接続



図 4.12 アナログシミュレータ試験の写真

シミュレータ試験での各ユニットのPSS設置状況を表4.1に示す。ここで、PSS1、PSS1*、PSS2、PSS3、PSS4、PSS4*、および、PSSAは図4.2から図4.6に示す通常型PSSであり、FLPSSはファジー論理型PSSである。また、同期発電機ユニット1と置き換える可変速発電機は同期発電機ユニット1と同じ容量に設定している。

表 4.1 PSSの設置状況

Case	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4
1	PSS1	PSS2	PSS3	PSS4
2	PSS1*	-	-	PSS4*
3	PSS1*	-	-	-
4	FLPSS	PSS2	PSS3	PSS4
5	FLPSS	-	-	PSS4*
6	FLPSS	-	-	-
7	PSSA	PSS2	PSS3	PSS4
8	PSSA	-	-	PSS4*
9	PSSA	-	-	-
10	FLPSS	PSS2	PSS3	PSS4
11	FLPSS	-	-	PSS4*
12	FLPSS	-	-	-

図4.13に可変速発電機モジュールをアナログシミュレータに同期投入した時の応答波形を示す。図中、上から可変速発電機有効電力、図4.1におけるB点での潮流、可変速発電機端子電圧、B点での電圧および系統周波数を示している。この場合、交流励磁装置としてはサイクロコンバータを採用している。図に示されるように、可変速発電機モジュールは大きな動揺を誘起することなくアナログシミュレータに同期投入されていることが分かる。

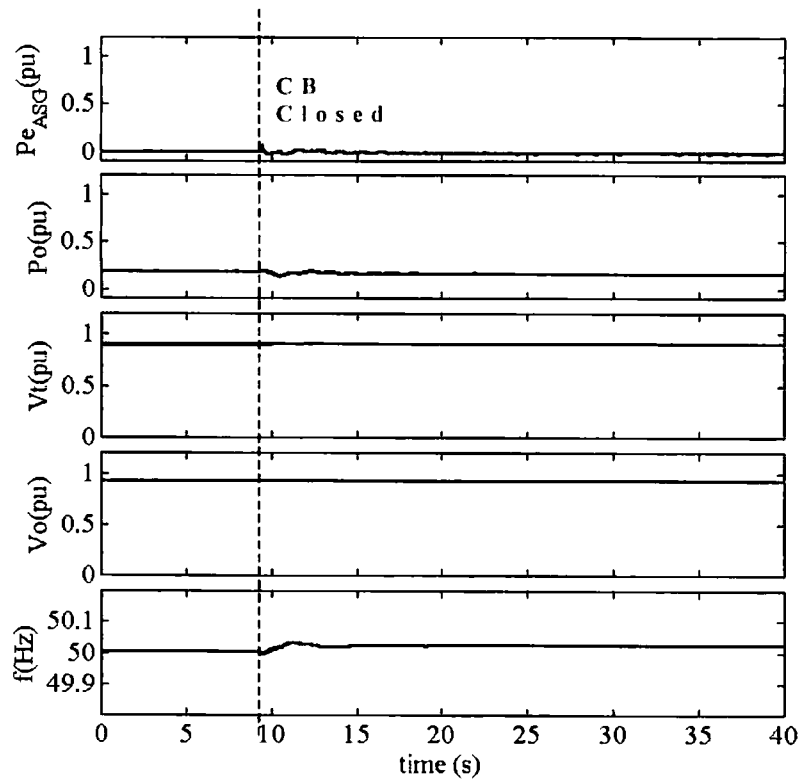
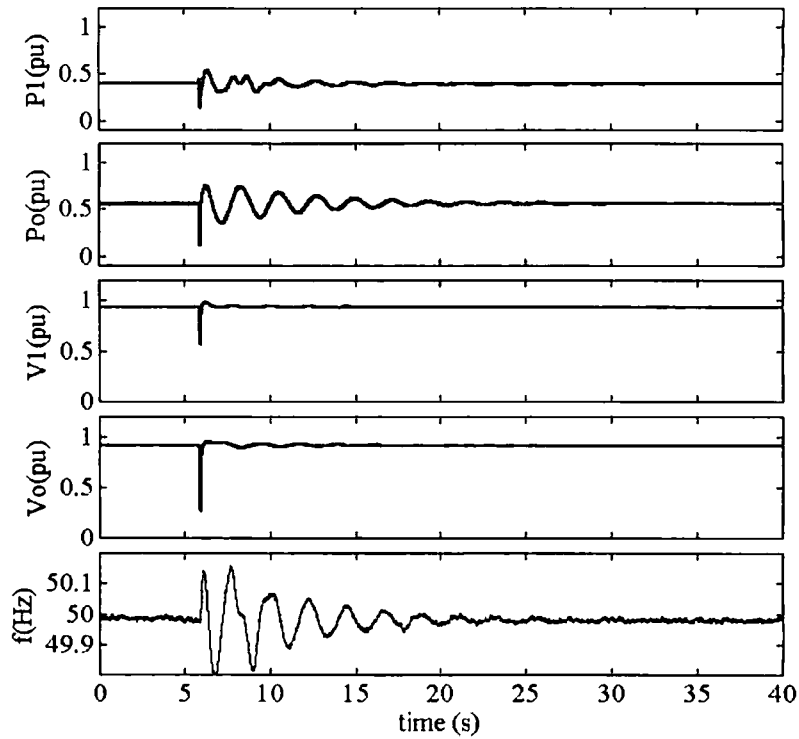


図 4.13 同期投入時の可変速発電機の応答波形

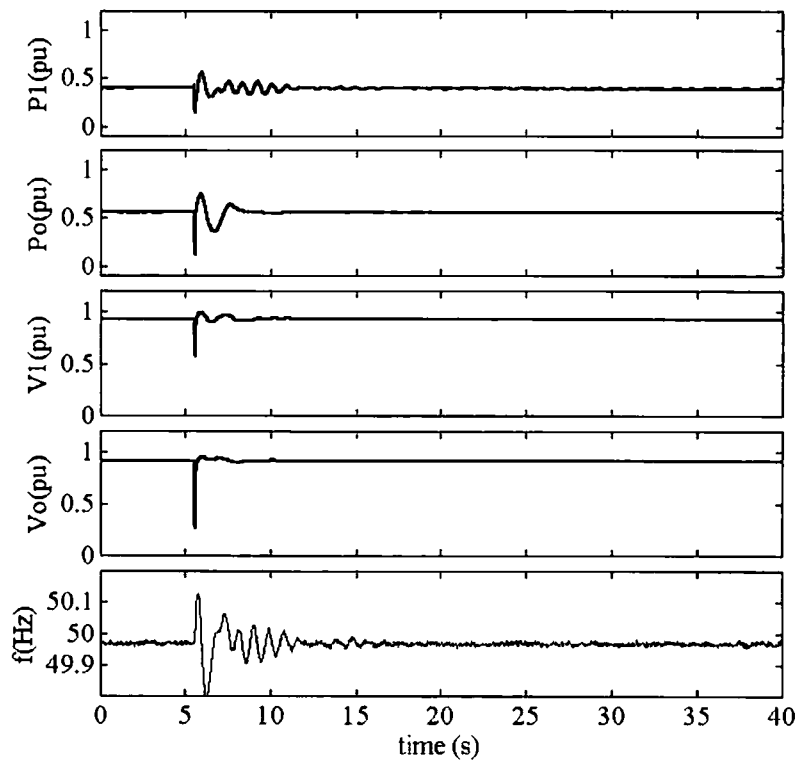
図 4.14 と図 4.15 にケース 1 とケース 4 の PSS 設置状況での同期発電機ユニット 1 の応答波形を示す。ただし、同期発電機ユニット 1 の出力設定は 0.4 pu としている。図中、上からは同期発電機ユニット 1 の有効電力、B 点での潮流、同期発電機ユニット 1 の端子電圧、B 点での電圧および系統周波数を示す。

図 4.14 に示されるように事故後例題系統におよそ 0.45 Hz の広域動揺が観測されるのに対し、同期発電機ユニット 1 にファジー論理型 PSS を設置した場合、図 4.15 に示すように広域動揺が大きく抑えられていることが分かる。



Unit 1: SG Unit, Output Setting: 0.4 pu
 Unit 1 - Unit 4: AVR+CPSS

図 4.14 ケース 1における SGユニット 1の 応答 波形



Unit 1: AVR+FLPSS
 Unit 2 - Unit 4: AVR+CPSS

図 4.15 ケース 4における SGユニット 1の 応答 波形

図 4.16 と図 4.17 に ケース 7 と ケース 10 (同期発電機ユニット 1 を同じ容量の可変速発電機ユニット 1 に置き換えた場合) における可変速発電機ユニット 1 の応答波形を示す。図中、上からは可変速発電機ユニット 1 の有効電力、B 点での潮流、可変速発電機ユニット 1 の端子電圧、B 点での電圧と系統周波数を示す。図 4.14 の同期発電機ユニット 1 の応答波形と比べると、図 4.16 では、およそ 1 Hz のローカルモードがはっきり見られるが、広域動揺があまり現れていない。また事故後の動揺の減衰特性も優れている。従って、同期発電機ユニット 1 を可変速発電機ユニット 1 に置き換えることによりシステムの安定性が大幅に改善されていることが分かる。

また、図 4.17 に示されるように、可変速発電機ユニット 1 の通常型励磁制御系をファジー論理型励磁制御系に移行することにより、システムの安定性がさらに改善されることが明らかとなった。

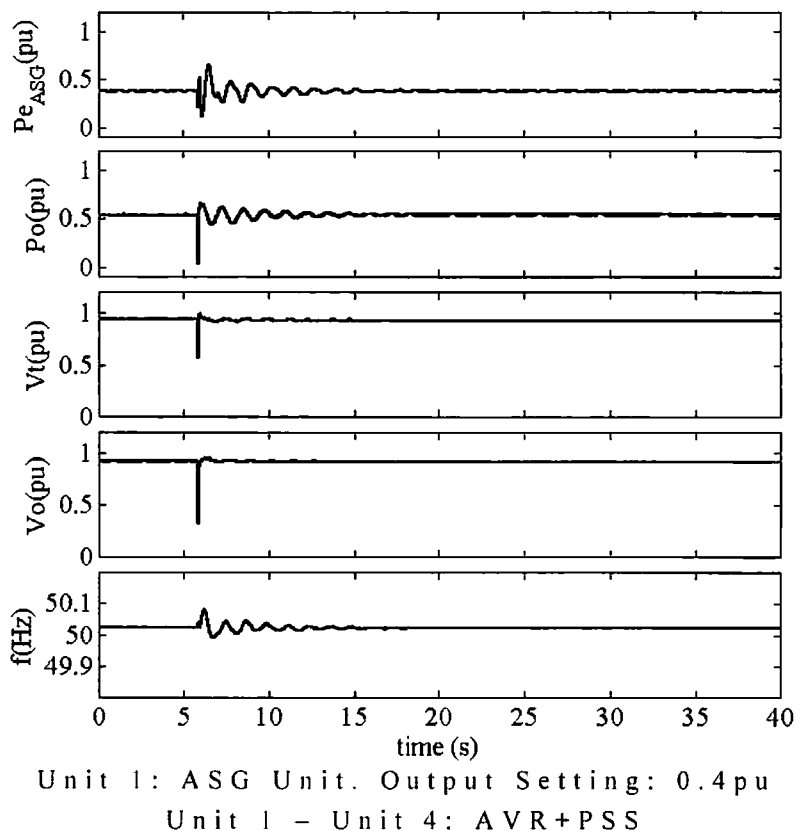
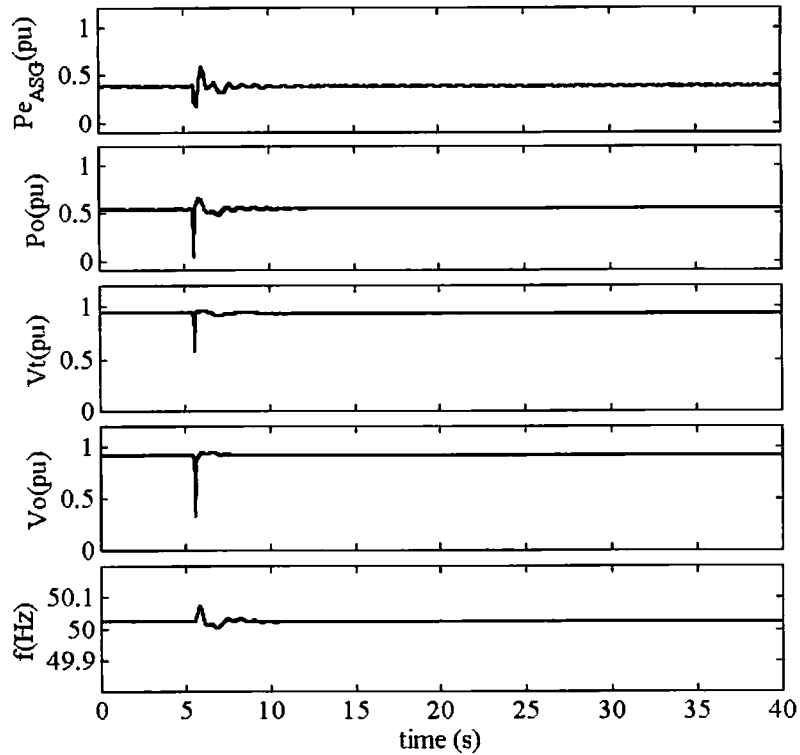


図 4.16 ケース 7 における ASG ユニット 1 の応答波形



Unit 1: ASG Unit, Output Setting: 0.4 pu

Unit 1: FAVR+FLPSS, Unit 2 - Unit 4: AVR+PSS

図 4.17 ケース 10における ASG ユニット 1 の応答波形

また、各ケースにおけるシミュレーション結果において、同期発電機ユニット 1 を可変速発電機ユニット 1 に置き換えた場合に系統周波数の変動がずいぶん小さくなることから、可変速発電機が優れた周波数制御機能を有していることも明らかとなった。

図 4.18 に同期発電機 (SG) ユニット 1 と可変速発電機 (ASG) ユニット 1 の安定限界極限電力を示す。図に示される通り、同じ励磁制御方式の場合、可変速発電機ユニット 1 の安定限界極限電力は同期発電機ユニット 1 のそれと比較して非常に大きくなっているといえる。また、同期発電機ユニット 1 と可変速発電機ユニット 1 のどちらに対しても、ファジー論理型励磁制御方式を採用した場合に系統の安定性が大幅に改善されることが分かる。

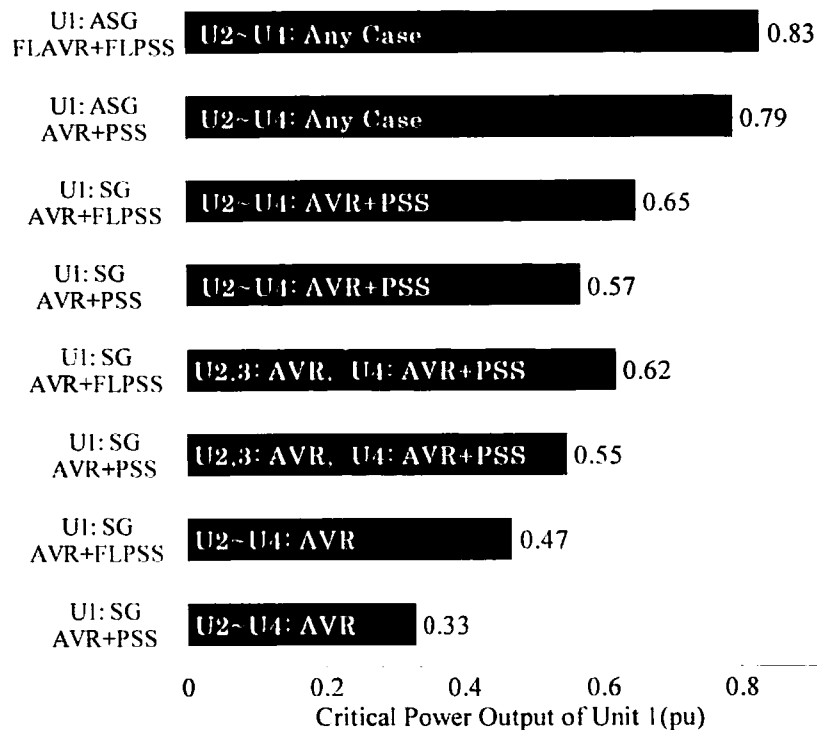


図 4.18 ユニット 1 の限界極限電力

本章で示す可変速発電機ユニット 1 に対するシミュレーション結果はすべてサイクロコンバータを交流励磁装置として使用した場合の結果であるが、PWM 型インバータを用いた場合にも同様な結果が得られている。

4.5. まとめ

九州電力(株)総合研究所にあるアナログシミュレータ上に構成したくし型四機無限大母線系統を例題系統として、パーソナルコンピュータ上に構成した可変速発電機モジュールとの並列実時間シミュレーションを行い、系統への可変速発電機導入後の安定度向上効果を実験的に検証した。想定したすべてのケースにおいて、可変速発電機導入により例題系統の安定性が大幅に改善されることが明らかになった。また、可変速発電機の交流励磁制御部を通常型励磁制御からファジー論理型励磁制御に変更した場合の有効

性についても明らかにしている。すなわち、ファジー論理型交流励磁制御を行うことにより、可変速発電機の安定性がさらに改善されることが明らかとなった。

第5章 ECSを用いた単独システムの自動発電制御

5.1. はじめに

近年、自然エネルギーを利用する分散電源、例えば、太陽光発電、風力発電などのシステムへの導入が進みつつある。これらの分散電源の問題点としてはその発電電力が気象条件左右されることがあげられる。そのため、他の分散電源さらには電力貯蔵装置と組み合わせた複合型運用方式が検討されている⁽¹⁹⁾⁻⁽²⁶⁾。本研究では、離島などに代表される単独システムにおけるこれらの分散電源を用いた自動発電制御⁽²⁷⁾⁻⁽²⁸⁾(AGC: Automatic Generation Control)に関する検討を行っている。さらに、広域にわたって分散配置されているこれらの分散電源の協調制御を実現するために、コンピュータネットワークを介して各種情報の授受を行うマルチエージェントシステムの適用に関してその予備検討をも行っている。すなわち、単独システム内に分散配置された各種分散電源からの出力情報、周波数変動情報は実際のコンピュータネットワークを介して伝送されるのではなく、その代わりに、遅延時間設定ブロックを使うことで、情報の伝送遅延時間を模擬して、シミュレーションを行っている。この場合、遅延時間設定ブロックで情報の伝送遅延時間を自由に設定できるため、情報伝送遅延時間が制御性能に及ぼす影響について把握することができる。本章では、簡単な例題システムを対象として、1台のコンピュータ上でシミュレーションを実施し、従来型自動発電制御方式と比べ、提案するECSを用いた自動発電制御方式⁽³⁵⁾の有効性を検証している。また、提案する自動発電制御方式において、情報伝送遅延時間が制御性能に及ぼす影響について明らかにしている。なおシミュレーションに際しては、Matlab/SimulinkおよびPower System Blockset環境下で構成した三相瞬時値ベースの単独システムモデルを使用している。

5.2. 例題系統

本章では、情報伝送遅延時間が単独系統における AGC 制御性能に及ぼす影響について調べるために、図 5.1 に示すディーゼル発電ユニット、可変発電ユニット（風力発電ユニットや太陽光発電ユニットなどの出力が気象条件に左右されるため任意の出力調整が不可能であるユニット）、電力貯蔵装置（ECS: Energy Capacitor System）、固定負荷と可変負荷などから構成した小規模単独系統を例題系統として考えている。例題系統の各部分の定数は表 5.1 に示している。

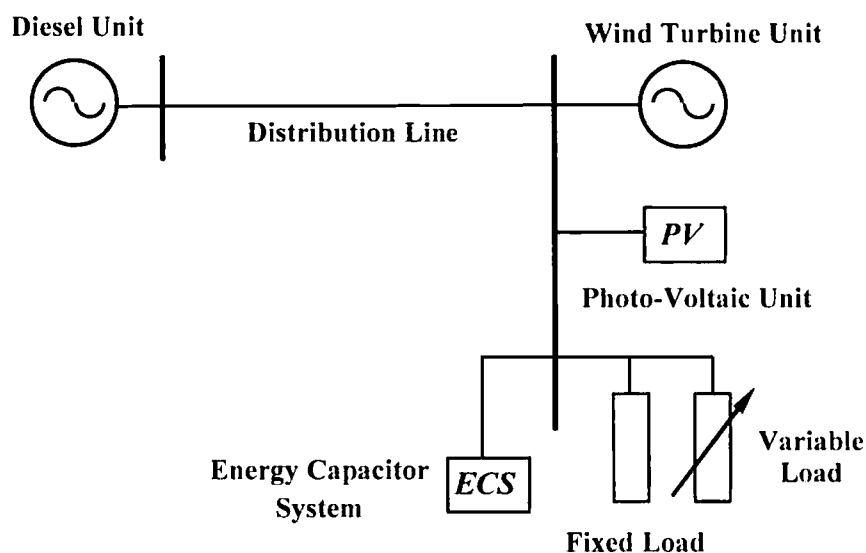


図 5.1 単独系統の構成

表 5.1 例題系統の定数

	定格値
太陽光発電システム出力	100 kW
風力発電システム出力	300 kW
ディーゼル発電システム出力	1000 kW
ECS 充放電電力	最大 300 kW
ECS 貯蔵電力量	3.0 kWh
固定負荷	500 kW
可変負荷	0-250 kW

5.2.1 太陽光発電システム

太陽エネルギーは無尽蔵に利用できる無償のエネルギー資源であり、太陽電池の構成材料として主に用いられているシリコンも資源量が豊富である。また、太陽光発電は光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため、タービンや発電機のような可動部分がなく、騒音も排ガスもないクリーンエネルギーである。さらに必要な電力がその場で発電できるという利点を有している。一方、問題点として、光が当たっている時だけしか発電しない、気象変化により出力が変動する、発電コストが高価であることなどが挙げられる。

5.2.2 風力発電システム

風力エネルギーは太陽エネルギー同様に無償のエネルギー資源である。風車のブレードが風を受けることにより生じた回転運動は、増速機で一定の回転数に上げられ、その動力で発電を行う。風車は常に風の吹いてくる方向に向き、ブレードの可変ピッチの制御によって風の運動エネルギーを最大限に受け取れる仕組みとなっている。また、台風等で風が強すぎるときは、可変ピッチの制御によりブレードと風の角度を0度とし、風車が回転しないようにする。風力発電は、風のエネルギーの約40%を電気エネルギーに変換できるなど効率性にも優れ、また規模のメリットが働くため、大型化すれば発電コストの低減も期待できる。しかし、風のないところでは発電できない、風力のエネルギー密度が小さい、風の不規則性・間欠性、また発電中に風切り音の騒音問題などデメリットがある。

5.2.3 ディーゼル発電システム

ディーゼル発電システムは起動・停止に要する時間が数分程度と短く、負荷の応答性が良いこと、出力に対して軽量・小型かつ

信頼性が高いこと、熱効率が良く取り扱いも簡単であるなどの特長がある。ディーゼルエンジン（圧縮点火エンジン）は、ガソリンエンジンと同様にシリンダ内部で燃料を燃焼させる内燃機関であり、現在、自動車用、船舶用などで幅広く使われている。このエンジンはガソリンエンジンと異なり、初めに空気だけをシリンダ内に吸い込み、これを断熱圧縮させて温度を上昇させる。そこへ霧状の燃料を噴射すると、自動的に着火して燃焼し、駆動力を発生する。このエンジンの特徴として、燃料に安価な軽油や重油が使用できて経済的であることがあげられる。しかし、シリンダ内の最高圧力が高いため、振動・騒音が大きく、重量が増えるなどの問題点もある。

5.2.4 電力貯蔵装置 ECS

ECSとは Enregy Capacitor System の略で、エネルギー密度の高い電気二重層キャパシタと電子装置（電子回路）から構成される新しい電気エネルギー貯蔵装置である。ECSは交直変換器を介して外部システムにつながっている。パーソナルコンピュータからの充放電制御信号を交直変換器に入力することによって ECS の充電・放電の切り替えや、充放電電力の切り替えの制御を高速に行うことが可能となっている。

5.3. 自動発電制御

5.3.1 ディーゼル発電ユニットによる通常型 AGC

通常型 AGC 方式では、ディーゼル発電ユニットの周波数によりディーゼル発電ユニットの出力を調整することになる。図 5.2 に PI 制御方式を採用した通常型 AGC 制御系の構成を示している。図中に、 $\Delta\omega$ はディーゼル発電ユニットの角周波数偏差、 P_m はディーゼル発電ユニットの出力設定値である。

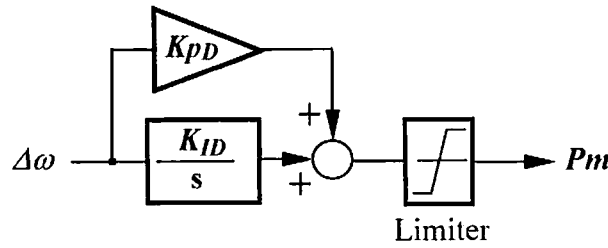


図 5.2 ディーゼルユニットによる AGC 制御系

5.3.2 ECS とディーゼルユニットとの協調型 AGC

本章で提案する AGC 方式は、ECS とディーゼル発電ユニットとの協調型 AGC である。図 5.3 に ECS の充放電制御部の基本構成を示す。図中、 $\Delta\omega$ はディーゼル発電ユニットの角周波数偏差、 PS_{ECS} は ECS の充放電電力の設定値、 T_{delay} は情報伝送遅延時間の設定値である。図 5.2 に示すディーゼル発電ユニットによる AGC 制御系と比べ、遅延時間設定ブロックのほかに構成が同じである。なぜ遅延時間設定ブロックが必要かと言うと、ECS はディーゼル発電ユニットと違う場所に設置されており、ディーゼル発電ユニットの角周波数偏差情報 $\Delta\omega$ を ECS に伝送するのに遅延時間が必ず存在するためである。

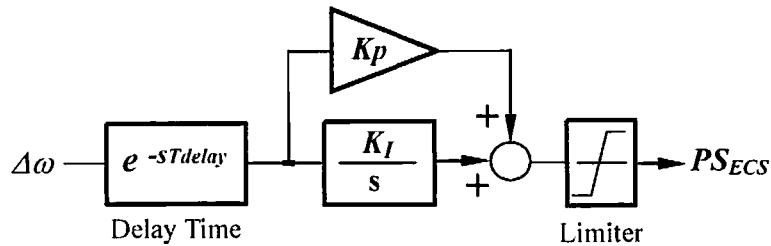


図 5.3 ECS の充放電制御

図 5.3 に示すように、ディーゼル発電ユニットで観測される角周波数偏差による ECS の高速充放電制御により、太陽光発電システムの出力量変動、風力発電システムの出力量変動および負荷の消費電力の変動成分を吸収し、系統周波数を定格値に維持することができる。また、ディーゼル発電ユニットに比べ、ECS は高速充放

電できるため、自動発電制御に優れた性能を有すると考えられる。しかしながら、本研究では、小容量の ECS を考えており、ECS の貯蔵電力量には限りがあるため、長時間にわたる放電制御は実行不可能である。この問題を解決するために、ディーゼル発電ユニットの出力調整による ECS 貯蔵電力残量を常にある範囲に維持するようなバックアップ方式を採用している。すなわち、ECS からの充放電の状況、ECS 貯蔵電力残量に応じてディーゼル発電ユニットの出力調整を実施することになる。

ディーゼル発電ユニットの協調制御系を図 5.4 に示す。ここで、 W_r は ECS 貯蔵電力量の目標値、 W_{ECS} は ECS 貯蔵電力量の現在値、 P_{ECS} は ECS の充放電電力、 T_{delay} は情報伝送遅延時間の設定値、 P_m は ECS との協調制御を実現するためのディーゼル発電ユニットの出力設定値である。ECS 側で観測された ECS の貯蔵電力残量情報 W_{ECS} と ECS の充放電電力情報 P_{ECS} によるディーゼル発電ユニットの出力調整を行うことにより、ECS の貯蔵電力量をある範囲内に維持することができる。

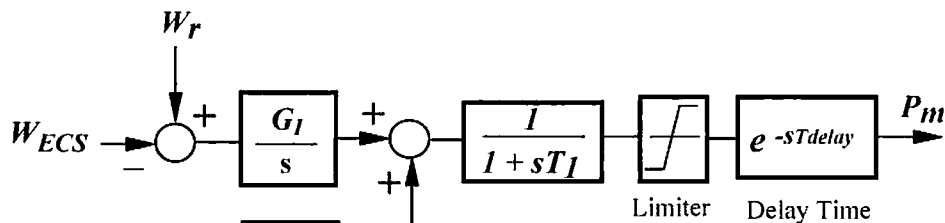


図 5.4 ディーゼルユニット協調制御系

5.4. 例題システムのモデリング

本章で提案する協調型 AGC を実施した場合に情報伝送遅延時間が AGC 制御性能に及ぼす影響を調べるために、例題システムモデルを一台の PC 上に構成し実時間シミュレーションを行った。ただし、コンピュータネットワークにより情報伝送遅延時間を図 5.3 および図 5.4 に示す遅延時間ブロックで設定している。図 5.5 に

Matlab/Simulink および Power System Blockset 環境で構成した例題システムの三相瞬時値ベースモデルを示す。

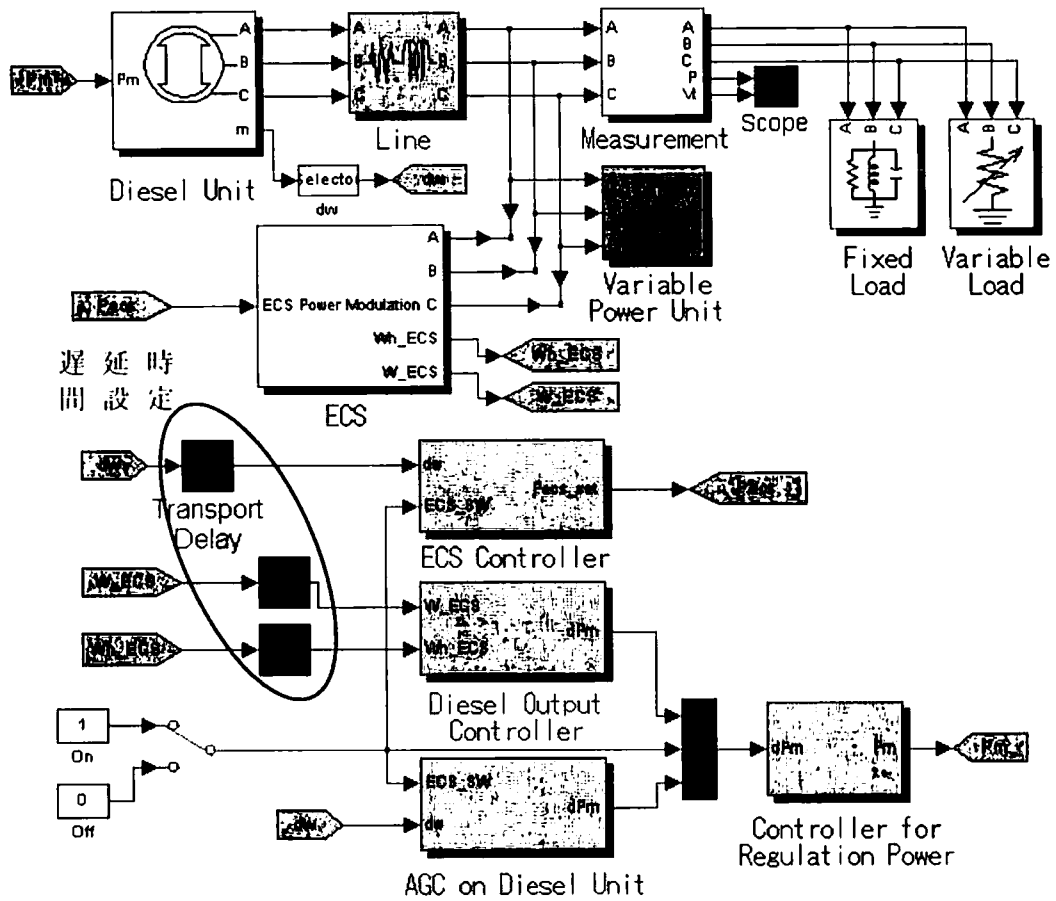


図 5.5 例題システムのモデル

5.4.1 ディーゼル発電機と風力発電機モデル

本論文では、ディーゼル発電機と風力発電機のモデルについては、ともに式(5-1)により同期発電機の三相瞬時値ベース詳細モデルを Matlab/Simulink および Power System Blockset 上で構成している。

$$V = \frac{d}{dt}(L \cdot I) + R \cdot I \quad (5-1)$$

ただし、

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_f \end{bmatrix} \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & & & \\ & R_s & & \\ & & R_s & \\ & & & R_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -L_s & Ms & Ms & M \cdot \cos(\theta) \\ Ms & -L_s & Ms & M \cdot \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ Ms & Ms & -L_s & M \cdot \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ M \cdot \cos(\theta) & M \cdot \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & M \cdot \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & L_r \end{bmatrix}$$

ここで

V_a, V_b, V_c : 発電機電機子相電圧 (V)

V_f : 励磁電圧 (V)

I_a, I_b, I_c : 発電機電機子相電流 (A)

I_f : 励磁電流 (A)

L_s : 固定子自己インダクタンス (H)

L_r : 回転子自己インダクタンス (H)

R_s : 固定子抵抗 (Ω)

R_r : 回転子抵抗 (Ω)

M : 固定子と回転子との最大相互インダクタンス (H)

θ : 固定子と回転子とのなす角 (rad)

5.4.2 風車モデル

風力発電機を駆動する風車のモデルは式(5-2)により構成している。

$$P_w = C_p \cdot V_w^3 \cdot \rho \cdot A / 2 \quad (5-2)$$

ただし、 V_w は風速 (m/s)、 ρ は空気密度、 A は風車の回転断面積、 C_p は出力係数と呼ばれ、式(5-4)で定義される周速比 λ とピッチ角 β の関数式(5-3)になる。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta)\lambda^2 + c_2(\beta)\lambda^3 + c_3(\beta)\lambda^4 \quad (5-3)$$

$$\lambda = R \omega / V_w \quad (5-4)$$

ただし、 R は風車半径、 ω は風車の回転角速度であり、 $c_1(\beta)$ 、 $c_2(\beta)$ 、 $c_3(\beta)$ は式 (5-5) で表される。ここで、 $c_{10} \dots c_{34}$ は定数である。

$$\begin{aligned} c_1(\beta) &= c_{10} + c_{11}\beta + c_{12}\beta^2 + c_{13}\beta^3 + c_{14}\beta^4 \\ c_2(\beta) &= c_{20} + c_{21}\beta + c_{22}\beta^2 + c_{23}\beta^3 + c_{24}\beta^4 \\ c_3(\beta) &= c_{30} + c_{31}\beta + c_{32}\beta^2 + c_{33}\beta^3 + c_{34}\beta^4 \end{aligned} \quad (5-5)$$

上記の式 (5-2) から式 (5-5) を基にして、風車翼のピッチ角 β を制御することにより、風車の出力を定格出力以下に調整することができる。

また、風車の駆動方程式は式 (5-6) で表すことができる。

$$\frac{Jd(\omega^2)}{2dt} = P_w - P_e \quad (5-6)$$

ここで、 J は風車発電機の慣性モーメント、 P_w は風車出力、 P_e は発電機出力である。

5.4.3 太陽光発電システムモデル

本研究では、実時間シミュレーションが行えるように、太陽光発電システムには、太陽電池や直交変換用のインバータなどの詳細モデルを省略し、その交流側の等価回路モデルを使用している。三相電圧 V に日射強度の変動に応じたゲインと時間遅れを乗ずることで三相電圧と同相の三相電流 I_s を算出し系統へ注入している。図 5.6 に Matlab/Simulink を用いて作成した太陽光発電システムモデルを示す。図中、Voltage は太陽光発電システム設置点での三相電圧であり、Current は三相電圧 Voltage に日射強度の変動を表す Insolation を乗じたもので系統に注入する三相電流である。太陽光発電システムの出力 (PV Power) は算出された三相電流と入力された三相電圧を乗ずることで計算される。

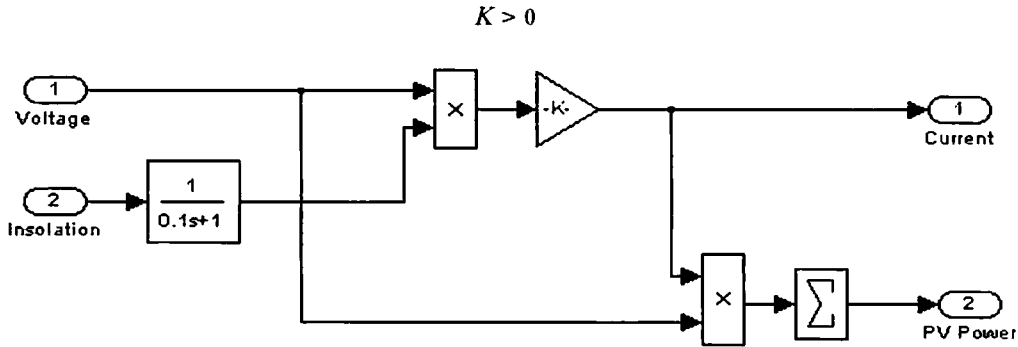
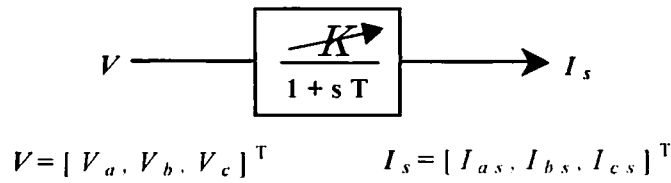


図 5.6 太陽光発電システムブロック図

5.4.4 ECS モデル

ECS システムは、交直変換器と ECS の 2 つに分けられ、交直変換器を介して外部システムにつながっている。パーソナルコンピュータからの充放電制御信号を交直変換器に入力することによって ECS の充放電制御を高速に行うことが可能となっている。本研究では、ECS のモデルについては太陽光発電システムモデルと同様に交流側等価回路モデルを考えている。三相電圧 V に ECS の充放電電力に応じて、充電の場合は負のゲイン、放電の場合は正のゲインを乗ずることで三相電圧と逆相または同相の三相電流 I_s を算出し系統へ注入している。図 5.7 に Matlab/Simulink を用いて作成した ECS モデルを示す。ECS の充放電電力は算出した三相電流と入力された三相電圧を乗ずることで計算される。さらに、この ECS の充放電電力を積分し、初期貯蔵電力量に加算することで ECS の貯蔵電力残量を算出している。

$$V \rightarrow \left[\frac{K}{1+sT} \right] \rightarrow I_s$$

$$V = [V_a, V_b, V_c]^T \quad I_s = [I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^T$$

$K > 0$: 放電

$K < 0$: 充電

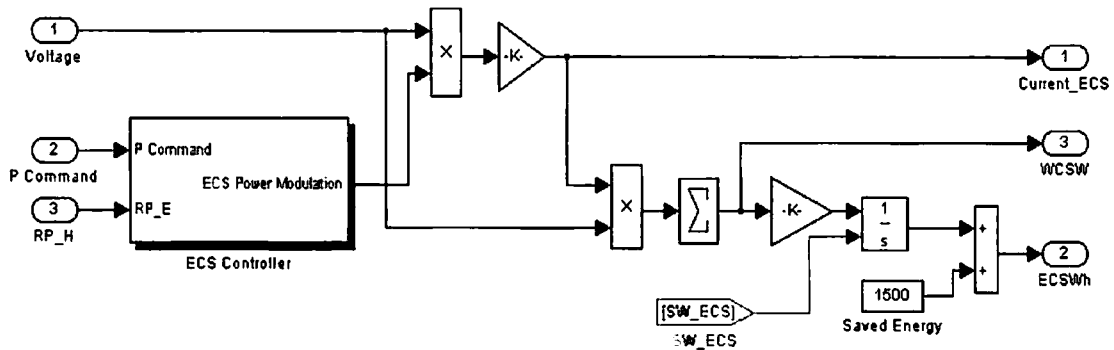


図 5.7 ECS ブロック図

5.5. シミュレーションと結果

例題システムにおいては、ディーゼル発電ユニットの周波数を制御対象として提案する ECS を用いた自動発電制御の有効性を検証するため、可変発電ユニットの出力を変動させることにより、太陽光発電ユニットおよび風力発電ユニットの気象による出力変動を模擬し実時間シミュレーションを実施している。また、比較対象としている従来型ディーゼル発電ユニットのみによる自動発電制御についても実時間シミュレーションを行っている。

5.5.1 通常型 AGC でのシミュレーション結果

図 5.8 から図 5.10 にランダム負荷変動、ランプ負荷変動、周期的負荷変動を想定した場合の通常型 AGC に対するシミュレーション結果を示している。図中の左側、上から風速 (m/s)、風車のピッチ角 (deg.)、負荷電圧 (pu)、負荷電力 (kW) とディーゼル発電ユニット出力 (kW) を、右側に上から風力発電機の出力 (kW)、

太陽光発電ユニット出力 (kW)、ECS 充放電電力 (kW)、ECS の貯蔵電力残量 (kWh) とディーゼル発電ユニットの周波数 (Hz) を示している。これらの応答波形に示されるように、ディーゼル発電ユニットの応答特性上、太陽光発電システム、風力発電システムと可変負荷などの速い変動成分を十分に吸収できないため、システムの周波数には大きな変動 (1Hz ほど) が現れている。

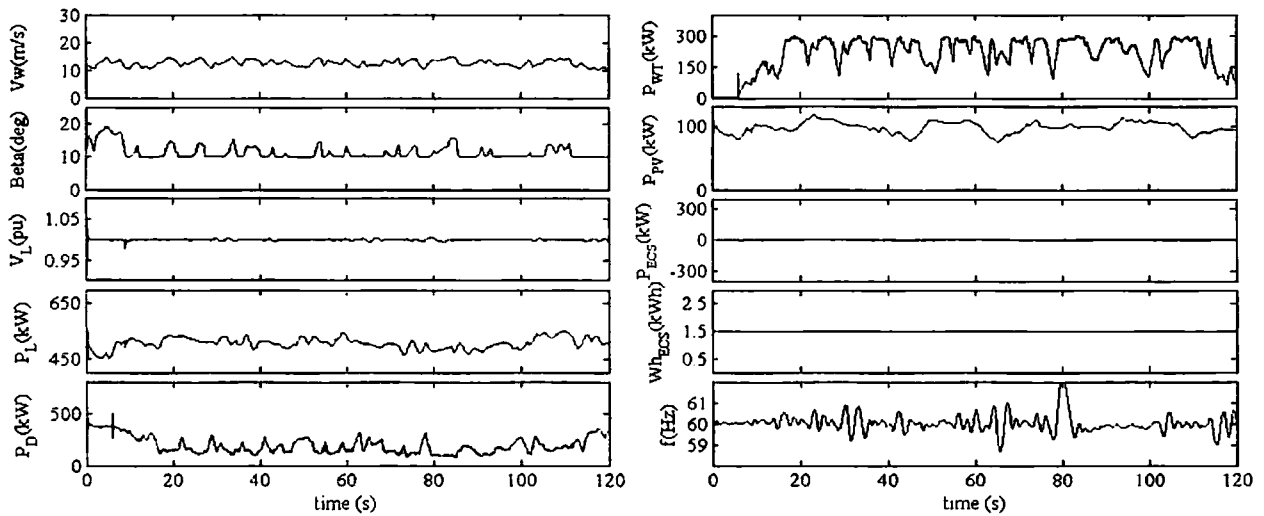


図 5.8 ディーゼルで自動発電制御 (ランダム負荷変動)

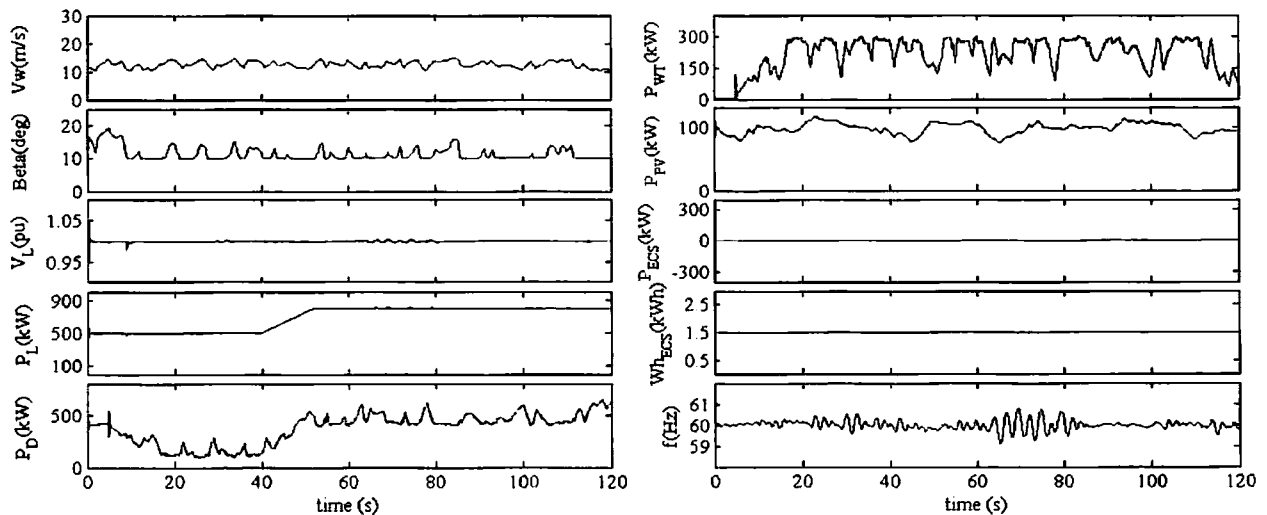


図 5.9 ディーゼルで自動発電制御 (ランプ負荷変動)

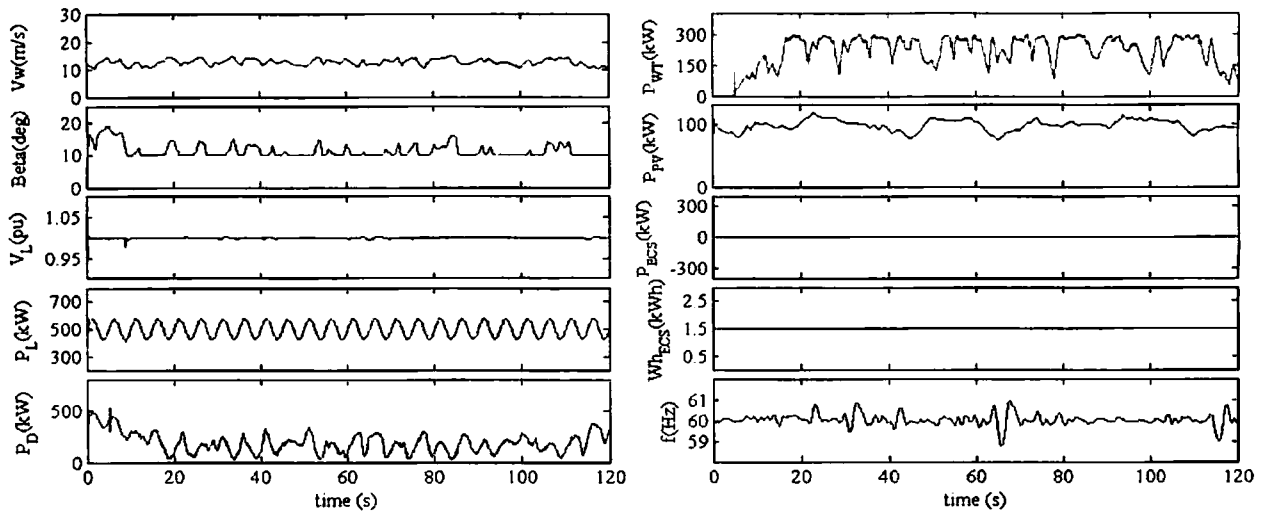


図 5.10 ディーゼルで自動発電制御(周期的負荷変動)

5.5.2 ECSによるAGCでのシミュレーション結果(無遅延)

図 5.11 から図 5.13 にランダム負荷変動、ランプ負荷変動、周期的負荷変動を想定した場合の提案する協調型 AGC に対するシミュレーション結果を示している。ただし、遅延時間設定値を 0 と設定し、ECS はディーゼル発電ユニットと同じ場所に設置されていることになる。この場合、ECS の高速充放電により、系統内の出力変動成分を吸収し、系統の周波数変動を十分に抑制できることが分かる (0.02Hz 以下)。

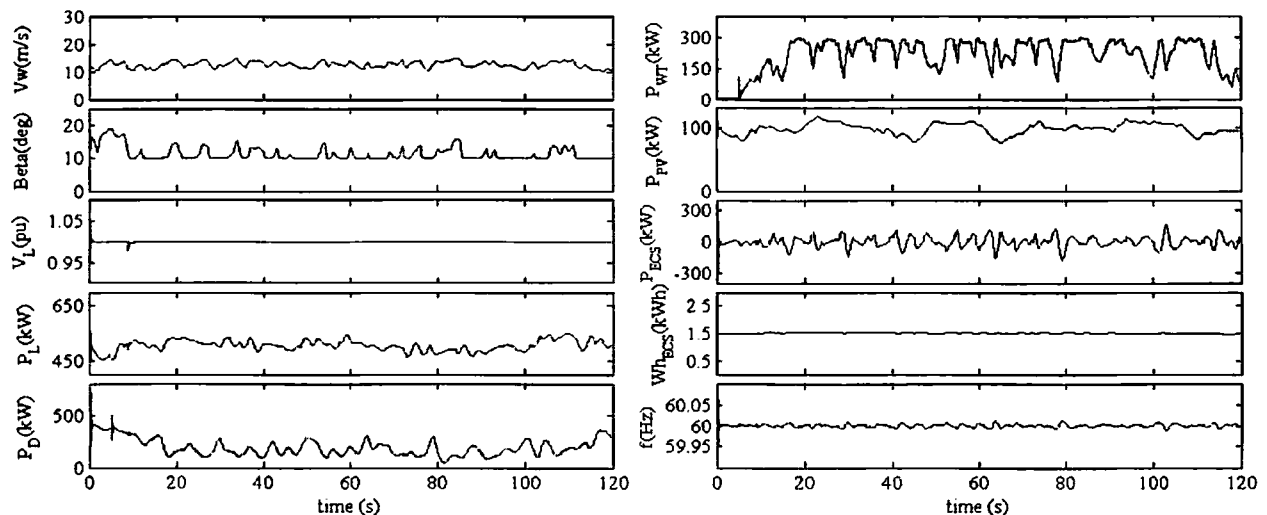


図 5.11 提案方式による自動発電制御(ランダム負荷変動)

$$(K_P = 200, K_I = 10)$$

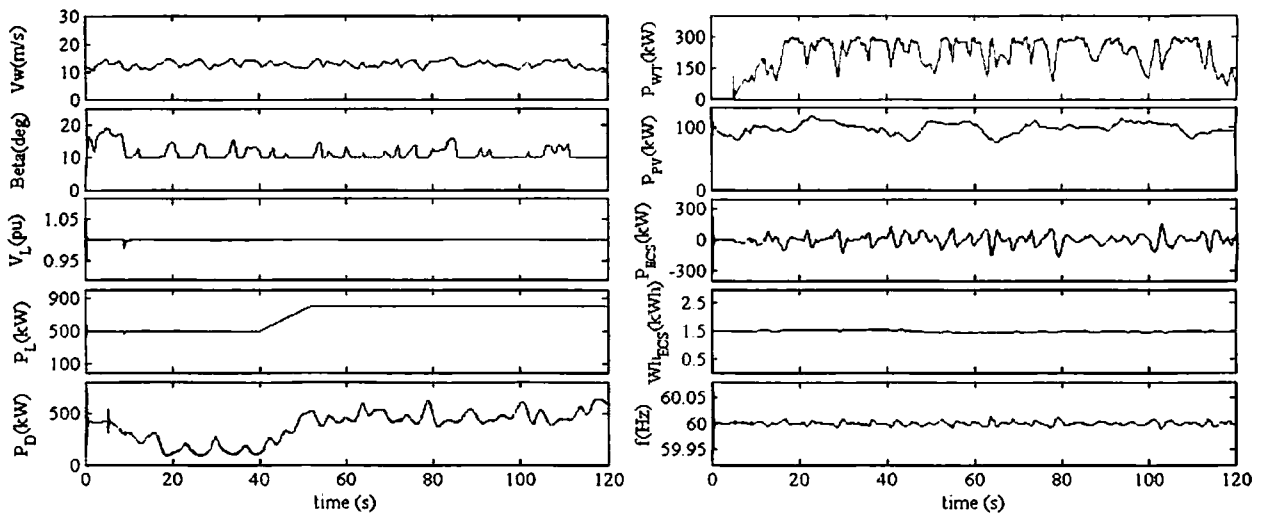


図 5.12 提案方式による自動発電制御(ランプ負荷変動)
 $(K_P = 200, K_I = 10)$

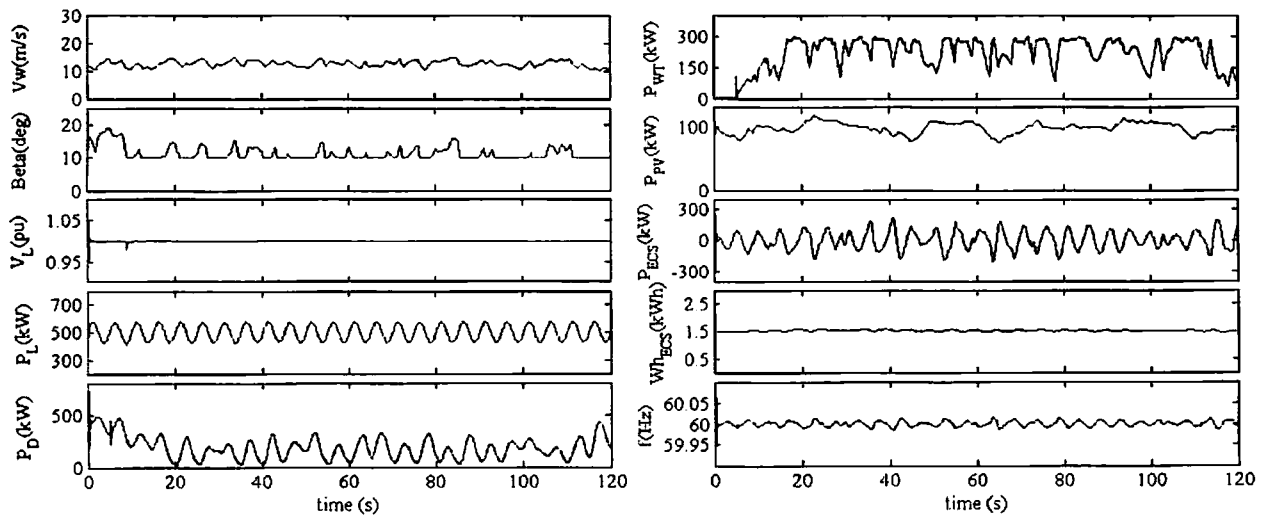


図 5.13 提案方式による自動発電制御(周期的負荷変動)
 $(K_P = 200, K_I = 10)$

5.5.3 ECSによるAGCでのシミュレーション結果(有遅延)

本研究では、情報伝送遅延時間がAGCの制御性能に与える影響について調べるために、例題システムを対象として、遅延時間を10ミリ秒から80ミリ秒まで10ミリ秒ごとに設定し、同様にランダム負荷変動、ランプ負荷変動、周期的負荷変動を想定して実時間

シミュレーションを行った。図 5.14 から図 5.21 にランダム負荷変動を想定した場合のシミュレーション結果を示している。ただし、AGC 制御方式として提案する協調型 AGC を採用している。この場合、遅延時間を大きく設定することは、ECS をディーゼル発電ユニットに遠い場所に設置することと考えられ、ディーゼル発電ユニットの周波数変動情報が ECS の充放電制御部に送られるのに時間がかかり、AGC の制御性能は劣化することになる。これらの応答波形に示されるように、遅延時間は大きくなればなるほど、系統周波数の変動も大きくなっていくことが分かる。

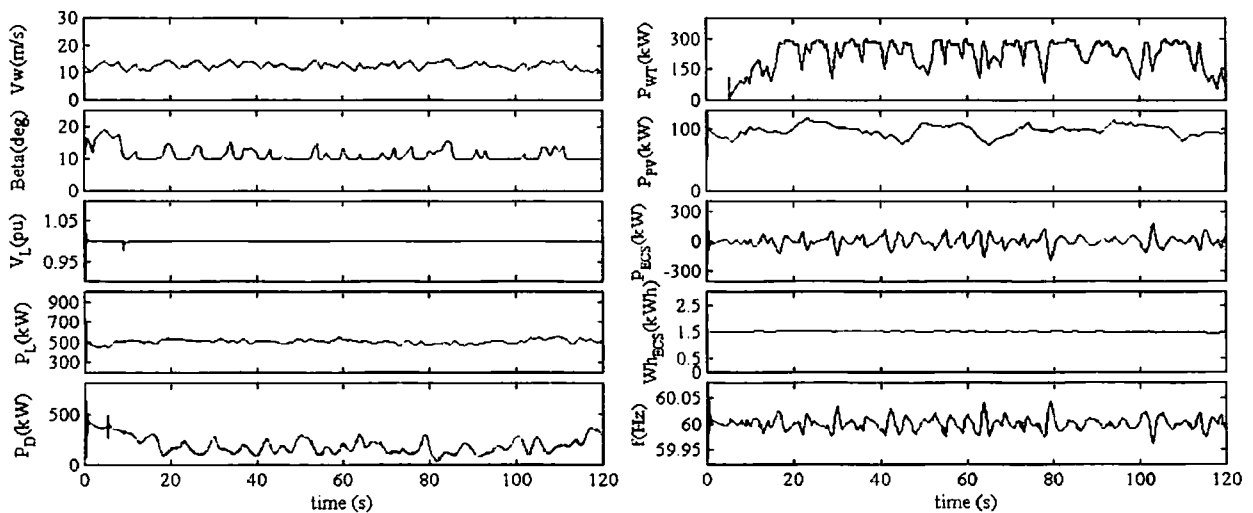


図 5.14 ($T_{delay} = 10 \text{ ms}$, $Kp = 60$, $KI = 10$)

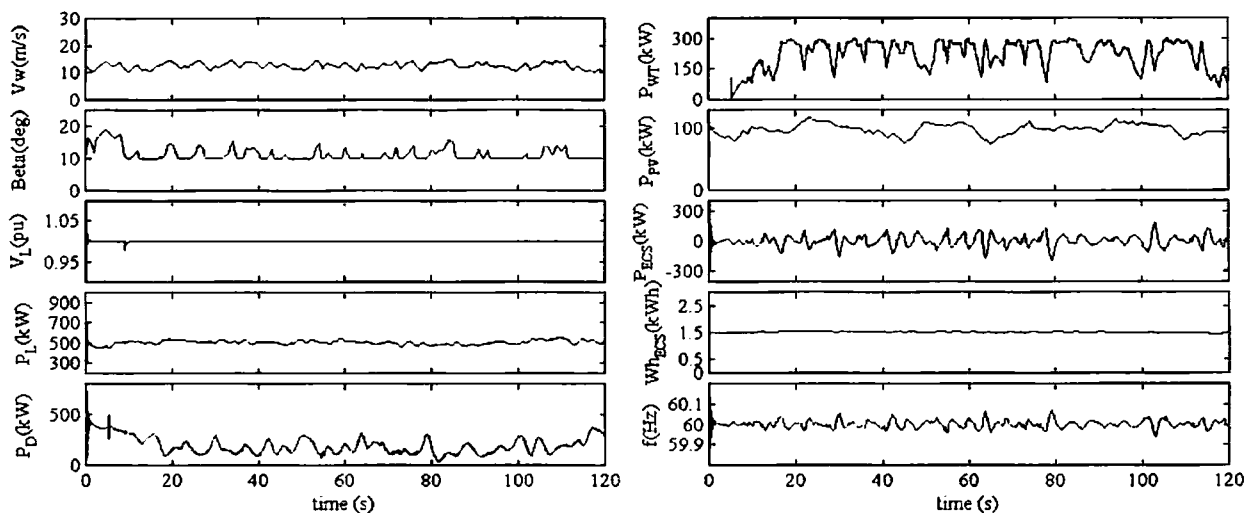
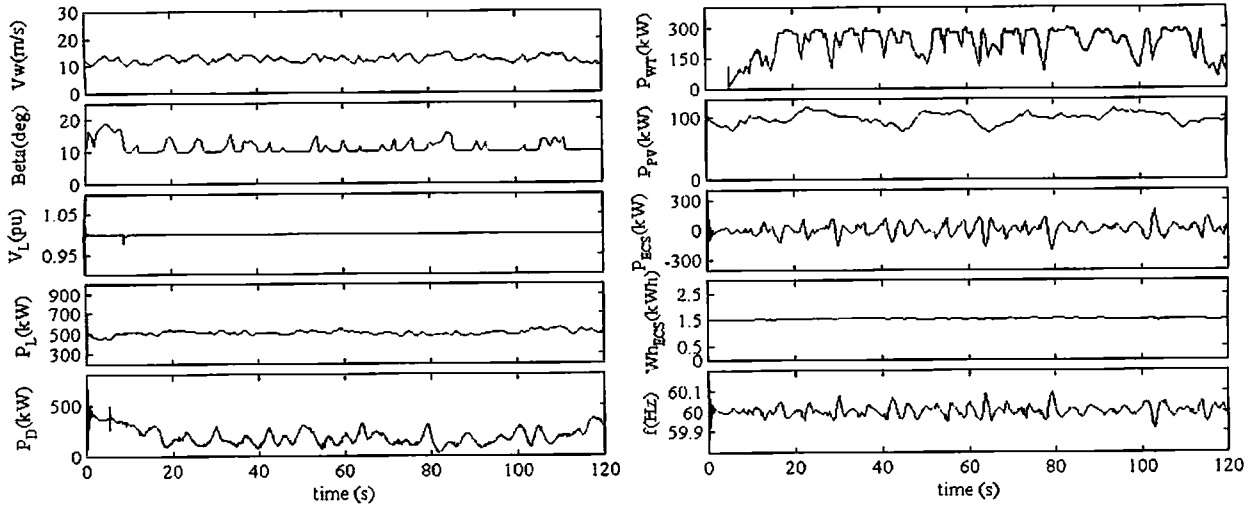
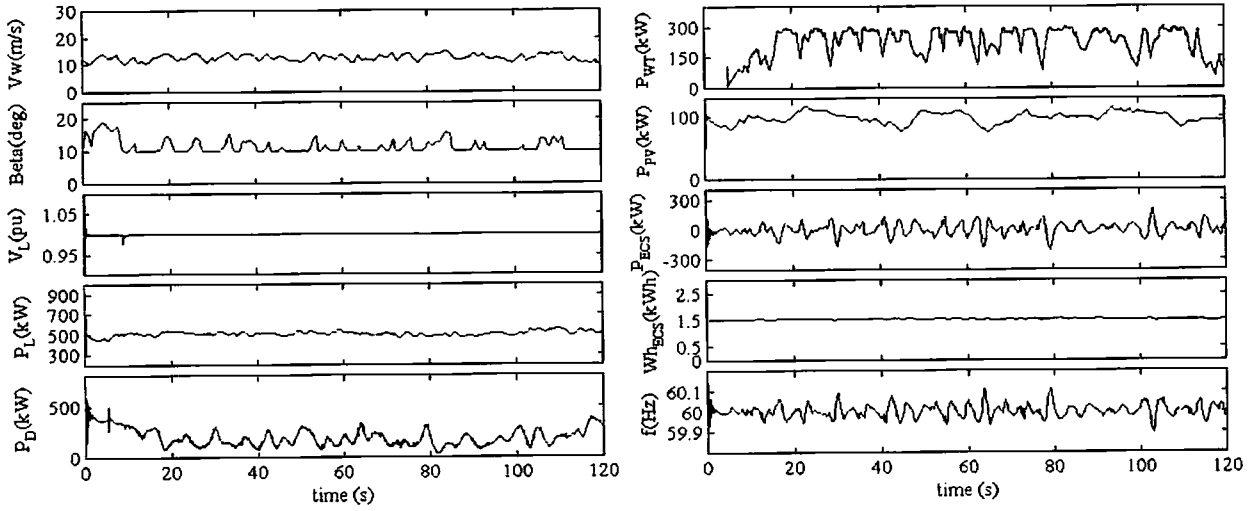


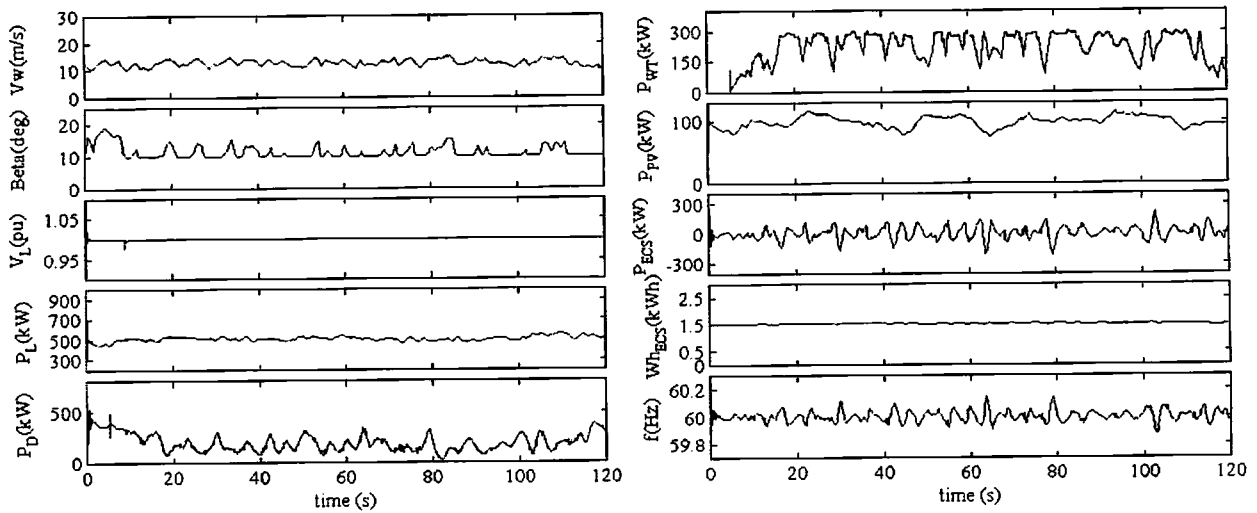
図 5.15 ($T_{delay} = 20 \text{ ms}$, $Kp = 40$, $KI = 10$)



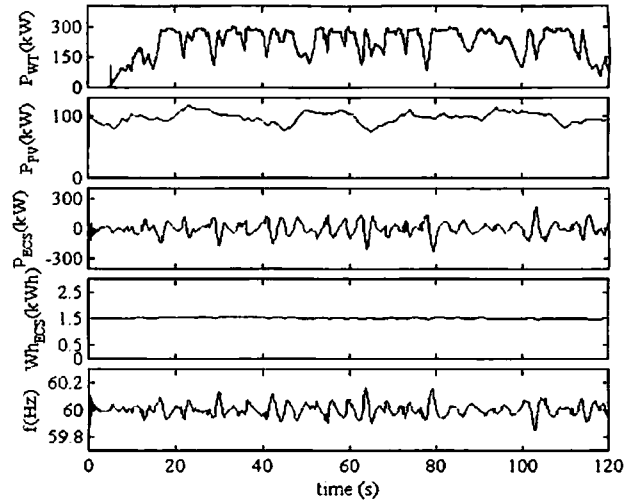
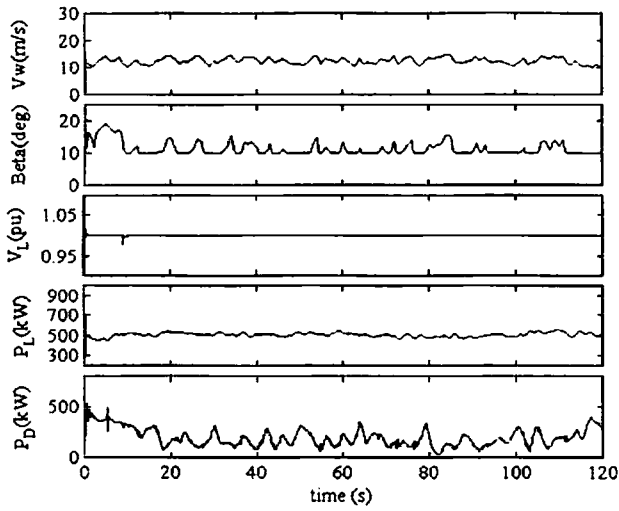
☒ 5.16 ($T_{delay} = 30 \text{ ms}$, $Kp = 30$, $KI = 10$)



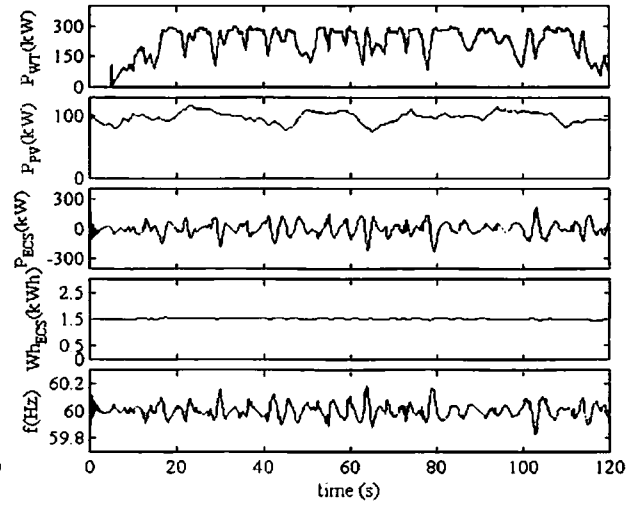
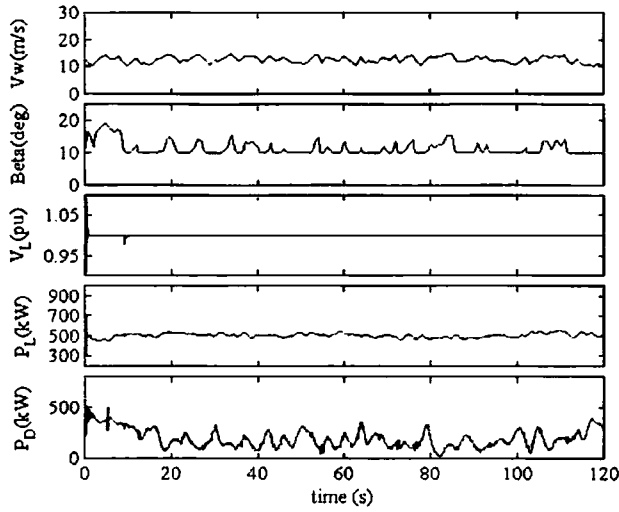
☒ 5.17 ($T_{delay} = 40 \text{ ms}$, $Kp = 25$, $KI = 10$)



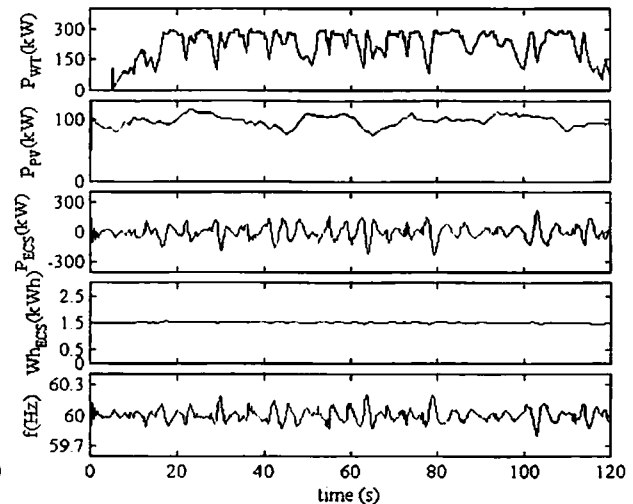
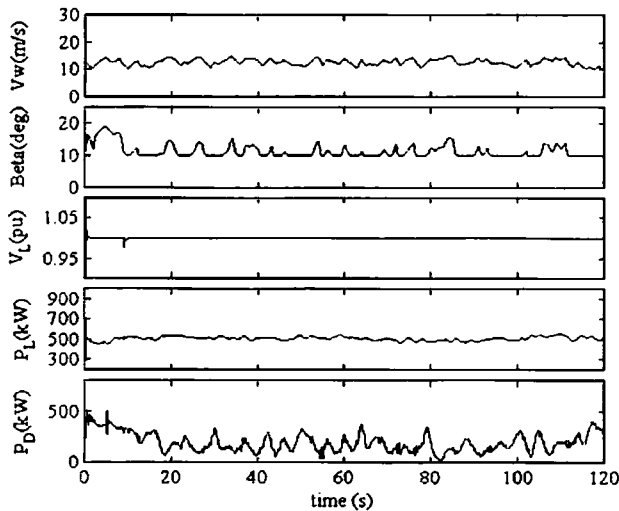
☒ 5.18 ($T_{delay} = 50 \text{ ms}$, $Kp = 20$, $KI = 10$)



☒ 5.19 ($T_{delay} = 60 \text{ ms}$, $Kp = 18$, $KI = 10$)



☒ 5.20 ($T_{delay} = 70 \text{ ms}$, $Kp = 16$, $KI = 10$)



☒ 5.21 ($T_{delay} = 80 \text{ ms}$, $Kp = 14$, $KI = 10$)

提案する協調型 AGC 方式の制御性能を評価するため、シミュレーション結果中の周波数データを利用して、以下の式(5-6)および式(5-7)により各場合の平均周波数偏差と最大周波数偏差を計算している。

$$\Delta f_{ave} = \sum_{i=1}^N |f_i - 60| / N \text{ (Hz)} \quad (5-6)$$

$$\Delta f_{max} = \max_i |f_i - 60| \text{ (Hz)} \quad (5-7)$$

表 5.2 と表 5.3 にディーゼル発電ユニットのみによる従来型 AGC、提案する AGC (無遅延) と提案する AGC (遅延時間を 80 ミリ秒と設定) を採用した場合の平均周波数偏差と最大周波数偏差を示す。また、各設定遅延時間での平均周波数偏差と最大周波数偏差を求めたものを図 5.22 と図 5.23 に示す。

表 5.2 平均周波数偏差

	Random	Ramp	Periodical
Conventional AGC	0.2153 Hz	0.2206 Hz	0.1969 Hz
Proposed AGC without Time Delay	0.0039 Hz	0.0038 Hz	0.0076 Hz
Proposed AGC with Delay Time of 80ms	0.0517 Hz	0.0511 Hz	0.0551 Hz

表 5.3 最大周波数偏差

	Random	Ramp	Periodical
Conventional AGC	1.3418 Hz	1.3646 Hz	1.8761 Hz
Proposed AGC without Time Delay	0.0186 Hz	0.0174 Hz	0.0218 Hz
Proposed AGC with Delay Time of 80ms	0.2516 Hz	0.2002 Hz	0.1341 Hz

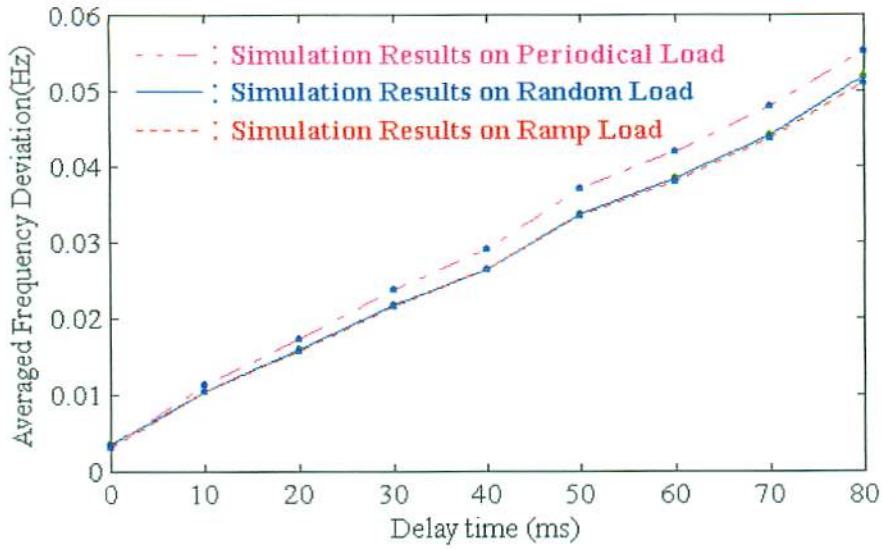


図 5.22 設定遅延時間での平均周波数偏差

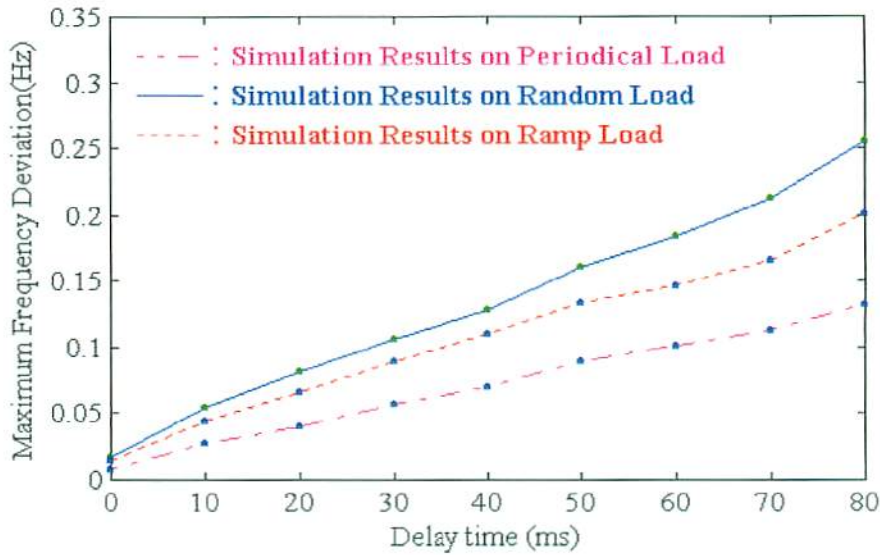


図 5.23 設定遅延時間での最大周波数偏差

図 5.22 と図 5.23 から明らかなように情報伝送遅延時間が大きくなるほど制御性能が劣化していくことが明らかとなった。しかしながら、表 5.2 と表 5.3 に示されるように、ディーゼル発電ユニットのみによる従来型 AGC を採用した場合の平均周波数偏差が 0.2153Hz、0.2206Hz、0.1969Hz、最大周波数偏差が 1.3418Hz、1.3646Hz、1.8760Hz となっていることを考えると、情報伝送遅延時間により制御性能が劣化した場合でも提案方式の制御性能は格段に優れているといえる。

5.6. まとめ

単独システムにおける ECS を用いた自動発電制御を提案し、実時間シミュレーションによりその有効性を明らかにした。さらに、実時間シミュレーションにより情報伝送遅延時間が制御性能に及ぼす影響について明らかにした。すなわち、情報伝送遅延時間が大きいほど、制御性能が劣化していくことが分かった。しかしながら、この情報伝送遅延時間による制御性能の劣化を考慮しても、従来型自動発電制御に比べると格段に優れた制御性能を有していることが明らかとなった。

第6章 単独システムにおける自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用

6.1. はじめに

本章では、単独システムにおける広域にわたって分散配置されている分散電源の協調型自動発電制御を実現するために、コンピュータネットワークを介して各種情報の授受を行うマルチエージェントシステム⁽³⁶⁾⁻⁽³⁹⁾の適用に関して検討を行っている。すなわち、単独システム内に分散配置された各種分散電源からの出力情報、周波数変動情報は情報配信エージェントにより、コンピュータネットワークを介して制御策定エージェントに伝送され、制御策定エージェントでは出力調整可能な分散電源の出力調整指令を決定し、この出力調整指令はネットワークを介して関連した分散電源の制御実行エージェントに伝送され制御が実行に移される。本章では、簡単な例題システムを対象として、コンピュータネットワークに接続された二台のパーソナルコンピュータ(PC)による実時間並列シミュレーションを実施し、コンピュータネットワークを介した情報伝送遅延時間が制御性能に及ぼす影響について明らかにしている。実時間シミュレーションに際しては、Matlab/SimulinkおよびPower System Blockset環境下で構成した三相瞬時値ベースの単独システムモデルを使用している。

6.2. 例題システム

本研究では、コンピュータネットワークを介した情報伝送遅延時間が単独システムにおけるAGC制御性能に及ぼす影響について調べるために、図6.1に示すディーゼル発電ユニット、可変発電ユニット(風力発電ユニットや太陽光発電ユニットなどの出力が気象条件に左右されるため任意の出力調整が不可能であるユニット)、電力貯蔵装置(ECS: Energy Capacitor System)、固定負荷

と可変負荷などから構成した小規模単独系統を例題系統として考
 えている。ECSの高速充放電により、可変発電ユニットや可変負
 荷などによる電力の変動成分を吸収し、系統周波数を定格値に維
 持することができる。ディーゼル発電ユニットはこの単独系統に
 おける主要電源であり、ECSの貯蔵電力量を常にある範囲内に保
 つためのバックアップ電源としての役割も果たしている。ここで、
 ディーゼル発電機の周波数偏差情報はコンピュータネットワーク
 を介してECS制御系(ECS設置点の制御策定エージェント)に送ら
 れ、ECSの充放電電力指令とディーゼル発電ユニットに対する出
 力調整指令が決定される。このディーゼル発電ユニットに対する
 出力調整指令はコンピュータネットワークを介してECSの貯蔵
 電力量をバックアップするためディーゼル発電ユニットの協調制
 御系(制御実行エージェント)に送られ協調制御が実行される。

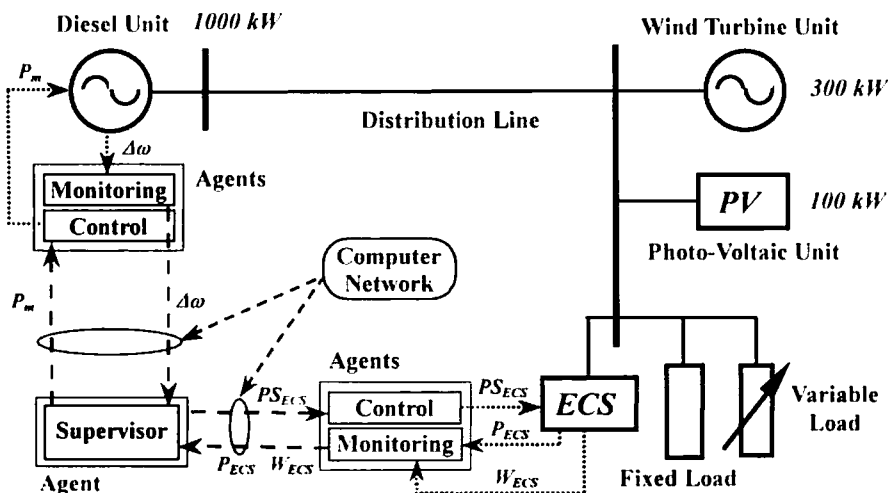


図 6.1 単独系統の構成

6.3. ECSとディーゼルユニットとの協調型AGC

本章で提案するAGC方式は、コンピュータネットワークを介し
 て情報の授受を行うマルチエージェントシステムを適用した協調
 型AGCである。複数のエージェントのうち、ひとつはECS側に

ある AGC 制御系に存在する制御策定エージェントであり、もうひとつのエージェントはディーゼル発電ユニット側の協調制御系に置く協調制御実施エージェントである。ただし、この二つのエージェント間の情報伝送にはコンピュータネットワークによる情報やり取りのため、情報伝送遅延時間が必ず存在し、AGC 制御性能に影響を与えることになる。

図 6.2 に PI 制御方式を採用した ECS の充放電制御部を示す。ディーゼル発電ユニットで観測される周波数偏差による ECS の高速充放電制御により、可変発電ユニット（太陽光発電システムと風力発電システム）や可変負荷などによる電力の変動成分を吸収し、系統周波数を定格値に維持することができる。図中、 $\Delta\omega$ はディーゼル発電ユニットの角周波数偏差、 PS_{ECS} は ECS の充放電電力の設定値、 T_{delay} はコンピュータネットワークでの情報伝送遅延時間である。

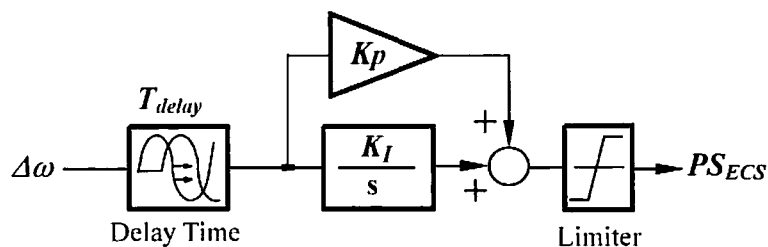
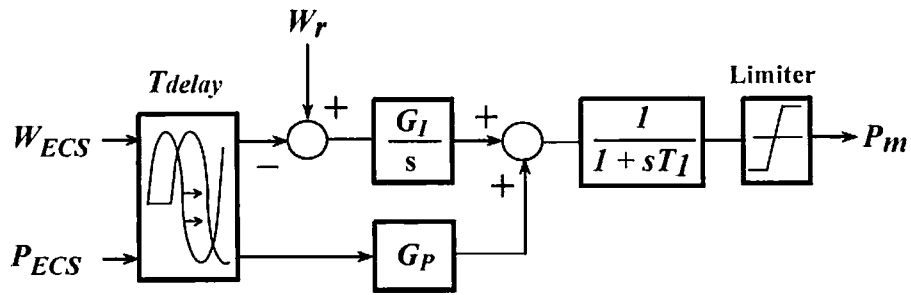


図 6.2 ECS の充放電制御

本研究で想定している ECS ユニットの貯蔵電力量は長期的な計画運用を想定していないため、この ECS の貯蔵電力量を常にある範囲内に保つために、ディーゼル発電ユニットの出力調整が必要となる。このディーゼル発電ユニットの協調制御系を図 6.3 に示す。ECS 貯蔵電力量の残量情報 W_{ECS} と ECS の充放電電力情報 P_{ECS} はコンピュータネットワークを介してディーゼル発電ユニット側の協調制御系に置く協調制御実施エージェントに送られる。



- W_r : ECSの貯蔵電力残量の目標値
- W_{ECS} : ECSの貯蔵電力残量
- P_{ECS} : ECSの充放電電力
- P_m : ディーゼル発電ユニットの出力指令値
- T_{delay} : 情報伝送遅延時間

図 6.3 協調制御のためのディーゼルユニット出力調整部

6.4. マルチエージェントシステムの適用

提案する協調型 AGC をマルチエージェント化した場合のより実際的なシミュレーションとして、コンピュータネットワークに接続された二台の PC の実時間並列シミュレーションを実施している。この実時間並列シミュレーションでの情報伝送方式としては、図 6.4 に示すように、共有ファイルの利用を考えている。ここで、一台の PC を PC1、もう一台の PC を PC2 とすれば、PC1 から PC2 に送り出す情報（ディーゼル発電ユニットの角周波数偏差情報、ECS の充放電電力情報と ECS の電力貯蔵残量情報）を PC1 で File1 に書き込む。PC2 で File1 からこれらの情報を読み込み、ECS の充放電電力指令値とディーゼル発電ユニットの出力設定値を算出し、File2 に書き込む。PC1 で File2 から必要な情報を読み込み、ECS の充放電制御とディーゼル発電ユニットの出力調整を行う。ただし、File1 と File2 は PC1 と PC2 両方ともにアクセスできる場所に置く必要がある。本研究では、PC1 と PC2 上にあるメモリの一部を RAM ディスクとして使用し、コンピュータ

ネットワーク上で共有するようにしている。この共有 RAM ディスクを File1 と File2 の置く場所とし、PC1 と PC2 の情報やり取りを行っている。

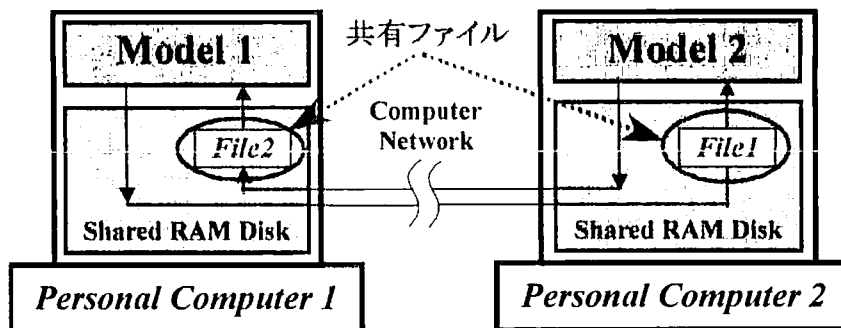


図 6.4 情報伝送の仕組み

Matlab/Simulink および Power System Blockset 環境下で構成したこのコンピュータネットワークを介した情報伝送系を有する例題システムモデルを図 6.5、図 6.6、図 6.7 に示す。

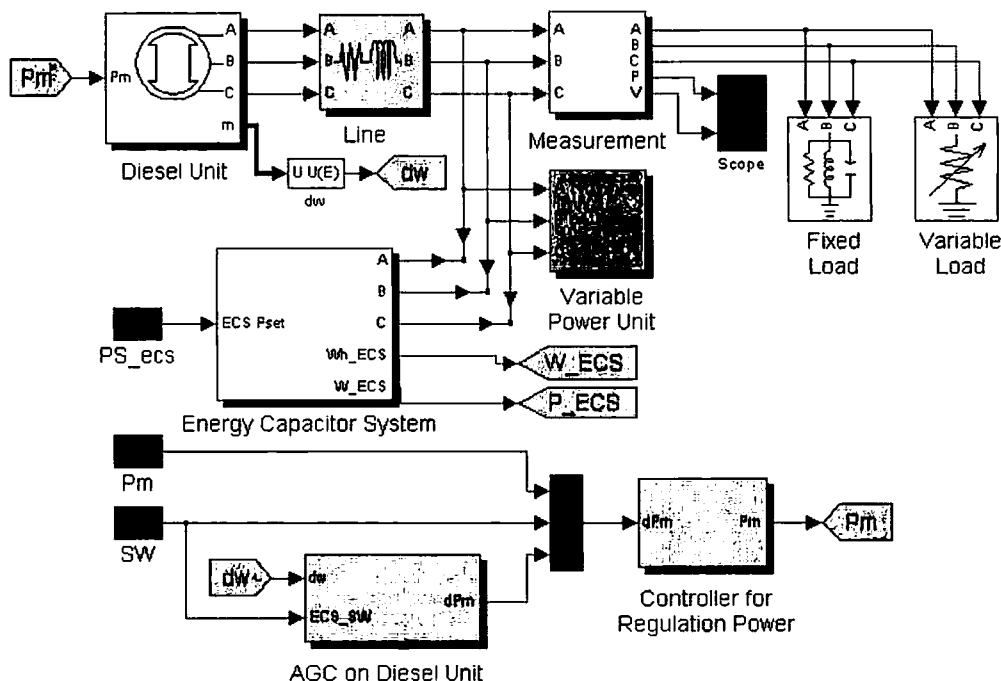


図 6.5 単独システムのシミュレータブロック

図 6.5 と図 6.6 は PC1 上に構成した単独システムのシミュレータブ

ロックと制御実行エージェントブロックであり、図 6.7 は PC2 上に構成した AGC 制御策定エージェントブロックである。2 台の PC による実時間並列シミュレーションのために、図 6.5 に示される単独系統シミュレータは PC1 にインストールされた DSP ボード上で実行され、図 6.6 に示す制御実行エージェントモデルは PC1 上の MATLAB/SIMULINK 環境で実行される。また、図 6.7 に示す AGC 制御策定エージェントモデルは同様に PC2 上の MATLAB/SIMULINK 環境で実行される。

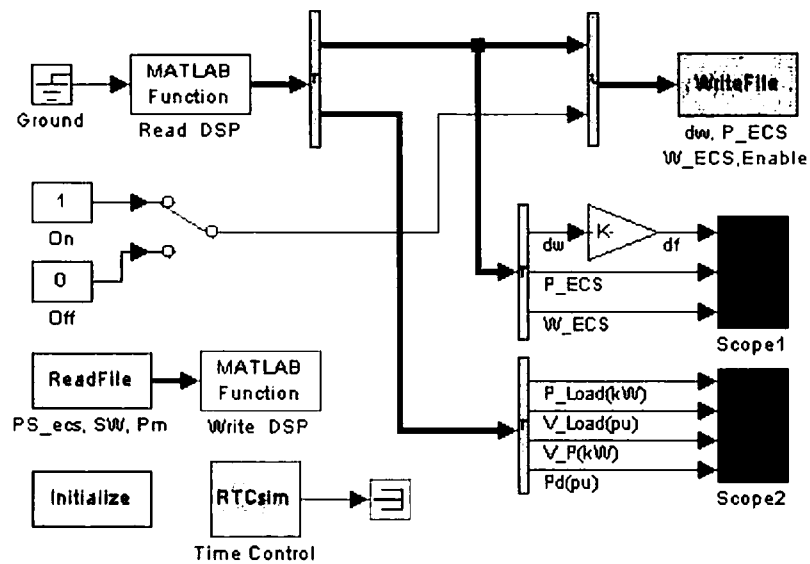


図 6.6 制御実行エージェント

ここで、図 6.6 に示す制御実行エージェントは、以下の二つの役割を担っている。一つ目は、DSP ボードからディーゼル発電ユニットの周波数偏差情報 $\Delta\omega$ 、ECS の充放電電力情報 P_{ECS} 、ECS の貯蔵電力量現在値 W_{ECS} を取り込み、AGC 制御策定エージェントに送るために、File1 に書き込む。二つ目は、AGC 制御策定エージェントから送られてくる ECS の充放電電力指令値情報 P_{SECS} とディーゼル発電ユニット出力調整値情報 P_m を File2 から読み込み、DSP ボード上の関連個所のデータを更新する。図 6.7 に示す AGC 制御策定エージェントでは、File1 からディーゼル発

電ユニットの周波数偏差情報 $\Delta\omega$ 、ECSの充放電電力情報 P_{ECS} 、ECSの貯蔵電力量現在値 W_{ECS} を読み込み、ECSの充放電電力の指示値 P_{SECS} とディーゼル発電ユニットの出力指示値 P_m を算出し、File2に書き込む。ただし、この例題系統においては、ファイルへの情報の書き込み間隔とファイルからの情報の読み出し間隔を20ミリ秒と設定している。なお、図6.6と図6.7に示す情報伝送系で必要となる計算量は非常に軽いためシミュレーション時間が実時間より早くなってしまうためMatlab/Simulinkのツールのひとつである実時間ツールRTCsims(図中にTime Controlと称す)を導入し、情報伝送系の実時間シミュレーションを実現している。

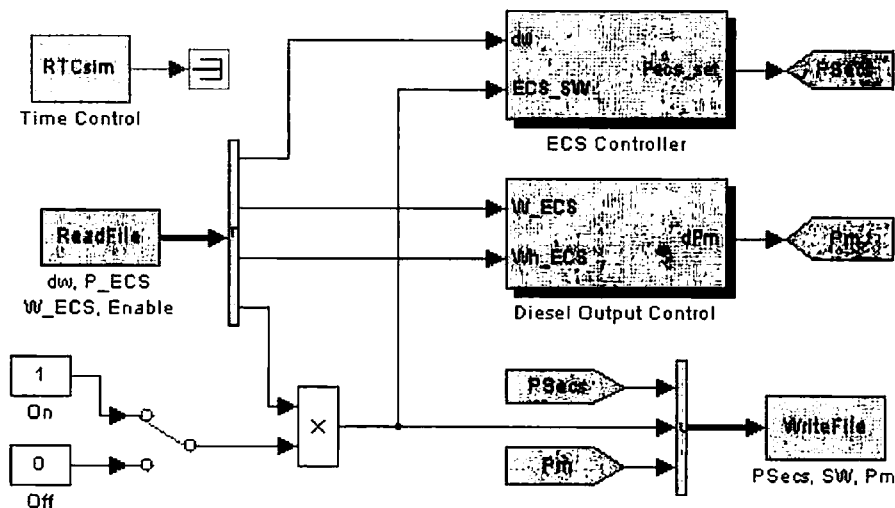


図 6.7 AGC 制御策定エージェント

6.5. シミュレーション結果

例題系統においては、ディーゼル発電ユニットの周波数を制御対象として提案する協調型AGCをマルチエージェント化している。可変発電ユニットの出力を変動させることにより、太陽光発電ユニットおよび風力発電ユニットの気象による出力変動を模擬し実時間シミュレーションを実施している。図6.8から図6.10に本研究で提案する協調型AGC方式を採用した場合のシミュレー

シミュレーション結果を示している。ただし、負荷変動としてランダム負荷変動、ランプ負荷変動、周期的負荷変動を想定している。図中、上から負荷電圧、負荷電力、ディーゼル発電ユニット出力、可変発電ユニット出力、ECS充放電電力、ECS貯蔵電力、ディーゼル発電ユニット角周波数を示している。また、制御性能を比較するため、ディーゼル発電ユニット単独で従来型 AGC を実施した場合のシミュレーション結果を図 6.11 から図 6.13 に示す。この場合も、負荷変動としてランダム負荷変動、ランプ負荷変動、周期的負荷変動を想定している。図 6.11 から図 6.13 をそれぞれ図 6.8 から図 6.10 と比較すれば分かるように、本研究で提案する協調型 AGC 方式を採用した場合、システムの周波数変動が大幅に抑制されていることが明らかとなる。

提案する協調型 AGC 方式の制御性能を評価するため、各負荷変動を想定した場合のシミュレーション結果中の周波数データを利用して、第 5 章の式 (5-6) および式 (5-7) により各場合の平均周波数偏差と最大周波数偏差を計算している。表 6.1 と表 6.2 にディーゼル発電ユニット単独で従来型 AGC を実施した場合と提案する協調型 AGC 方式を採用した場合の平均周波数偏差と最大周波数偏差を示す。表 6.1 と表 6.2 に示されるように、ディーゼル発電ユニット単独で従来型 AGC を実施した場合の平均周波数偏差は 0.2153Hz、0.2206Hz、0.1969Hz であり、最大周波数偏差は 1.3418Hz、1.3646Hz、1.8761Hz である。これに対して、提案する協調型 AGC 方式を採用した場合の平均周波数偏差は 0.0387Hz、0.0350Hz、0.0444Hz、最大周波数偏差は 0.1842Hz、0.1252Hz、0.1462Hz である。これらの数値からも明らかのように、コンピュータネットワークを介した情報伝送系での情報伝送遅延時間による制御性能の劣化を考えた場合でも提案方式の制御性能が大幅に優れているといえる。

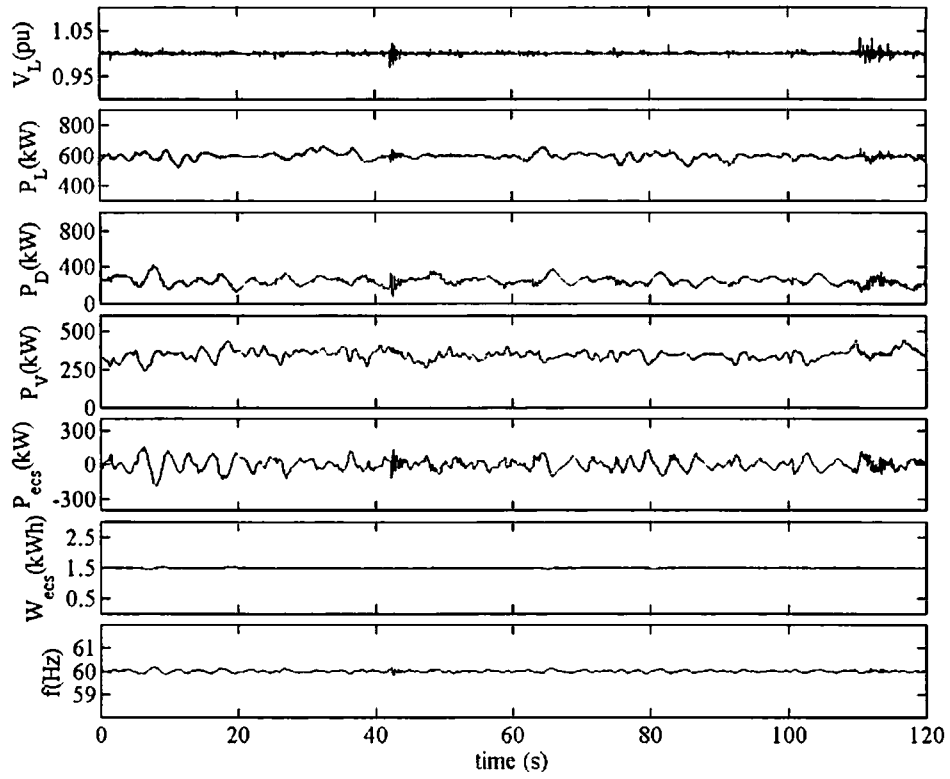


図 6.8 提案方式による自動発電制御(ランダム負荷変動)

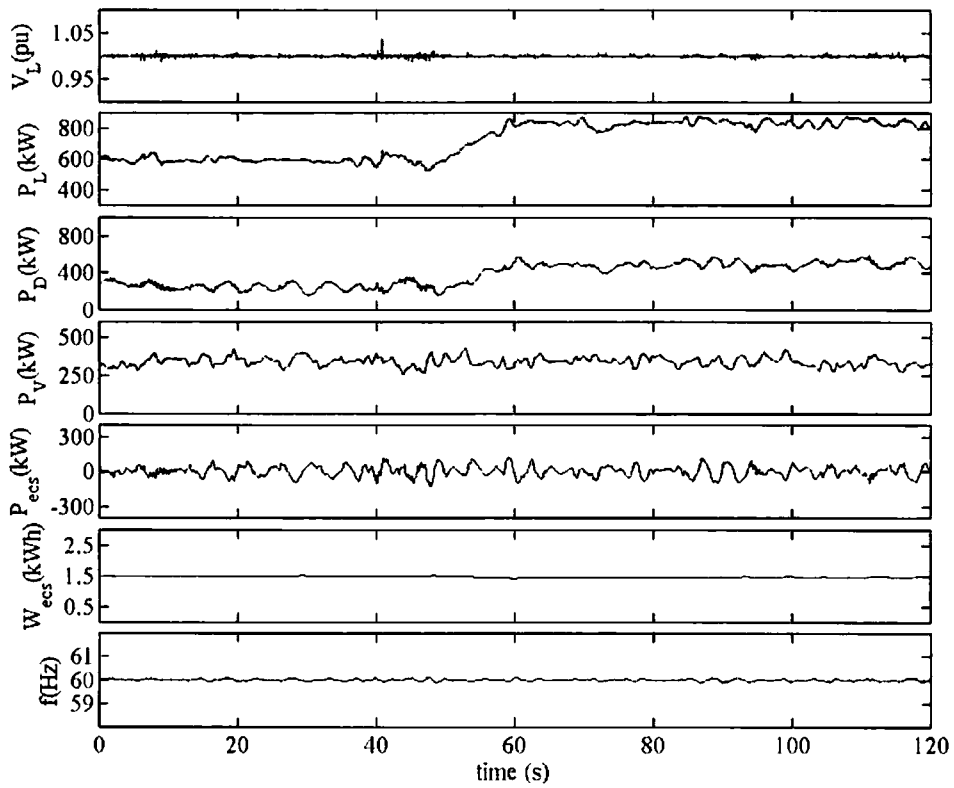


図 6.9 提案方式による自動発電制御(ランプ負荷変動)

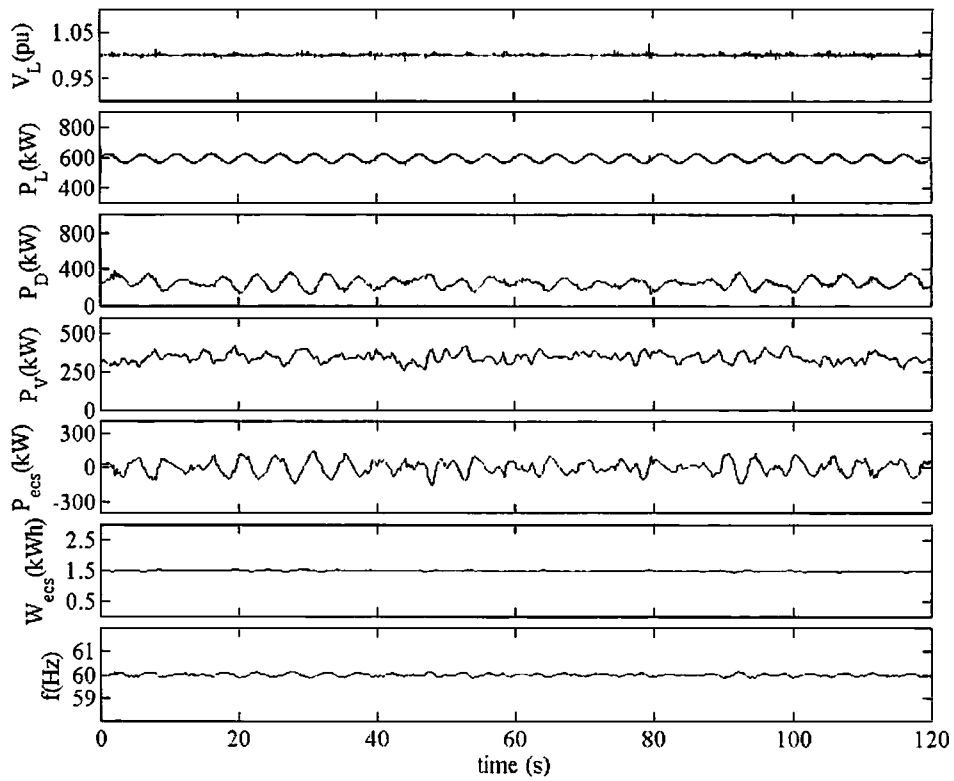


図 6.10 提案方式による自動発電制御(周期的負荷変動)

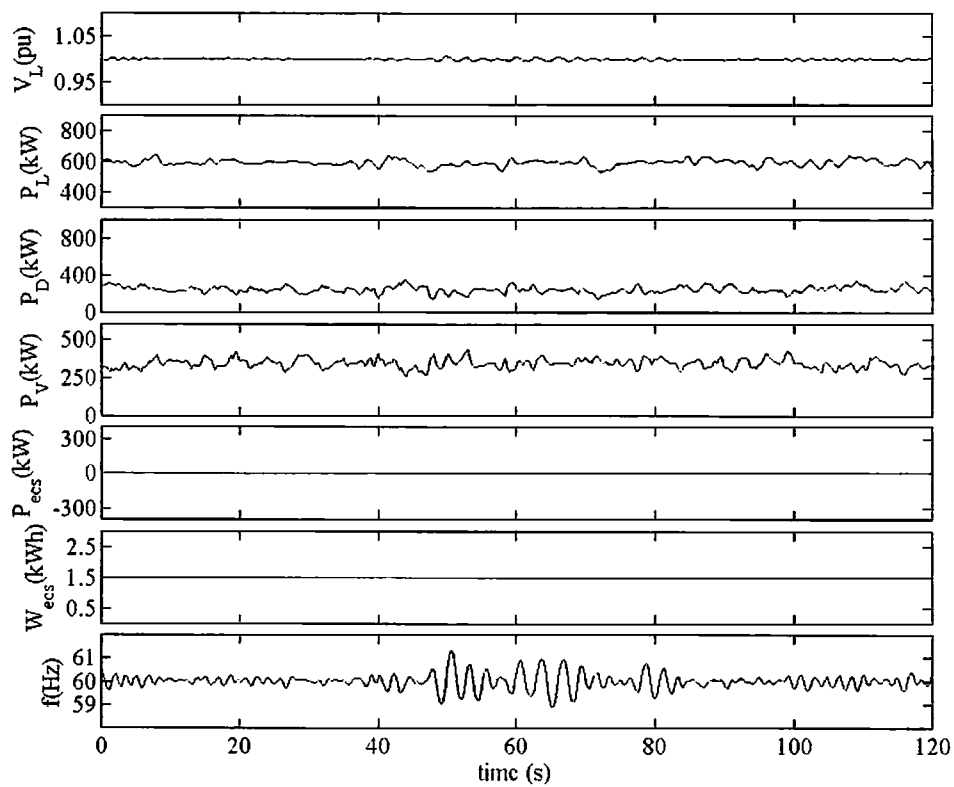


図 6.11 ディーゼルで自動発電制御(ランダム負荷変動)

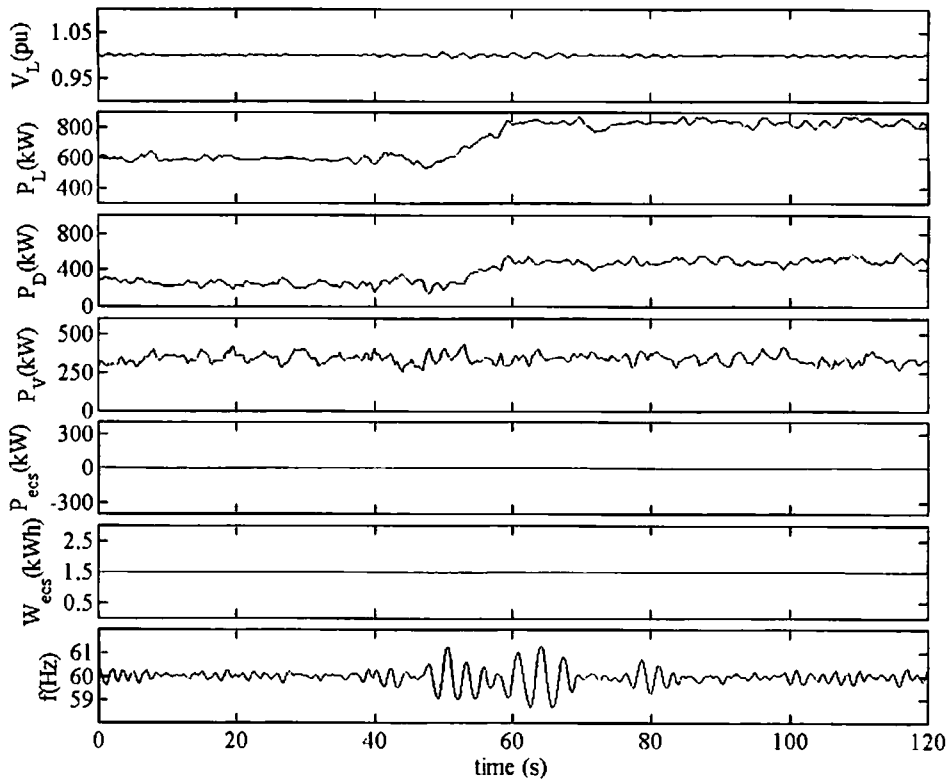


図 6.12 ディーゼルで自動発電制御(ランプ負荷変動)

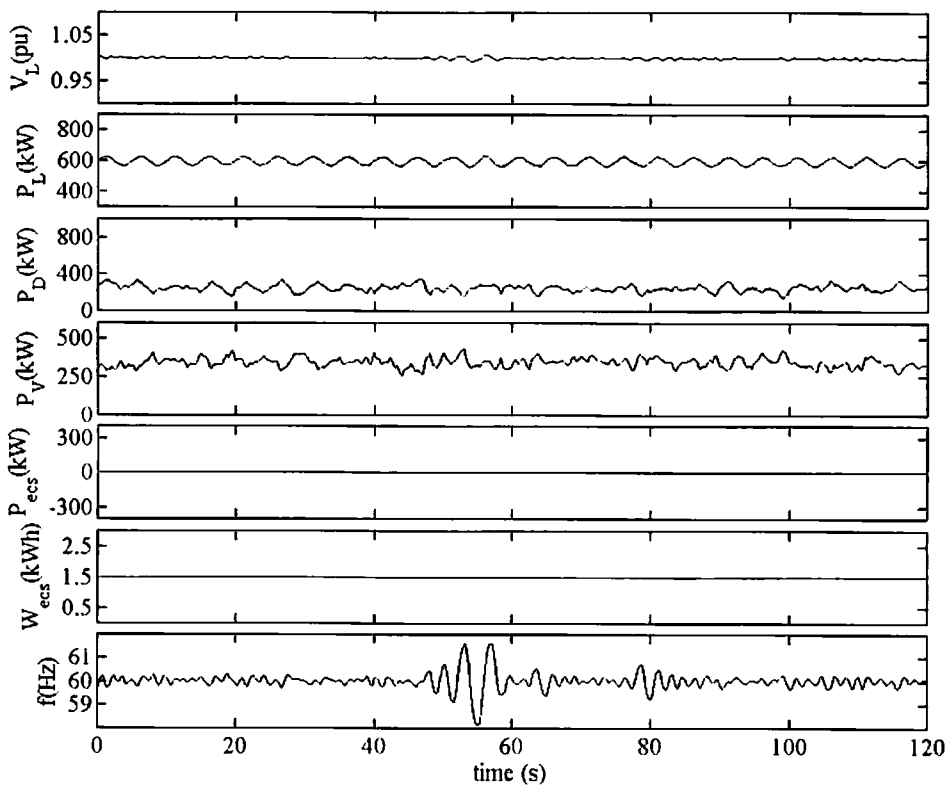


図 6.13 ディーゼルで自動発電制御(周期的負荷変動)

表 6.1 平均周波数偏差

	Random	Ramp	Periodical
Conventional AGC	0.2153 Hz	0.2206 Hz	0.1969 Hz
Proposed AGC	0.0387 Hz	0.0350 Hz	0.0444 Hz

表 6.2 最大周波数偏差

	Random	Ramp	Periodical
Conventional AGC	1.3418 Hz	1.3646 Hz	1.8761 Hz
Proposed AGC	0.1842 Hz	0.1252 Hz	0.1462 Hz

表 6.1 と表 6.2 に示す平均周波数偏差と最大周波数偏差を第 5 章の図 5.22 および図 5.23 に示す一台の PC 上で行ったシミュレーションにより得られた情報伝送遅延時間が AGC の制御性能に与える影響と比較すれば、図 6.14 に示すように、今回 2 台の PC により実施した実時間並列シミュレーションにおけるコンピュータネットワークによる情報伝送遅延時間はおよそ 60 ミリ秒程度であることがわかる。ここで、コンピュータネットワークを利用した場合の情報伝送遅延時間には、PC 上で必要な情報のファイルへの書き込み時間、ファイルからの情報の読み出し時間、さらに、二台の PC で同時に同一ファイルをアクセスする場合の衝突による伝送遅れ時間も含まれている。

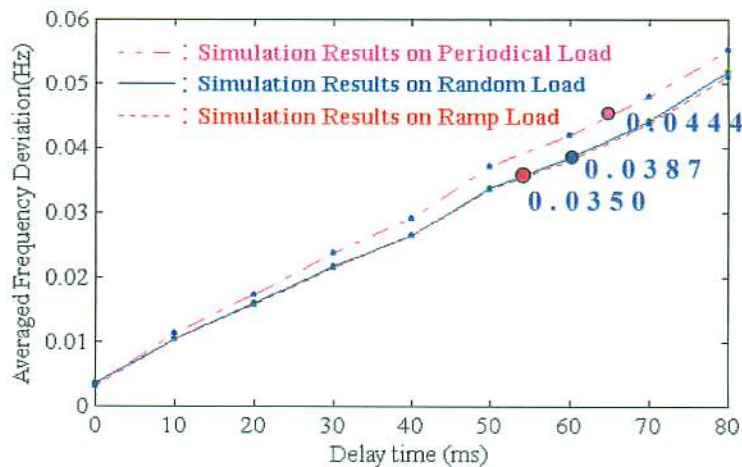


図 6.14 コンピュータネットワークによる情報伝送遅延時間

6.6. まとめ

単独系統における自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用を提案し、コンピュータネットワークに接続された2台のPCによる実時間シミュレーションによりその有効性を明らかにした。さらに、一台のPC上で行ったシミュレーションにより得られた情報伝送遅延時間が制御性能に与える影響と比較し、2台のPCにより実施した実時間並列シミュレーションにおけるコンピュータネットワークによる情報伝送遅延時間はおよそ60ミリ秒程度であることがわかった。また、コンピュータネットワークにより情報伝送遅延時間による制御性能の劣化を考慮しても、従来型自動発電制御に比べると非常に優れた制御性能を有していることが明らかとなった。

第 7 章 総括

本研究では、Matlab/Simulink 環境下で三相瞬時値ベースの詳細モデルを用いて実時間シミュレーションを実現するための方式、さらに DSP ボードを用いてそのモジュール化を実現しアナログシミュレータとの実時間並列シミュレーションを可能とした。また、モジュール化する際に、AD/DA 変換インターフェースによる高調波問題およびその解決方法について明らかにした。さらに、マルチエージェント方式を採用した分散電源の協調運用にかかわるコンピュータネットワークに接続される複数のパーソナルコンピュータによる実時間並列シミュレーション方式を提案・検証した。本研究で提案するシミュレーション方式により、可変速発電機（交流励磁を採用した新型発電機）モジュールを開発し、九州電力（株）総合研究所にあるアナログシミュレータとの実時間並列シミュレーションにより、可変速発電機の導入による電力システム安定性向上効果の検証を行った。また、離島などに代表される単独系統を例題系統として、電気二重層キャパシタで構成される新型電力貯蔵システム（Energy Capacitor System（ECS））と風力・太陽光発電システム、ディーゼル発電システムなどの分散電源とのマルチエージェント方式による協調運用方式をも検証した。

以下に、本研究によって得られた結論を各章別に要約して述べる。

第 2 章「シミュレーション技術」では、オフラインシミュレーションからコンピュータネットワークを介した実時間並列シミュレーションまでさまざまなシミュレーション技術について述べた。

第 3 章「可変速発電機の瞬時値ベースモデリングと実時間シミュレーション」では、Matlab/Simulink 環境下で三相瞬時値ベースの可変速発電機モジュールを開発し、DSP ボードを実装したパーソナルコンピュータ上での実時間シミュレーションを可能とし

た。開発した可変速発電機モジュールの動作確認のため、この可変速発電機モジュールを別のパーソナルコンピュータ上に構成した送電ネットワークモジュールに接続し、一機無限大母線系統を例題系統として並列計算による実時間シミュレーション方式を提案している。並列計算時におけるこれらのパーソナルコンピュータ間での離散的な信号のやり取りに起因する高調波の問題に関しては、バンドパスフィルタの付加により解決可能なことを、また1サンプルの時間遅れに関しても1台パーソナルコンピュータ上での例題系統のシミュレーション結果との比較により問題のないことを明らかにした。さらに、二機無限大母線系統を例題系統とした九州電力(株)総合研究所におけるアナログシミュレータとの並列運転による実時間シミュレーションにより、開発した可変速発電機モジュールの動作確認を完了した。

第4章「可変速発電機による電力系統の安定度向上効果の検証」では、九州電力(株)総合研究所にあるアナログシミュレータ上に構成したくし型四機無限大母線系統を例題系統として、パーソナルコンピュータ上に構成した可変速発電機モジュールとの並列実時間シミュレーションを行い、系統への可変速機導入後の安定度向上効果を実験的に検証した。想定したすべてのケースにおいて、可変速機導入により例題系統の安定性が大幅に改善されることが明らかになった。また、交流励磁制御部を通常型励磁制御からファジー論理型励磁制御に変更した場合の有効性についても明らかにした。すなわち、ファジー論理型交流励磁制御を行うことにより、可変速発電機の安定性がさらに改善されることが明らかとなった。

第5章「ECSを用いた単独系統の自動発電制御」では、単独系統におけるECSを用いた自動発電制御を提案し、実時間シミュレーションによりその有効性を明らかにした。さらに、実時間シミュレーションにより情報伝送遅延時間が制御性能に及ぼす影響に

ついて明らかにした。すなわち、情報伝送遅延時間が大きいほど、制御性能が劣化していくことが分かった。しかしながら、この情報伝送遅延時間による制御性能の劣化を考慮しても、従来型自動発電制御に比べると格段に優れた制御性能を有していることが明らかとなった。

第6章「単独システムにおける自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用」では、単独システムにおける自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用を提案し、コンピュータネットワークに接続された2台のPCによる実時間シミュレーションによりその有効性を明らかにした。さらに、一台のPC上で行ったシミュレーションにより得られた情報伝送遅延時間が制御性能に与える影響と比較し、2台のPCにより実施した実時間並列シミュレーションにおけるコンピュータネットワークによる情報伝送遅延時間はおよそ60ミリ秒程度であることがわかった。また、コンピュータネットワークにより情報伝送遅延時間による制御性能の劣化を考慮しても、従来型自動発電制御に比べると非常に優れた制御性能を有していることが明らかとなった。

今後の展望として、コンピュータネットワークを介して他の情報伝送方式、例えばTCP/IPプロトコルを利用する伝送方式での遠隔実時間並列シミュレーションおよび伝送遅延時間と制御性能に及ぼす影響について、また、情報伝送遅延時間の適応型補償方式についての検討、更には実電力システムへの実用が期待される。

参考文献

- (1) 関根 泰次 : "電力系統過渡解析論" オーム社 1984 年
- (2) "MATLAB User's Guide" The MATH WORKS Inc. 1999 年
- (3) "SIMULINK Dynamics System Simulation Software" サイバネットシステム株式会社 1996 年
- (4) 芦野 隆一、Remi Vaillancourt : "はやわかり MATLAB" 共立出版 1997 年
- (5) "ControlDesk Experiment Guide" dSPACE 社 1999 年
- (6) B.W.カーニハン、D.M.リッチー : "プログラミング言語 C 第 2 版" 共立出版株式会社 1989 年
- (7) 桑原 雅晴 : 卒業論文 "交流励磁可変速発電機の安定性評価" 1998 年
- (8) 後藤 洋 : 卒業論文 "可変速発電機の三相瞬時値モデルの構成" 1999 年
- (9) 左 敦定 : 修士論文 "可変速発電機のモデリングとシミュレーションに関する研究" 1999 年
- (10) 江崎 浩子 : 卒業論文 "マルチエージェントシステムを適用した単独システムの自動発電制御" 2001 年
- (11) 姚 双恵 : 修士論文 "電力貯蔵システムを有する単独システムの自動発電制御に関する研究" 2001 年
- (12) W.B.Gish, J.R.Shurz, B.Milano, and F.R.Schleif : "An Adjustable Speed Synchronous Machine for Hydroelectric Power Applications", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.5, 1981, pp.2171-2176.
- (13) 道上, 子柳: "電力系統における可変速揚水発電電動機の系統定定度向上に関する研究", 電学論 B, 114 巻 2 号, 平成 6 年
- (14) 小柳, 横山, 小向: "単独負荷系統における可変速発電機の電圧制御系の安定性解析", 電学論 B, 119 巻 7 号, 平成 11 年
- (15) 立松, 横山: "複数可変速発電機の励磁電圧協調制御による多機系統安定化", 電学論 B, 116 巻 2 号, 平成 8 年
- (16) 重藤, 横山: "可変速発電機励磁電圧制御系による電力系統ダンピング向上効果とロバスト安定性の関係", 電学論 B, 118 巻 1 号, 平成 10 年
- (17) T.Hiyama, S.Oniki, and H.Nagashima: "Evaluation of advanced fuzzy logic PSS on analog network simulator and actual installation on hydro generators". IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.11, No.1, March 1996, pp.125-131.
- (18) T. Hiyama, K. Miyazaki, and H. Satoh : "A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power Systems with Multi-Mode Oscillations". IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 11, No.2, 1996, pp.449-454.
- (19) F. Bonnano, A. Consoli, A. Raciti, B. Morgana, and U. Nocera : "Transient Analysis of Integrated Diesel-Wind-Photovoltaic Generation Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, 1999, pp.232-238.
- (20) R. Ramakumar, L. Abouzahr, K. Krishnan, and K. Ashenayi: "Design Scenarios for Integrated Renewable Energy Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, 1995, pp.736-746.

- (21) G. S. Stavrakakis and G. N. Kariniotakis: "A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction Part I: A General Multimachine Power System Model". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3. 1995, pp.577-581.
- (22) G. S. Stavrakakis and G. N. Kariniotakis: "A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction Part II: Implementation of the Algorithm and Case Studies with Induction Generators". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3. 1995, pp.584-590.
- (23) 岡村: "電力用蓄電装置の基礎的研究". 電学論 B. 115 巻 5 号, 1995.
- (24) 大島, 清水, 清水, 山岸, 岡村: "誤差追従式 PWM と電気二重層コンデンサによる系統連系型蓄電装置". 電学論 D. 118 巻 12 号, 1998.
- (25) T. Hiyama, D. Ueno, S. Yamashiro, M. Yamagishi, and M. Shimizu: "Fuzzy Logic Switching Control for Electrical Double-Layer Energy Capacitor System for Stability Enhancement", Proceedings of the IEEE PES 2000 Summer Meeting, Vol. 4, pp.2002-2007, 2000.
- (26) T. Hiyama, K. Tomsovic, M. Yoshimoto, and Y. Hori: "Modeling and Simulation of Distributed Intelligent Power Sources". Proceedings of IPEC'2001. Vol. 2. pp.634-638. 2001.
- (27) B.R. Bergman, A.R. Caprez, J.L. Haneline, G.L. Kusic, J.A. Sutterfield: "Automatic generation control for hydro systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3. pp. 33 -39. 1988.
- (28) B.H. Bakken, O.S. Grande: "Automatic generation control in a deregulated power system". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, pp.1401 -1406, 1998.
- (29) D. Zuo, T. Hiyama, T. Funakoshi, T.H. Ortmeier : "Detailed Modeling and Simulation of Adjustable Speed Generator in Matlab/Simulink Environment". IEEE PES 2000 Summer Meeting. Vol. 4, pp.2520-2524.
- (30) D. Zuo, T. Hiyama, T. Akine, T.H. Ortmeier : "Development of Personal Computer Based Adjustable Speed Generator Module for Analog Power System Simulator", IPEC'2001(International Power Engineering Conference), Vol. 2, pp.477-482
- (31) 左 敦定, 檜山 隆, 秋根 孝彦, T.H. Ortmeier : "可変速発電機の瞬時値ベースモデリングと実時間シミュレーション". 平成 13 年電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集、論文 I、pp.121-128
- (32) D. Zuo, T. Hiyama, T. Akine, T.H. Ortmeier : "PC Based Real Time Simulation of Adjustable Speed Generator in Matlab/Simulink Environment". ICPS'2001(Cigre International Conference on Power Systems), pp.222-226
- (33) 左 敦定, 檜山 隆, 野見山 文敏, T.H. Ortmeier : "可変速発電機による電力システムの安定度向上効果の検証", 平成 14 年電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集、論文 I、pp.228-233
- (34) D. Zuo, T. Hiyama, F. Nomiya : "Stabilization Effect after installation of Adjustable Speed Generator to Multi-machine Power System". PowerCon 2002 (IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology), pp. 314-318

- (35) T. Hiyama, D. Zuo, T. Funabashi : "Automatic Generation Control of Stand Alone Power System with Energy Capacitor System", PSMC 2002 (Fifth International Conference on Power System Management and Control), pp. 59-64
- (36) 左 敦定, 檜山 隆, 舟橋 俊久: "単独系統における自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用", 平成 14 年電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集、論文 1、pp.116-121
- (37) T. Hiyama, D. Zuo, T. Funabashi : "Multi-Agent Based Automatic Generation Control of Isolated Stand Alone Power System". PowerCon 2002 (IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology). pp. 139-143
- (38) Takashi Hiyama, Dunding Zuo, Toshihisa Funabashi : "Multi-Agent Based Load Following Operation of Dispersed Power Sources". International Symposium on AdCONIP'02 (Advanced Control of Industrial Processes). pp.61-66
- (39) T. Hiyama, D. Zuo, T. Funabashi : "Multi-Agent Based Control and Operation of Distribution System with Dispersed Power Sources". IEEE/PES T&D 2002: Asia Pacific
- (40) Dunding Zuo, Takashi Hiyama, Thomas H. Ortmeier : "Fuzzy logic excitation control of adjustable speed generator for stability enhancement", International Symposium on AdCONIP'02 (Advanced Control of Industrial Processes). pp.67-72
- (41) 左 敦定、姚 双惠、檜山 隆、吉本 正彦、堀 康弘 : "風力発電機を有する配電システムのシミュレーション", 平成 13 年電気学会全国大会講演論文集、6-099
- (42) 左 敦定、檜山 隆、秋根 孝寛 : "可変速機モジュールのアナログシミュレータ試験", 平成 13 年電気学会全国大会講演論文集、No.6-060
- (43) 左 敦定、檜山 隆、舟越 節彦 : "可変速発電機の三相瞬時値ベースモデル", 平成 12 年電気学会全国大会講演論文集、No. 6-027
- (44) 檜山 隆、左 敦定、舟橋 俊久 : "単独系統における自動発電制御へのマルチエージェントシステムの適用", 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集、No. 6-243
- (45) 檜山 隆、左 敦定、穴見英介、吉本正彦、堀 康弘 : "複合分散型インテリジェント電源のモデリングとシミュレーション". 平成 13 年電気学会全国大会講演論文集、No. 6-013

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始熱心な御指導・御鞭撻を賜りました熊本大学大学院自然科学研究科システム情報科学専攻エネルギーシステム講座 檜山隆 教授に心より感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、御討論・御教示頂いた熊本大学大学院自然科学研究科システム情報科学専攻エネルギーシステム講座 秋山 秀典 教授、蛭原建治 教授、宮原 邦幸 教授並びに生産システム科学専攻生産知能システム講座 柏木 潤 教授に謹んで感謝の意を表します。

また、研究を進めるにあたって、熊本大学工学部 電気システム工学科 電気エネルギーシステム講座 宮内 肇 助教授、喜多 敏博 助手、九州電力株式会社総合研究所 舟越 節彦氏に、有益かつ貴重な御助言・御指導を頂き、心から謝意を表します。

最後になりましたが、本論文の執筆並びに本研究を進めていく上で、多大なご協力を頂きました電力システム研究室の皆様に感謝申し上げます。

本研究は、以上に挙げた方々の御助力のもとにはじめて完遂し得たものであります。ここに記して心からの感謝の意を表します。

2003 年 3 月

左 敦定