

E2

電力システムのモデリング・解析環境 構築と工場受変電システムの解析

富士電機株式会社

パワエレシステム事業本部 エンジニアリング統括部
プラントシステムセンター 変電システム技術部

壹岐 浩幸

九州工業大学

大学院工学研究院電気電子工学研究系

渡邊 政幸

2018年10月30日
MATLAB EXPO 2018

目次

- 研究テーマ紹介
- 工場受変電システムの特徴
- MATLAB/Simulinkで構築した電力システム解析ツール
- 工場受変電システムの解析事例
- まとめ

九州工業大学：渡邊研究室の主な研究テーマ

• 研究内容

- 電力システムの監視・解析・制御
 - MATLAB/Simulink, 各種系統解析ツールを活用

• 主なテーマ

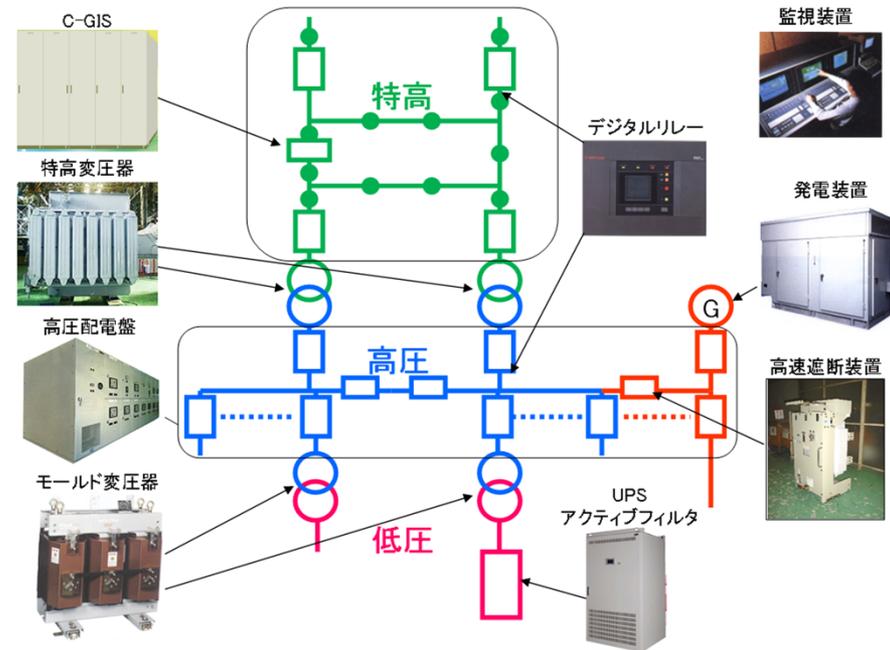
- 同期位相計測に基づく電力システムの特長解析・制御
 - 実データに基づく安定性評価
 - 計測情報可視化
 - 安定化制御系設計
 - 計測器最適配置
- 工場受変電システムを対象とした系統解析
 - MATLAB/Simulinkベースの解析ツール開発
 - タービン発電機, 電動機等の各種モデリング, 特長評価, 安定性解析
 - 誘導電動機の特長に起因する諸問題の評価
 - 高調波解析

自家用発電設備を有する 工場受変電システムの特徴

渡邊政幸・壹岐浩幸：
「自家用発電設備を有する工場受変電システム
における信頼性への取り組み」、
電気学会誌, 137巻1号, pp.31-34 (2017)

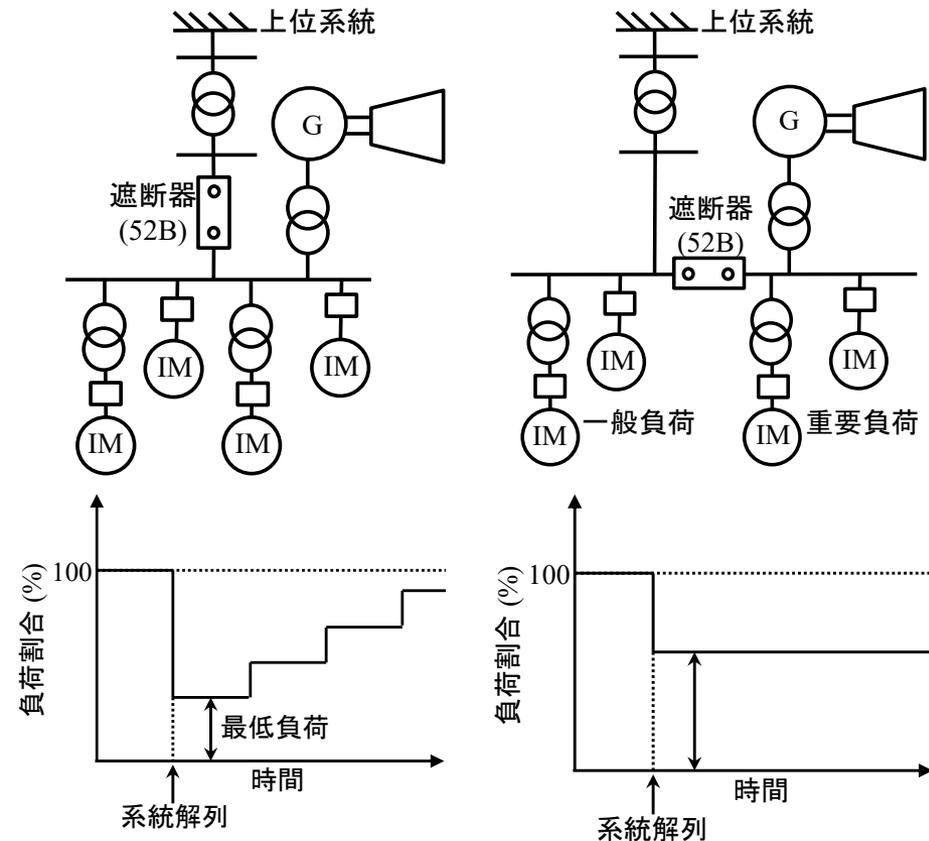
自家用発電設備を有する工場受変電システム

- 大規模な石油化学や石油精製，鉄鋼，製紙プラント
- 大規模工場では自家用発電設備を複数台有する
 - 電力供給に加えて蒸気供給源としても重要
 - 制御系が複雑
- 負荷：回転機など多様
- 数千台程度の誘導電動機や同期電動機
 - ポンプ，ブロワ，コンプレッサ，ファンなどの動力源
 - 瞬時電圧低下（瞬低）や停電対策が必要
 - 電圧安定性の課題



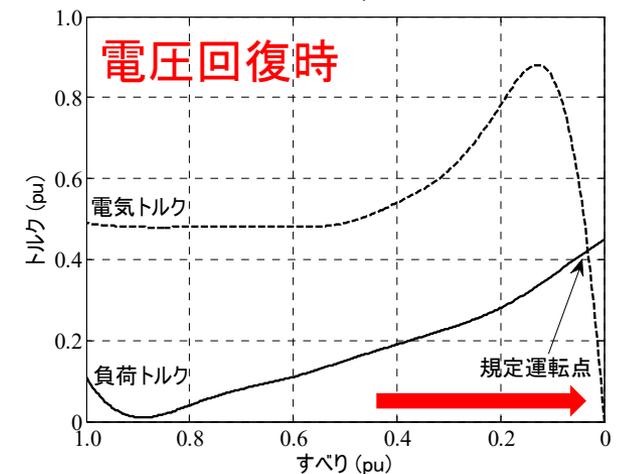
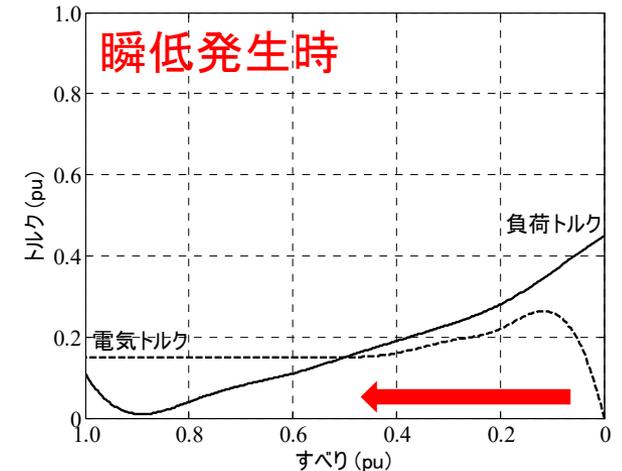
工場受変電システムの系統構成例

- 系統事故に伴う受電点の解列
 - 自立運転への移行, 自家用発電設備が工場内の負荷を背負う
 - 周波数の変動, 電力動揺や電圧安定性が課題となることが多い
 - 負荷の大半を占める誘導電動機の特性に起因するトラブルが多い
- 誘導電動機に設置される電磁開閉器への瞬低補償対策
- 順次再閉路方式の採用
 - 受電用変圧器の2次側(もしくは1次側)に系統解列用遮断器を設置
 - 自立運転に移行の場合は, 自家用発電機の最低出力分の負荷のみ残し, 母線電圧変動に留意しつつ順次電動機群を再投入
- 遅延釈放方式等の採用
 - 主母線に系統解列用遮断器を設置
 - 瞬低発生時には電磁開閉器は閉路状態を維持。自家用発電機の定格出力に対して約60 ~ 70 %程度の重要負荷を残して自立運転を維持



瞬低と誘導電動機

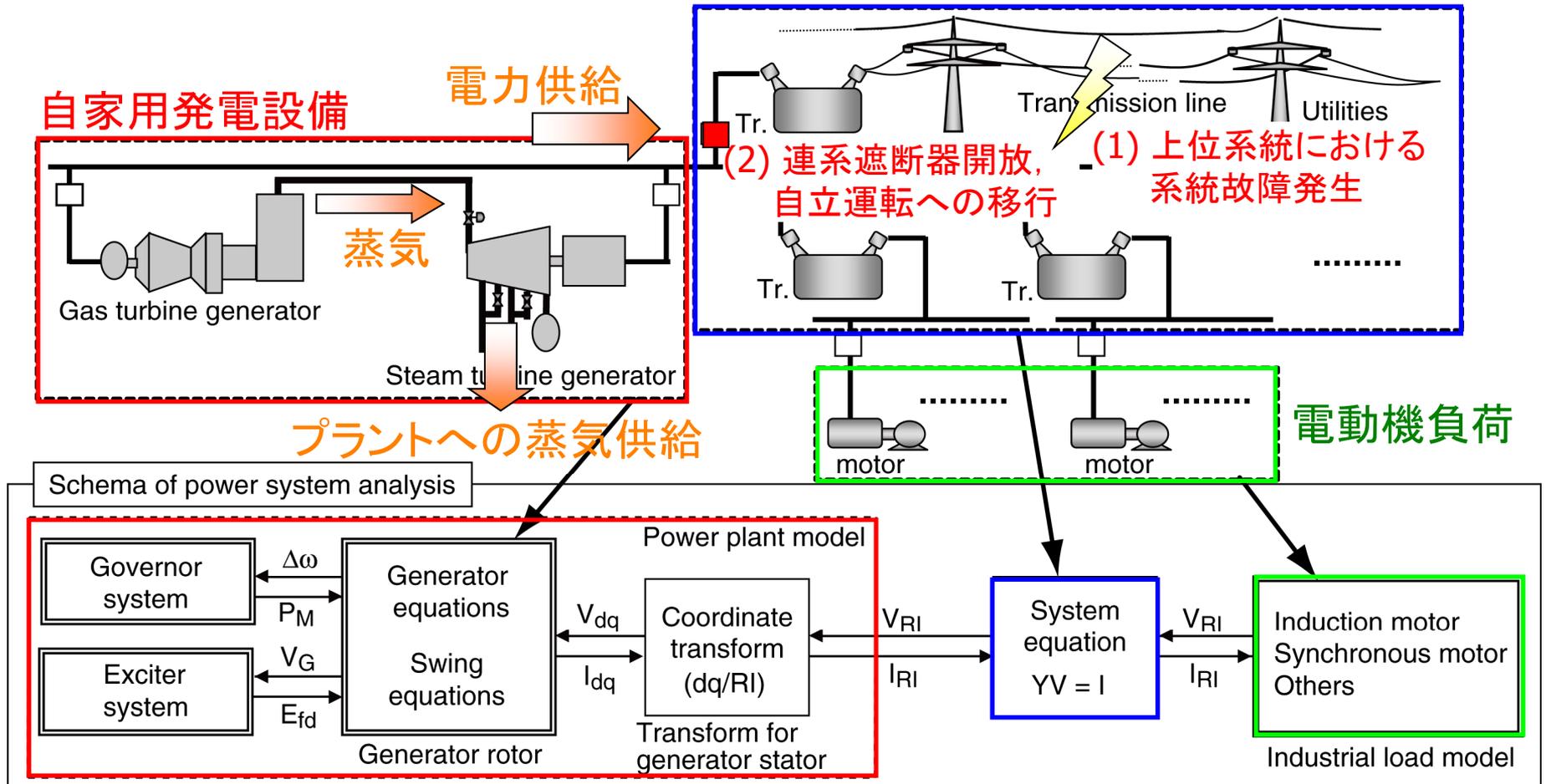
- 誘導電動機の電気トルクは電圧の二乗に比例
- 瞬低発生による電圧低下
 - 電気トルク $T_M < 負荷トルクT_L$
 - 誘導電動機の回転数が低下(すべりが増大)
- 母線電圧の回復
 - 誘導電動機の電気トルクが回復し $T_M > T_L$ となって加速
 - 再加速のために定格の数倍程度の力率が低い再始動電流が生じる
- 多数の誘導電動機群が一斉に再加速するため大きな再始動電流発生
 - 幹線フィーダの過電流リレーの不要動作
 - 再始動電流(無効電流)によるフィーダや変圧器のリアクタンス成分による電圧降下が大きく、特に負荷末端での電圧の回復が遅れる



系統解析の必要性

- 各構成要素の特性は把握できるが、それらが接続されたときのシステム全体の振る舞いは複雑
- 現象解明や対策・設計には系統シミュレーションによる解析が有効
- 各種解析ツールの適用
 - 国内外で多数の汎用解析ツールが存在
 - 現象により瞬時値解析, 実効値解析を選択
 - 一般にParkの基本式から導出された同期発電機モデルを使用
 - ツールがパッケージ化 → 計算アルゴリズムやモデル構造がブラックボックス
 - 詳細な動特性解析・モデリングの要望に対して対応が困難な場合がある
- 工場受変電システムの解析において
 - 汎用ツールが提供する発電機制御系の標準モデルでの解析精度に疑問
 - 擾乱発生後の自家用タービン発電機の挙動の検証には, 調速機や励磁制御系の詳細モデルが必要
 - 誘導電動機群を含めた電圧回復性の評価が必要

工場受変電システムの特性解析



• 自家用発電設備は蒸気供給を優先して電力供給を行う

- 発電機制御器(特に调速機系)が複雑で非線形性が強い
- 連系時, 解列(自立)時で制御モードが異なる

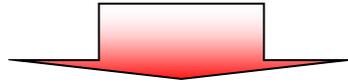


詳細なモデリング
によるシステム解析

• とくに自立運転時は発電機制御器の特性がシステムの振る舞いに大きな影響

ツール開発の経緯

- 汎用解析ツールでは難しい柔軟性を持った解析ツールが欲しい



- MATLAB/Simulinkを活用して一から構築
 - 富士電機がプロトタイプ開発
 - 当初は、同期発電機の動特性解析、同期発電機モデルや系統安定度解析の学習用途を想定
 - 富士電機、成蹊大学、九州工業大学の3者でバージョンアップ
 - 精度検証、アルゴリズム追加等
 - 工場受変電システムにおける諸問題の解析に適用
 - 実効値解析
- MATLABの優れた数値解析能力とSimulinkが提供するモデリング環境をそのまま利用できる
- 各種Toolboxとの連携による分析や制御系設計等も可能

MATLAB/Simulinkの 柔軟なモデリング環境を活用した 電力システム解析ツール

壹岐浩幸・小松正寛・瓜生芳久・渡邊政幸・三谷康範：
「MATLAB/Simulinkを用いた同期発電機動特性解析ツールの開発
－ 発電機モデル表現が解析に与える影響に関する考察 －」，
平成18年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会，
PE-06-50, PSE-06-50 (2006)

開発した系統解析ツールの概要

● 潮流計算部

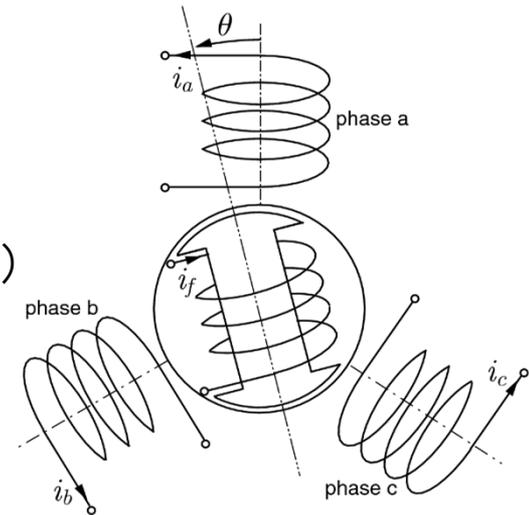
- MATLAB上のMファイル群で構成
- Newton-Raphson法, Gauss-Seidel法(選択可能)

● 過渡計算部

- MATLAB上のMファイル群とSimulinkで構成した機器モデル
- 同期発電機モデル(d 軸1個, q 軸2個の制動巻線を含む6次モデル, GOV, AVR等の制御系を含む)
- 誘導電動機モデル(すべりによるインピーダンス変化を考慮)

● 実行用GUI

- ボタンのクリックで一連の解析を実行可能
- 系統および発電機定数入力, 保存機能, 読込機能
- 過渡計算の波形表示および時系列データExport機能



潮流計算用スクリプト

多数の行列操作・演算 収束演算

```
D:\home\watanabe\matlab\test3\matrix_Y.m
ファイル(E) 編集(E) 表示(V) テキスト(T) デバッグ(D) ブレークポイント(O) Web(B) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)
D:\home\watanabe\matlab\test3\matrix_Y.m
スタック: ペース
1 | % =====
2 | % matrix_Y.m
3 | % =====
4 |
5 | % アドミタンス行列の計算
6 |
7 | % data sample
8 | % linedata=[nl nr R X 1/2B tr]
9 |
10 | j=sqrt(-1);
11 | i=sqrt(-1);
12 | nl=linedata(:,1);
13 | nr=linedata(:,2);
14 | R=linedata(:,3);
15 | X=linedata(:,4);
16 | Bc=i*linedata(:,5);
17 | tr=linedata(:,6);
18 |
19 | nbr=length(linedata(:,1));
20 | nbus2=max(max(nl), max(nr));
21 |
22 | for i1=1:1:nbr;
23 |     a(i1)=1/tr(i1);
24 | end;
25 |
26 | for i1=1:1:nbr;
27 |     Z(i1,1)=R(i1,1)+j*X(i1,1); % 各ブランチのインピーダンス
28 |     if Z(i1,1)~=0;
29 |         y(i1,1)=1/Z(i1,1); % 各ブランチのアドミタンス
30 |     else;
31 |         y(i1,1)=(1e+10)*(1+i);
32 |     end;
33 | end;
34 |
35 | % Trを無視したときのY行列
36 | Ybus=zeros(nbus2);
37 | % 伝達アドミタンス
38 | for i1=1:1:nbr;
39 |     if (nl(i1)~=0 & nr(i1)~=0);
40 |         Ybus(nl(i1),nr(i1))=Ybus(nl(i1),nr(i1))-y(i1);
41 |         Ybus(nr(i1),nl(i1))=Ybus(nl(i1),nr(i1));
42 |     end;
43 | end;
44 |
45 | % 駆動点アドミタンス(サセプタンスなし)
46 | for i1=1:1:nbus2;
47 |     Ybus(i1,i1)=-sum(Ybus(:,i1));
48 | end;
49 |
50 | % サセプタンス1(1/2B)
```

```
D:\home\watanabe\matlab\test3\newtonrap1.m
ファイル(E) 編集(E) 表示(V) テキスト(T) デバッグ(D) ブレークポイント(O) Web(B) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)
D:\home\watanabe\matlab\test3\newtonrap1.m
スタック: ペース
1 | hbus = length(busdata(:, 1));
2 |
3 | for k=1:1:nbus;
4 |     n=busdata(k,1);
5 |     kb(n,1)=busdata(k,2);
6 |     Vm(n,1)=busdata(k,3);
7 |     theta(n,1)=busdata(k,4);
8 |     Pd(n,1)=busdata(k,5);
9 |     Qd(n,1)=busdata(k,6);
10 |    Pg(n,1)=busdata(k,7);
11 |    Qg(n,1)=busdata(k,8);
12 |
13 |    if Vm(n,1)<=0;
14 |        Vm(n,1)=1.0;
15 |        V(n,1)=1+j*0;
16 |    else;
17 |        theta(n,1)=pi/180*theta(n,1);
18 |        V(n,1)=Vm(n,1)*(cos(theta(n,1))+j*sin(theta(n,1)));
19 |        P(n,1)=Pg(n,1)-Pd(n,1);
20 |        Q(n,1)=Qg(n,1)-Qd(n,1);
21 |        S(n,1)=P(n,1)+j*Q(n,1);
22 |    end;
23 | end;
24 |
25 | G = real(Ybus);
26 | B = imag(Ybus);
27 | E = real(V);
28 | F = imag(V);
29 |
30 | iter = 0;
31 | mismatch = 100 * accuracy;
32 |
33 | while mismatch > accuracy & iter < maxiter
34 |     s3 = 0;
35 |     for s = 1:nbus
36 |         Pc(s,1) = 0;
37 |         Qc(s,1) = 0;
38 |         V2c(s,1) = 0;
39 |         if kb(s) == 3
40 |             s3 = s3 + 1;
41 |             for r = 1:nbus
42 |                 Pc(s) = Pc(s) + E(s) * (G(s, r) * E(r) - B(s, r) * F(r)) + F(s) * (G(s, r) * F(r) + B(s, r) * E(r));
43 |                 Qc(s) = Qc(s) + E(s) * (-G(s, r) * F(r) - B(s, r) * E(r)) + F(s) * (G(s, r) * E(r) - B(s, r) * F(r));
44 |             end
45 |             delta(2*s3-1,1) = P(s) - Pc(s);
46 |             delta(2*s3,1) = Q(s) - Qc(s);
47 |         elseif kb(s) == 2
48 |             s3 = s3 + 1;
49 |             for r = 1:nbus
50 |                 Pc(s) = Pc(s) + E(s) * (G(s, r) * E(r) - B(s, r) * F(r)) + F(s) * (G(s, r) * F(r) + B(s, r) * E(r));
```

同期発電機モデル

- Park理論に基づく同期機モデル

機器定数を用いてあらわされたモデル

→ 仮定により2通りの表現方法

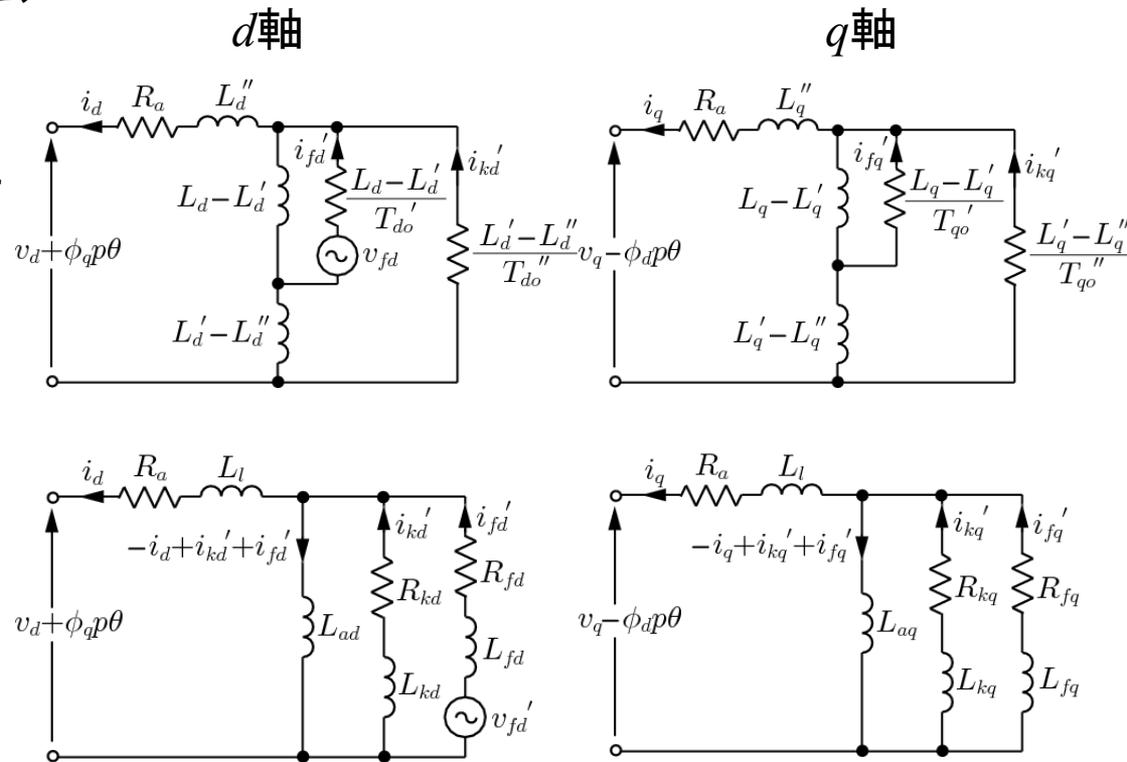
- 「仮定A」

同期機の端子で三相短絡を起こしたとき、短絡の前後で励磁電流が急変しないという実験的事実に基づいた方式

- 「仮定B」

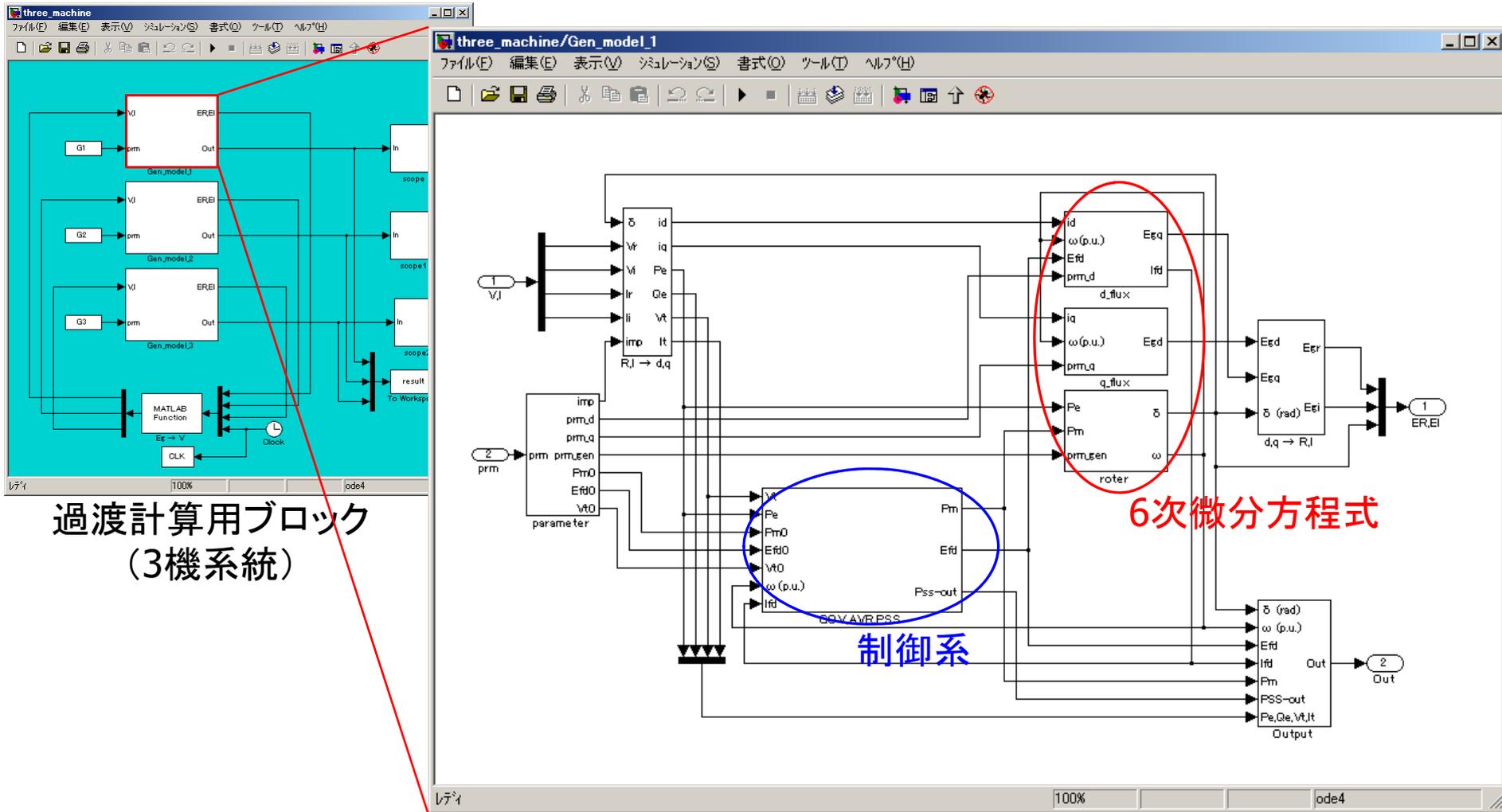
d 軸上に存在する3つの巻線が1つの3巻線変圧器を構成し、同一の磁気回路を共有しているという考え方に基づいた方式

同期機の等価回路



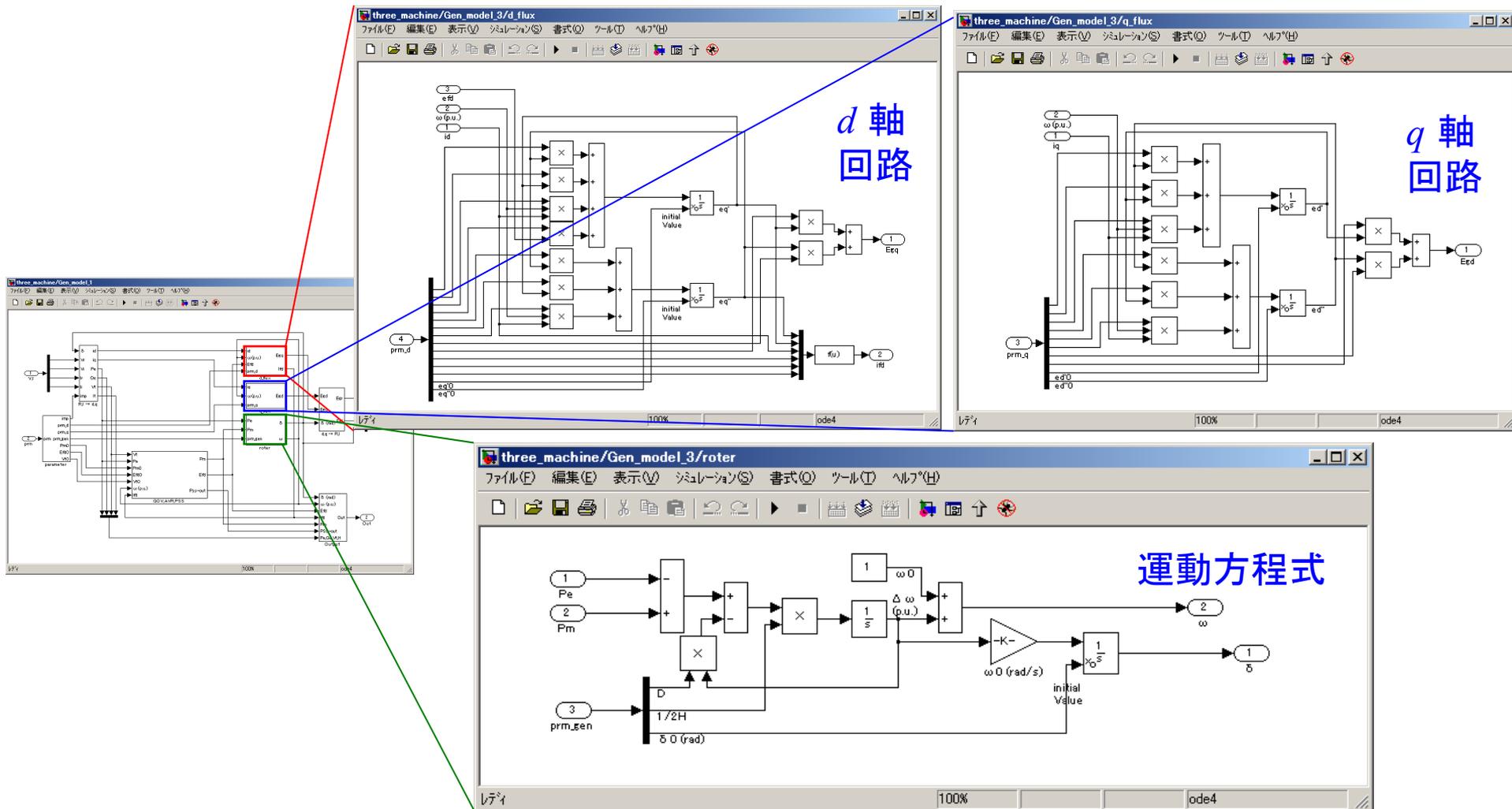
参考文献 関根泰次:「電力系統過渡解析論」, オーム社 (1984)

Simulinkで構成した同期発電機モデル



サブシステム化により各ブロックの構造やその役割を容易に把握可能

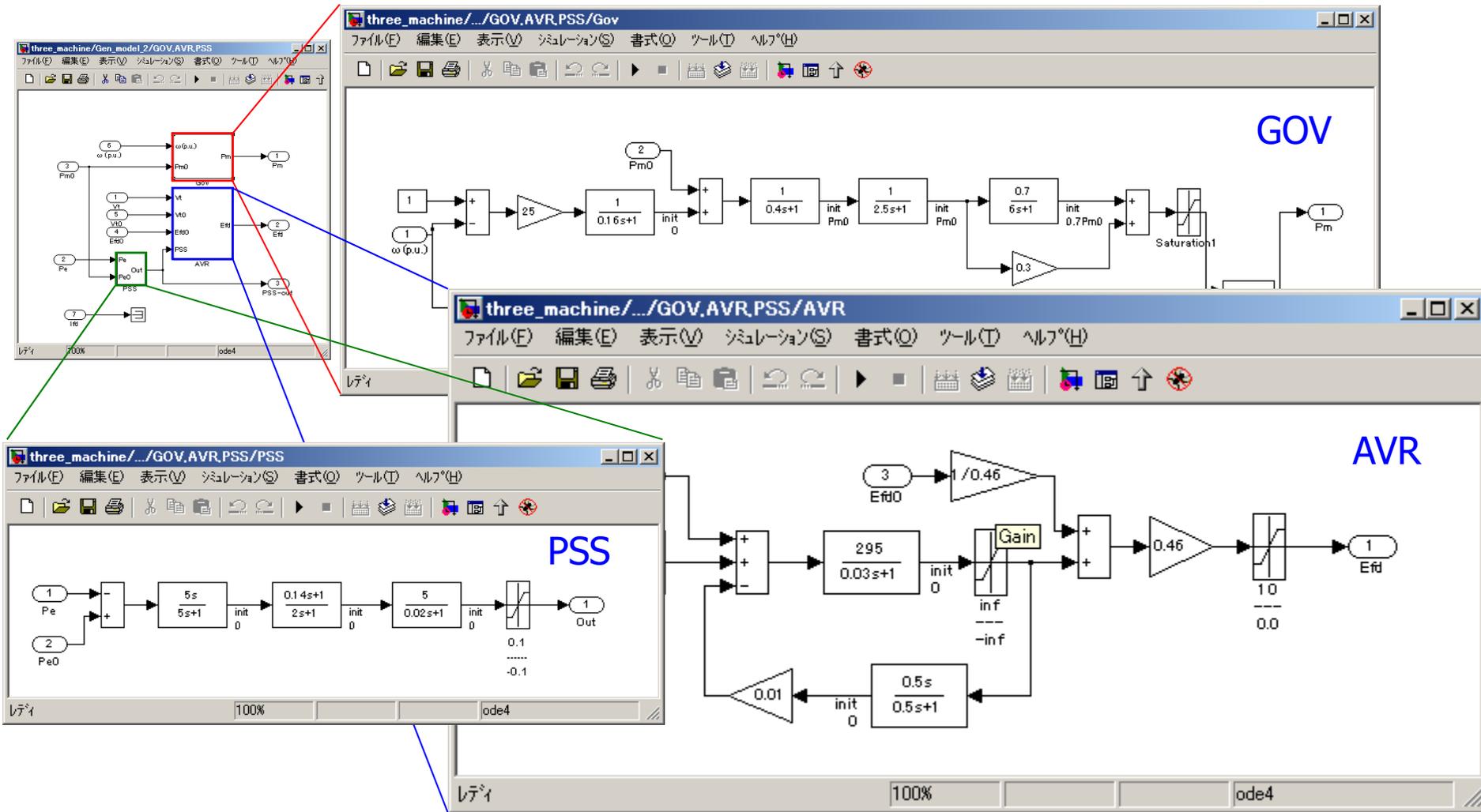
d 軸回路, q 軸回路, 運動方程式



敢えてSimulink上で微分方程式を構成
 解析目的に合わせて柔軟に変更・拡張が可能
 Scope等で各部の応答を容易に描画できる

発電機制御系モデル

GOV: Governor
AVR: Automatic Voltage Regulator
PSS: Power System Stabilizer



Simulinkの機能をそのまま活用可能, 視覚的にモデル構築
各種Toolboxとの併用により制御系設計が容易に

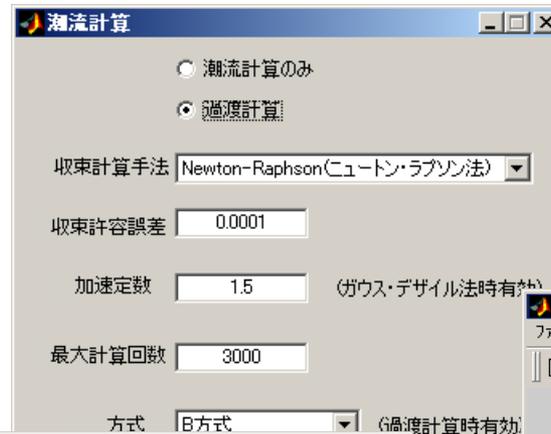
実行用GUI

※GUIDEで構築

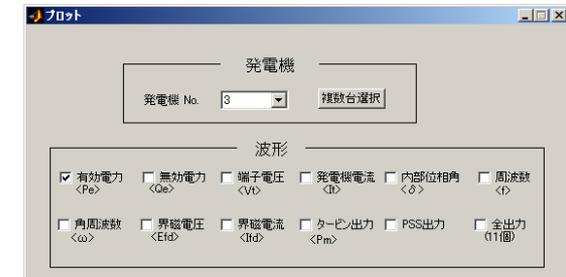
メニュー画面



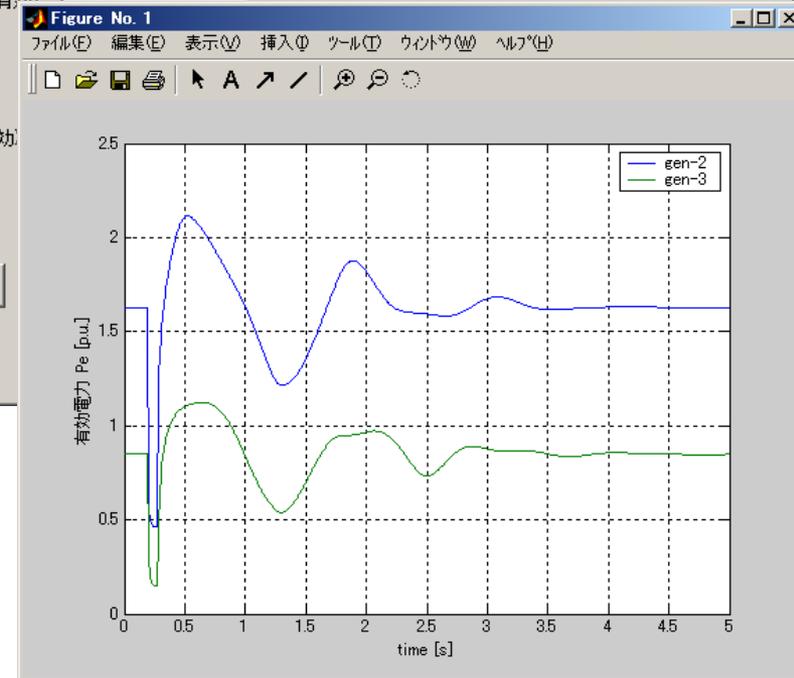
潮流計算実行画面



波形出力



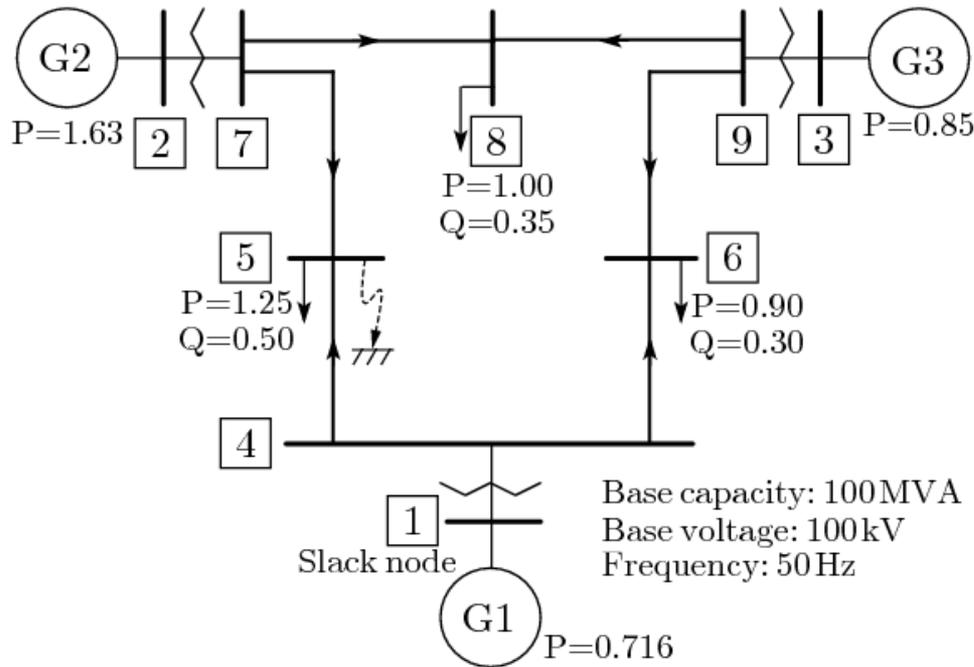
発電機定数入力画面



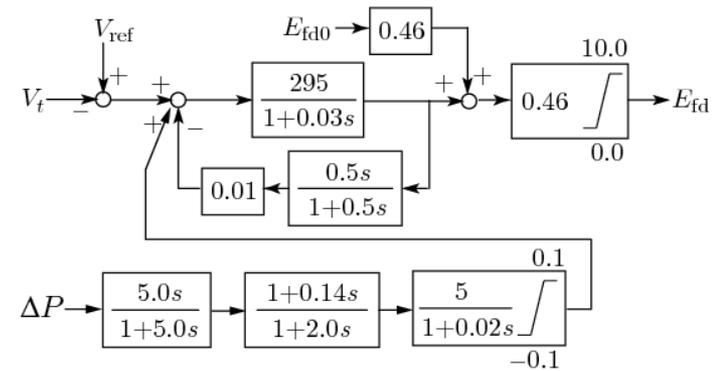
各定数, 条件はすべてGUI上で入力可能
ボタンのクリックのみで一連のシミュレーションを実行可能

モデルシステムを用いた評価

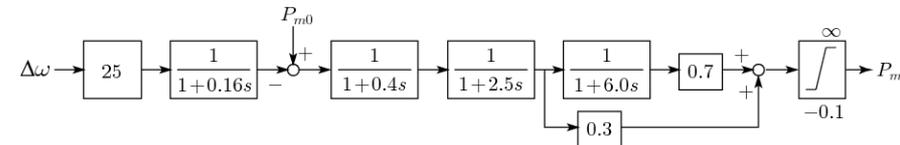
3機9母線系統モデル



ΔP 型PSS付きAVRモデル



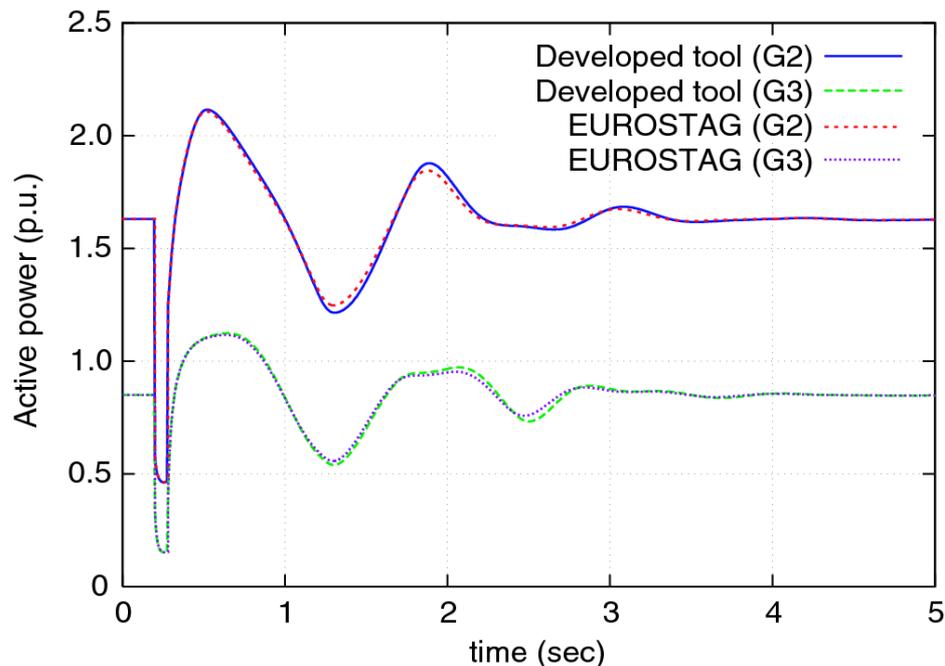
GOVモデル



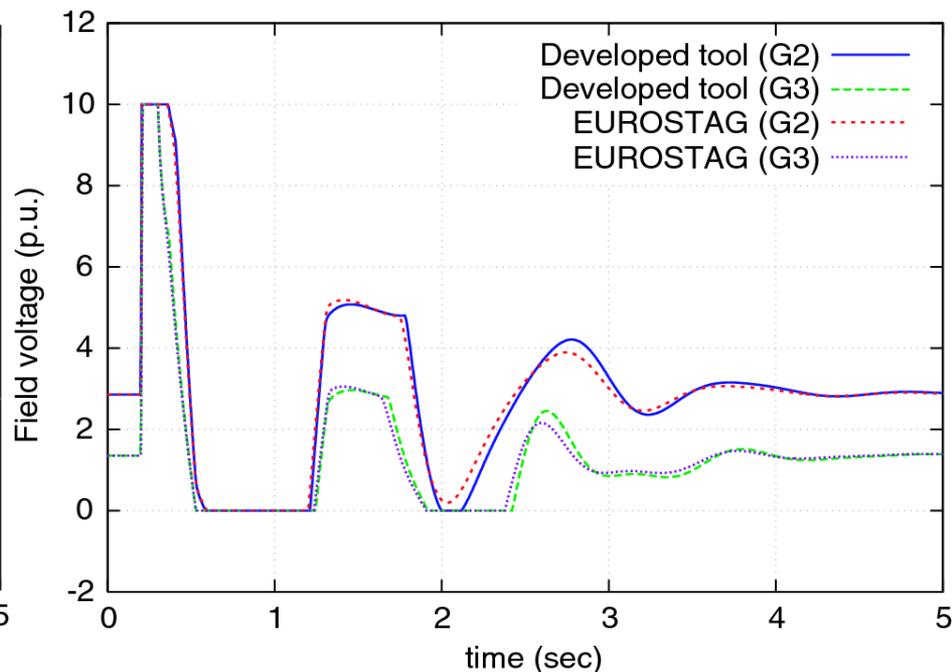
ノード5における持続時間0.08秒の三相地絡故障を想定

汎用解析ツールとの比較

発電機(G2, G3)有効出力



発電機(G2, G3)界磁電圧

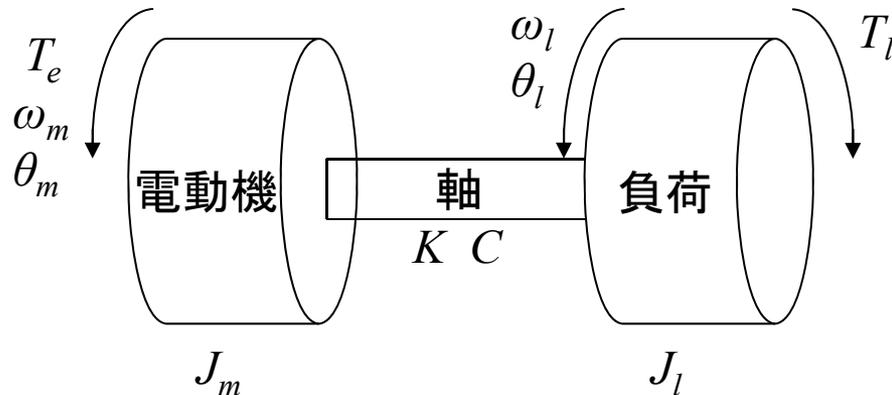


汎用解析ツール(EUROSTAG)との比較
発電機モデルとして「仮定B」を使用

両者でほぼ同一の結果
開発ツールによる系統動特性解析の妥当性を確認

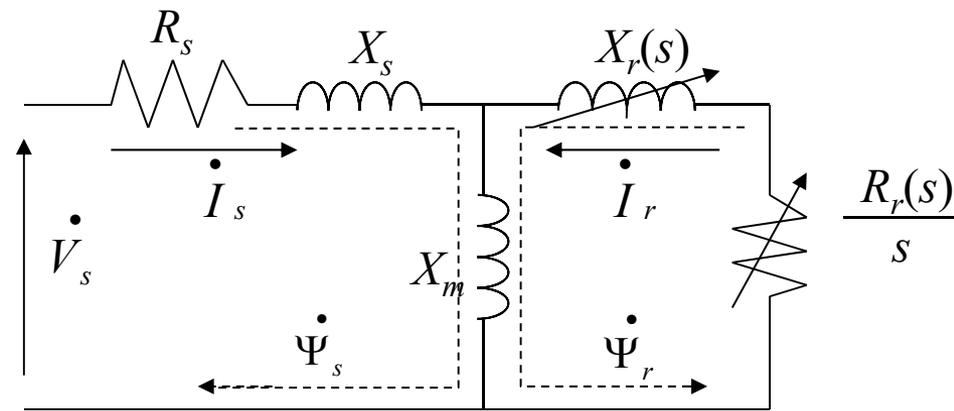
誘導電動機モデル

運動系モデル



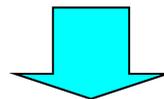
J_m : 回転子慣性モーメント J_l : 負荷慣性モーメント
 T_e : 誘導機発生トルク T_l : 負荷トルク
 ω_m : 回転子角速度 ω_l : 負荷側角速度
 θ_m : 回転子角度 θ_l : 負荷角度
 K : バネ定数 C : 減衰係数

等価回路



固定子: $(R_s + jX_d) \dot{I}_s + \dot{E}_m = \dot{V}_s$

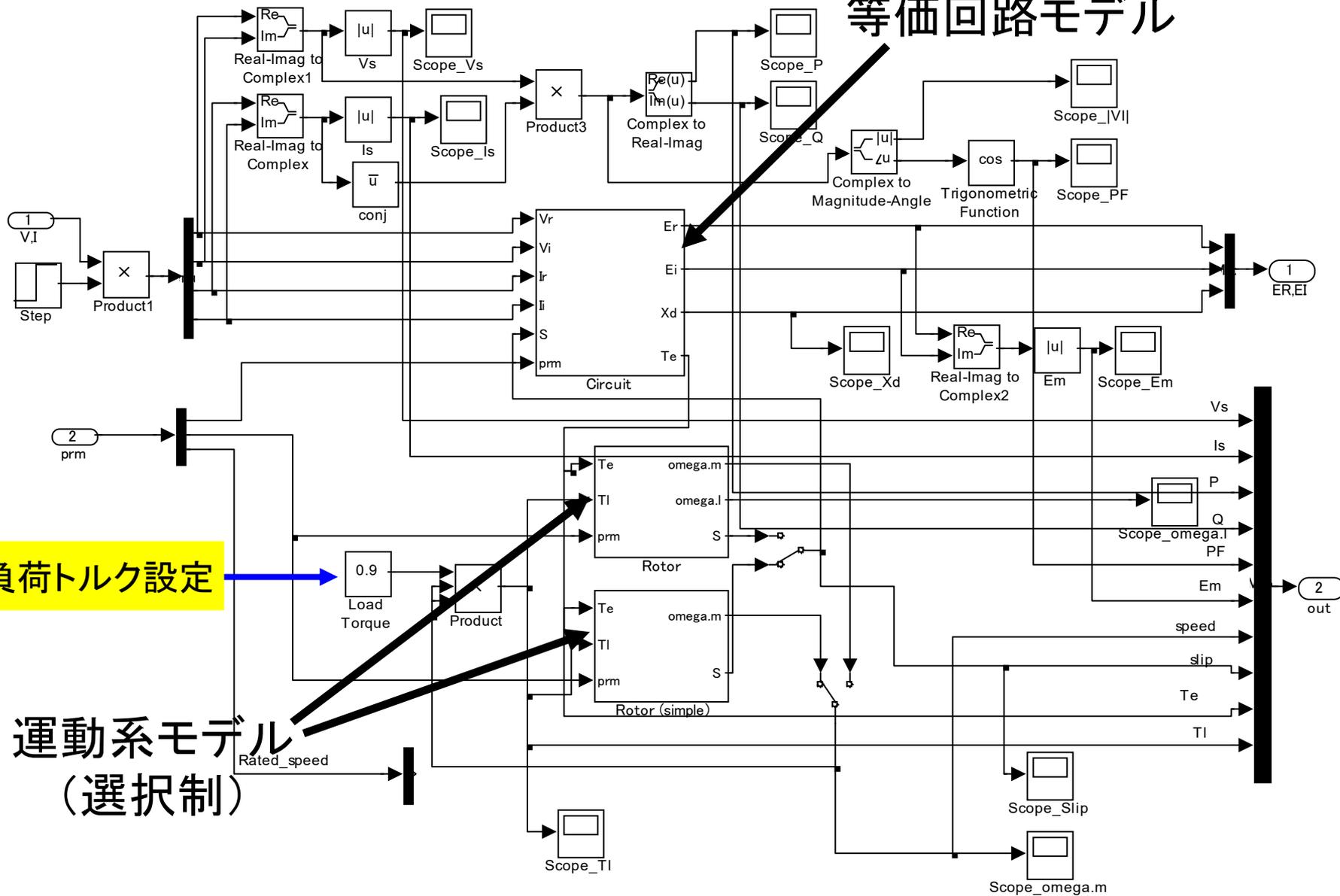
回転子: $\dot{E}_m - j \left(X_m - \frac{X_r X_m}{X_r + X_m} \right) \dot{I}_s + \gamma_0 \left(\frac{d\dot{E}_m}{dt} + jS \dot{E}_m \right) = 0$



軸系を含むモデルを模擬し、軸に伝達される定常的なトルクを計算可能

誘導電動機モデル

等価回路モデル

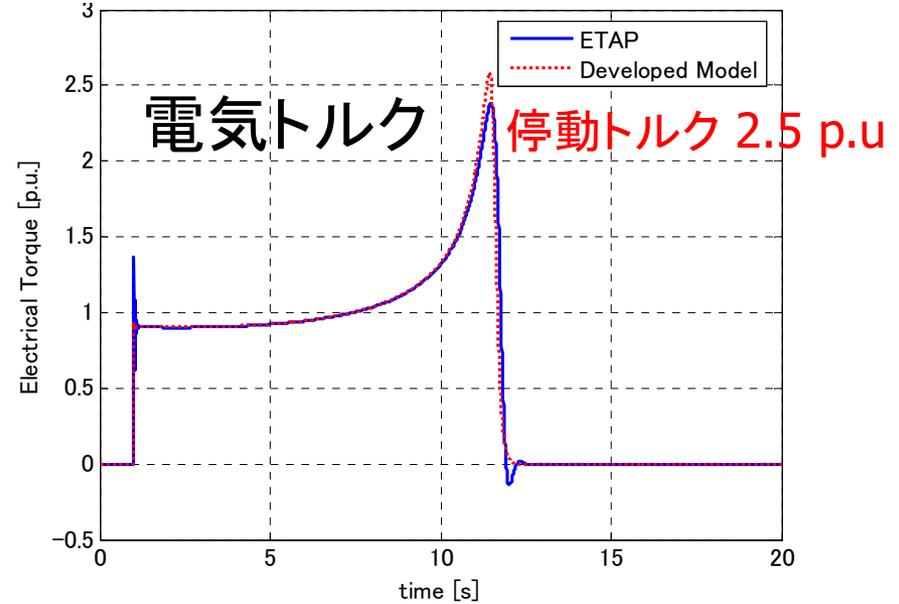
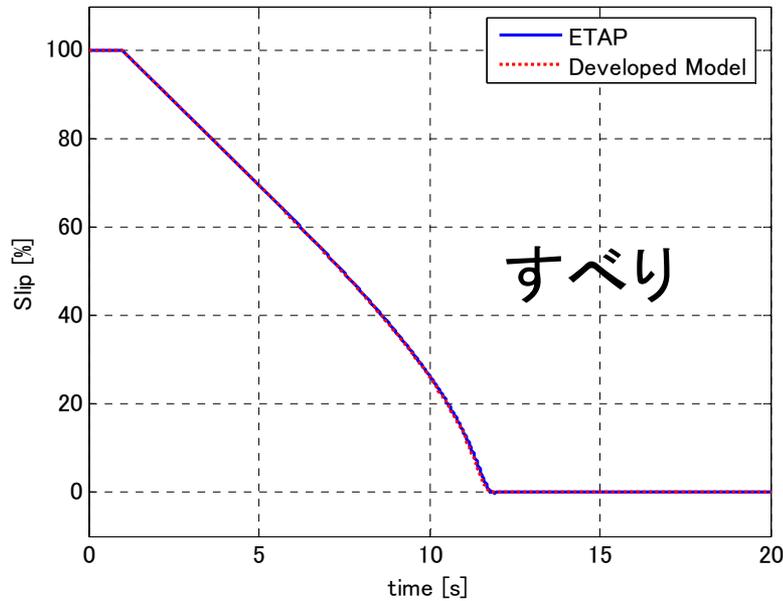
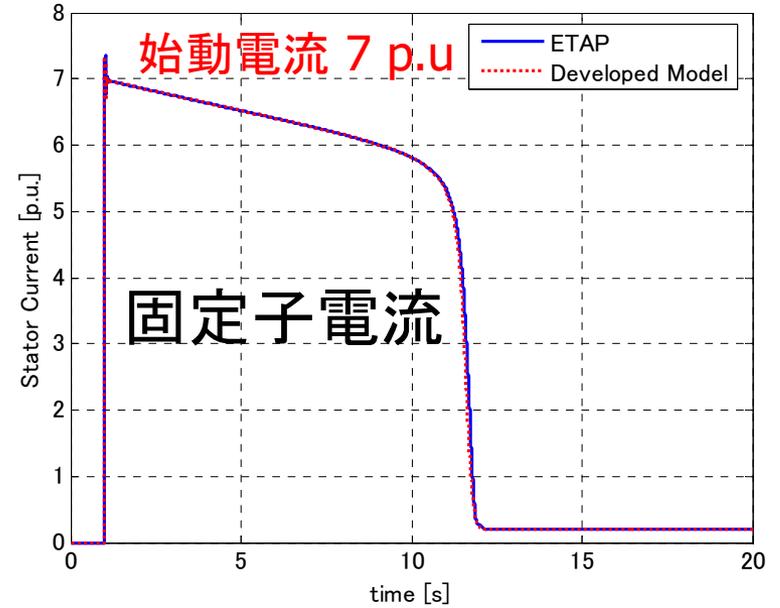
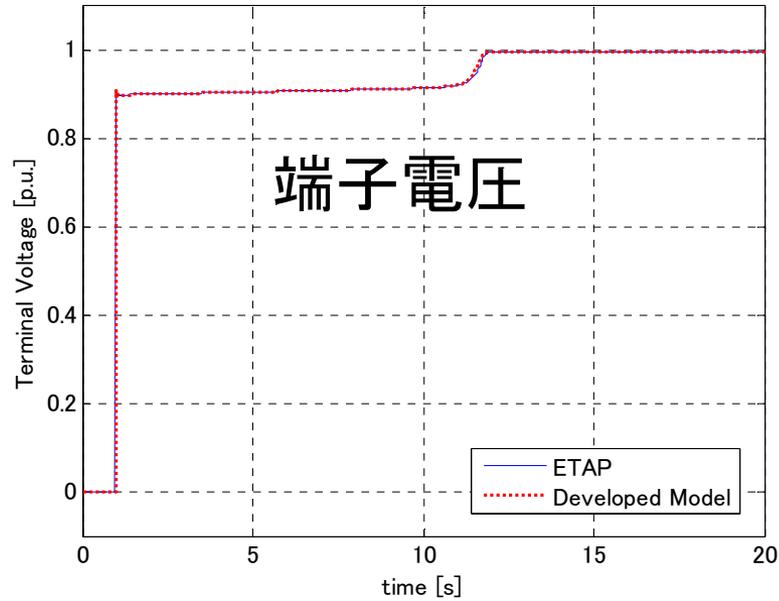


負荷トルク設定

運動系モデル
(選択制)

始動特性の比較(負荷トルクなし)

汎用解析ツール(ETAP)との比較



解析事例(1)

自家用発電設備モデルの詳細化による工場受変電システム解析

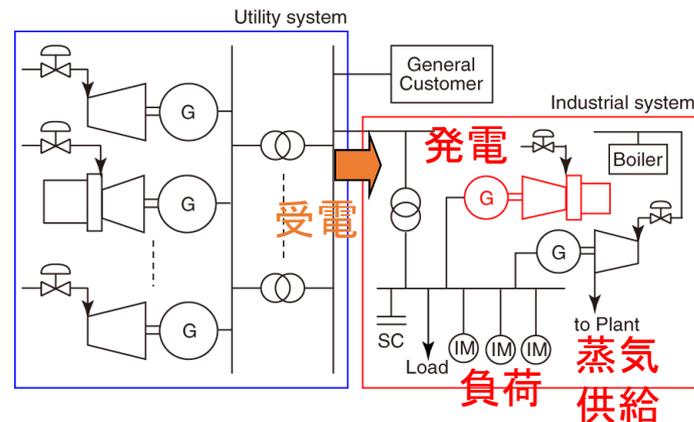
前田晃志・渡邊政幸・三谷康範・壹岐浩幸・瓜生芳久・浦野恭博：
「自家用発電設備モデルの詳細化による産業用電力系統解析」，
平成22年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会，
PE-10-119, PSE-10-118 (2010)

目的

工場用システムと事業用システムの違い

- ・ 蒸気利用が優先される場合あり
- ・ 負荷の大半は誘導電動機

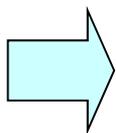
系統解析の精度向上を図るには、
制御系を含め詳細なモデル構築が必要



- ・ 自家用蒸気タービン発電機
 - ・ 自家用ガスタービン発電機
- ガバナ制御系を含めて必要精度に応じた詳細なモデルを構築

解析ツールとしてMATLAB/Simulinkを適用

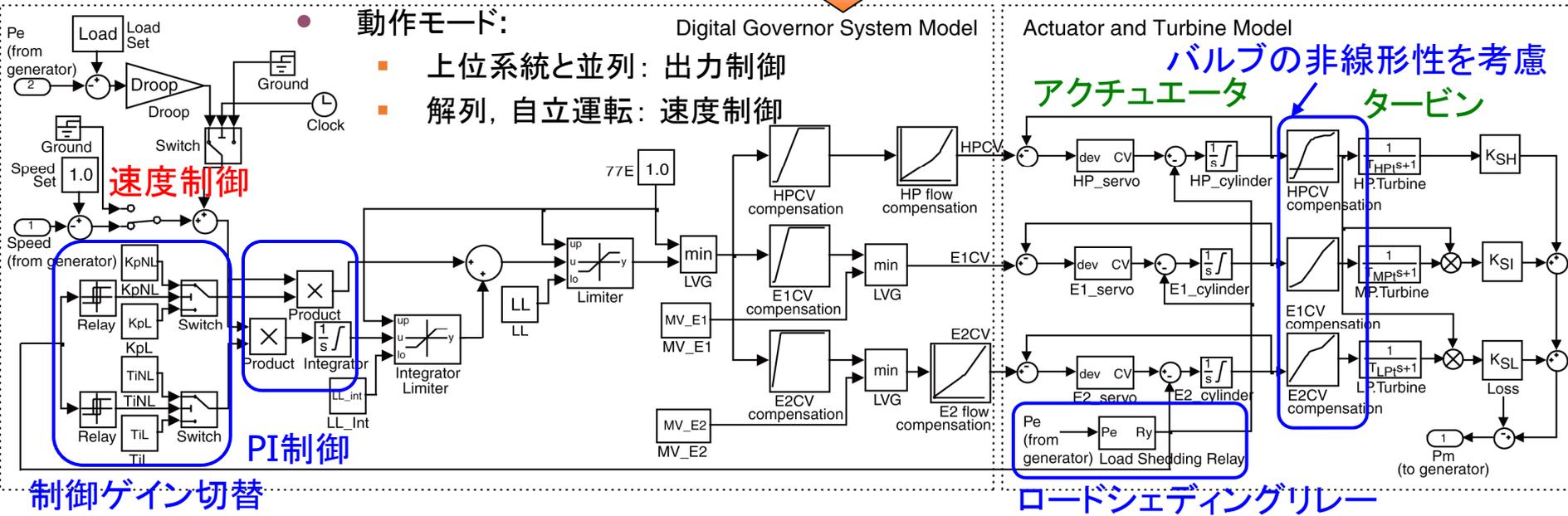
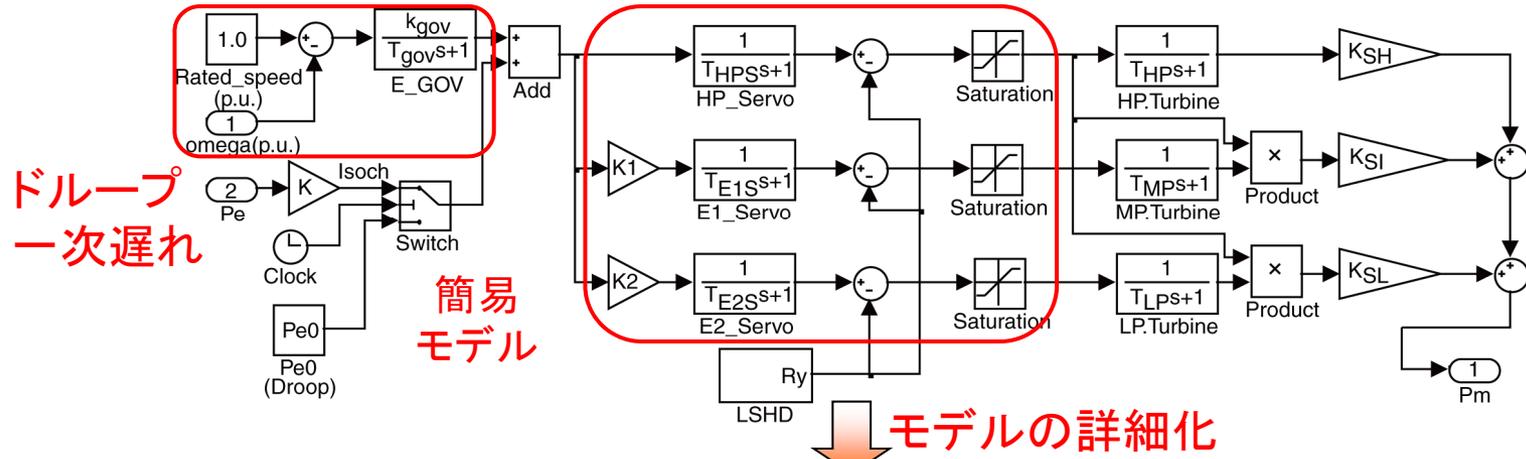
- ・ 行列演算に優れる
- ・ ブロック図を組み合わせることで複雑なモデルも容易に構築可能



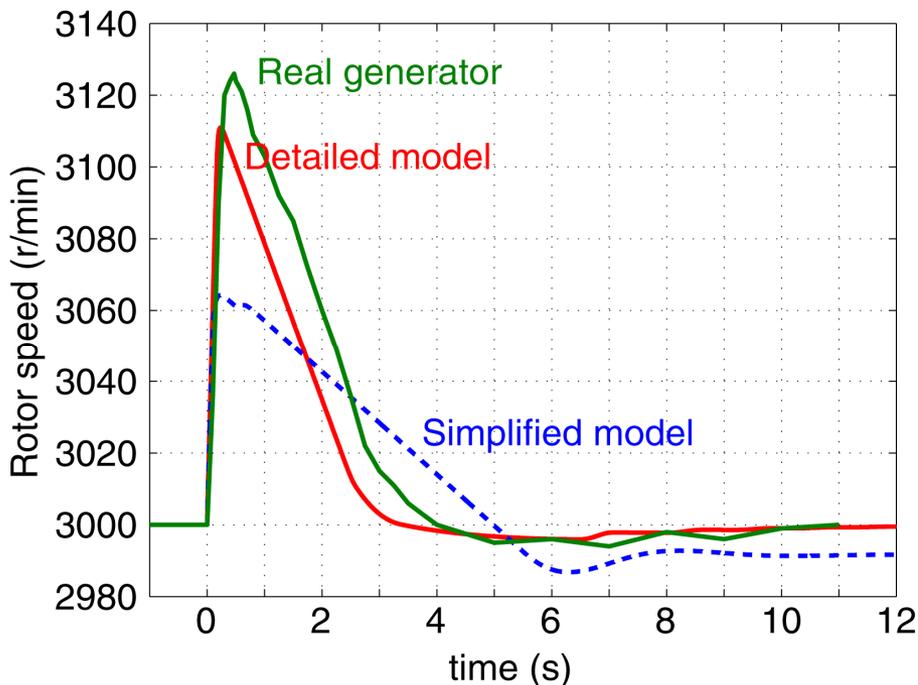
構築した発電機モデルの精度評価
システムモデルを用いたシステム事故時の応答解析

自家用蒸気タービン発電機ガバナのSimulinkモデル

アクチュエータを簡略表現



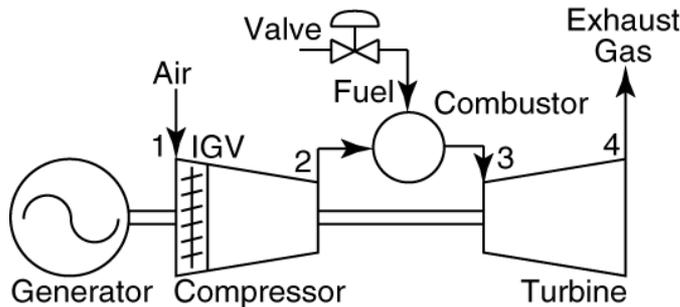
自家用蒸気タービン発電機ガバナモデルの 負荷遮断時における回転数の応答の比較



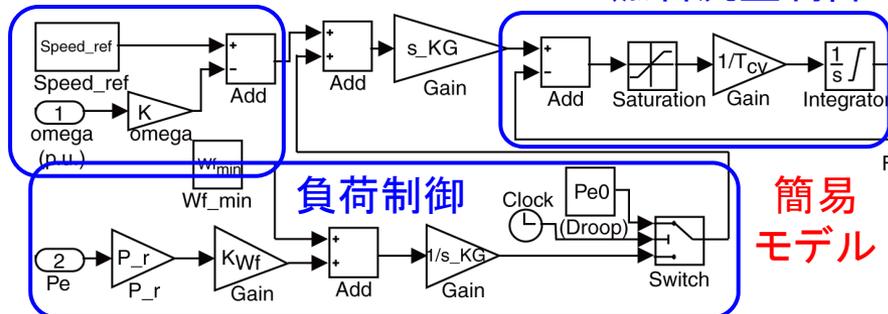
- 従来モデル(簡易モデル)
 - 回転数最大値が小さい
 - 整定値(2,990 min⁻¹)が一致しない
- 構築モデル(詳細モデル)
 - 回転数最大値が実際(3,126 min⁻¹)と一致
 - 整定値が実際(3,000 min⁻¹)と一致

汎用解析ツールなどの簡略モデルでは実測値と大きく異なる応答を示すが、
実機に基づく詳細モデルでは実測値とほぼ同等の結果が得られる

自家用ガスタービン発電機ガバナモデル

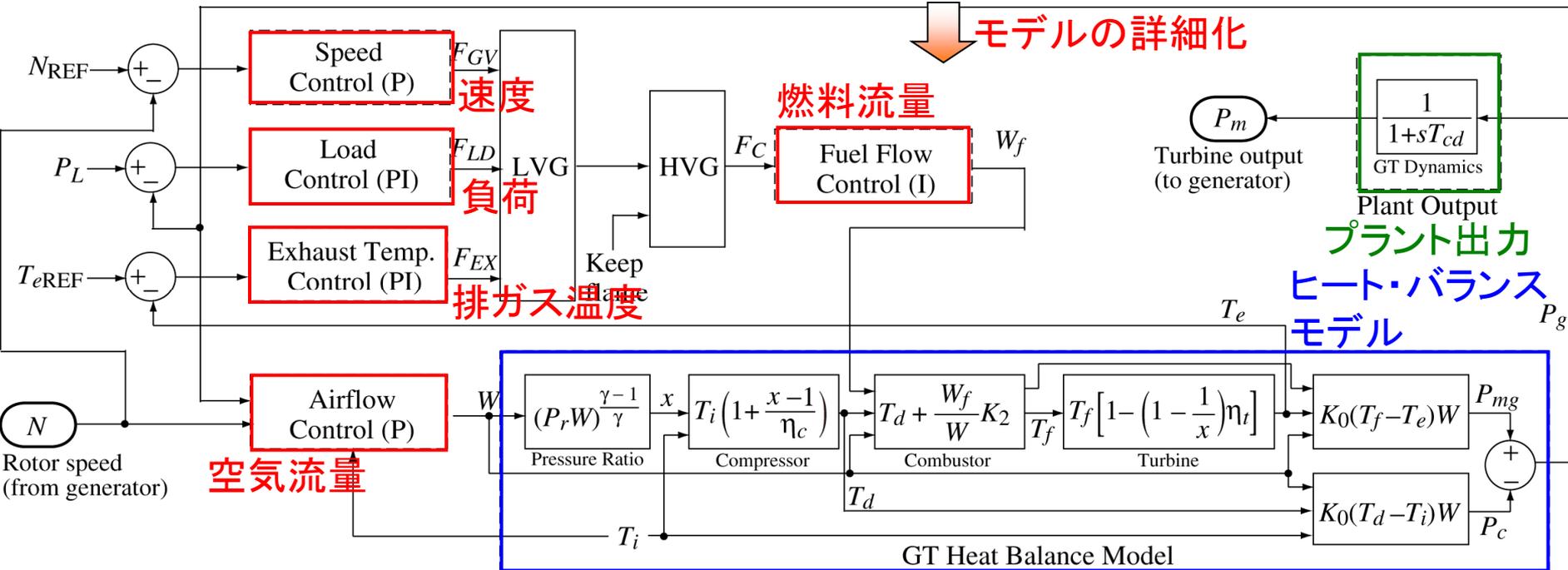


速度制御



簡易モデル

モデルの詳細化

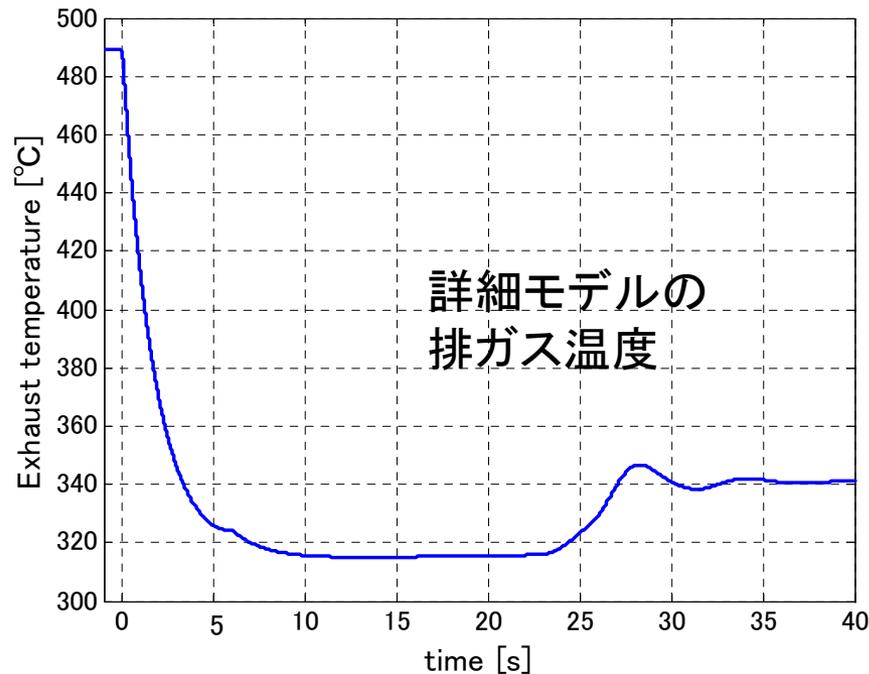
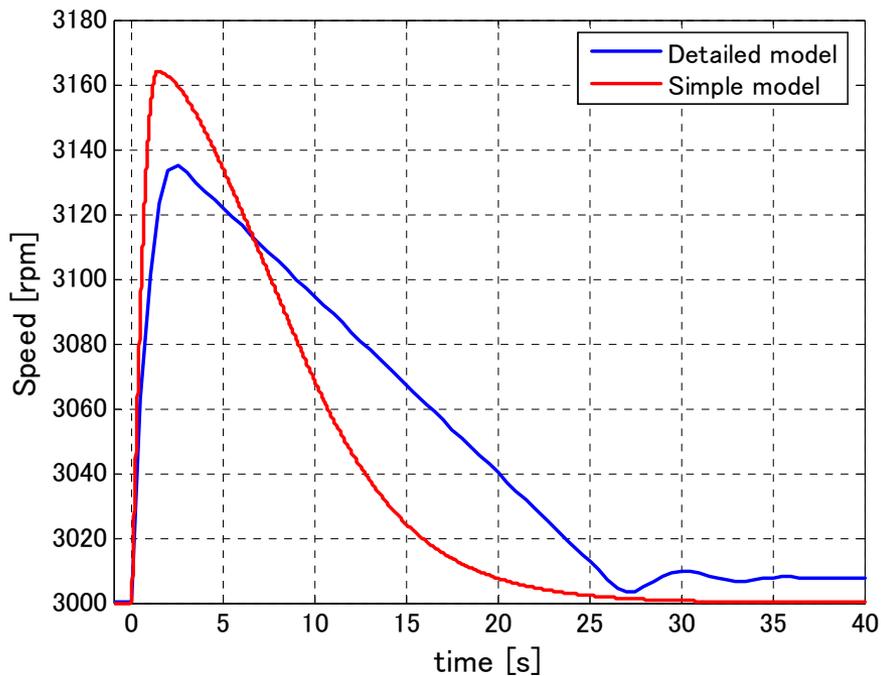


5つの制御器(メーカーにより異なる)

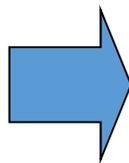
- 速度, 負荷, 排ガス温度, 燃料流量, 空気流量
- トラッキング制御, ヒート・バランスモデルの考慮

入手不可能なパラメータは
実測値から推定

自家用ガスタービン発電機ガバナモデルの 負荷遮断時における回転数の応答の比較



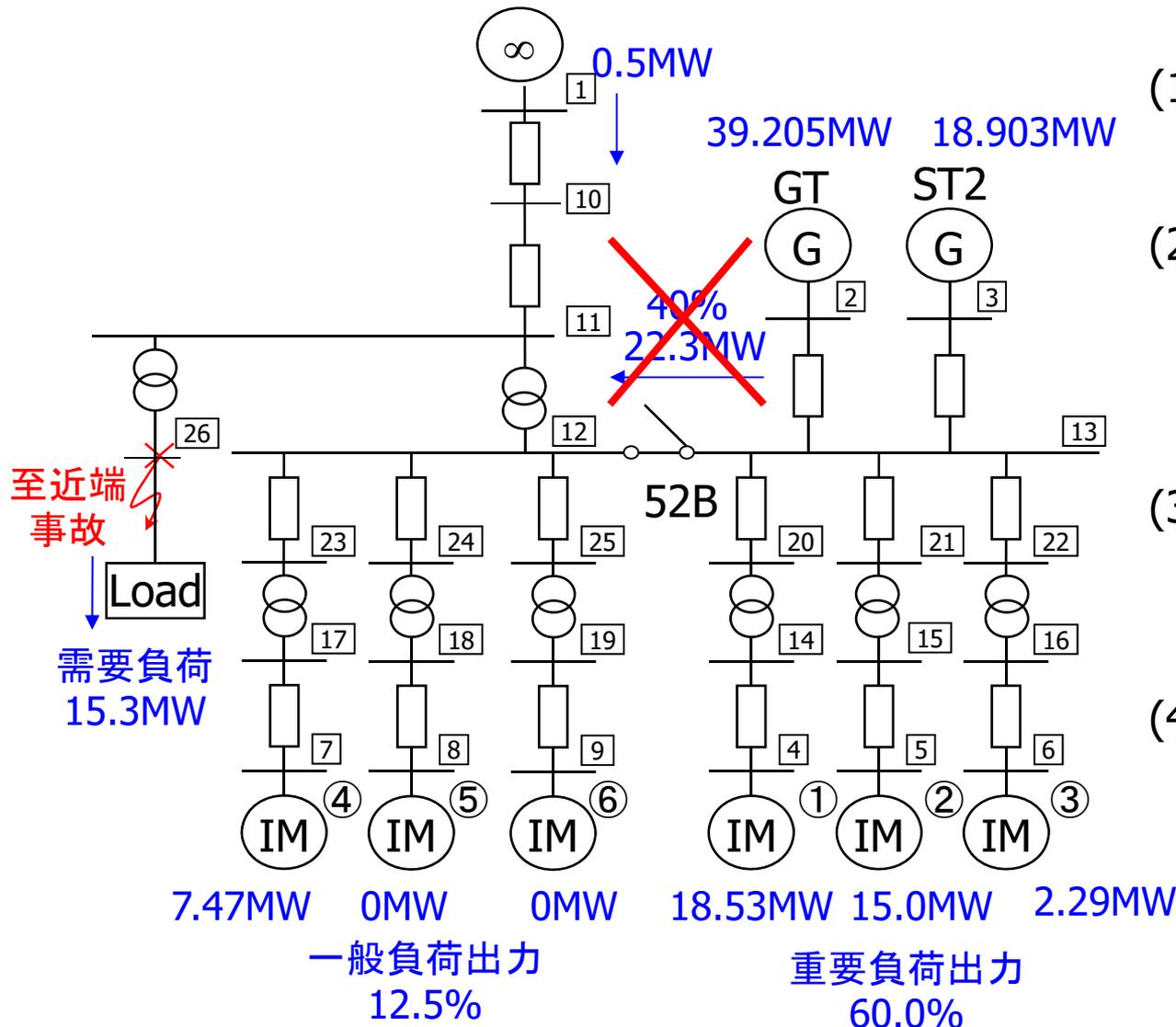
実機の負荷遮断試験記録
回転数の最大値: 3135 min^{-1}
整定後の回転数: 3008 min^{-1}



詳細モデルの応答
回転数の最大値: 3135 min^{-1}
整定後の回転数: 3008 min^{-1}

実機と一致
ボイラシステムの蒸気量の解析の有効な手段になりえる

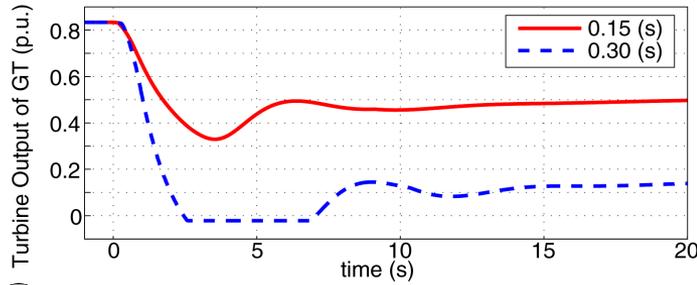
三相短絡事故解析



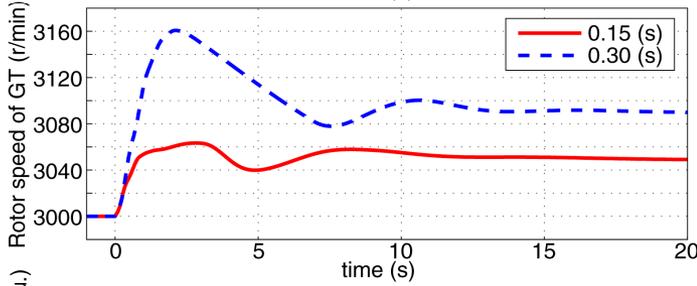
- (1) 電力会社管内の至近端で三相短絡事故発生
- (2) 0.15秒後もしくは0.30秒後に52B遮断器開放, 重要負荷設備は自立運転に移行
- (3) 電力会社系統から解列することにより需給アンバランスが発生
- (4) 自家用発電設備および重要負荷設備が自立運転状態に移行した時の応答を評価

発電機の応答

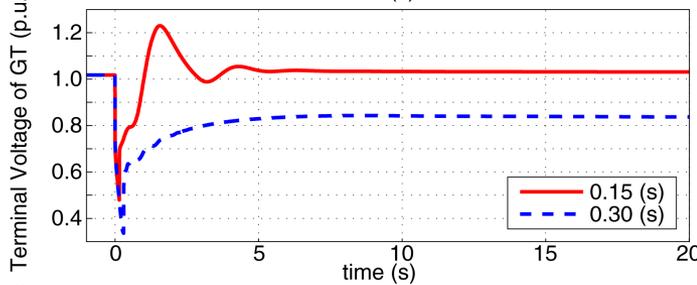
タービン出力



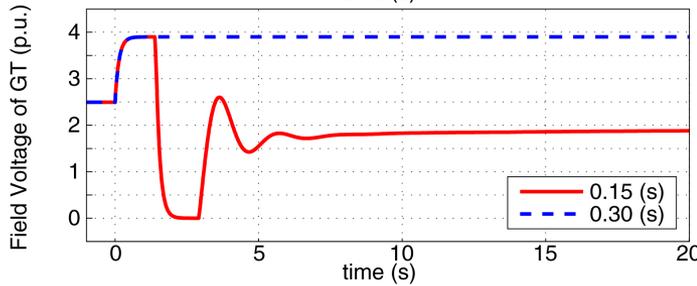
回転数



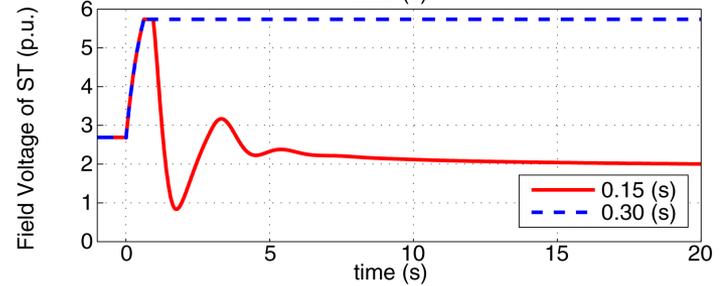
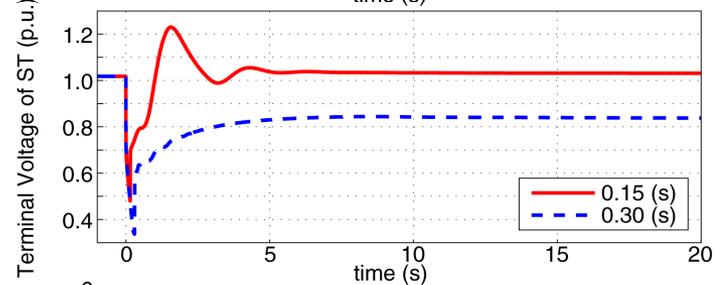
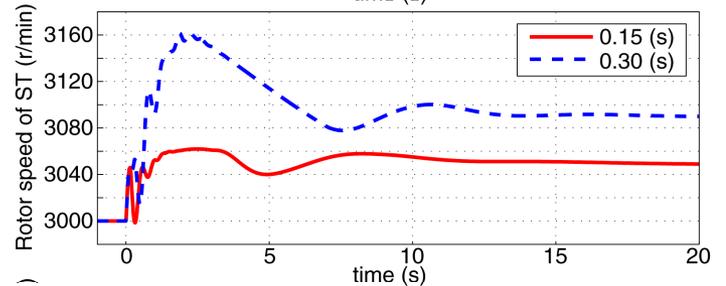
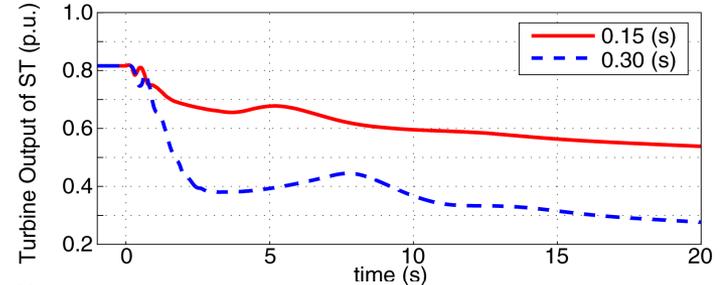
端子電圧



界磁電圧

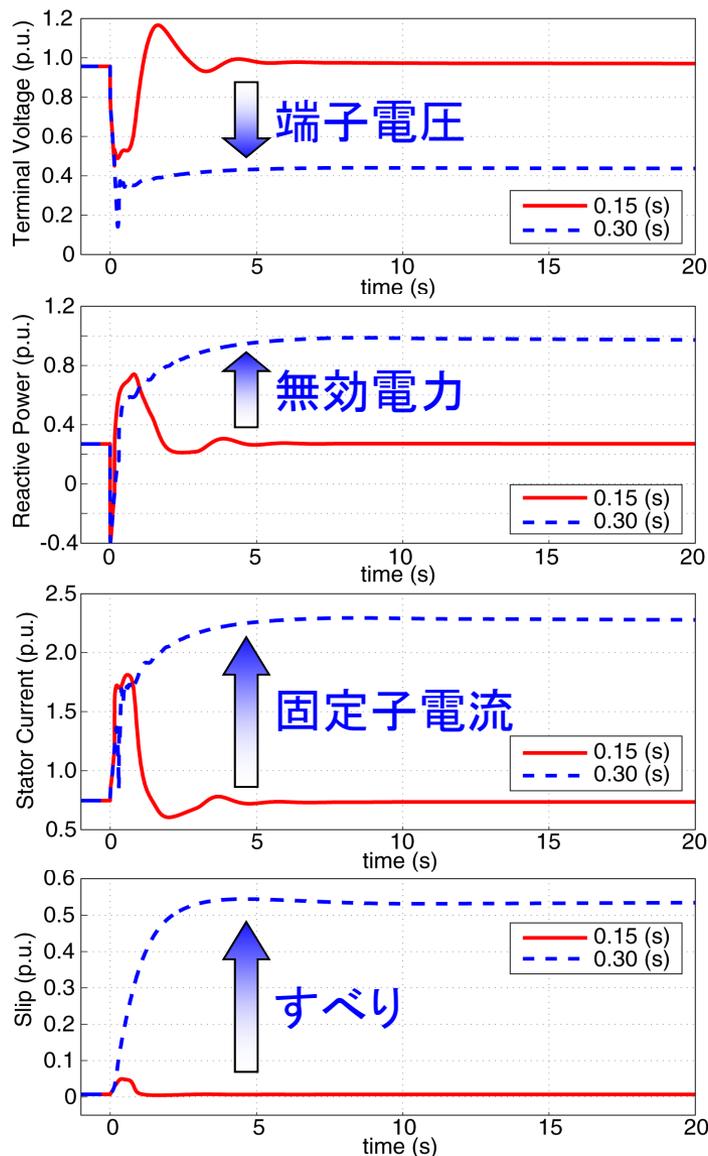


ガスタービン発電機



蒸気タービン発電機

誘導電動機1の応答



- 0.30秒で解列時の電圧回復性:
 - 大きなすべりにより低力率の再始動電流大
 - フィーダや変圧器での無効電力消費大
 - 各発電機の界磁電圧が上限に達する
 - 誘導電動機の再始動に要求される無効電力が発電機から供給されない
 - システム全体の電圧が回復しない
 - 誘導電動機のすべりが回復しない

解析事例(2) 発電機過励磁制限(OEL)の動作特性 と電圧回復性

原田友保・渡邊政幸・三谷康範・壹岐浩幸：
「産業用電力系統における発電機過励磁制限の動作特性と電圧回復性」，
平成29年電気学会全国大会，No.6-094 (2017)

OELによる励磁電流制限

OEL: Over Excitation Limiter

外部系統事故(瞬低, 停電等)に伴い, 電力会社から解列し自立運転へ移行

<問題点>

誘導電動機の再始動電流による
母線電圧降下

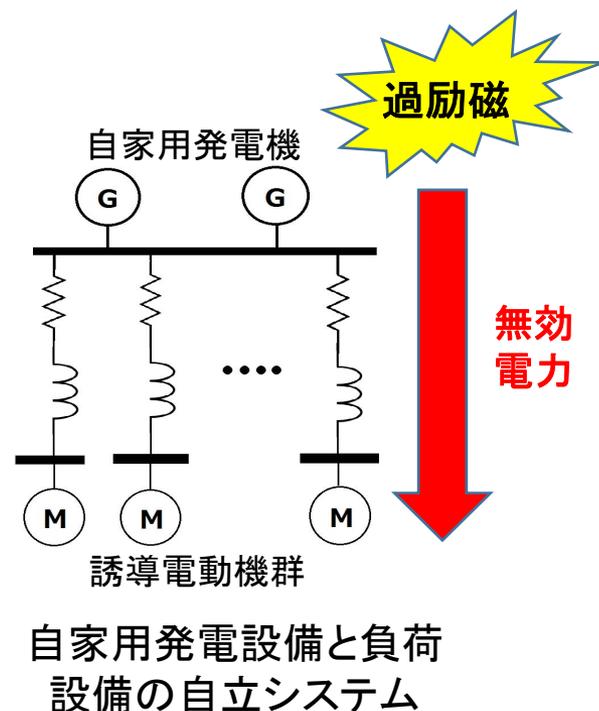


主に無効分

自家発電機の過励磁制限装置(OEL)
による励磁電流制限

母線電圧回復失敗に陥る可能性

OELの動作特性を考慮した
母線電圧回復性評価が必要



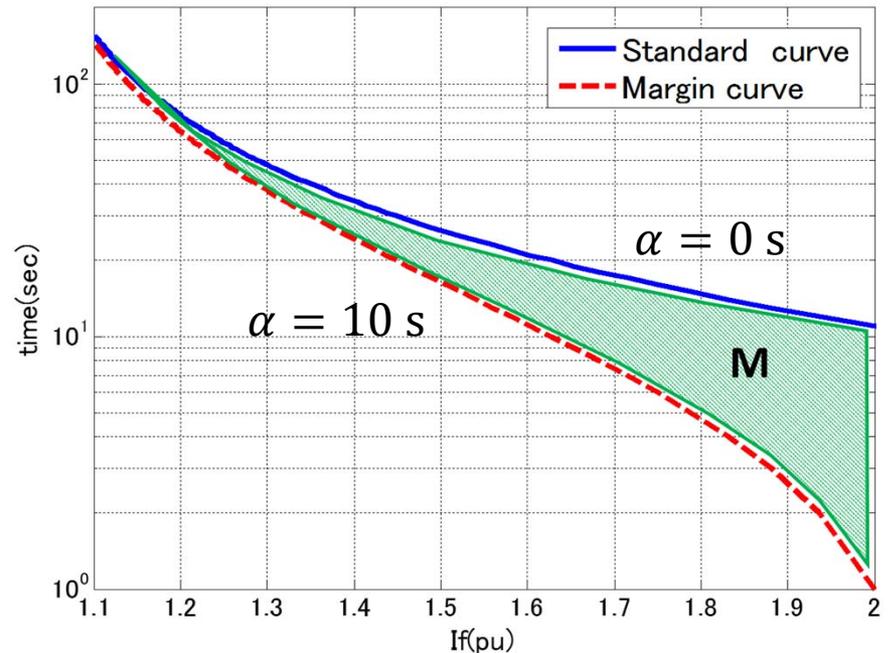
OELと電圧回復性

OELの動作特性が
電圧回復性に影響を与える

発電機保護のため規格値より
余裕(マージン)を取る

- ・ マージンの設定は一意ではなく
どの程度マージンが取れるか判
断が難しい
- ・ マージンが大きい場合は十分な
無効電力を供給できず母線電圧
回復失敗に陥る可能性がある

発電機励磁系におけるOELのモデリングが重要



OEL動作特性
(縦軸:時間, 横軸:励磁電流)

励磁制限と電圧回復性

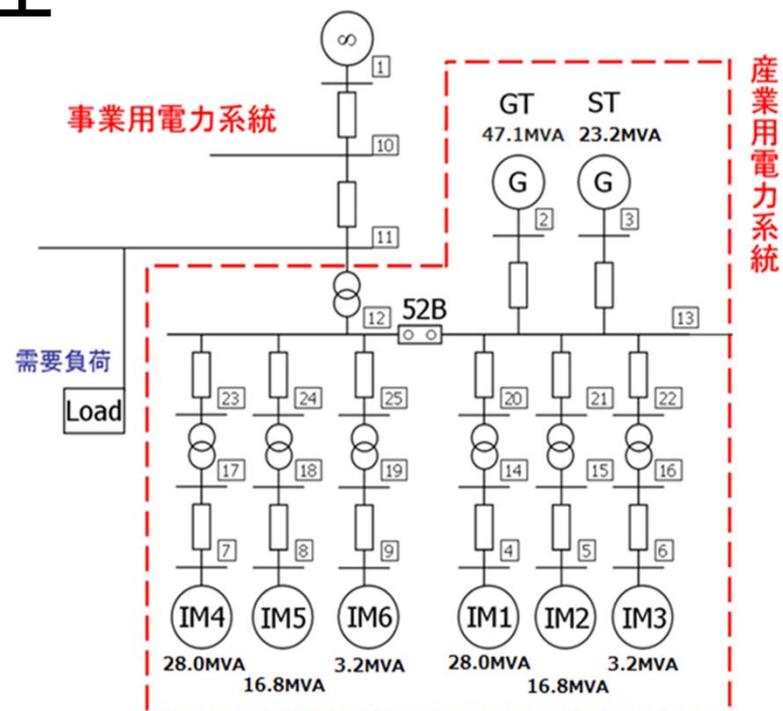
発電機, 事故, 負荷条件

名称	値
シーリング値	2.0 pu
事故時間	0.25 s
重要負荷割合	53.9 %

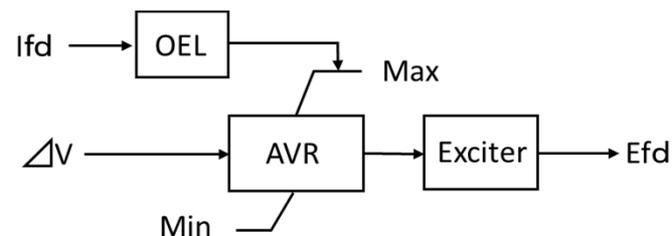
ST(蒸気タービン発電機)
OELを考慮する

GT(ガスタービン発電機)
励磁系を考慮しない
(界磁電圧初期値一定)

OELの有無, マージンの違いによる
電圧回復性の違いについて解析



系統モデル

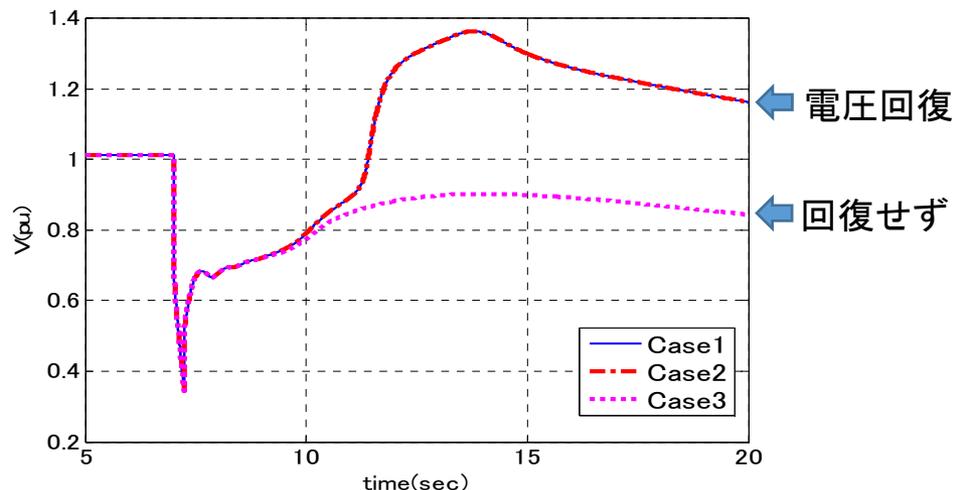


OELモデル

OEL有無, マージンの違いによる電圧回復性の評価

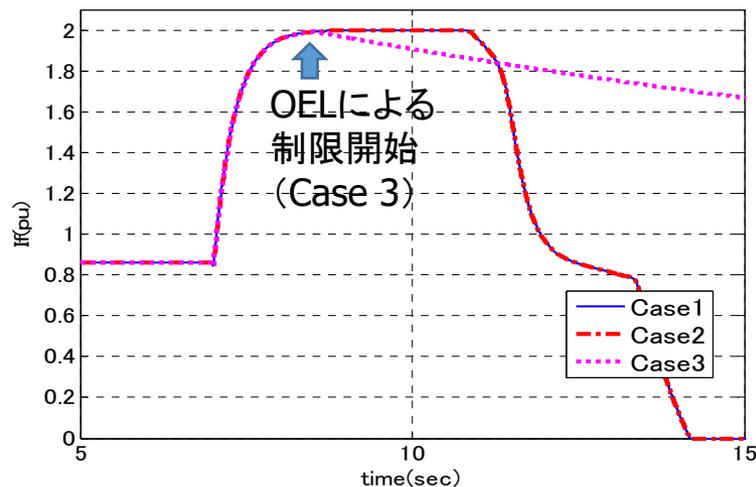
解析条件

	条件
Case 1	OEL無
Case 2	OEL有, マージン小
Case 3	OEL有, マージン大



Case 3 では励磁電流がOELにより制限されており, 必要な無効電力を十分に供給できていない
→ 電圧回復失敗

OELの有無やマージンの設定によって電圧回復性に影響を及ぼす



まとめ

- MATLAB/Simulinkで構築した電力システム解析ツール
 - 解析目的や現場のニーズに応じて柔軟にモデル構築が可能
 - 解析精度向上が期待
 - 各種Toolboxとの連携による制御器設計等も可能
- 工場受変電システム固有の過渡現象解析への適用
 - 実機に基づく自家用タービン発電設備詳細モデル化
 - 瞬時電圧低下時における誘導電動機の特性に起因する電圧回復性の解析
 - 発電機過励磁制限装置と電圧回復性の解析