東海大学紀要工学部
Vol.56,No2,2016,pp.27-34

電力系統シミュレータ用動的計算エンジンの開発

石丸　将愛[*1]　関原　英人[*2]

Development of Dynamics Calculation Engine for Power System Simulator

by

Masachika ISHIMARU[*1] and Hideto SEKIHARA[*2]

(Received on Sep. 28, 2016 and accepted on Jan. 12, 2017)

Abstract

Since the Great East Japan Earthquake, the electrical power industry has been changing dramatically. Power companies have been required to separate electrical power production from the power distribution and transmission sector. As a pioneer, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) has taken a company system. In the electric power market, entry to the electricity retail business was fully full liberalized in April this year, enabling retail electricity companies to sell electricity to ordinary homes. In order to maintain the fairness of power system operations, the Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators (OCCTO) was started in April 2015. Opportunities for system operation were expected to expand throughout Japan. Moreover, expansion of direct-current equipment between power companies in the Tokyo and Chubu areas has been planned. All of these reflect the significant policy for reform of the electricity system in Japan, and the policy has been carried out steadily.

In the changing power sector in Japan, electrical engineers are in high demand as before. Electric power companies have developed a digital real-time simulator of the power system for operators, and have been using it for training. In this research, we developed a power system simulator engine for education in universities; the simulator engine is also useful for power system analysis in research. The reproducibility of electrical phenomena in the power system and calculation performance of the engine have been verified. Low-frequency poorly-dumped oscillations occurring in the eastern power system in Japan were used to verify electrical phenomena, while a large-scale power system was used to evaluate the calculation performance. Satisfactory results in both verifications were obtained.

Keywords: Power system simulator, Dynamics simulation, Transient stability, Power system analysis, Standard power system model in Japan

1. まえがき

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災をターニングポイントに,日本の電力業界は大きく様変わりしている.これまで地域独占の企業であった電力会社は,発送電分離が進んでおり,その先駆けとして,東京電力株式会社（現 東京電力ホールディングス)がカンパニー制となった.また,電力市場という観点からは,2004 年の高圧需要家の小売自由化に続き 2016 年 4 月より,小売部門が完全自由化され,「新電力」とも呼ばれる小売電気事業者が,一般家庭に電力を販売できるようになった.さらには,電力系統運用の公平性を保つため,2015 年 4 月から電力広域的運営推進機関が設立・運用が開始され,広域系統運用の拡大が期待されている.また,東京−中部間の直流連系設備の拡充なども計画されており,制度や市場だけでなく,設備としても新たな展開が予想される.これらは,電力システム改革 [1]の重要事項であり,現在,着実に実行されている.

一方,同じく東日本大震災を転機に,大手通信会社が,周辺各国との電力系統連系の目標とした「アジア・スーパーグリッド構想」を発表しており,民間からも電力系統への関心が高まっている [2].近隣諸国との国際連系は,歴史的・政治的にみても課題が山積みではあるが,技術的には不可能ではない.今後,国内の地域間連系の拡充に加え,諸外国との多国間連系までも視野に入れた系統運用が必要とされる可能性もある.

「アジア・スーパーグリッド構想」とはいかないまでも,今後,地域間連系の拡充後に要求される研究・開発では,解析対象となる電力系統が大規模になると予想される.また,電力自由化により,その必要性も高まるはずである.その際,電力潮流解析といった静的断面だけでなく,単一設備故障（N-1 故障）にも耐えられるかといった動的な評価（安定度解析など）も要求される.

このような状況も踏まえ,今後も電力分野の技術者の育成が望まれる.電力会社においては,電力系統運用者に対して,その訓練用のディジタルリアルタイムシミュレータを開発 [3]し,技術者の育成に努めている.本研究では,大学などの教育機関において使用することを念頭に置いた,教育用の電力系統シミュレータ用動的計算エンジン

*1　工学部電気電子工学科専任講師
*2　工学部電気電子工学科学部学生

の開発を行った.この動的計算エンジンは,市販の PC でもリアルタイム性を損なわない速度性能を有している.また,日本の電力系統に於いて生じる電気的現象を再現できる標準モデル [4]を使用し,その性能検証を行った.さらに,大規模系統を作成し,シミュレータとしての実現性も評価した.この電力系統シミュレータ・エンジンは,電力系統解析システムにも利用可能である.

2. 電力系統解析シミュレーション

2.1 電力系統解析

電力系統解析には,静的シミュレーションと動的シミュレーションがある.静的シミュレーションには,動的シミュレーションをするための準備として,電力系統の初期断面を作成する潮流計算や,電力系統内の電圧分布を確認し,調相設備等を調整する VQC シミュレーション等がある [5].一方,動的シミュレーションは,発電機の過渡応答や事故波及等を確認するための安定度解析がある.また,制御器モデル等の制御効果検証のためにも,動的シミュレーションが実施される [6,9].

潮流計算では,電力方程式を解く必要があり,その数値解析手法として,Newton-Raphson 法や Gaus-Seidel 法が使用される.過渡安定度計算では,発電機を Park モデルで記述し,電力動揺方程式と制御器等の微分方程式モデルとを併せて,Runge-Kutta 法や Trapezoidal 法を使用して微分方程式を解くことが行われる.このようなダイナミクス計算と電力系統方程式とを交互に計算しながら,電力系統のノード電圧や線路潮流などの過渡的な振る舞いをシミュレーションする.

2.2 初期系統計算（電力系統初期状態計算）

電力系統解析では,第一段階として必ず潮流計算を行い,電力系統の初期状態の決定が行われる.以降の動的計算（事故後の発電機の動特性や安定度などの検証）においては,地絡事故等の発生する前時点では電力系統は安定（定常状態）であったことを前提とするため,安定している初期状態を作成することは重要である.

潮流計算に使用される方法に,Newton-Raphson（N-R）法がある.本研究に於いても,この方法を使用した.N-R 法では,以下の電力方程式

$$S = P + jQ = V \cdot I^* \tag{1}$$

（*は,共役複素数）と電力系統方程式

$$I = YV \tag{2}$$

から,有効電力 P と無効電力 Q の式を導出する.これにより,潮流計算で PQ 指定母線として指定する負荷母線が計算できる.ここで,V[p.u.]は母線電圧ベクトル,I[p.u.]は系統への注入電流ベクトル,Y はアドミタンス行列である.一方,発電機母線は PV 指定であるため,電圧式

$$|V|^2 = e^2 + f^2 \tag{3}$$

を使用して,指定電圧を設定する.ここで,e[p.u.]および f[p.u.]は母線電圧の実部および虚部である.

次に,式(1)～(3)から導かれた P,Q,V に関する方程式

$$\begin{cases} P_i = \sum_{k=1}^{N} (G_{ik}e_ie_k - B_{ik}e_if_k + B_{ik}f_ie_k + G_{ik}f_if_k) \\ Q_i = \sum_{k=1}^{N} (-B_{ik}e_ie_k - G_{ik}e_if_k + G_{ik}f_ie_k - B_{ik}f_if_k) \\ |V_i|^2 = e_i^2 + f_i^2 \end{cases} \tag{4}$$

に対して Jacobian 行列

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial e} & \frac{\partial P}{\partial f} \\ \frac{\partial Q}{\partial e} & \frac{\partial Q}{\partial f} \\ \frac{\partial |V|^2}{\partial e} & \frac{\partial |V|^2}{\partial f} \end{bmatrix} \tag{5}$$

を導出し,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \tag{6}$$

を解くことによって電力方程式を満たす解を探索する収束計算が実行される.この Jacobian 行列Jは,電力系統の母線数を N とすると,(2N-1)×(2N-1)次元の実数係数行列である.ここで,式(4)の G 及び B は,アドミタンス行列 Y のコンダクタンスとサセプタンスである.

上記の計算により得られた初期状態は,電力系統内の負荷量 P_L[p.u.]と発電機からの発電量 P_G[p.u.]だけでなく,無効電力 Q_L[p.u.]および Q_G[p.u.]についてもバランスがとれているため,電力系統の周波数 f[Hz]および端子電圧 V[p.u.]についても定常がとれる安定な状態が保証される.

2.3 過渡応答計算（動的計算）

初期状態計算に引き続き行われるのが,過渡応答計算である.これは,安定した状態にある電力系統に何らかの擾乱が生じた場合,発電機が安定した運転（同期運転）を保つことが可能かどうかをシミュレーションするものであり,安定度計算とも呼ばれる [5,6].

安定度には,

i) 定態安定度
ii) 動態安定度
iii) 過渡安定度
iv) 電圧安定度

がある.電圧安定度以外の安定度は,主に,擾乱後にも発電機が脱調せずに同期運転を継続できるかを評価することを目的としている.定態安定度では,発電機 1 機が大きな系統に連系している,いわゆる一機無限大母線系統に於いて,擾乱後に系統から脱調することなく同期運転を継続できるかを,電力相差角曲線（P-δ 曲線）

$$P = \frac{E_\infty \cdot E_t}{x_l} \cdot sin\delta \tag{7}$$

を用いて評価される.ここで,E_∞は無限大母線電圧[p.u.],E_tは発電機端子電圧[p.u.]であり,δはそれらの電圧相差角である.x_lは送電線,昇圧変圧器,内部リアクタンス等も含めたリアクタンスである.また,動態安定度では,発電機の制御器等も含めて,その安定度を評価するものである.

実系統に於いて最も重要視されるのは,過渡安定度である.過渡安定度計算では,発電機だけでなく自動電圧調整器 (AVR:Automatic Voltage Regulator) や調速機

(Governor)といった制御器も含めてより精緻なモデルの使用が要求される.

発電機および制御器の精緻なモデルは,その動特性を表現した複数の微分方程式で記述される.微分方程式の求解には,大別して,陰解法と陽解法がある.それぞれの代表的な解法には,Trapezoidal 法と Runge-Kutta（R-K）法がある.本研究では,陽解法である R-K 法を使用した.R-K 法では,微分方程式

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}y = f(t,y) \tag{8}$$

に対して,

$$\begin{cases} k_1 = f(t_0, y_0)\cdot\Delta t \\ k_2 = f\left(t_0+\frac{\Delta t}{2}, y_0+\frac{k_1}{2}\right)\cdot\Delta t \\ k_3 = f\left(t_0+\frac{\Delta t}{2}, y_0+\frac{k_2}{2}\right)\cdot\Delta t \\ k_4 = f(t_0+\Delta t, y_0+k_3)\cdot\Delta t \end{cases} \tag{9}$$

を計算し,

$$y_1 = y_0 + \frac{k_1+2(k_2+k_3)+k_4}{6} \tag{10}$$

により,現在時点の値y_0と,時刻 t により「陽」に次時点の値y_1を計算することができる.これが,陽解法と呼ばれる所以である.

また,過渡安定度計算では,発電機および制御器等の動特性を解きながら,電力系統方程式(2)を解くことで,回転体としての発電機の運動と電力系統の系統状態を決定するという処理が交互に行われる.具体的には,定常状態にある電力系統において,地絡事故等の系統擾乱が発生することで,系統（回路）状態が急激に,しかも大きく変化する.この変化を受けた発電機が動揺することで,電力系統全体が激しく動揺する.それでも同期を保とうと,発電機やその制御器等が動揺の抑制を行うよう機能する.それにも関わらず,動揺を抑えきれない場合には発電機が脱調する結果となり,電力系統の崩壊（ブラックアウト）にもつながりかねない事態へと進行する恐れがある.このような事態にならないよう,事前に電力系統の安定性を評価するのが過渡安定度であり,電力系統の運用には非常に重要な指標となっている.

過渡安定度シミュレーションの計算の流れを Fig.1 のフローチャートに示した.

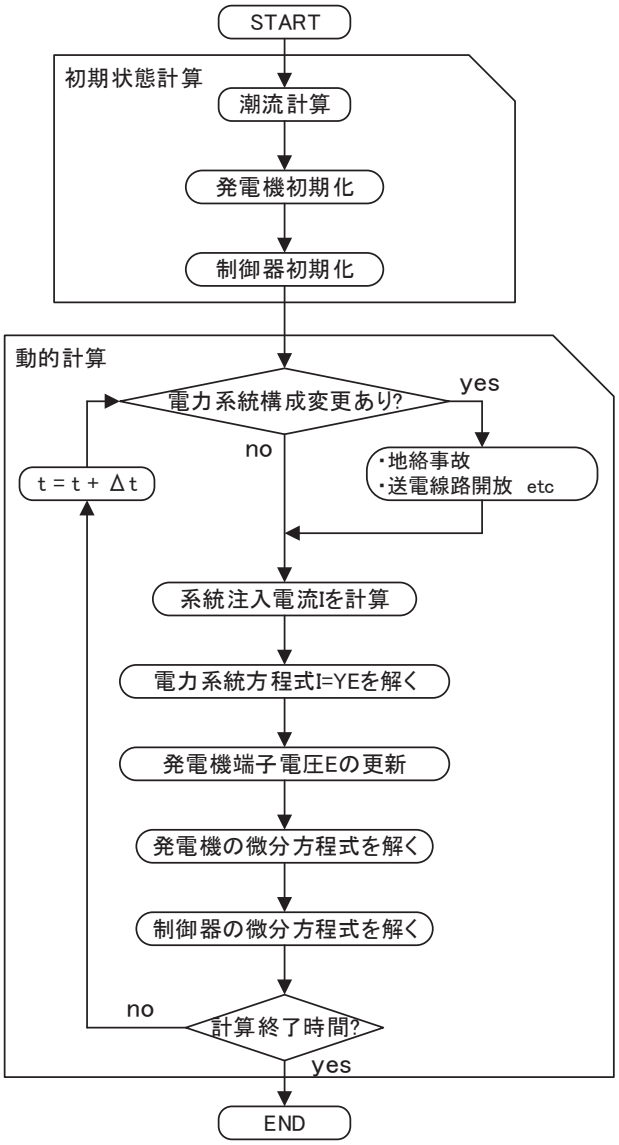


Fig. 1 Flow chart of transient stability calculation.

3. 電力系統モデル

3.1 電力系統解析用発電機モデル

発電機の精緻なモデルとしては,Park のモデルが有名である[8].Park の方程式を整理し,界磁電圧e_{fd},界磁巻線磁束ϕ_{fd},d 軸および q 軸の制動巻線磁束ϕ_{kd}およびϕ_{kq},発電機端子電流（d-q 軸成分）i_dおよびi_q以外の変数を消去した式を以下に示した[7].

界磁巻線の電圧式

$$\frac{d}{dt}\phi_{fd} = -\frac{\phi_{fd}}{T_{ffd}} + \frac{\phi_{kd}}{T_{fkd}} + \frac{r_{fd}}{x_{md}}\cdot e_{fd} - r_{fad}\cdot i_d \tag{11}$$

制動巻線の電圧式（q 軸ダンパー1 巻線モデル）

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\phi_{kd} = \frac{\phi_{fd}}{T_{kfd}} - \frac{\phi_{kd}}{T_{kkd}} - r_{kad}\cdot i_d \\ \frac{d}{dt}\phi_{kq} = \frac{\phi_{kq}}{T_{kkd}} - r_{kaq}\cdot i_q \end{cases} \tag{12}$$

また,トルクは次式により計算される.

$$T_e = \phi_d\cdot i_q - \phi_q\cdot i_d \tag{13}$$

ここで,ϕ_dおよびϕ_qは電機子巻線の磁束（d-q 軸成分）である.

過渡安定度で使用される発電機モデルは,上記の Park モデルと回転体としての発電機の動特性を記述した電力動揺方程式

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\delta = \omega_0\cdot\Delta\omega \\ \mathrm{M}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\Delta\omega = T_m - T_e - D\cdot\Delta\omega \end{cases} \tag{14}$$

とで表現される.ここで,$\Delta\omega$は発電機の角速度偏差[rad./sec.],ω_0は定格回転速度[rad./sec.]であり,T_mは発電機への機械的入力トルク[p.u.],T_eは発電機からの電気的出

力トルク[p.u.],M は発電機の慣性定数[sec.],D は制動トルク係数[p.u.]である.

3.2 電圧自動調整器および調速機

電力系統には,様々な制御器が導入されている.これらの中で,過渡安定度に大きく寄与するのは,発電機に対して制御量を加えることができる制御器である.その中でも,必ず設置されていると言っても過言でない制御器は,発電機の励磁電圧を調整する電圧自動調整器（AVR）と発電機の回転数を制御する調速機（ガバナ）である.AVR およびガバナは,電力会社および重電メーカにより様々なタイプが存在する.そのため,標準的なモデルが推奨モデルとして公開されている [5].本研究では,電気学会標準モデル [4]の AVR およびガバナを使用した.Fig.2 に示した AVR は,回転励磁系の AVR である.サイリスタ励磁系と比較すると,制御動作が低速である.

ガバナは,発電機のタイプに応じて 2 種類の標準モデルが用意されている.Fig.3 が火力・原子力機用ガバナモデルであり,Fig.4 が水力機用ガバナモデルである.何れのタイプも,設定により,ガバナフリー（G.F.）運転/ロード・リミット（L.L.）運転の模擬が可能である.

3.3 負荷モデル（負荷特性）

電力系統の負荷は,無数の負荷を負荷母線で集約しているため,詳細なモデルを作成することは困難である.そのため,一般的な電力系統解析では,以下のモデルが使用されている [7].

$$\begin{cases} P_L = P_{ini} \cdot \left(\frac{V}{V_{ini}}\right)^{\alpha} \cdot \left(1 + \Delta f \cdot \frac{\beta}{100}\right) \\ Q_L = Q_{ini} \cdot \left(\frac{V}{V_{ini}}\right)^{\alpha} \cdot \left(1 + \Delta f \cdot \frac{\beta}{100}\right) \end{cases} \quad (15)$$

ここで,αは電圧特性指数であり,

$$\begin{cases} \alpha = 0 : \textit{定電力負荷} \\ \alpha = 1 : \textit{定電流負荷} \\ \alpha = 2 : \textit{定インピーダンス負荷} \end{cases}$$

である.βは周波数特性指数[%/Hz]である.また,添え字 ini は,初期値を意味している.本研究では,電気学会標準モデルを参考に,有効電力負荷量P_Lのみ負荷母線の端子電圧 V=0.7[p.u.]を閾値として,

$$\begin{cases} P_L = P_{ini} \cdot \left(\frac{V}{V_{ini}}\right)^{1} \cdot \left(1 + \Delta f \cdot \frac{4}{100}\right) \ , \ V \geq 0.7[p.u.] \\ P_L = P_{ini} \cdot \left(\frac{V}{V_{ini}}\right)^{2} \cdot \left(1 + \Delta f \cdot \frac{4}{100}\right) \ , \ V < 0.7[p.u.] \\ Q_L = Q_{ini} \cdot \left(\frac{V}{V_{ini}}\right)^{2} \cdot \left(1 - \Delta f \cdot \frac{2}{100}\right) \end{cases} \quad (16)$$

とした.

3.4 発電機および負荷の電流源モデル

過渡安定度シミュレーションにおいて,電力系統方程式(1)を解く際,Fig.1 のフローチャートに示したように,発電機および負荷からの注入電流を計算する必要がある.そのため,発電機モデルは,電気子抵抗R_a[p.u.]と d 軸次過渡リアクタンスX_d"[p.u.]を使用して,電圧源モデルE_G[p.u.]から電流源モデルI_G[p.u.]へ変換する.

$$I_G = \frac{E_G}{R_a + jX_d"} \quad (17)$$

一方,負荷についても次式を用いて電流源モデルに変換する.

$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V^*} \quad (18)$$

これらの式を用いて,電力系統方程式の電流ベクトル I を逐次更新しながら,電力系統の母線電圧ベクトル E を計算する.

4. 電力系統解析の数値結果の評価

4.1 電力系統解析評価用モデル

電力系統解析システムとして十分な機能を有していることを確認するため,電気学会標準モデルのうち,東日本の 50[Hz]系統を模擬した EAST10 モデルを使用して検証した.EAST10 モデルを Fig.5 に,電力系統規模を Table1 に示した.

4.2 電力系統解析シミュレーション条件

シミュレーションは,動的計算の刻み幅を 0.005 秒とし,シミュレーション時間は 20 秒とした.また,N-1 故障として,Fig.5 の電力系統における 2 回線運用中の送電線路<36>の(36)母線側で三相地絡故障が発生（Fig.5 中の地絡マーク箇所）し,事故除去した後,送電線路<36>を 1 回線で運用するシナリオとした.詳細を Table2 に示した.

Table 1 Scales of standard power system model.

	Gen.	Bus	Load	Line	Trans.
EAST10	10	47	12	33	22
WEST10	10	27	17	16	10
EAST30	30	107	31	68	55
WEST30	30	115	34	94	30
EAST120	120	197	31	68	145

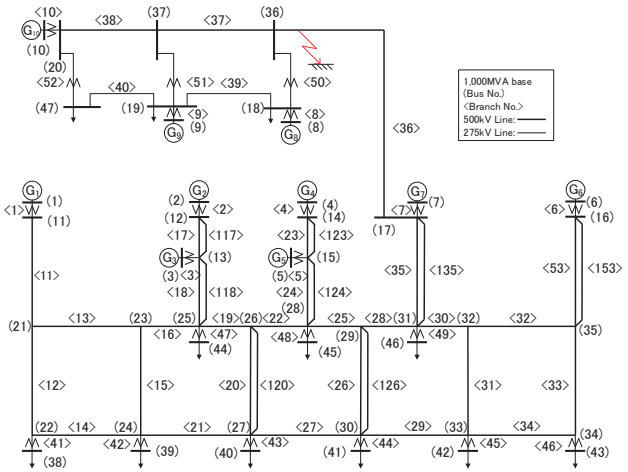


Fig. 5 Eastern 10 machines - power system model (EAST10).

Table 2 N-1 contingency scenario (3LGO).

No.	Time [sec.]	Event
1	0.000	Simulation Start
2	1.000	3-Phase Grand Fault on Line <36>
3	1.070	Eliminate Fault (1 Line Open)
4	20.000	Simulation End

4.3　電力系統解析シミュレーション評価

Table2 の事故ケースは,東京電力と東北電力との連系線に於いて地絡事故が発生した場合を模擬した事故ケースである.この事故ケースでは,東京地域と東北地域の発電機が激しく動揺し,地域間において電力のやりとりを持続させる結果となる.この現象は実系統でも生じる電気的事象であり,長周期動揺問題として知られている.

通常,発電機の持つ固有振動周期は約 1 秒である.そのため,系統事故において生じる系統動揺周期もそれに依存した動揺周期になることが多いが,長周期動揺ケースでは,2 秒から 4 秒の周期で系統が動揺するのが特徴である[9].

本研究にて開発した電力系統シミュレータ用動的計算エンジンで長周期動揺の事故ケースのシミュレーション結果を,Fig.6 および Fig.7 に示した.Fig.6 は,発電機の相差角[deg.]（発電機 G3 の位相角を基準）と発電機の角速度偏差[%]である.

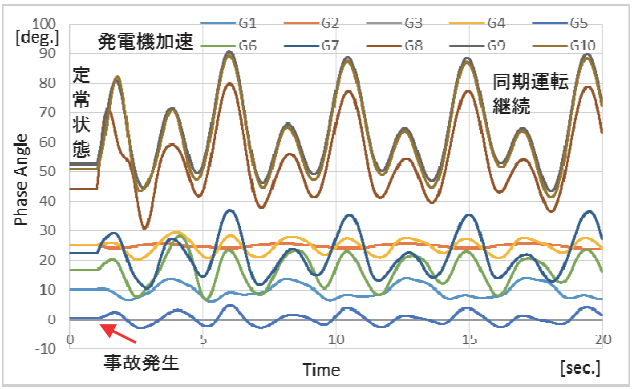


Fig. 6 Phase angle of generators (Ref. G3).

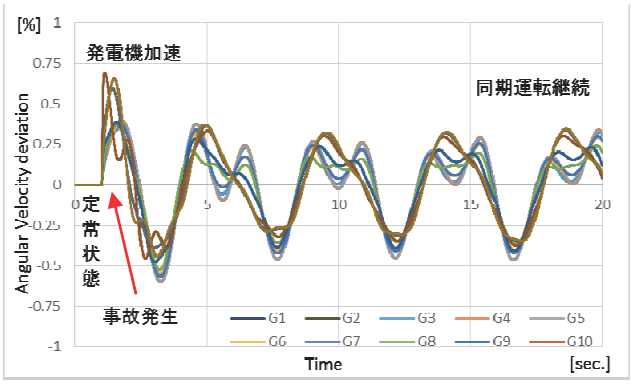


Fig. 7 Angular velocity deviation of generators.

相差角の結果に於いては,事故直後に発電機が加速するものの,制御器等の効果により発電機が脱調することなく同期運転を継続できている.しかし,第 3 波以降は大小の振幅を持つ動揺が,減衰することなく持続している.また,角速度偏差の結果では,台形をかたどったような動揺を示している.これは,周期 2 秒と 4 秒の動揺が重畳された場合の特徴的な振動波形である.このことから,本研究で開発した電力系統シミュレータ用動的計算エンジンは,電力系統解析ツールとして十分活用できるものであると判断される.

5.　電力系統シミュレータの評価

5.1　電力系統シミュレータ評価用モデル

次に,電力系統シミュレータとしての評価を行った.評価として,設備規模と所要時間（計算速度）の調査を行った.使用した電力系統モデルは,電気学会標準モデルの EAST10 に加え,同じく WEST10,EAST30,WEST30 である.いずれのモデルも,EAST10 同様,日本の 50Hz,もしくは 60Hz 系統の特徴を再現することが可能なモデルとなっている.これらの電力系統モデルを Fig.8～Fig.10 に示した.

5.2　電力系統シミュレータ評価条件

シミュレータ評価は,解析評価と同様,動的計算の刻み幅を 0.005 秒とし,シミュレーション時間を 20 秒とした.また,EAST10 のケースと同様,N-1 故障を起こしている.

5.3　電力系統シミュレータ評価用計算機スペック

上記の 4 種類の電力系統を評価するのに使用した計算機のスペックを Table3 に示した.

Table 3 Machine spec.

CPU	Intel® Core™ i5-6200U 2.3GHz, 4cores
RAM	3.5 GB
OS	Scientific Linux 6.1
C Compiler	gcc version 4.4.5

5.4　電力系統シミュレータ評価結果

電力系統標準モデルを使用して,20 秒の N-1 故障シミュレーションを行い,その所要時間の評価を行った.所要時間の評価は,5 回の計測結果の平均値とした.計測した平均時間とシミュレーション時間に対する所要時間の比率[%]を Table4 に示した.系統規模に応じて,所要時間が長くなるものの,いずれのモデルにおいても,シミュレーション時間を大幅に下回る時間でシミュレーションが終了することが確認できた.これにより,シミュレータとして活用できるだけの能力を有していると判断できる.

Table 4 Evaluation of time required (Average).

	EAST10	WEST10	EAST30	WEST30
Time [sec.]	2.84	2.64	5.21	5.51
Ratio [%]	14.2	13.2	26.1	27.6

5.5　大規模電力系統での評価

教育機関での電力系統シミュレータとしては,発電機 30 機・母線数 100 超の電力系統規模で十分ではあるが,実系統規模での拡張性を検証するため,より大規模系統での検証を試みた.

大規模系統を作成するにあたり,より現実性があり,今後の解析にも利用可能なように,EAST30 モデルをベースに大規模系統を作成した.

EAST30 モデルは,東日本の電力系統を,発電機の集約をするなどして 30 機にまとめていると判断される.そこで,これらの発電機は,約 4 機の発電機が集約されていたと仮定し,集約前の発電機 120 機とした EAST120 機系統モデルを作成した.拡張イメージを Fig.11 に示した.これにより,電力系統規模は,表 5 のようになる.

この系統において,同様の条件で評価した結果,所要時間は Table6 のようになった.比較のため,EAST30 の場合と併記した.

発電機の台数が 4 倍になっただけでなく,母線数も 90 母線増えているため,アドミタンス行列の次元も拡張されている.そのため,速度パフォーマンスはかなり低下すると予想されたが,所要時間はシミュレーション時間を下回る結果が得られた.

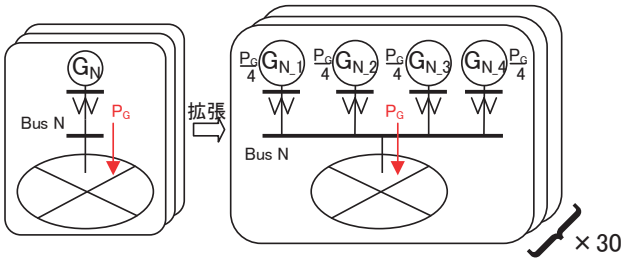


Fig. 11 Expansion method for EAST120 model.

Table 5 Expanded power system model.

	Gen.	Bus	Load	Line	Trans.
EAST30	30	107	31	68	55
EAST120	120	197	31	68	145

Table 6 Evaluation of time required in large scale power system.

	EAST30	EAST120
Time [sec.]	5.21	13.74
Ratio [%]	26.1	68.7

6. まとめ

本研究では,電力系統運用および解析エンジニアを育成するための電力系統シミュレータの動的計算エンジンの開発を行った.電力系統シミュレータでは,電力系統の現象を忠実に再現できることが条件となる.そのため,実系統において発生する長周期動揺が再現できる電気学会標準モデルを用いて本シミュレータの検証を行い,良好な再現性を得た.

次に,シミュレータとして要求される処理速度について,電力系統の規模を拡大しながら,所要時間の計測を行った.電気学会から公開されている 4 種類の標準系統においては,20 秒間の過渡安定度シミュレーションが何れも半分以下の時間で終了することが確認できた.

さらには,教育用としては十分であるが,より実系統に近づけるために拡張した大規模系統に於いても,その処理能力が十分であることが確認された.

本研究で開発した電力系統シミュレータの動的計算エンジンは,安定度解析システムとしても利用可能である.今後は,解析用とシミュレータ用とに用途を分けて発展させることを検討している.教育用電力系統シミュレータとしての開発では,Fig.9 や Fig.10 のような電力系統図とその系統図上に電圧,有効電力潮流といった電気量を表示できる GUI（Graphical User Interface）が必要となる.この教育用 GUI の開発が今後の課題として挙げられる.

参考文献

1) 電力システムに関する改革方針,経済産業省資源エネルギー庁 HP, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/ electric/system_reform002/.
2) 平成 25 年度電力系統関連設備形成等調査事業（国際連系に関する調査・研究）報告書,一般財団法人日本エネルギー経済研究所,http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E003734.pdf.
3) 給電技能訓練のためのリアルタイムシミュレータの開発,栗原重雄,千喜良英則,鈴木守,戸田満,石丸将愛,平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会,p.p.18-1 – 18-6, 平成 22 年 9 月.
4) 電力系統モデル標準化調査専門委員会:「電力系統の標準モデル」,電気学会技術報告　第 754 号, 1999 年 11 月.
5) 電力システム解析　ーモデリングとシミュレーションー,谷口治人,平成 21 年 8 月 15 日,オーム社.
6) 電力系統過渡解析論,関根泰次,昭和 59 年 1 月 20 日,オーム社.
7) 電力工学ハンドブック,宅間薫,高橋一弘,柳父悟,2005 年 10 月 30 日,朝倉書店.
8) Two-reaction theory of synchronous machines, Generalized method of analysis - Part I, R. H. Park, AIEE Trans., Vol. 48, pp. 716-727, 1929.
9) Allocation and Design of Power System Stabilizers for mitigating Low-Frequency Oscillations in the Eastern Interconnected Power System in Japan, M. Ishimaru, R. Yokoyama, O. M. Neto, K. Y. Lee, International Journal of Electrical Power & Energy System, Volume 26 Issue 8, pp.607-618, October, 2004.

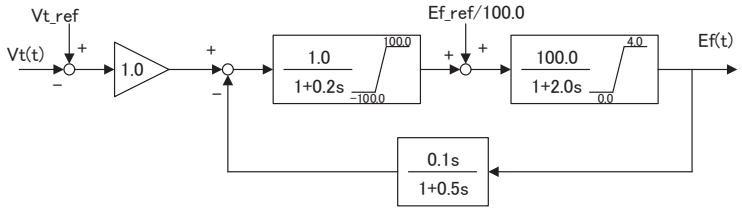


Fig. 2 Block diagram of automatic voltage regulator in the standard power system models.

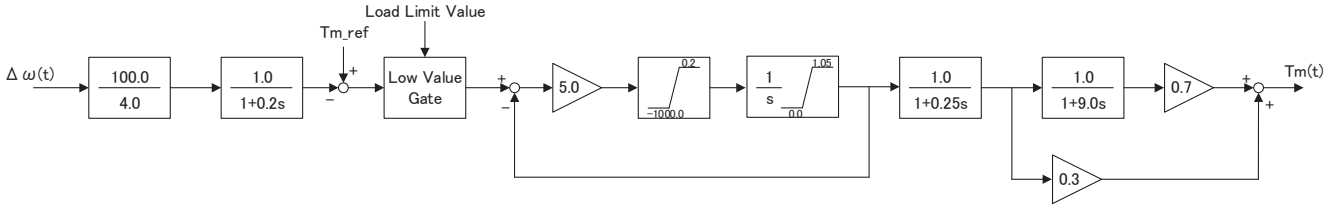


Fig. 3 Block diagram of governor for thermal/nuclear machine model in the standard power system models.

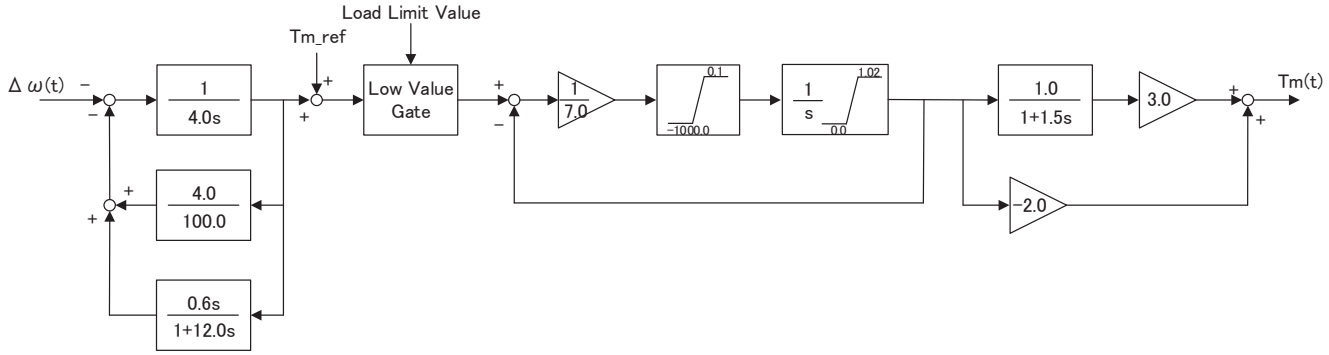


Fig. 4 Block diagram of governor for hydro machine model in the standard power system models.

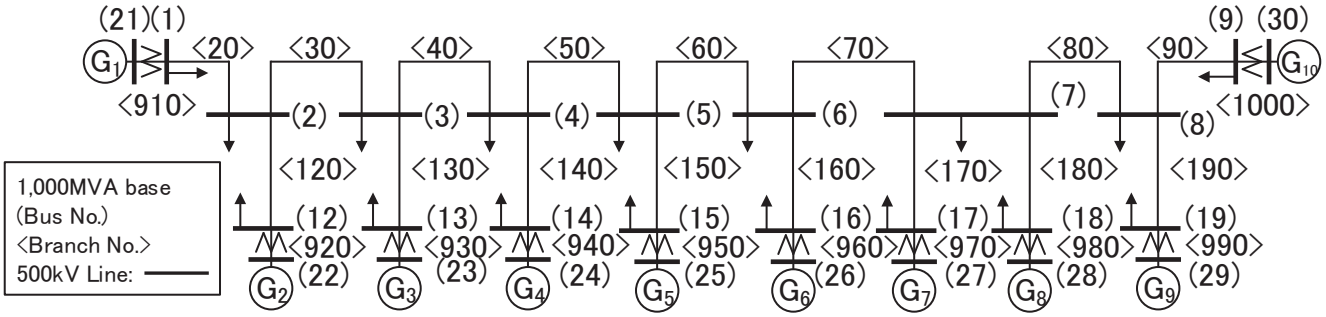


Fig. 8 Western 10 machines - power system model (WEST10).

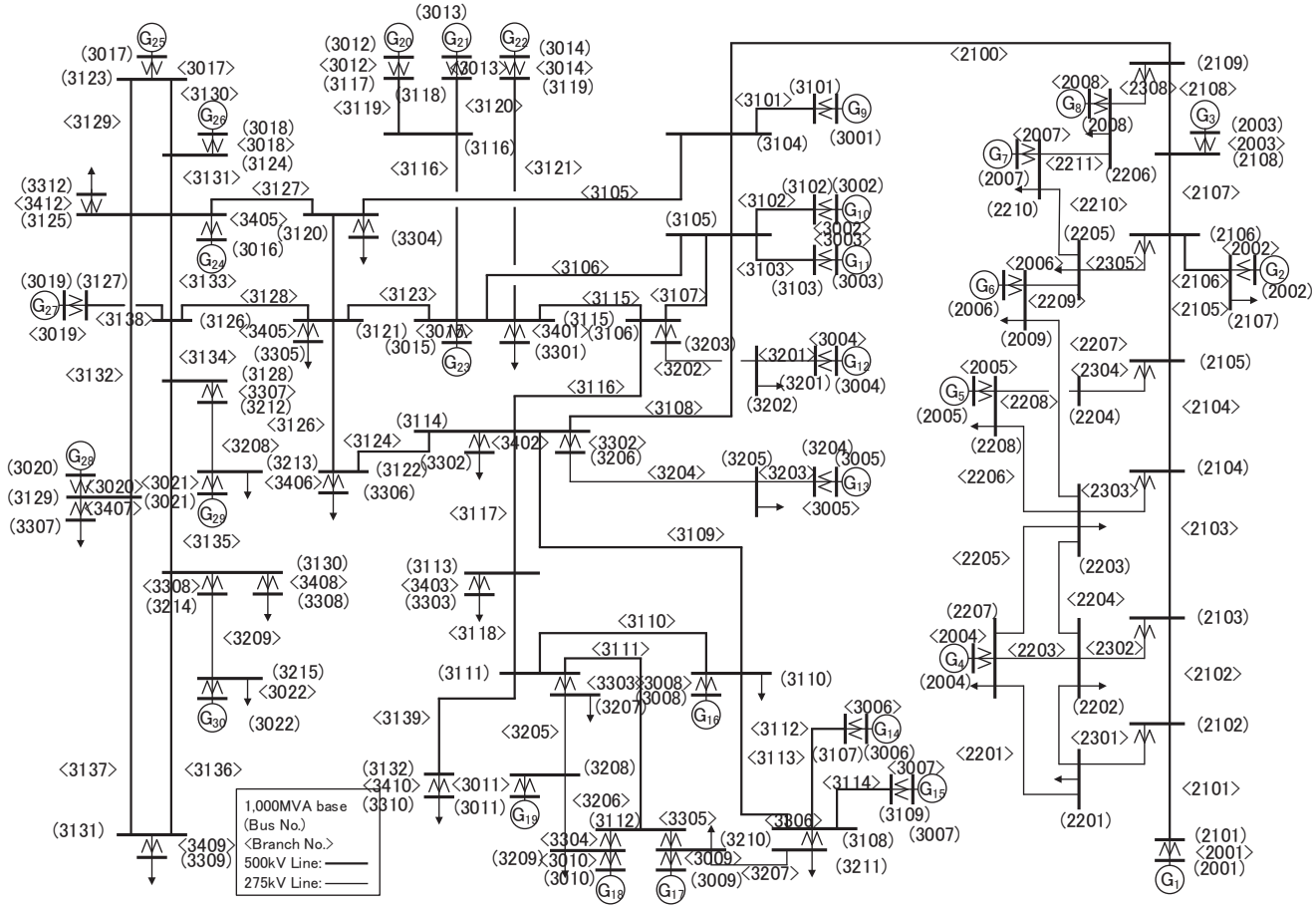


Fig. 9 Eastern 30 machines - power system model (EAST30).

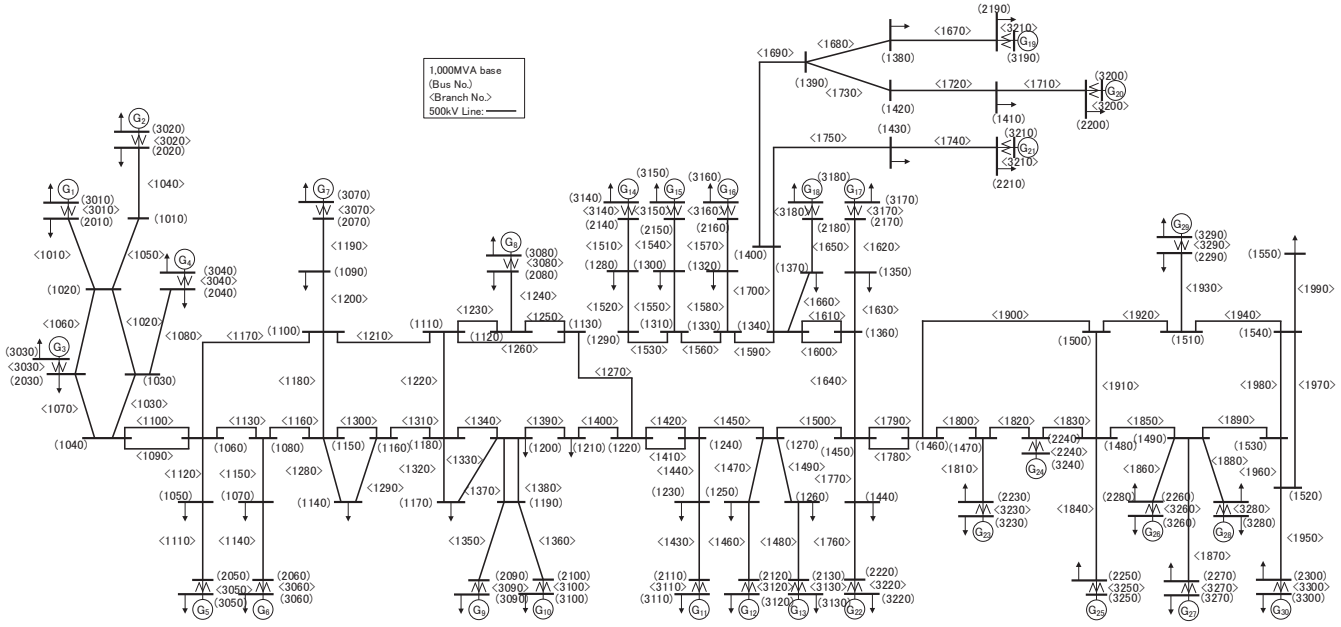


Fig. 10 Western 30 machines - power system model (WEST30).