

大規模電力系統から見た大容量同期調相機導入の 系統運用面の効用に関する総合的な評価

道 上 勉*・宮 田 明 則**

Synthetic Evaluation of Large Capacity Synchronous Condenser Application to a Bulk Electric Power System to improve System Operation Characteristics.

Tsutomu Michigami and Akinori Miyata

Reactive power supply sources with excellent voltage and dynamic stability characteristics are required to maintain system stability in a large-scale heavily loaded power system. The authors carefully examined the effectiveness of synchronous condenser application to such a power system in improving the stability margin. In an analysis example of a large-actual power system which has a comparatively higher nose tip voltage, a large capacity synchronous condenser can lower the nose tip voltage by about 4 kV on the same demand conditions compared with shunt capacitor case. A large capacity synchronous condenser applied to a large-scale heavily loaded power system achieved the expected results with good operating characteristics.

1. まえがき

近年、電力系統の大規模で、かつ、高密度・長距離大電力送電化に伴い、系統の電圧安定性と系統安定度の維持は電力の安定供給を確保するうえでの重要課題⁽¹⁾となっている。特に、大都市部のように広範囲な高密度需要地域に大電力を供給する重潮流系統において系統の電圧安定性を維持するためには優れた電圧特性を有する無効電力供給源が得られないと電圧維持面の制約で送電系統を十分に利用できないこととなる。また、電源構成として大容量火力・原子力のベース電源の開発に合わせ、尖鋭化する需要に対する経済的なピーク供給力として、大規模な揚水式水力が開発されている。この大規模揚水式水力を系統運用面から見た場合、昼間の発電運転時は火力・原子力と同様、発電機内部誘起電圧は進み位相となりベース電源の発電機電圧との位相差は大きく開かないが夜間の揚水運転時は遅れ位相となり、大きく開き系統事故時に安定に運転できる安定度余裕が小さくなる。そこで著者らは、大規模電力系統の電圧安定性の維持と揚水送電系統の安定度を向上する方策として優れた系統電圧特性を有する無効電力供給源として歴史的に豊富な運転実績があり、かつ、SVCやSVGに比べ慣性効果が期待できる大容量同期調相機に着目し、実系統に適用する系統運用面のニーズの評価、検討⁽²⁾⁽³⁾を行ってきた。その背景には同機は設備構成と運用・運転が

* 電気工学科 ** (株)東京電気工務所

シンプルなうえ最近の新素材の採用で運転の信頼性が向上し、かつ、環境対策や保守の簡素化を図った空気冷却形の製作が可能となつたことがある。本論文では、最初に系統運用面のニーズの1つである電力系統の電圧安定性を改善する特性を重負荷の500kV 変電所送電系統モデルを用いて同期調相機とSVC（電力用コンデンサ相当）を比較検討し、前者の優位性を示す。つぎに同期調相機の系統安定度向上効果を大規模な揚水送電系統モデルを用い、同期調相機の有無でのP-δ曲線とリアプノフ関数による静的な安定度解析と発電電動機と同期調相機等の慣性効果を考慮した動的シミュレーションで評価した結果について報告する。

2. 同期調相機適用による電圧安定性改善の基礎的検討

＜2.1＞ 500kV 変電所送電系統の電圧安定性の改善効果 検討対象の系統モデルとしては電圧安定性維持が要求される高需要密度地域に供給する500kV 変電所、架空線、地中ケーブルから構成される重負荷の1変電所送電系統モデル（図1）を考え、系統の具体定数は表1の条件とした。この系統モデルで受電端に同期調相機とSVC（電力用コンデンサ相当）設置時の受電端の系統電圧特性式を求める。

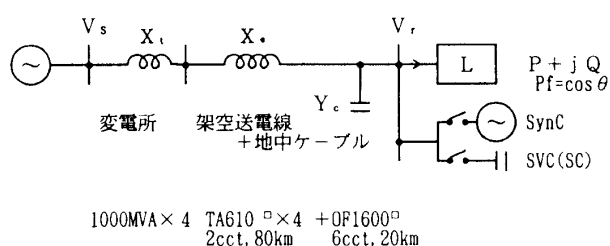


図1 一変電所対大電力送電系統モデル

Fig.1. A one-substation and large power flow system model

表1 大電力送電系統の系統諸元

Table1. Parameters of the model system

Xt (pu)	0.0350
Xe (pu)	0.1328
Yc (pu)	1.1186
Vs (pu)	1.00
負荷力率	0.95, 0.975, 1.00

(a) 同期調相機設置の場合（設置量Qc）；同期調相機のQ-V特性は、電圧制御の下限範囲を超えても内部誘起電圧により運転電圧80%程度までは、ほぼ定Q特性とみなせる。いま、受電端の電圧をV_r、負荷の有効電力をP、負荷力率(cos θ)を一定とすれば負荷の無効電力QはαP（ただし、α = √(1 - cos² θ) / cos θ）で表現できるから受電端のPとV_rの特性式は次式で表される。

$$P^2 + \left\{ \left(\frac{1}{X_t + X_e} - Y_c \right) V_r^2 + (\alpha P - Q_c) \right\}^2 = \frac{V_s^2 V_r^2}{(X_t + X_e)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、V_s:送電端電圧、X_t:変圧器リアクタンス、Y_c:送電線アドミタンス
X_e:送電線リアクタンス

(b) SVC（電力用コンデンサ相当）の設置（設置量Y_{sc}）；SVCのQ-V特性は電圧制御の下限範囲を超えたときは電力用コンデンサのみとなるから定Z特性とみなせる。その時の受電端のPとV_rの特性式は次式で表される。

$$P^2 + \left\{ \left(\frac{1}{X_t + X_e} - Y_c - Y_{sc} \right) V_r^2 + \alpha P \right\}^2 = \frac{V_s^2 V_r^2}{(X_t + X_e)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上記の(1), (2) 式に表1の系統諸元を代入し求めた受電端のP-V_r 曲線が図2 (a), (b) である。また、図2における安定限界点の安定限界電力P_cと安定限界電圧V_cの関係式を(1), (2) 式か

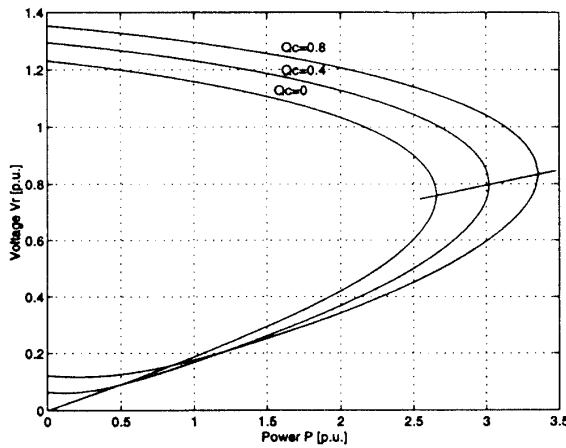
ら求めたのが次の(3)～(6)式である。

(a) 同期調相機設置の P_c 、 V_c

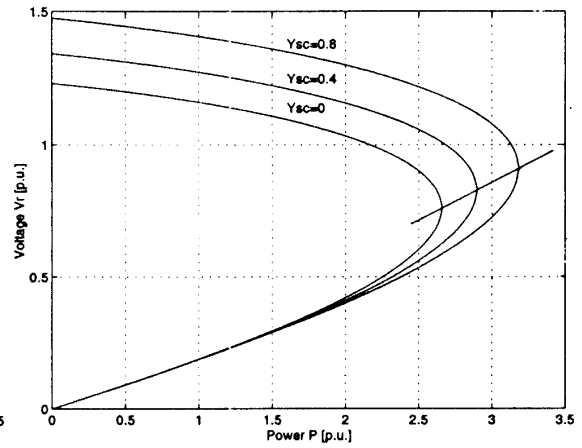
$$P_c = \frac{35.515 (\sqrt{1+\alpha^2} + 4 \times 4.841 Q_c / 35.515 - \alpha)}{2 \times 4.841} \dots (3) \quad V_c = \frac{\sqrt{35.515/2 - 4.841(\alpha P_c - Q_c)}}{4.841} \dots (4)$$

(b) SVC設置の P_c 、 V_c

$$P_c = \frac{35.515 (\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha)}{2 \times (4.841 - Y_{sc})} \dots (5) \quad V_c = \frac{\sqrt{35.515/2 - (4.841 - Y_{sc}) \alpha P_c}}{4.841 - Y_{sc}} \dots (6)$$



(a) 同期調相機設置の場合



(b) SVC設置の場合

図2 同期調相機とSVC設置の受電端P-V曲線

Fig.2. P-V curves at the receiving end for the model system with synchronous condensers or shunt capacitors

上記(3)～(6)式を図示したのが図3で、この図からSVCより同期調相機を設置すれば V_c の上昇を抑えつつ P_c を延伸することができる重要な系統電圧特性が得られる。つまり、SVC設置と同期調相機設置の dV_c/dP_c の比率 R は q を調相設備設置量とすれば次式で表される。

$$R = 2 \beta \beta' \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \left(1 + 0.273q - \frac{\alpha}{\beta'}\right)} \dots (7)$$

$$\text{ただし、} \beta = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha}$$

$$\beta' = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2} + 0.545q - \alpha}$$

この R 値は図3の分岐点付近($q=0$)で負荷力率=0.95で2.91、負荷力率=0.975で2.57、負荷力率=1.00で2.00となり、SVC設置は同期調相機設置の場合の2～3倍、図3 同期調相機とSVCの受電端 $P_c - V_c$ 曲線の速さで V_c が上昇し、特に負荷力率が悪くなる程、その値が大きくなる。

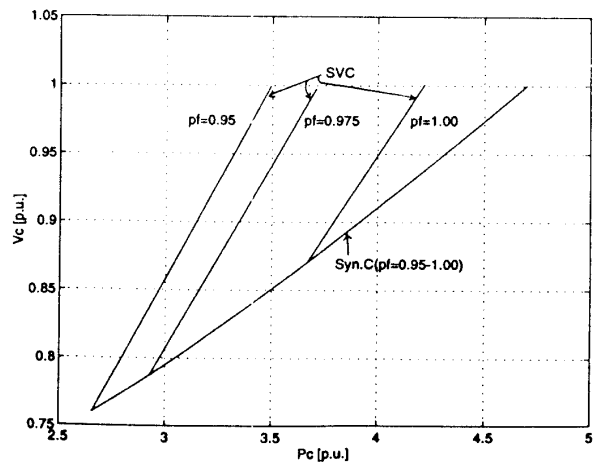


図3 同期調相機とSVCの受電端 $P_c - V_c$ 曲線

Fig.3. $P_c - V_c$ curves at the receiving end for synchronous condenser case and shunt capacitor case

〈2.2〉 最大送電電力 P_m と各種無効電力供給源の関係 前節で求めた受電端の安定限界電力 P_c と安定限界電圧 V_c の関係は電圧安定性の安定度合いを示す指標となるがこれを実際の電力システムの運用にあてはめ考察してみる。実システムでは常時の系統電圧の運用範囲は系統の安定性や機器の安定運転面などから公称電圧の95~105%となっており、同期調相機やSVCを設置した後の安定限界電圧 V_c が常時の系統電圧の運用範囲に接近した断面が、この系統における最大可能な送電電力 P_m となる。従って、送電系統の新增設なしで、調相設備で送電電力を増加させる場合は、どのような無効電力供給源であれば V_c の上昇を抑制して P_m を大きくすることが可能であるかが系統の安定運用上の重要な課題となる。そこで図1の系統モデルを用いて、これを検討すると図3の $P_c - V_c$ 曲線上において V_c の値が常時の系統電圧の運用範囲の下限値（重負荷時は公称電圧100%程度）に達したときの P_c が P_m となる。これを負荷力率をパラメータにして求めたのが図4で、同期調相機設置では負荷力率に無関係に P_m は4.7pu 程度一定に対し、SVC設置では負荷力率が低下するに従い P_m も減少し、負荷力率0.95では3.5pu 程度となる。同期調相機設置とSVC設置の P_m の比を求めると負荷力率100%で1.12倍、95% で1.34倍で負荷力率が低下するに従い同期調相機の効果が顕著となる。つまり、同期調相機は、SVCに比べ受電端の系統電圧特性を向上させる優れた無効電力供給源で既設の送電系統を延命させ有効活用できると考える。一方、サイリスタ素子の進歩により、最近、GTO等を利用した比較的大容量のSVG（自励式SVC）が開発されつつある。このSVGは理論的には電圧特性面で同期調相機と同等の効果が期待できるが、今後、同期調相機と同等の設備や運用の信頼性確保、系統の過渡動揺時など電圧変化が大きいときの制御追従範囲の拡大運用技術面からのヒューマンインタフェースの向上などの課題が解決されるに従い順次、実システムに適用されるべきものと考えられる。

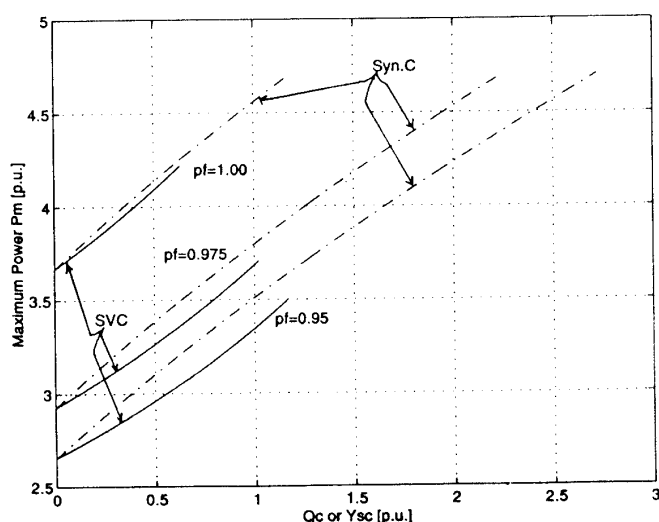


図4 同期調相機とSVC設置の受電端 $P_m - Q$ 曲線

Fig.4. P_m - Q curves at the receiving end for synchronous condenser case and shunt capacitor case

3. 同期調相機適用による系統安定度向上の基礎的検討

〈3.1〉 同期調相機適用の揚水系統の静的安定度向上効果 同期調相機を中間調相機として用い安定度を向上する方式は古くからBaum system と呼ばれ、その有効性は多くの論文⁽⁴⁾、著書⁽⁵⁾に示す通りであるが、この節では前述のように現在、安定度が問題となっている揚水系統に同期調相機を適用した場合の安定度向上効果を検討する。同期調相機を適用する検討対象の系統モデルとしては大規模な揚水送電系統として、揚水発電電動機（以下、発電電動機と称す）、中間に母線を有する架空送電線、大きな母系統発電機から構成される図5のような系統モデルとし、具体的な系統定数として理論的に同期調相機設置の効果が最も大きくなる $X_{t1} + X_{e1}$ と X_{e2} が等しい中間点に母線

を設けた表2の条件とした。最初に、この系統モデルの中間母線に同期調相機設置の有無の静的な系統安定度を比較する。

表2 大規模揚水送電系統の系統諸元
Table 2. Parameters of the model system

電力 [pu]	$P1=-1.0, P2=1.0, Ps=0.0,$
電圧 [pu]	$E1=E2=Es=1.0$
慣性 [rad]	$M1=1/10\pi, Ms=1/100\pi, M2=1/\pi$
系統リアクタンス [pu]	① $Xt+Xe1=Xe2=1/3, Xs=1/4$ ② $Xe2=2/3$, その他は①に同じ

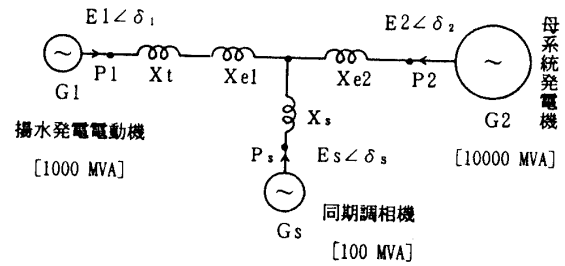


図5 大規模揚水送電系統モデル

Fig.5. A model system with large pumped-storage hydro-plant

(a) 同期調相機設置時の発電電動機の揚水電力 $P1$; 同期調相機設置時は発電電動機 $G1$, 同期調相機 G_s , 母系統発電機 $G2$ の3機系となる。いま送電系統のリアクタンス $Xt+Xe1, Xs, Xe2$ を $Y \rightarrow \Delta$ 変換して各発電機間の伝達アドミタンスをそれぞれ $Y1s, Ys2, Y12$ とし、同期調相機 G_s の端子電圧 E_s の位相角を基準とし $\angle \delta_s = 0^\circ$ とすれば発電電動機 $G1$ の揚水電力 $P1$ は次式で求められる。

$$P1 = E1E_sY1s \sin \delta_1 + E1E2Y12 \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ただし、} \delta_2 = \sin^{-1} \left(-\frac{E1Y1s}{E2Ys2} \sin \delta_1 \right), Y1s = \left\{ Xt+Xe1+Xs + \frac{(Xt+Xe1)Xs}{Xe2} \right\}^{-1}$$

$$Y12 = \left\{ Xt+Xe1+Xe2 + \frac{(Xt+Xe1)Xe2}{Xs} \right\}^{-1}$$

(b) 同期調相機無しの発電電動機の揚水電力 $P1'$; 同期調相機無の送電系統は発電電動機 $G1$ と母系統発電機 $G2$ の2機系となり、その間の伝達アドミタンスを $Y12'$ とすれば $G1$ の揚水電力 $P1'$ は

$$P1' = E1E2 Y12' \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ただし、} \delta_2 = \sin^{-1} \left(-\frac{E1Xe2}{E2(Xt+Xe1)} \sin \delta_1 \right), Y12' = (Xt+Xe1+Xe2)^{-1}$$

以上の(8), (9) 式に表2の系統定数①を代入して発電電動機 $G1$ の $P-\delta$ 曲線を求めたのが図6で、同図より同期調相機を設置すれば $G1$ の最大揚水電力 P_m は無い場合の1.22倍となる。また、初期の揚水電力 $P1=-1.0$ [pu]以上の過渡動揺時の安定な位相範囲も同期調相機設置時が 75° に対し無しが 48° で、その範囲が1.56倍と極めて広くなっており安定度が大幅に向上することが分かる。この状態における安定度の度合いをエネルギー関数面から考察する。

(a) 同期調相機設置時; いま、 $G1$ の初期揚水電力を $P1i$ 、 $E1$ の位相を α_0 、 $P-\delta$ 曲線の谷の反対側の位相を α_{1m} とすればリアプノフ関数の最大値 V_m ⁽⁶⁾ は次式で表される。

$$V_m = \frac{1}{M1} \left\{ P1i(\alpha_0 - \alpha_{1m}) + Pm1s(\cos \alpha_0 - \cos \alpha_{1m}) + \frac{Pm12}{2}(\cos 2\alpha_0 - \cos 2\alpha_{1m}) \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ただし、} Pm1s = E1E_sY1s, Pm12 = E1E2Y12$$

(b) 同期調相機設置無し; 初期の揚水電力を $P1i$ 、 $E1$ の位相を δ_0 、 $P-\delta$ 曲線の谷の反対側の位相を δ_{1m} とすればリアプノフ関数の最大値 V_m' は次式で表される。

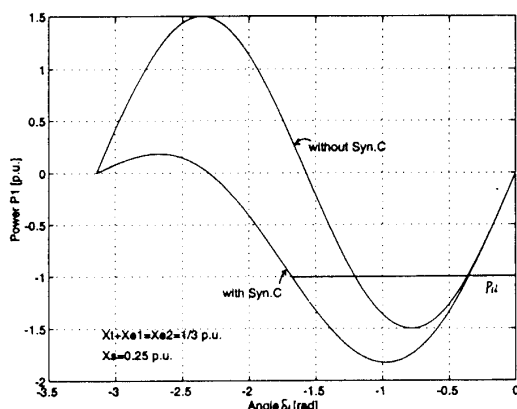


図6 発電電動機G1 のP-δ曲線

Fig.6. P-δ curve of generator/motor G1

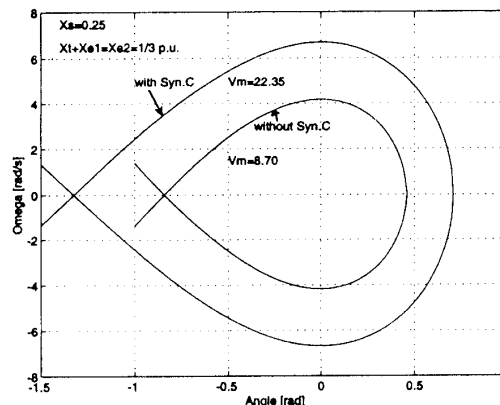


図7 発電電動機G1 のSeparatrix

Fig.7. Separatrix of generator/motor G1

$$V_m' = \frac{1}{M1} \left\{ P_{li}(\delta_0 - \delta_{1m}) + \frac{P_{m1}}{2} (\cos 2\delta_0 - \cos 2\delta_{1m}) \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし $P_{m1} = E1E2Y12'$

この(10), (11) 式に図6の $P_{li} = -1.0$ [pu] の $\alpha_0 = -20.3^\circ$, $\alpha_{1m} = -96.2^\circ$ と $\delta_0 = -20.9^\circ$, $\delta_{1m} = -69.1^\circ$ を代入して V_m を求めると $V_m = 22.35$, $V_m' = 8.70$ となり同期調相機設置時のエネルギーの最大値が極めて大きいことが分かる。また、 $\Delta\delta - \Delta\omega$ 平面上にG1のMaximum Trajectory (Separatrix)を示したのが図7で、この図からも同期調相機を設置すれば安定な揚水運転の範囲が大幅に広がる事が分かる。一方、送電線リアクタンス $X_t + X_{e1}$ と X_{e2} を同時に増加したときの同期調相機有無のG1の最大揚水電力と、その比 G を示したのが図8である。送電線リアクタンスの増加に従い最大揚水電力は減少するものの G の値は増加しており系統が安定度的に弱くなるに従い同期調相機の効果が增加することを示唆している。

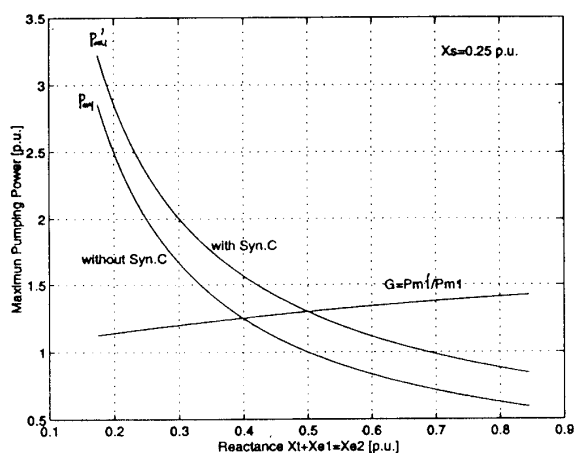


図8 発電電動機G1の最大揚水電力と同期調相機有無の比

Fig.8. Maximum available pumping power curve of G1 and their ratio in cases with and without synchronous condenser

<3.2> 同期調相機適用の揚水系統の動的安定度向上効果 動的シミュレーションのモデルを得るため図5の系統モデルで各発電機の動的な運動方程式の定式化を求める。

(a) 同期調相機設置時の運動方程式の定式化；いま、G1, Gs, G2の慣性定数をそれぞれ $M1, Ms, M2$ とすれば各機の運動方程式は次式⁽⁶⁾で表される。

$$M1 \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = P_{li} - E1E_s Y_{1s} \sin(\delta 1 - \delta s) - E1E2Y_{12} \sin(\delta 1 - \delta 2) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Ms \frac{d^2 \delta s}{dt^2} = P_{si} - E_s E1Y_{1s} \sin(\delta s - \delta 1) - E_s E2Y_{s2} \sin(\delta s - \delta 2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$M2 \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = P2i - E2E1Y12 \sin(\delta 2 - \delta 1) - E2EsYs2 \sin(\delta 2 - \delta s) \dots\dots\dots (14)$$

(b) 同期調相機無の運動方程式の定式化；この場合はG1 とG2 の2機系となり次式で表される。

$$M1 \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = P1i - E1E2Y12' \sin(\delta 1 - \delta 2) \dots\dots\dots (15)$$

$$M2 \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = P2i - E1E2Y12' \sin(\delta 2 - \delta 1) \dots\dots\dots (16)$$

以上の各機の運動方程式の動的ブロック図を示すと図9 (a), (b) となる。このブロック図を用い同期調相機設置時の動的シミュレーションを行うため系統定数として表2の値を(12)～(14)式に代入すると運動方程式は次式となる。

$$\frac{1}{10\pi} \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = -1 - 1.2 \sin(\delta 1 - \delta s) - 0.9 \sin(\delta 1 - \delta 2) \dots\dots\dots (17)$$

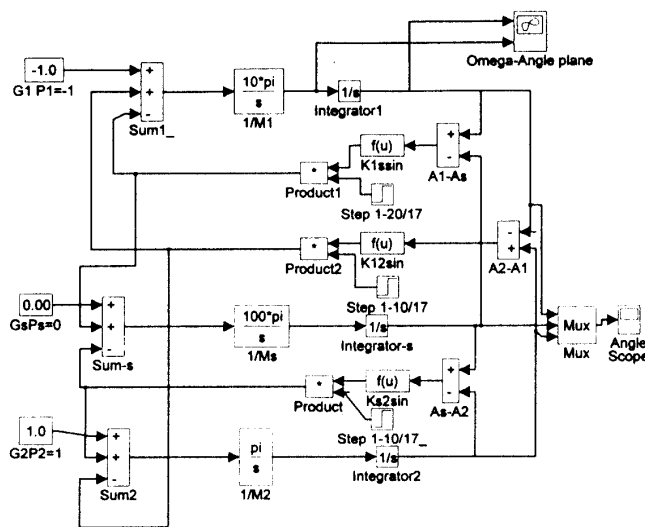
$$\frac{1}{100\pi} \frac{d^2 \delta s}{dt^2} = -1.2 \sin(\delta s - \delta 1) - 1.2 \sin(\delta s - \delta 2) \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{1}{\pi} \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = 1 - 0.9 \sin(\delta 2 - \delta 1) - 1.2 \sin(\delta 2 - \delta s) \dots\dots\dots (19)$$

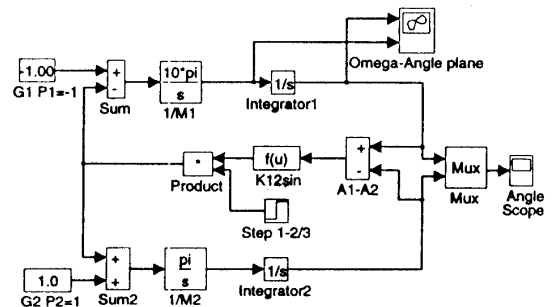
また、同様に同期調相機無しの運動方程式は次式となる。

$$\frac{1}{10\pi} \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = -1 - 1.5 \sin(\delta 1 - \delta 2) \dots\dots (20), \quad \frac{1}{\pi} \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = 1 - 1.5 \sin(\delta 2 - \delta 1) \dots\dots (21)$$

この(17)～(21)式の状態（表2の①）から送電線リアクタンスXe2をt=0.5sで2/3[pu]に変更した場合（表2の②）の動的シミュレーション結果〔MATLAB使用〕が図10(a), (b)で、同図(a)は各



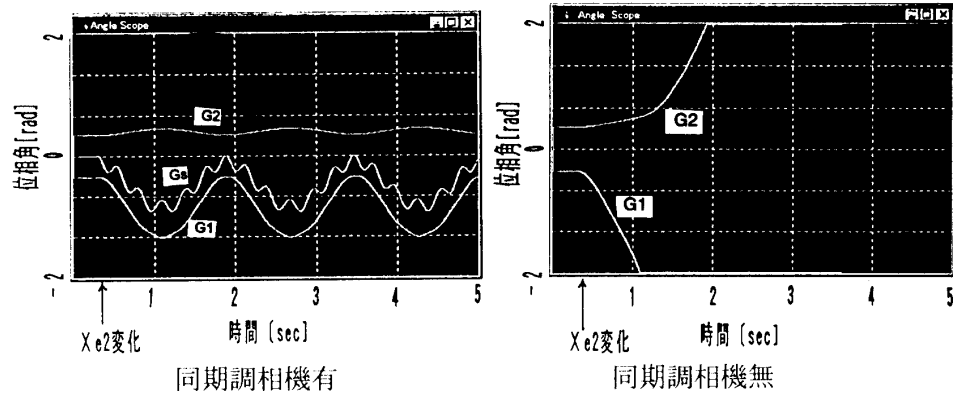
(a) 同期調相機 有



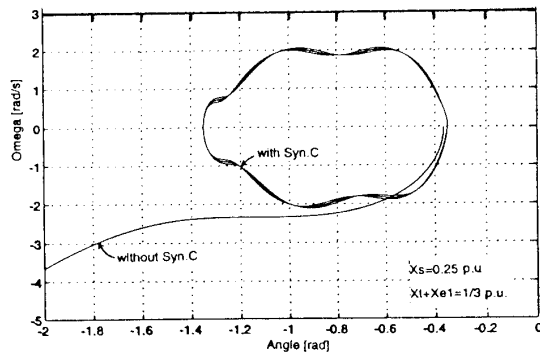
(b) 同期調相機 無

図9 発電機の運動方程式の動的ブロック図

Fig.9. Dynamics block diagram of power system with a pumped-storage hydro-plant



(a) 各発電機の δ の時間推移 (リアクタンス $X_{e2} \ 1/3 \rightarrow 2/3$ 変化時)



(b) G1 のTrajectory ($X_{e2} \ 1/3 \rightarrow 2/3$ 変化時)

図10 発電電動機G1の動的シミュレーション結果

Fig.10. Dynamics simulation result of generator/motorG1

発電機の δ の時間推移を示し、同図(b)はG1のTrajectoryを $\Delta\delta - \Delta\omega$ 平面上に示したものである。同図から同期調相機を設置した場合は過渡安定度が維持されているのに対し同期調相機が無い場合は第1波脱調となっており、同期調相機設置が安定度向上に大きく寄与していることが分かる。

5. まとめ

本論文を要約すると、大容量同期調相機を適用し(1) 系統の電圧安定性改善を目指した重負荷の500kV 変電所送電系統モデルの検討ではSVCに比べP-V曲線の安定限界電圧 V_c の上昇を1/2~1/3に抑えつつ、安定限界電力 P_c を大幅に延伸でき負荷力率95%で約35%増加できる。

(2) 系統安定度向上を目指した大容量揚水送電系統モデルの静的検討では送電系統の中間点に同機を設置すれば同期調相機無しに比べ揚水可能電力を約20%増加でき、また、同機の慣性効果を考慮した動的シミュレーションでも同期調相機が無いと第1波脱調に対し、同期調相機の設置により安定度が維持できる。

今後は、同期調相機とSVGの系統運用面のニーズの比較と同期調相機の励磁制御系にPSSを付加したダンピング向上方策などについて検討を進める。

文 献

- (1) 関根泰次、川路恭郎、他:「解説 電力系統における電圧安定性」, 電学誌, 111巻, 4号(平3)
- (2) 宮田明則、道上勉:「大規模電力系統の電圧安定性を改善する大容量同期調相機適用の基礎的検討」, 平10電気学会全大, No. 1282
- (3) 宮田明則、道上勉:「大規模揚水系統の系統安定度を向上する大容量同期調相機適用の基礎的検討」, 平10電気学会全大, No. 1283
- (4) 関根泰次、上之園親佐、田村康男、他:「電力系統の安定度」, 電協研第34巻, 第5号(昭54)
- (5) 関根泰次、林宗明、芹沢康夫、豊田淳一、長谷川淳:「電力系統工学」, 日叶社
- (6) G.E.Gless: "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability", IEEE, Trans. P159 (Feb. 1966)

(平成10年11月18日受理)