

米国原子力発電所の電気過渡応答解析プログラムの活用状況とその性能の調査

Investigation of Practical Use Situation and Performance for Electric Transient Analysis Programs in the U.S. Nuclear Power Plants

嶋田 善夫 (Yoshio Shimada)*¹

要約 本研究の目的は、海外トラブル等の情報分析から良好事例として抽出された米国の原子力発電所における電気過渡応答解析プログラムの活用状況を調査し、国内原子力発電所で実施する場合には、使用が望ましい電気過渡応答解析プログラムを選定し、その活用を促進することである。また、この技術の国内原子力発電所への普及を図ることを目的として、選定した電気過渡応答解析プログラムを使用して、国内原子力発電所の非常用ディーゼル発電機 (EDG) の負荷投入シーケンス試験の過渡応答をシミュレーションした結果と実機試験データを比較し、シミュレーションの精度を検証した。その結果は、以下の通りである。(1) 米国の原子力発電所では、電気過渡応答解析プログラム (ETAP, EMTP 等) によるシミュレーションが広く行われ、安全性の向上に寄与していることがわかった。(2) 国内原子力発電所の EDG の負荷シーケンス試験時の発電機の有効電力、電流、電圧および周波数の過渡応答について、シミュレーション結果と実機試験データを比較した結果、精度の高いシミュレーションの可能なことが検証できた。

キーワード 電気過渡応答解析プログラム, ETAP, EMTP, 非常用ディーゼル発電機, EDG, シミュレーション, 原子力発電所, 安全性, 実機試験データ

Abstract The purposes of the present study are firstly to investigate the status of practical use of electric transient analysis programs used in U. S. nuclear power plants, which has been extracted as good examples from the information analysis of overseas troubles, and secondly to select a program to be recommended for use in implementing electric transient analysis in domestic nuclear power plants. In addition, to promote its practical use, a selected electric transient analysis program was tested by simulating the transient response during a load sequence test of an emergency diesel generator (EDG) in a domestic representative nuclear power plant to evaluate its simulation accuracy by comparing its result with the measured plant data. The results obtained are as follows:

(1) In U.S. nuclear power plants, simulations using electric transient analysis programs, such as ETAP, EMPT, etc., are widely performed, which contributed to improve the plant safety. (2) A selected transient analysis program EMTP was verified in its accuracy in terms of transient response of active power, current, voltage and frequency of the EDG during the load sequence test in a domestic representative nuclear power plant.

Keywords electric transient analysis programs, ETAP, EMTP, emergency diesel generator, EDG, simulation, nuclear power plant, safety, measured plant data

1. 調査目的

海外トラブル等の情報分析から抽出した良好事例として、多くの米国の原子力発電所では、電源系統の設計検証、不具合原因の究明などに電気過渡応答解析プログラムを活用していることがわかった。

そこで本調査の目的は、米国の原子力発電所にお

ける電気過渡応答解析プログラムの活用状況を調査し、国内原子力発電所での使用が望ましいプログラムを選定し、電気過渡応答解析プログラムの活用を促進することである。また、選定した電気過渡応答解析プログラムを使用して、国内原子力発電所の非常用ディーゼル発電機 (EDG) の負荷投入シーケンス試験の過渡応答をシミュレーションした結果と実

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

機試験データを比較し、シミュレーションの精度を検証し、この技術の国内原子力発電所への普及を図ることである。

2. 調査方法

NRCの公開文書（事業者事象報告書（LER）、検査報告書（Inspection Report））による文献調査および米国原子力発電所に依頼してアンケート調査を実施した。

3. 調査結果

3.1 NRCの公開文書による調査結果

調査は、名前がわかっている電気過渡応答解析プログラム（EMTP⁽¹⁾⁽²⁾、ETAP⁽³⁾など）の名称で、英文の全文検索により抽出し、最終的に5件の事例について調査した。調査結果は、表1に示す。

電気過渡応答解析プログラムの種類毎の件数は、ETAP、EMTPが、それぞれ3件、2件であった。

シミュレーションによる解析を実施した電源系統は、非常用所内電源系、所内電源系および送受電系が、それぞれ3件、1件、1件であり、非常用所内電源系の設計検証のために、シミュレーションが多く使用されている。

シミュレーションによる解析を発電所自ら実施している件数は1件であり、残り4件は不明である。

シミュレーションによる解析の目的は、設計検証、機器の不具合が安全機能に与える影響の検証、推定した機器の故障原因の検証、機器の故障原因の究明、大容量負荷起動時の母線電圧降下の確認、EDGの周波数、電圧の初期値が技術仕様書の許容範囲で変動した場合の影響評価である。

3.2 米国原子力発電所のアンケート調査結果

電気過渡応答解析プログラムによるEDGの過渡解析の実施状況について、米国65の原子力発電所にアンケートを依頼し、55の原子力発電所から回答を得た。調査結果の一例を表2に示す。

電気過渡応答解析プログラムによるEDGの過渡解析を既に実施している、または計画している発電所は、29（53%）であった。

電気過渡応答解析プログラムの種類毎の件数は、ETAP、EMTP、EDGメーカーのソフト、Simulink⁽⁴⁾、Mat-Lab⁽⁵⁾、EDSA⁽⁶⁾、PTW32⁽⁷⁾が、それぞれ7（24%）、4（14%）、7（24%）、1（3.4%）、1（3.4%）、1（3.4%）、1（3.4%）である。ETAP、EMTP、EDGメーカーのソフトが、多く利用されていることがわかった。

また、電気過渡応答解析プログラムを選定した理由の例を以下に示す。

- ① ETAPは10CFR50 Appendix Bなどで要求される品質保証要件に適合している、顧客サポートがよい、潮流計算が可能、業界で最も多く使用されている、一つのソフトに統合するため。
- ② PTW32は過去から既に使用している。
- ③ Mat-Labは使い慣れている。
- ④ EMTPは、使用が難しいソフトウェアであるが、非常に正確である。
- ⑤ EDSAを選定した理由は、EDSAとETAPを比較して類似のプログラムであり、明確な利点は見出せなかったこと、既にEDSAを使用していた。

シミュレーションの実施理由は、以下の通りである。

- ① EDGの負荷投入シーケンス中の電圧および周波数の過渡応答が、NRCの定めた設計基準内⁽⁸⁾であることの検証
- ② EDGの負荷投入シーケンス中の電圧の過渡応答が低電圧リレーを動作させないことの検証
- ③ EDGの高出力の負荷変更時の設計検証
- ④ 外部電源喪失／冷却材喪失機能試験で検証できないEDGの機能を検証
- ⑤ 要求時間内に電動機が起動できることの検証
- ⑥ ドループ⁽⁹⁾を持つEDG（EDGの周波数が低下した場合）が、事故解析要件に適合するかどうかの検証
- ⑦ EDGの負荷に対する余裕の検証
- ⑧ 直流電源系の解析
- ⑨ ガバナーの設計変更時の検証

さらに、23（79%）の発電所が、EDGの電圧および周波数の過渡応答に係る解析をシミュレーションにより実施している。

表1 NRCの公開文書による調査結果

| プラント | 事象件名 | 解析目的 | 解析系統 | 解析者 | 解析結果 | プログラム | 関連するNRCの検査 |
|--------------------|--|---|----------|-----|--|-------|--|
| Joseph M. Farley 2 | 許容基準に合致しないディーゼルの発電機シーケンサの AGASTAT タイマ (LER_50-364/92-009-00) | EDG 負荷投入シーケンサのタイマ設定値が、技術仕様書の許容基準から逸脱していたため、発見されたタイマ逸脱の範囲で、EDG が正常に機能したことを確認するために負荷投入シーケンサ中の過渡事象をシミュレーションした。 | 非常用所内電源系 | 不明 | EDG の機能に問題なし | EMTP | Electrical distribution system functional inspection (EDSFI) |
| Limerick 2 | 無効電力調整コンデンサ-故障に伴うタービントリップ/原子炉スクラム (LER_50-353/99-006-01) | 特高開閉所のサージアレスターの故障原因が、遮断器の開閉による高周波の過渡現象であると推定した事象シーケンスをシミュレーションにより確認した。 | 送電系 | 不明 | 推定したシーケンス通り | EMTP | — |
| Clinton 1 | 所内変圧器給電遮断器のトリップ起因するタービン動原子炉給水ポンプトリップに伴う原子炉水位の低下による、原子炉手動スクラム (LER_50-461/03-003-00, LER_50-461/03-003-01) | ヒーターの地絡によりヒーター遮断器がトリップする前に上流の変圧器遮断器がトリップした原因を究明するためにシミュレーションを実施した。 | 所内電源系 | 不明 | ヒーターの地絡により変圧器遮断器がトリップするの十分に事故電流が流れることおよび、遮断器の過負荷トリップ曲線と変圧器地絡保護リレーの動作曲線が接近しすぎていることが確認できた。 | ETAP | — |
| Davis Besse | オリジナルの交流電源系統の解析が最も厳しい条件を仮定していなかったことから、外部送電系統の電圧が低下した場合に、一部の 480V が発生した場合に、一部の 480V が安全系負荷が正常に機能しない可能性が判明、変圧器タップおよび不足電圧保護リレーの設定値変更 (LER_50-346/03-007_00) | 発電所の種々の運転状態および設計基準事故時の所内母線の潮流および電圧降下をシミュレーションにより確認した。 | 非常用所内電源系 | 不明 | シミュレーションにより外部送電系統の電圧が低下した条件で大 LOCA が発生した場合に、一部の 480V が安全系負荷が正常に機能しない可能性を確認した。 | ETAP | — |
| Wolf Creek | NRC の総合検査において、非常用ディーゼル発電機の負荷投入時における Tech. Spec. 許容下限値での周波数変動の影響について説明できず、NRC が引用されない違反を発行 (INTEGRATED INSPECTION REPORT 05000482/2008004) | 非常用ディーゼル発電機の負荷投入時における Tech. Spec. 許容上限および下限値での周波数および電圧変動の影響をシミュレーションする。 | 非常用所内電源系 | 発電所 | 結果は不明。 | ETAP | Integrated Inspection |

表2 米国原子力発電所のEDG 過渡解析の実施状況のアンケート調査結果（一例）

| 発電所 | EDG 過渡解析実施の有無（計画がある場合は有） | プログラム | 解析実施理由および追加情報 |
|-----|--------------------------|---------------------------------|--|
| A | 有 | ETAP | 計算は1991年にNRCのCDBI検査に対応するために実施された。ETAPを選択する前に、いくつかのソフトウェアパッケージが調査された。ETAPはもっとも良い顧客サポートを提供したので選択した。 |
| B | 有 | EMTP | 発電所は、SG9によって認可された。発電所の従業員によって維持されているEMTPにより最大負荷およびシーケンス投入の影響を確認した。 |
| C | 有 | Mat-Lab | 要求時間内に電動機を加速するための十分な電力をEDGが供給できることを検証するために、10年前に手計算が実施された。安全関連でない計算としてドループを持つEDG（EDGの周波数が低下した場合）が、事故解析要件に適合するかどうか検証するために2006年にMat-Labを用いた解析をおこなった。 |
| D | 有 | SKM systemsのPTW32 | 計算は発電所で開発され維持されている。Dapper/Captor/AfaultなどのSKM社のソフトウェアを利用した計算を、発電所が既に実施していたため、SKM社のソフトウェアを選択した。現在、ETAPを使用していないが、将来使用することを検討している。動的負荷解析は、プラント停止中の指摘事項に対応するために開発された。EDGの出力が、負荷に対して余裕があることおよび、EDGの能力を検証するために計算を実施した。 |
| E | 有 | Mat-Lab simulink(現在) ETAP(更新予定) | 発電所内の検討中に、SG9の要件への適合性検証が不十分との疑問が提起された。メーカーが使い慣れたソフトウェアを使用した。 |
| F | 有 | EDGメーカーのソフト Simulink | 発電所は、メーカーが権利を有するソフトウェアを使用し、Sargent & Lundyによって開発されたEDGの動的モデルを所有している。また、2301Aガバナーに更新したときに、Simulinkを使用した動的モデルを開発した。ETAPへ移植できるので、Simulinkを使用している。Simulinkを使用した動的モデルは、プラントメーカーで検証されたが、DC Cookの所有者による再評価は完了していない。 |
| G | 有 | PSS/E(過去) EDSA(現在) | 計算は、発電所によって実施された。1980年代中頃の規制に対応するためであったと考えられる。送電部門が最初にPSS/Eを購入したので使用した。（我々は、送電・配電・計画部門の一部であった。）発電所は、後にClass 1Eの125VDCシステムのモデルを開発するために、EDSAを購入した。その後、発電所はソフトウェアプログラムの数を減らした。EDSAは品質保証計画を持っていたが、PSS/Eは持っていなかったため、EDSAを選択した。発電所は、EDSAとETAPを比較し類似のプログラムであり、明確な利点は見出せなかったこと、既にEDSAを使用していたことからEDSAを選択した。 |
| H | 有 | EDGメーカーのソフト | メーカーの技術者が開発したソフトウェアを使用し、過渡解析計算は行われた。 |

3.3 使用が望ましいプログラムの選定

INSSは、以下の理由により、電気過渡応答解析プログラムとしてEMTPを選択した。

- ① ETAPは、NRCの品質保証規則への適合性、ソフトウェアメーカーのサポートがよいなどから、アンケートの調査結果により、24%の発電

所で使用されているが、かなり高価なソフトウェアである。

- ② 一方、EMTPは、米国政府機関が開発し、無償で公開されているため、世界で最も広く利用されている。使用が難しいというアンケート結果もあるが、現在では、使いやすいGUI（グラフィカルユーザーインターフェース）が開発さ

れており、ETAPと比較しても使いやすくなっていると考えられる。

- ③ さらに、ETAPは使いやすさを優先しすぎており、ユーザーからブラックボックスになっている部分が多く、シミュレーション結果の検証が困難のように思える。
- ④ ETAPの使用率が高いこともあろうが、不具合の報告があるのは、ETAPだけである。
- ⑤ EMTPは、NRCの品質保証規則への適合性は、担保されていないが、日本国内で利用する場合は、日本国内の基準に従うことになるので、ETAPと比較して不利にはならない。一般的に、シミュレーションの利用に当たっては、シミュレーション結果と実機の試験データを比較検証する、理論的な検証を行うなどにより、シミュレーションの品質保証は可能である。

また、米国では、電気過渡応答解析プログラムによるシミュレーションが、規則で義務付けられていないにもかかわらず事業者が積極的に取り組む理由は、以下のことが考えられる。

- ① 実機試験などの方法で設計検証を行うことと比較して、コストが低く、短時間で多くのデータを得られる。
- ② シミュレーションは、機器にストレスを与えない。
- ③ NRCの品質保証規則に合致したプログラムによるシミュレーション結果は、NRCの承認が比較的容易に得られる。(ETAPが多く使用されている理由でもある)

4. 国内原子力発電所のEDGのシミュレーション

4.1 シミュレーション実施の背景

3章の米国の原子力発電所の調査結果から、米国ではEDGの負荷投入シーケンス中の電圧および周波数の過渡応答が、NRCの定めた設計基準内にあることの検証、過渡応答中に低電圧リレーが動作しないことの検証などに、シミュレーションを積極的に利用している。

また、コンピューターのハードウェアおよびソフトウェアの進歩により、低コストで精度の高いシミュレーションを短時間でできる。

一方、国内の原子力発電所においては、電気事故の解析のためにシミュレーションも部分的に利用されているが、非常用電源システム全体をモデル化して、EDGの過渡応答を評価することは、まだ行われていない。

4.2 シミュレーション実施の目的

電磁過渡プログラム(EMTP)を活用して、実際に国内原子力発電所のEDGの負荷投入シーケンスの過渡応答をシミュレーションして精度を検証し、この技術の国内原子力発電所への普及を図る。

4.3 従来の手法とシミュレーションの比較

従来の手法による電圧降下の評価は、負荷の起動電流、変圧器のインピーダンス、発電機のインピーダンス、ケーブルのインピーダンスから表計算ソフトで電圧降下を評価しているため、正確な過渡応答は評価できない。また、周波数は、別途計算した方形波形状に単純化した負荷が、エンジンの軸に加わったと仮定して、コンピューターシミュレーションにより評価しているため、正確な過渡応答は評価できない。

一方、電気過渡応答解析プログラムによるシミュレーションは、発電機、ポンプ、ファンの電気系、機械系を包括した実機等価解析モデルを作成し、電気系の過渡応答(電流、電圧、周波数)、機械系の過渡応答(回転数、トルク)を包括してシミュレーションできる。したがって、ディーゼル発電機および負荷(ポンプ、ファン、ヒータ)の実機で発生する過渡応答が、パソコン上でそのまま再現できる。

4.4 電磁過渡プログラム(EMTP)の概要

シミュレーションに使用したEMTPは、1966年から米国エネルギー省のボンネビル電力庁(BPA)がスポンサーとなって、Dommel博士を中心に開発が開始された。1980年代前半まで様々な改良が実施された。米国政府の公開原則により公開されていたため、世界中で広く利用され、電気/電子回路の定常および過渡解析の標準プログラムとなっている。

また、図1に示すグラフィカルユーザーインター

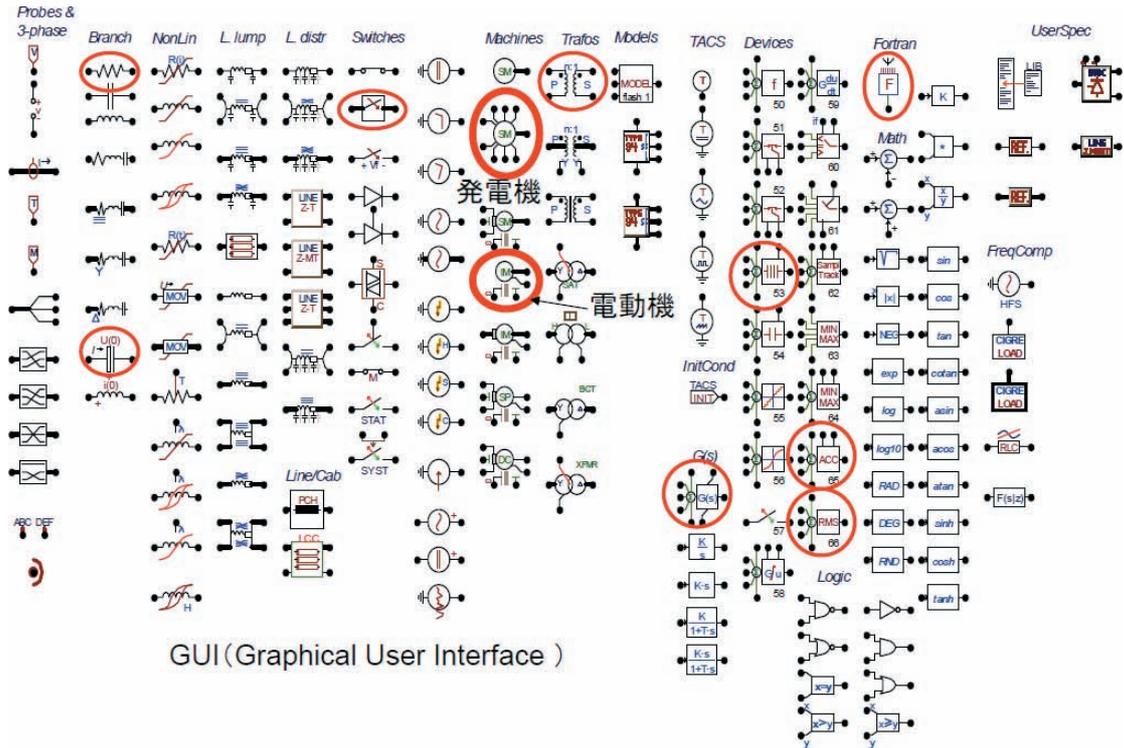


図1 グラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) プログラム (ATPdraw)

フェイス (GUI) プログラム (ATPdraw⁽¹⁰⁾) は、BPA がスポンサーとなって、Hans Kristian Hoidalen 他によって開発され、発電機、電動機などに対応するアイコンを単線結線図のとおり配置して接続し、それぞれのアイコンを開いて回路定数を入力することで解析モデルの作成が容易にできる。赤丸で囲ったアイコンは、発電機、電動機など、今回のシミュレーションの中で多用したものである。

4.5 非常用電源システムのモデル化

図2は、シミュレーションを実施するために構築した非常用電源システムの概略実機等価解析モデルである。負荷は、誘導電動機で駆動されるポンプ5台を接続して、順次起動することを示しているが、実際のシミュレーションモデルは、18台のポンプ、ファンに加えてヒータ、一定力率の負荷が接続されている。発電機の電圧は、励磁器/AVRにより6900Vに制御される。周波数は、2%のドロープのあるガバナーにより、61.2Hz(無負荷)~60Hz(全負荷)に制御される。

図3は、同期発電機のアイコンを示し、アイコンを開いて発電機の電圧、極数、皮相電力、リアクタ

ンス、抵抗、時定数、慣性モーメントなどを入力した。

図4は、EDGの回転数制御を行うためのWoodward社のUG-40ダイヤル型ガバナーの概略機構説明図および伝達関数のブロック図である。

図5は、EDGの電圧制御を行うための単線結線図およびIEEE Std 421.5-2005のType ST2A-Compound-source rectifier励磁器の伝達関数のブロック図である。

図6は、電動機のアイコンを示し、アイコンを開いて電動機の極数、リアクタンス、抵抗などを入力した。

図7は、ポンプ、ファンなどの機械負荷を等価な電気回路としてモデル化したものである。

抵抗、コンデンサー、電流源に流れる電流(A)が、電動機の軸トルク(N・m)に対応し、それぞれの素子の対地電圧(V)が、電動機の角速度(rad/s)に対応する。流体と配管表面などとの摩擦力は、流速の約二乗に比例し、電動機から見ると軸トルクとして作用するので、その軸トルクは、角速度の約二乗に比例する。したがって、電圧(角速度に対応)の二乗に比例する電流源(トルクに対応)としてモデル化した。

電動機，ポンプ，ファンの慣性モーメントないしは，流体の質量を電動機の軸から見た慣性モーメント，トルクおよび角速度の間には，

$$T = J \times d\omega / dt$$

T ：トルク， J ：慣性モーメント， ω ：角速度， t ：時間

の関係があり，数式の形状が，

$$I = C \times dV/dt$$

I ：電流， C ：静電容量， V ：電圧， t ：時間と同じなので，慣性モーメントは，静電容量としてモデル化できる．電動機，ポンプ，ファンの慣性モーメントは，建設図書，メーカーから入手した．

また，流体の質量を電動機の軸から見た慣性モーメント J は，

$$1/2 \times m \times v^2 = 1/2 \times J \times \omega^2$$

m ：配管内の流体の質量， v ：配管内の流体の平均流速， J ：流体の質量を電動機の軸から見た慣性モーメント， ω ：電動機の軸の角速度により算出できる．

あるいは，実機試験データが入手できる場合は，シミュレーションによるポンプ，ファンの起動時間

と実機試験データの起動時間が一致するように静電容量を調整する．

軸受の粘性摩擦係数，トルクおよび角速度は，

$$T = D \times \omega$$

T ：トルク， D ：粘性摩擦係数， ω ：角速度の関係があり，数式の形状が，

$$I = 1/R \times V$$

I ：電流， R ：抵抗， V ：電圧

と同じなので，粘性摩擦係数は，抵抗の逆数としてモデル化できる．

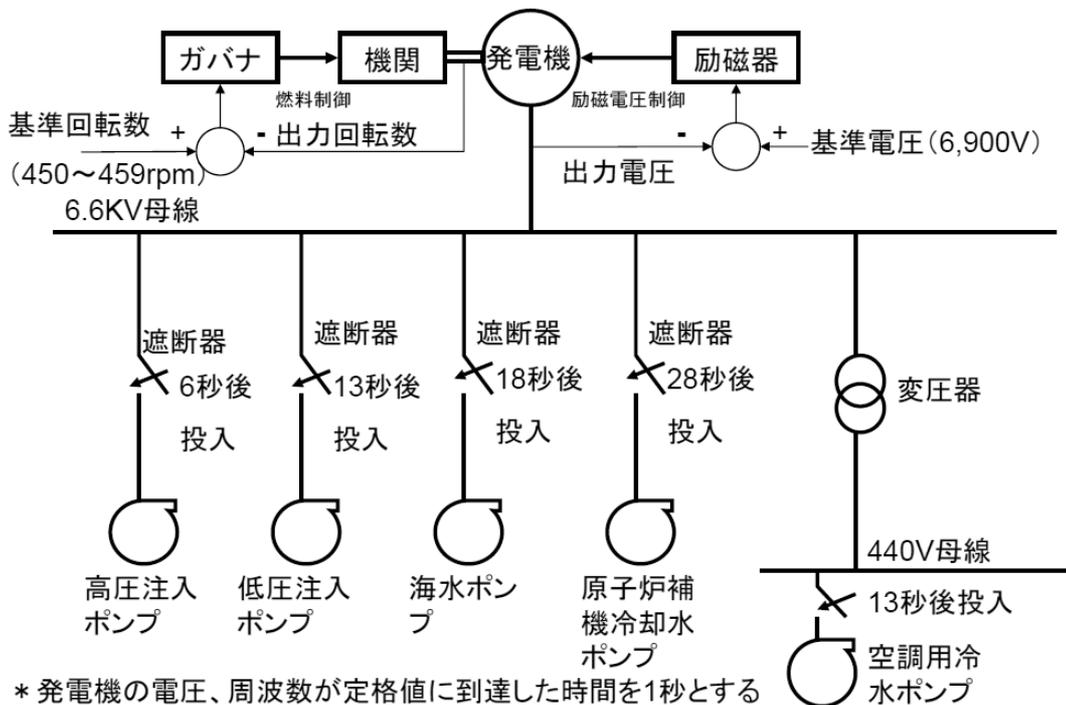


図2 非常用電源系統の概略実機等価解析モデル

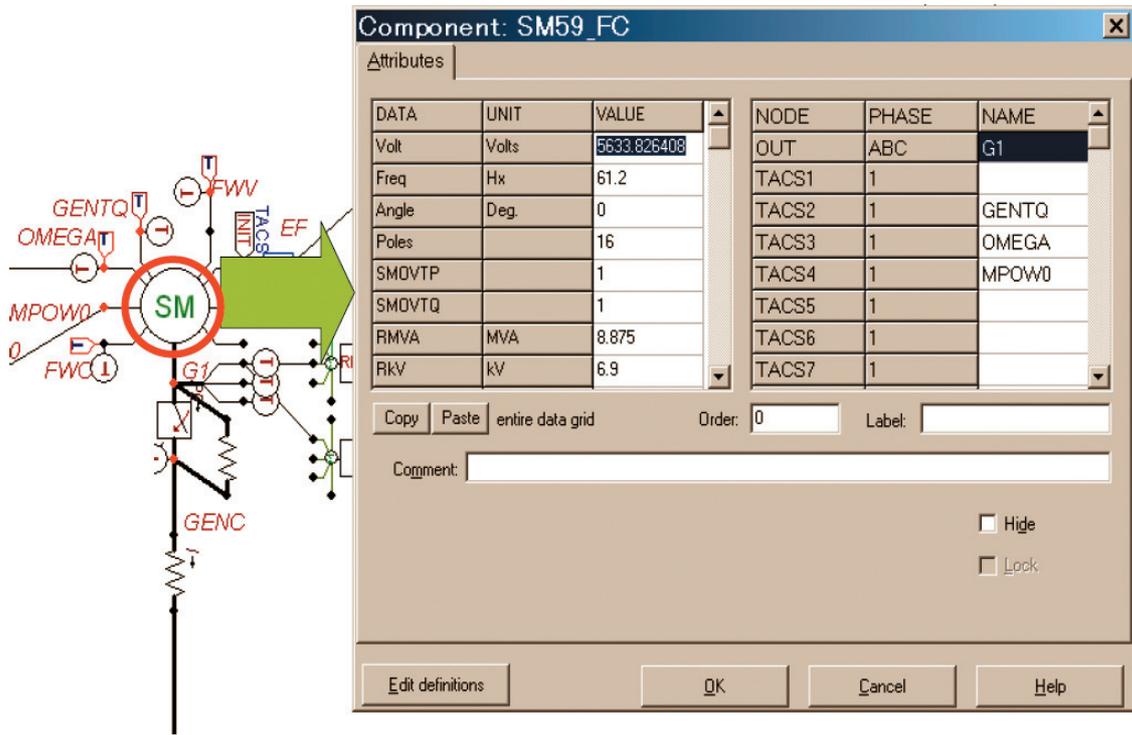


図3 同期発電機のアイコン

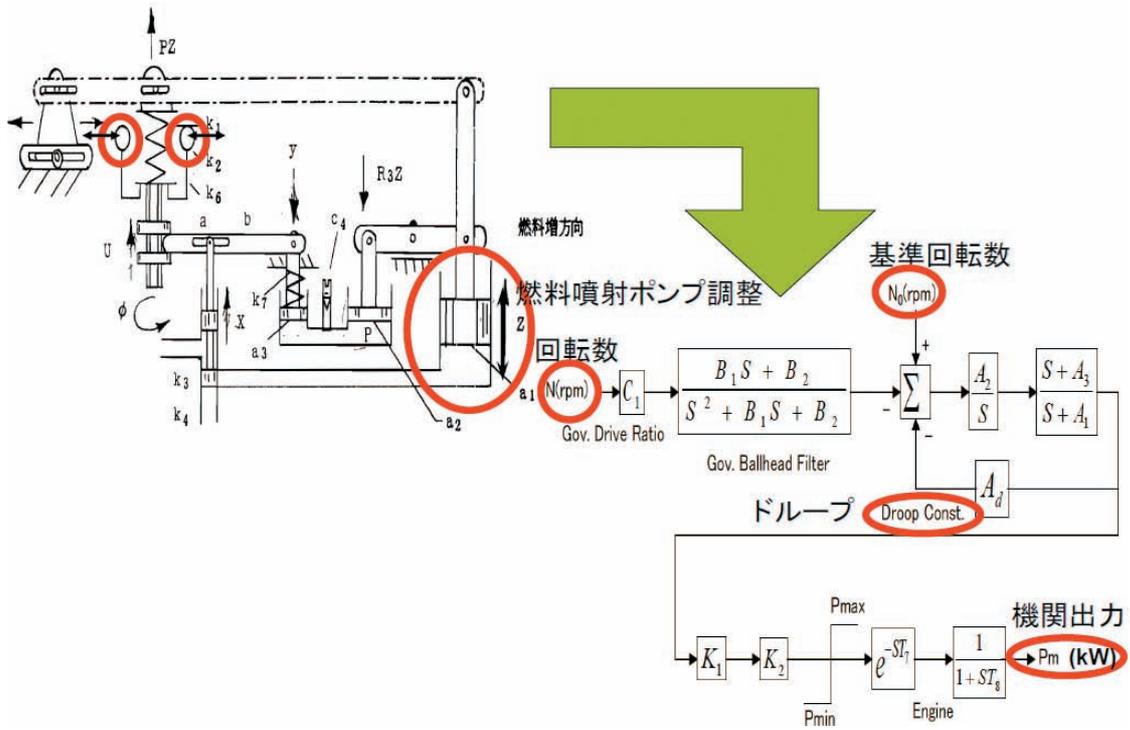
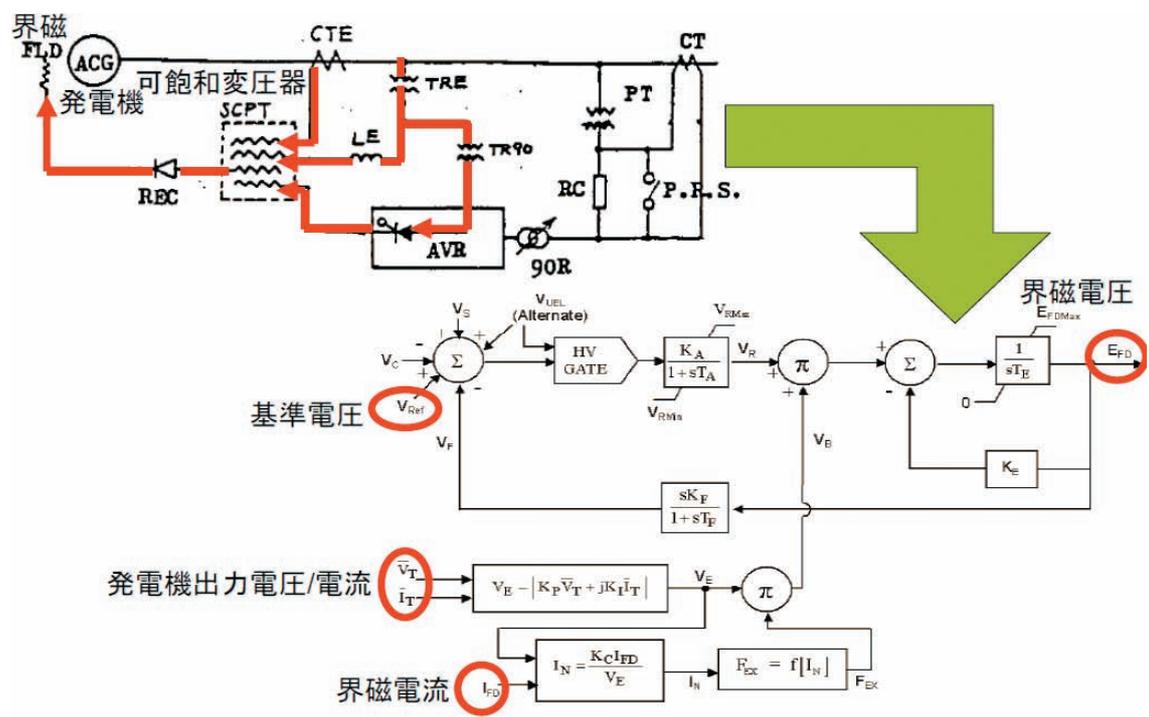


図4 Woodward社のUG-40ダイヤル型ガバナー



IEEE Std 421.5™-2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies
 Copyright©IEEE Std 421.5™-2005. All right reserved.

図5 IEEE Std 421.5-2005 の Type ST2A-Compound-source rectifier 励磁器

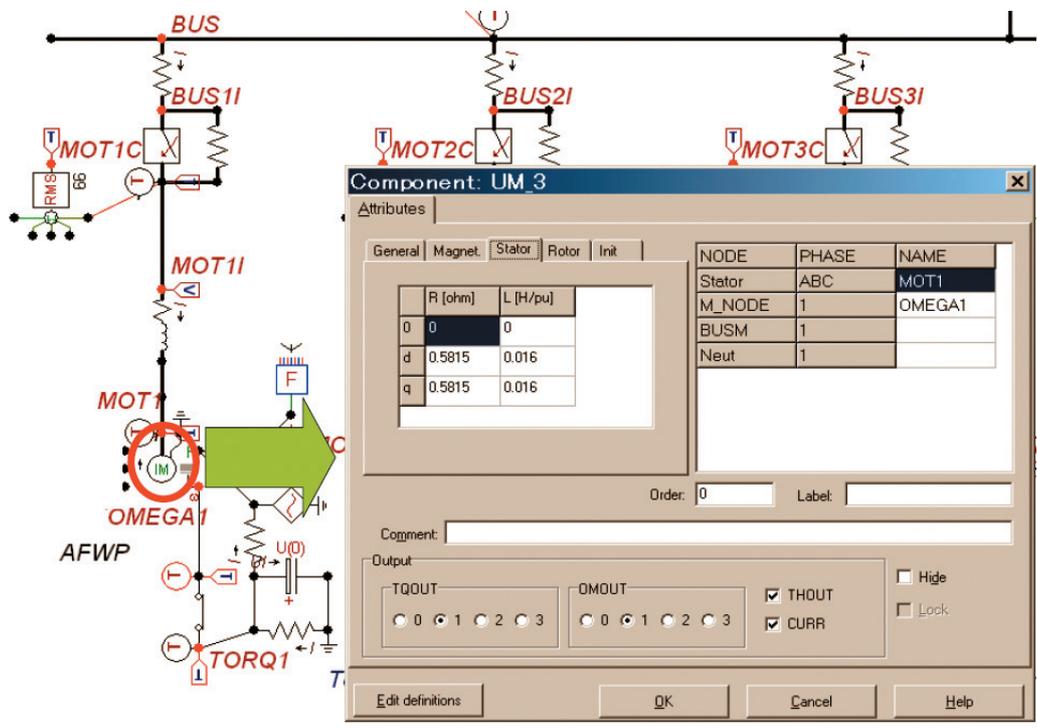


図6 電動機のアイコン

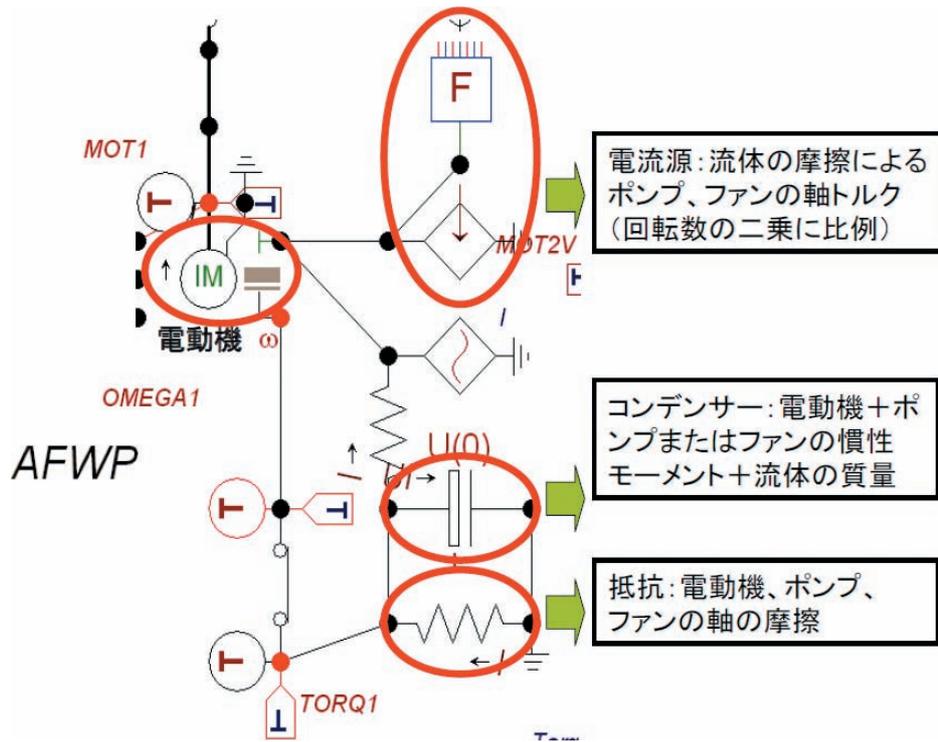


図7 ポンプ、ファンなどの機械負荷の等価電気回路

4.6 入力データ

表3は、シミュレーションに必要な入力データの種類、参考情報をまとめた。

また、発電機定数については、入手できないデータを他のデータから算出できる場合も有る。発電機定数の関係式は、参考文献⁽¹⁾に詳細に説明されている。これらの関係式は、データの検証にも有効である。

表3 シミュレーションに必要な主な入力データ

| 機器 | 入力データ | 参考情報 | |
|----------------------|---------------------------|---|-----------------|
| 非常用ディーゼル発電機 | 端子電圧 = Volt | | |
| | 周波数 = Freq | | |
| | 位相角 = Angle | | |
| | 極数 = Poles | | |
| | 定格皮相電力 = RMVA | | |
| | 相互インダクタンス = AGLINE | | |
| | 電機子抵抗 = RA | | |
| | 電機子漏れリアクタンス (飽和値) = XL | 発電機の飽和を考慮する場合は「不飽和値」を、考慮しない場合は「飽和値」を使用 | |
| | 直軸同期リアクタンス (飽和値) = Xd | | |
| | 横軸同期リアクタンス (飽和値) = Xq | | |
| | 直軸過渡リアクタンス (飽和値) = Xd' | | |
| | 横軸過渡リアクタンス (飽和値) = Xq' | | |
| | 直軸初期過渡リアクタンス (飽和値) = Xd'' | | |
| | 横軸初期過渡リアクタンス (飽和値) = Xq'' | | |
| | 直軸過渡時定数 (短絡時) = Tdo' | | |
| | 横軸過渡時定数 (短絡時) = Tqo' | | |
| | 直軸初期過渡時定数 (短絡時) = Tdo'' | | |
| | 横軸初期過渡時定数 (短絡時) = Tqo'' | | |
| | 零相リアクタンス = Xo | | |
| | 中性点接地インピーダンスの実部 = RN | | |
| | 中性点接地インピーダンスの虚部 = XN | | |
| | Canay の特性リアクタンス = XCAN | 電機子漏れリアクタンスの値を使用 | |
| 発電機の慣性モーメント = HICOG | | | |
| エンジンの慣性モーメント = HICOE | | | |
| はずみ車の慣性モーメント = HICOF | | | |
| ガバナー | 伝達関数ブロック図 | Woodward 社に作成を委託 | |
| 励磁器, AVR | 伝達関数ブロック図 | <ul style="list-style-type: none"> IEEE Std 421.5-2005 の Type ST2A-Compound-source rectifier exciter を使用 実機試験データと比較して、定数を調整 | |
| ポンプ, ファン, 電動機 | 周波数 | 左記の電動機仕様データを WINDSYN というプログラムに入力し、電動機の等価回路定数を推定 | |
| | 回転子タイプ | | |
| | 定格出力 | | |
| | 端子電圧 | | |
| | 回転数 | | |
| | 力率 | | |
| | 効率 | | |
| | 全負荷時すべり | | |
| | 起動電流 | | |
| | 起動トルク | | |
| | 飽和開始電流 | | 標準的な値 (2pu) を使用 |
| | 定格出力時の負荷トルク | | |
| | 電動機慣性モーメント | | |
| | ポンプ, ファン慣性モーメント | | |
| | 流体の軸換算慣性モーメント | 実機試験データにより調整 | |
| 動力変圧器 | 変圧比 | | |
| | 漏れインピーダンス | | |
| ケーブル | 抵抗 | ケーブル長, ケーブル仕様から抵抗, インダクタンスを算出 | |
| | インダクタンス | | |

5. シミュレーションの結果

図8～図11は、国内原子力発電所のEDGの負荷投入シーケンス試験時の有効電力、電流、電圧、および周波数の過渡応答について、シミュレーション結果と定期点検時の実機試験データを比較したグラフであり、精度の高いシミュレーションの可能なことが検証できた。周波数については、実機のガバナーの特性と設計条件を元にガバナーメーカーが作成した標準的なガバナー伝達関数モデルの特性との間に若干の差異があると推定される。電圧の過渡応答については、シミュレーション結果のオーバーシュートが少し大きいのが、これは、実機試験データ取得装置に、急激な変化を抑制するフィルタが有り、その影響と考えられる。

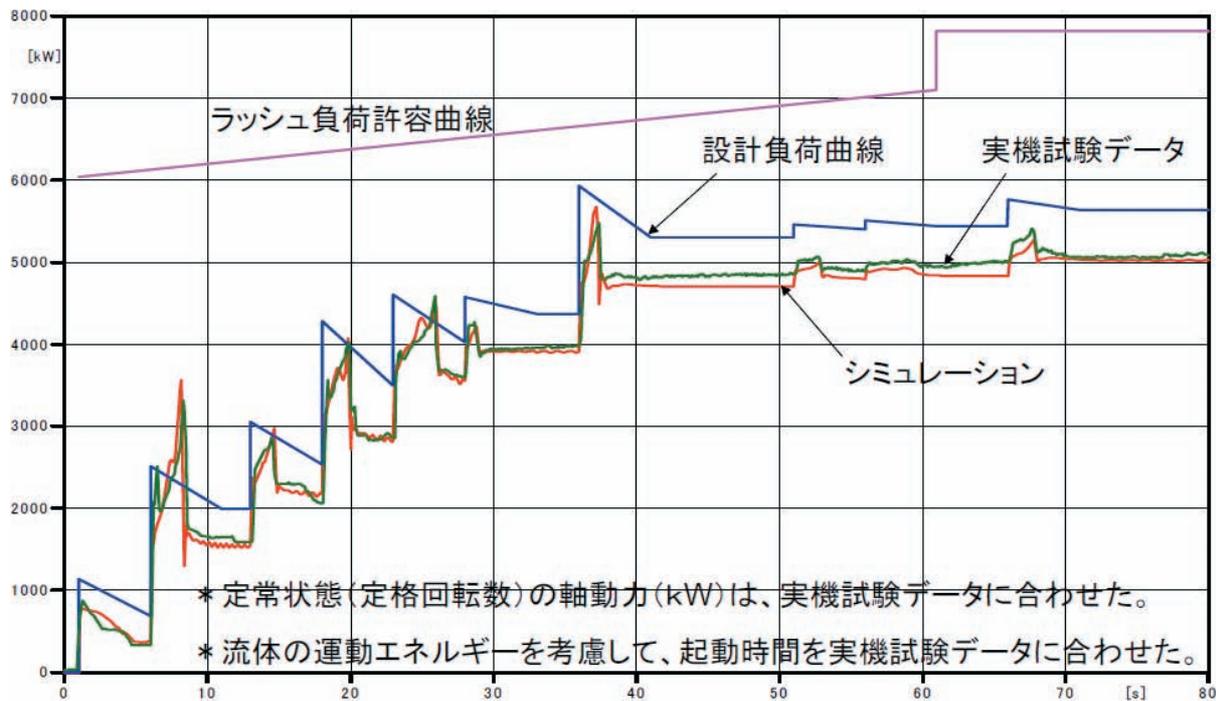


図8 有効電力のシミュレーション結果と実機試験データの比較

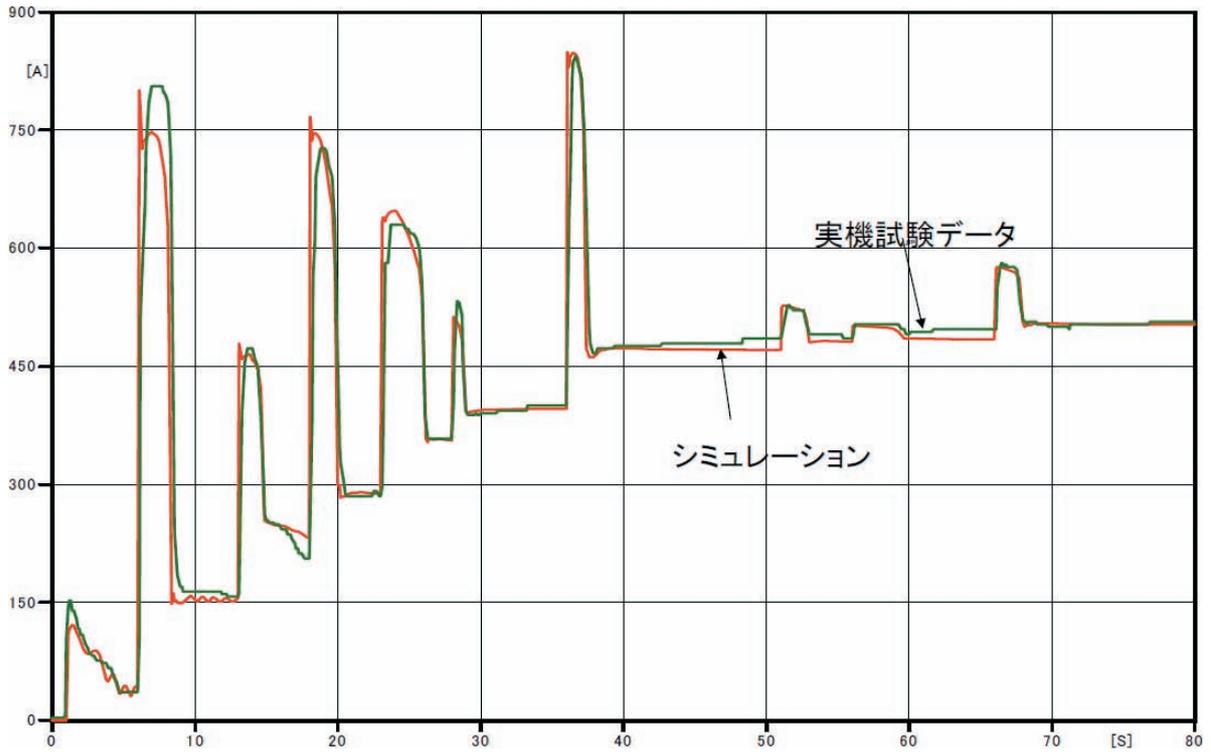


図9 電流のシミュレーション結果と実機試験データの比較

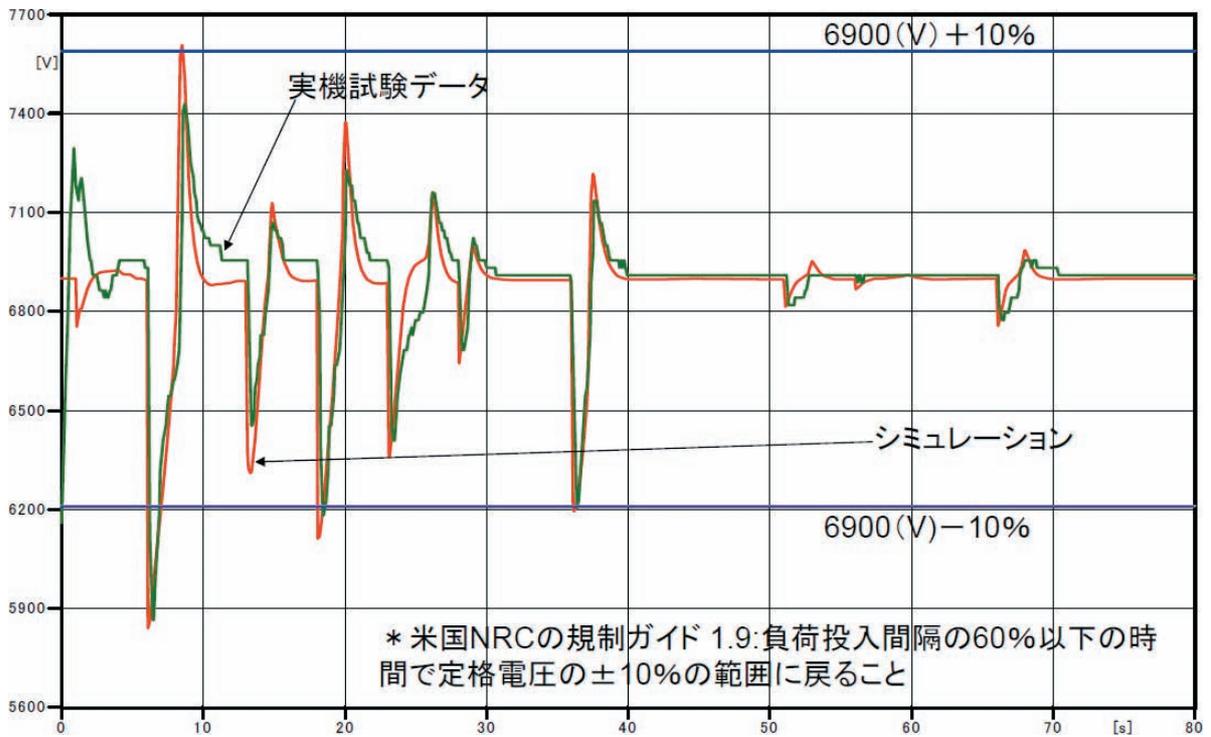


図10 電圧のシミュレーション結果と実機試験データの比較

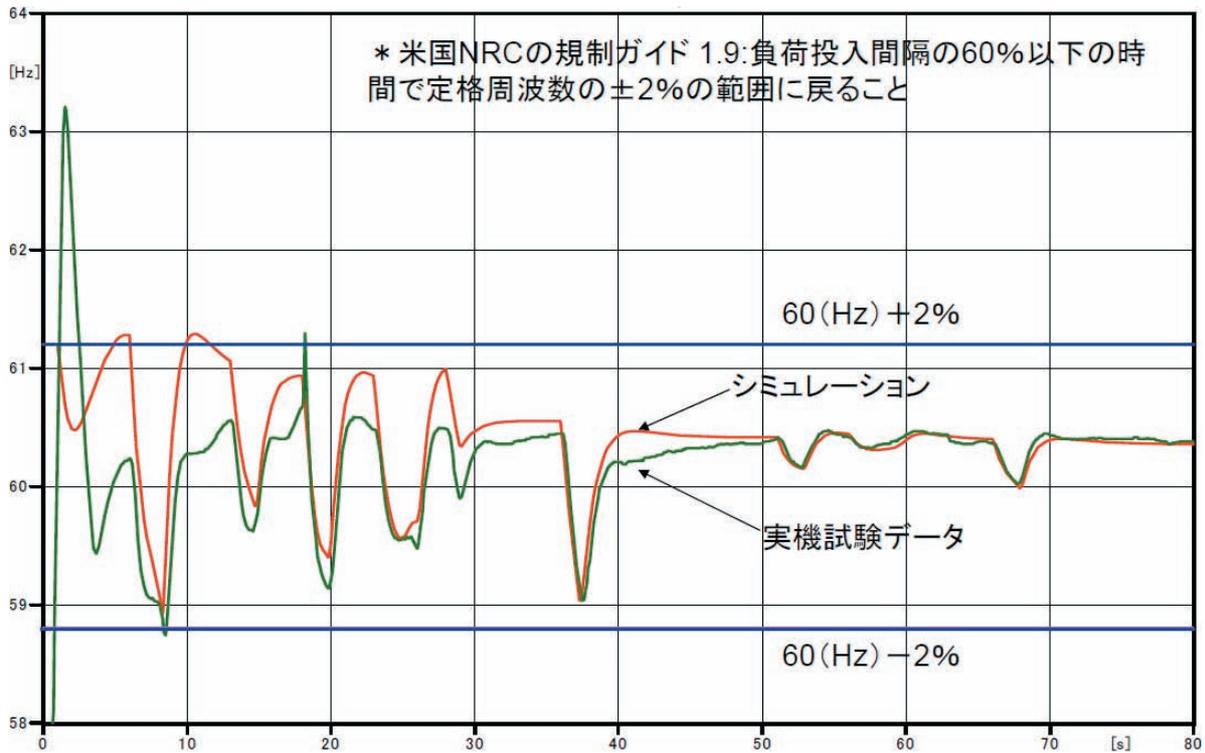


図 11 周波数のシミュレーション結果と実機試験データの比較

図 12 は、界磁電圧および界磁電流のシミュレーション結果である。EDG の出力電圧は、図 5 の励磁器のモデルで界磁電圧を制御することにより、一定電圧となるように制御しており、重要な変数であるので結果を示した。EDG の工場試験成績書によると、75% 出力、力率 80% において界磁電圧、界磁電流は、176 (V)、208 (A) である。また、図 12 の 70 秒～80 秒の区間は、70% 出力、力率 85%、において界磁電圧、界磁電流は、163 (V)、190 (A) であることから、妥当なシミュレーションの結果である。

図 13 は、EDG の機関出力、発電機出力のシミュレーション結果である。EDG の周波数は、図 4 のガバナーのモデルで機関出力を制御することにより、一定周波数になるよう制御しており、重要な変数であるので結果を示した。発電機出力については、図 8 により実機試験データとよく一致することが確認できており、発電機出力に対して機関出力は、妥当なシミュレーションの結果である。

図 14 は、負荷の中で最も出力の大きい高圧注入ポンプの起動時の角速度、軸受の摩擦分の軸トルク、流体と配管壁面などとの摩擦分の軸トルク、慣性モーメント（ポンプ慣性モーメント+電動機慣性モーメント+流体の質量を軸換算した慣性モーメント）

分の軸トルクおよびそれらの合計の軸トルクの過渡応答をシミュレーションした結果である。この結果は、図 7 のポンプ、ファンなどの機械負荷の等価電気回路からの出力であり重要な変数であるので示した。また、誘導電動機の起動シミュレーションについては、多数の報告があり、それらと比較してこのシミュレーションの結果は妥当である。

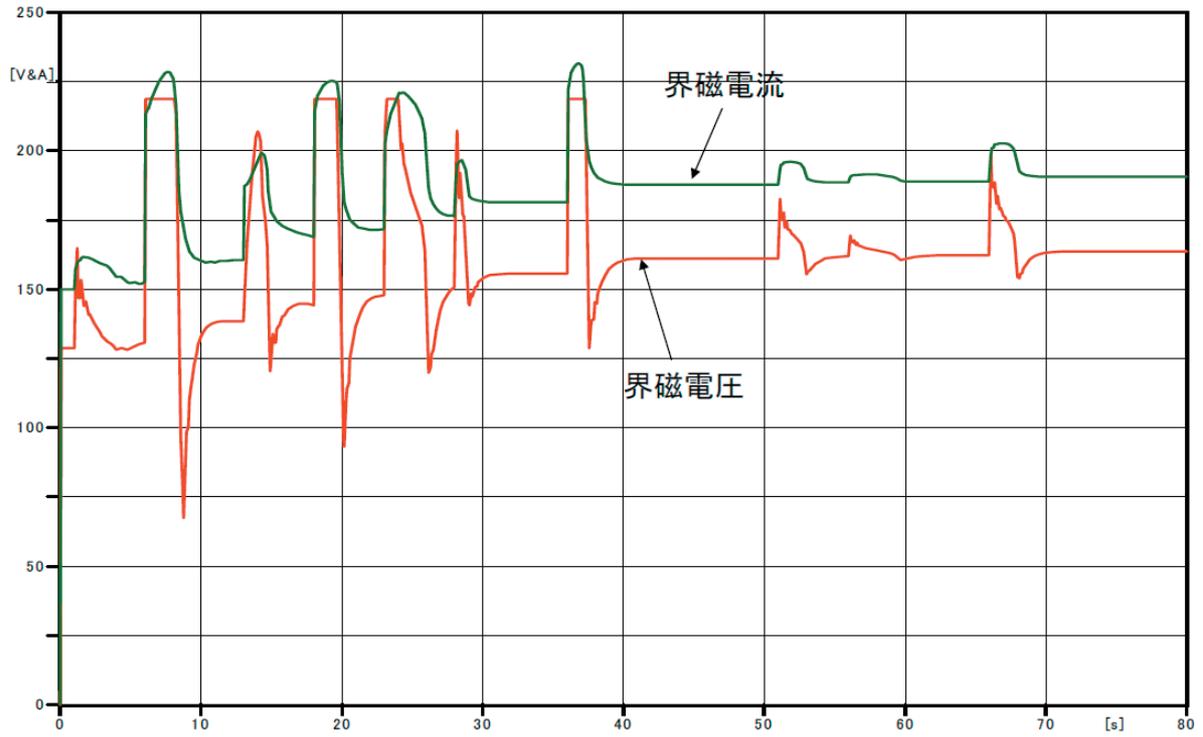


図12 界磁電圧，界磁電流のシミュレーション結果

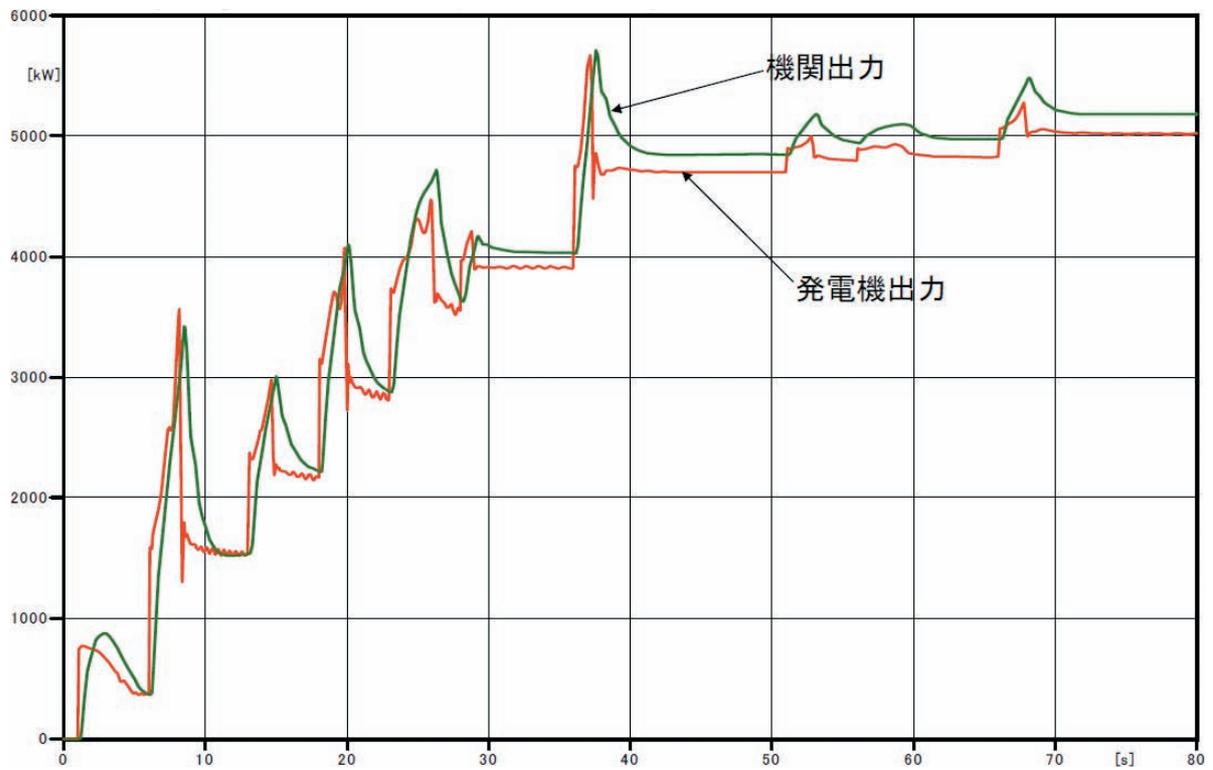


図13 機関出力，発電機出力のシミュレーション結果

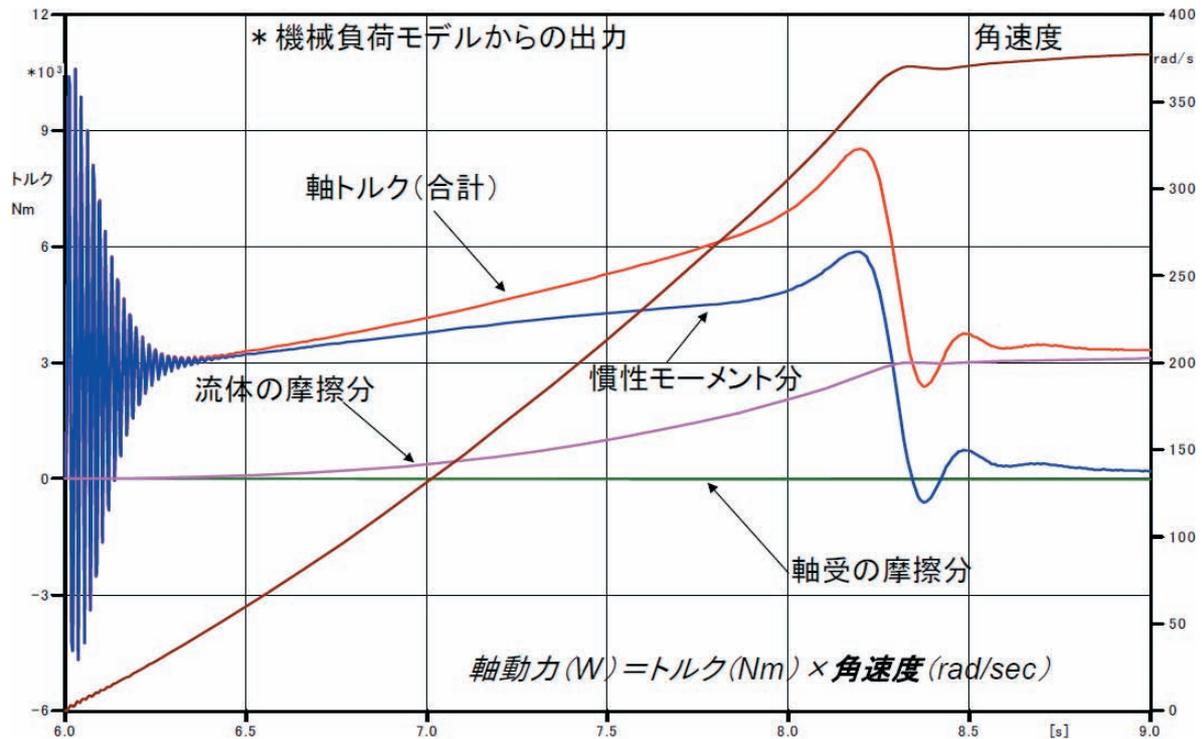


図 14 高圧注入ポンプの起動時の角速度および軸トルクのシミュレーション結果

6. まとめ

- (1) 米国の原子力発電所では、電気過渡応答解析プログラム (ETAP, EMTP 等) によるシミュレーションが広く行われ、安全性の向上に寄与している。
- (2) 国内国内原子力発電所の非常用ディーゼル発電機の負荷投入シーケンス試験時の発電機の有効電力、電流、電圧および周波数の過渡応答について、シミュレーション結果と実機試験データを比較した結果、精度の高いシミュレーションの可能なことが、検証できた。

文献

- (1) Hermann W. Dommel, EMTP Theory Book, BPA, 1986.
- (2) Meyer, W. S., et al Editors "EMTP Rule Book" Portland, Oregon, Revised 1992. Bonneville Power Administration, System Engineering, 1980.
- (3) ETAP 開発メーカー, <http://www.etap.com/>
- (4) Simulink 開発メーカー, [\[works.co.jp/\]\(http://works.co.jp/\)](http://www.math-

</div>
<div data-bbox=)

- (5) Mat-Lab 開発メーカー, <http://www.math-works.co.jp/>
- (6) EDSA 開発メーカー, <http://www.edsa.com/>
- (7) PTW32 開発メーカー, <http://www.skm.com/>
- (8) NRC Regulatory Guide 1.9, "Application and Testing of Safety-Related Diesel Generators in Nuclear Power Plants," USNRC (2007).
- (9) Woodward 社の解説, http://www.woodward.com/corp/locations/japan/gov_basic1.htm
- (10) László Prikler, Hans Kristian Høidalen, ATPD RAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual, 2009
- (11) Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, "Second Edition POWER SYSTEM DYNAMICS Stability and Control," John Wiley & Sons, Ltd. (2008)