大規模電力系統から観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と実証

正員 宮田明則 (東京電気工務所)

正員 道上 勉 (福井工業大学)

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

Akinori Miyata, Member (Tokyo Denki Komusho) Tsutomu Michigami, Member (Fukui Univ. of Technology)

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.

キーワード：大容量同期調相機、電圧安定性、安定限界電圧上昇抑制、系統安定度、揚水系統、適用と実証

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観た場合、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・運転がシンプルなおよび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同期調相機とSVC（電力用コンデンサ相当）で比較し論じた後、重負荷の500kV変電所送電系統モデルを用いて解析し、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た静的な安定度解析と慣性効果を考慮した動的シミュレーションで評価し、最後に大規模電力系統に大容量同期調相機を適用した電圧安定性改善効果のシミュレーション結果と実系統の適用例ならびに実証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> 同期調相機の系統電圧の安定性に与える影響 電力系統を安定に運用するためには常に電圧安定性を適正に維持する必要があるが系統の電圧安定性が問題となるのは送電系統の規模に対し潮流が重潮流となり系統電圧を適正に維持できない場合である。つまり、系統負荷の増加に伴い系統が重潮流となり大量の調相設備の設置により系統の電圧安定性を維持しなければならない特性の系統で設置後の常時の系統電圧が設備の安定運転範囲（通常、公称電圧の95～105%）を確保できない場合である。この観点から電力系統の電圧安定性維持のため系統の変電所に同期調相機とSVC（電力用コンデンサ相当）を設置した場合を比較する。同期調相機のQ-V特性は、電圧制御の下限範囲を

図1 一変電所対大電力送電システムモデル

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

表1 大電力送電システムの系統諸元

Table1. Parameters of the model system

X_t (pu)	X_e (pu)	Y_c (pu)	V_s (pu)	負荷力率
0.0350	0.1328	1.1186	1.00	0.95, 0.975, 1.00

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⁽³⁾とみなせるのに対し、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特性となり、前者が系統電圧が変化しても無効電力を一定に供給し続ける優れた特性を有するのに対し後者は系統電圧の変化に伴い2乗で無効電力が変動し系統電圧を更に変化させる特性となる。この特性の差が系統の電圧安定性上、重要である負荷増加に伴うP-V曲線の安定限界電圧の上昇に大きな影響を与え、後者が急激に上昇し、常時の運用電圧に接近して系統の対応限界を早めるのに対し、前者は緩やかに上昇し、系統の対応限界を延伸させる優れた系統特性となる。

<2.2> 500kV 変電所送電システムの電圧安定性の改善効果

前節の検証として、電圧安定性問題が顕在化する大都市の高需要地区に500kV変電所から供給する重潮流の275kV地中ケーブル系統を取上げ検討する。このシステムモデルは、系統特性として対地充電容量が負荷の送電電力の1/3~1/4に相当する大きな値を有する275kV架空線・地中ケーブルと500kV変電所から構成される重負荷の送電システム(図1)で、具体的な系統定数は表1の条件とする。このシステム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)を設置した場合の受電端の系統電圧特性を求める。

いま、受電端の電圧を V_r 、負荷の有効電力を P 、負荷力率($\cos \theta$)を一定とすれば負荷の無効電力 Q は αP ($\alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} / \cos \theta$)で表現でき受電端の P と V_r の特性式は

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

ただし、 V_s :送電端電圧、 X_t :変圧器リアクタンス
 X_e :送電線リアクタンス、 Y_c :送電線アドミタンス
 Q_c :同期調相機設置量、 Q_{sc} :SVC設置量($V=1.0$ の値)

(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

となる。前記の(1)式に表1の系統諸元(負荷力率0.95)を代入し負荷を定電力特性として求めた受電端のP-V曲線が図2(a),(b)である。この図から同期調相機設置はP-V曲線の安定限界点の電圧が負荷の増加につれて緩やかに上昇しているに対し、SVC設置は急激に上昇しているのが観測される。このシステムモデルの特性をさらに詳細に観るため安定限界点の安定限界電力 P_c と安定限界電圧 V_c の関係式を求めたのが次式である。

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

$$V_c = \frac{\sqrt{35.515/2 - (4.841 - Q_{sc}) (\alpha P_c - Q_c)}}{4.841 - Q_{sc}} \quad (3)$$

上記(2),(3)式で同期調相機($Q_{sc}=0$)とSVC($Q_c=0$)設置を図示したのが図3で、この図からSVCより同期調相機を設置すればP-V曲線の V_c の上昇を抑えつつ P_c を延伸できる重要な系統電圧特性が得られる。また、安定限界電圧の上昇割合を示す dV_c/dP_c のSVC設置と同期調相機設置の場合の比率 R (付録)を求めたのが次式である。

図3 同期調相機とSVC設置の受電端 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

図4 同期調相機とSVC設置の受電端Pm-Q曲線
Fig. 4. Pm-Q curves at the receiving end for synchronous condenser case and shunt capacitor case

$$R = 2\beta\beta' \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \left(1 + 0.273q - \frac{\alpha}{\beta'}\right)} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\beta = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha}$ 、 $\beta' = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha'^2+0.545q}-\alpha}$
q=調相設備設置量

(4)式のR値を図3の分岐点付近(q=0)で求めると負荷力率=0.95で2.91、0.975で2.57、1.00で2.00となり、SVC設置は同期調相機設置に比べ2～3倍の速さでVcが上昇する電圧特性となっている。

〈2.3〉最大送電電力Pm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Pcと安定限界電圧Vc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電力系統の実際の運用にあてはめ考察してみる。実系統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Vc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Pm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確保する系統では、どのような無効電力供給源であればVcの上昇を抑制してPmを大きくできるかが系統の安定運用上の重要課題となる。このことを図1の系統モデルを用いて検討するとSVCの制御範囲の設定は電圧安定性が問題となる重負荷時は高め電圧設定(公称電圧110～100%)としており、運用下限値(100%程度)以下では制御範囲を下回るので定Z特性となり、同期調相機は定Q特性とみなせ、かつ、Vcが80%程度以上を論じているので図3がそのまま活用できる。

従い、図3のPc-Vc曲線上において調相設備の増加につれて上昇するVcの値が常時の系統電圧の運用下限値(公称電圧100%程度)に達したときのPcがPmとなる。また、負荷力率をパラメータにして調相設備投入量(Qc, Qsc)とPm(Vc=1.00puのPc値)の関係を求めのが図4で同期調相機設置では負荷力率に無関係にPmは4.7pu程度一定に対しS

Vc設置では負荷力率が低下するに従いPm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Pmの比を求めると負荷力率100%で1.12倍、95%で1.34倍と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利用できると思う。

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、実系統に適用されるべきものと思う。

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⁽⁶⁾、著書⁽⁷⁾に示す通りであるが、この章では序論で述べたように現在、安定度が問題となつ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。

検討方法は電圧安定性改善を目的として設置した同期調相機の安定度向上面の有効性を確認することから同機の有無での効果で評価することとした。検討対象の系統モデルは揚水発電電動機(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のような大規模な揚水送電系統とし、具体的な系統定数は表2とし同期調相機設置箇所は理論的に効果が最大となるXt+Xe1とXe2が等しい中間点母線とした。

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

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

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

最初に、同期調相機有無の静的な系統安定度を比較する。

(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Gs、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 X_t+X_{e1} 、 X_s 、 X_{e2} をY-Δ変換して各発電機間の伝達アドミタンスをそれぞれ Y_{1s} 、 Y_{s2} 、 Y_{12} とし、同期調相機Gs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。

$$P_1 = E_1 E_s Y_{1s} \sin \delta_1 + E_1 E_2 Y_{12} \sin(\delta_1 - \delta_2) \dots (5)$$

$$\text{ただし、} \delta_2 = \sin^{-1} \left(-\frac{E_1 Y_{1s}}{E_2 Y_{s2}} \sin \delta_1 \right)$$

$$Y_{1s} = \left\{ X_t + X_{e1} + X_s + \frac{(X_t + X_{e1}) X_s}{X_{e2}} \right\}^{-1}$$

$$Y_{12} = \left\{ X_t + X_{e1} + X_{e2} + \frac{(X_t + X_{e1}) X_{e2}}{X_s} \right\}^{-1}$$

(b) 同期調相機無しの発電電動機の揚水電力P1'

同期調相機無しの送電系統は発電電動機G1と母系統発電機G2の2機系となるから、その間の伝達アドミタンスを Y_{12}' とすればG1の揚水電力P1'は次式で求められる。

$$P_1' = E_1 E_2 Y_{12}' \sin(\delta_1 - \delta_2) \dots (6)$$

$$\text{ただし、} \delta_2 = \sin^{-1} \left(-\frac{E_1 X_{e2}}{E_2 (X_t + X_{e1})} \sin \delta_1 \right)$$

$$Y_{12}' = (X_t + X_{e1} + X_{e2})^{-1}$$

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

前記の(5)、(6)式に表2の系統定数(系統リアクタンスは①)を代入して発電電動機G1のP-δ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Pmは無い場合の1.22倍となる。また、初期の揚水電力 $P_1 = -1.0$ [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倍と極めて広くなり安定度が大幅に向上する。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 P_{1i} 、 E_1 の位相を α_0 、P-δ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 ⁽⁸⁾は次式で表される。

$$V_m = \frac{1}{M_1} \left\{ P_{1i} (\alpha_0 - \alpha_{1m}) + P_{m1s} (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_{1m}) + \frac{P_{m12}}{2} (\cos 2\alpha_0 - \cos 2\alpha_{1m}) \right\} \dots (7)$$

$$\text{ただし } P_{m1s} = E_1 E_s Y_{1s}, \quad P_{m12} = E_1 E_2 Y_{12}$$

(b) 同期調相機無し; 初期の揚水電力を P_{1i} 、 E_1 の位相を δ_0 、P-δ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。

$$V_m' = \frac{1}{M_1} \left\{ P_{1i} (\delta_0 - \delta_{1m}) + \frac{P_{m1}}{2} (\cos 2\delta_0 - \cos 2\delta_{1m}) \right\} \dots (8)$$

$$\text{ただし } P_{m1} = E_1 E_2 Y_{12}'$$

この(7)、(8)式に図6の $P_{1i} = -1.0$ [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ことが分かる。

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 P_m と、その比 G を示したのが図8でリアクタンスの増加に従い P_m は減少するが 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増加することを示唆している。

(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. Dynamic block diagram of power system with a pumped-storage hydro-plant

同期調相機有

同期調相機無

(a) 各発電機の δ の時間推移

図10 発電電動機G1 の動的シミュレーション結果

(リアクタンス X_{e2} 1/3 $\rightarrow$ 2/3 変化時)

Fig.10. Dynamic simulation result of generator/motorG1

(b) G1 のTrajectory

<3.2> 同期調相機適用の揚水系統の動的安定度向上効果

次に図5のシステムモデルを用いて同期調相機設置時の動的な安定度向上効果をMATLABで解析する。同機有無の各発電機の動的な運動方程式は次のように定式化される。

(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とし、各機に理想的なAVRが付加され端子電圧が一定に保たれるものとした場合の運動方程式は次式⁽⁸⁾となる。

$$M1 \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = P1i - E1EsY1s \sin(\delta 1 - \delta s) - E1E2Y12 \sin(\delta 1 - \delta 2) \dots (9)$$

$$Ms \frac{d^2 \delta s}{dt^2} = Ps i - EsE1Y1s \sin(\delta s - \delta 1) - EsE2Ys2 \sin(\delta s - \delta 2) \dots (10)$$

$$M2 \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = P2i - E2E1Y12 \sin(\delta 2 - \delta 1) - E2EsYs2 \sin(\delta 2 - \delta s) \dots (11)$$

(b) 同期調相機無し時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、(a)と同様な条件で運動方程式を求めると次式となる。

$$M1 \frac{d^2 \delta 1}{dt^2} = P1i - E1E2Y12' \sin(\delta 1 - \delta 2) \dots (12)$$

$$M2 \frac{d^2 \delta 2}{dt^2} = P2i - E1E2Y12' \sin(\delta 2 - \delta 1) \dots (13)$$

以上の運動方程式を基に動的シミュレーションを行うためシステム定数として表2の値を代入してMATLABの解析ブロック図に展開したのが図9(a)、(b)である。この解析ブロック図で系統外乱として同期調相機分岐と母系統発電機間の送電線リアクタンスXe2をt=0.5sで1/3から2/3[pu]に変化した時の動的シミュレーション結果が図10(a)、(b)である。同図(a)は各発電機の δ の時間推移を示し同図(b)は発電電動機G1のTrajectoryを $\Delta \delta - \Delta \omega$ 平面上に示し

たもので、同図から同期調相機設置時はダンピング項を無視しているため持続振動になるものの過渡安定度が維持されるのに対し同機が無い場合は発電電動機G1が第1波の減速脱調となるようすが観測される。このように大規模な揚水送電系統に同期調相機を設置すれば中間調相機の機能を発揮し系統の安定度向上に寄与することが立証できた。

4. 実系統への大容量同期調相機の適用例と実証

＜4.1＞ 大規模電力系統に大容量同期調相機を適用した電圧安定性の解析例 大都市部の超過密地域の需要に供給する大規模な実系統で夏期ピーク時に、系統中央部の500kV変電所に大容量同期調相機（200MVA×1台、500kV側の系統電圧に応じた無効電力制御方式を採用）を設置した場合の系統解析を行った。この系統の電圧特性は全系の需要増加に伴い調相設備を設置して全設備健全時に目標とする需要で電圧安定性を確保しなければならない特性となつてゐる。解析手法は実系統の電圧無効電力制御を忠実に再現したシミュレーションで、全系統の500kV、275kV変電所が1次側電圧を一定に保つ個別VQCの分散制御を行つてゐる状態で総需要が一定の速度（1000MW/分程度）で増加した場合を解析し評価した。解析ケースとしては電圧安定性維持のため全系の全設備が健全な状態と最も過酷な500kV送電線1回線停止の状態において総需要の増加に応じて（1）同期調相機200MVAを設置して目標とする需要（6650万kW）に対応するケース（①、③）と（2）電力用コンデンサを設置して対応するケース（②、④）とした。その解析結果が図11で、同図は系統の中央部の500kV変電所のP-V曲線を示しており、ほぼ同一の需要断面をみると大容量同期調相機を設置した①、③ケースは電力用コンデンサを設置した②、④ケースに比較して安定限界電圧 V_c を3.5～4kV程度低下させるようすが観測され2章で述べた同期調相機特有の特性が実系統の解析例でも反映されている。なお、②、④ケースで設置した電力用コンデンサ量は共に280MVAとなつてゐる。また、P-V曲線が極めて特異な形態となつてゐるのは対応する需要（6650万kW）までは系統電圧がVQCで一定値に制御され、それ以上の需要では調相設備の制御量がないため系統固有の特性となるが、系統電圧が低下する途中で発電機の発生無効電力が設備限界に達し、系統への供給無効電力を制限するため系統電圧が急激に低下に至るためである。このように大規模で大電力を供給する重潮流系統では電力用コンデンサ設置に比べ大容量同期調相機設置は系統電圧特性を大幅に改善し電圧安定性を向上させ送電系統を有効に利用できる極めて優れてゐる無効電力供給源であるといえる。

＜4.2＞ 大規模電力系統に適用した大容量同期調相機の運転実績 東京電力では前述のような系統運用面のニーズから平成2年から基幹系統の中枢部に環境対策と保守の簡素化を図つた単機容量60～200MVA級の空気冷却形の大容量同期調相機を設置してきた（図12）。これら同期調相機の年間の運転稼働率を示したのが表3で、同表から、同機は

図11 大容量同期調相機を適用した大規模実系統の500kV変電所のP-V曲線解析例

Fig.11. Simulation results in the form of P-V curves at a 500kV substation with a synchronous condenser on bulk power system

図12 東京電力系統上の大容量同期調相機の適用箇所

Fig.12. Position of large-synchronous condenser on TEPCO's power system.

昼間帯の全系の電圧安定性維持と夜間帯の揚水系統の安定度維持を図るため年間を通して昼夜間、連続して運転されていることが分かる。この同期調相機の高稼働状況の中でも設置当初の初期トラブルによる停止を除けば大部分は定期的に行う点検に伴う停止である。定格容量200 MVAの大容量同期調相機の点検保守については設備保全上、普通点検を年1回11～13日間運転を停止して行つてゐるが、この停止を除くと運転稼働率は98～99%程度と良好な運転状態である。大容量同期調相機は適用後6年に渡り順調な運転を踏んでおり所期通りの実績であり、今後も系統運用上のニーズがあれば、他の代替対策との技術的、経済的な総合評価のうえ適用すべきものと考えらる。

表3 大規模系統に適用した同期調相機の運転稼働率
Table 3. Operation factor of synchronous condensers

変電所	新所沢	新富士	北東京	中東京	京 北
容量 [MVA]	200×2	200×2	61.4×2	61.4×2	61.4×2
運開年月	1991.6.7	1991.7	1990.7	1991.7	1991.7
平成2年度 (1990)	—	—	96.0 [96.0]	—	—
3年度 (1991)	96.0 [96.0]	95.0 [95.0]	94.7 [94.8]	99.7 [99.7]	100 [100]
4年度 (1992)	96.5 [96.7]	95.1 [95.4]	94.0 [94.0]	98.1 [100]	97.8 [99.8]
5年度 (1993)	96.7 [96.7]	97.2 [97.8]	99.0 [99.0]	94.9 [94.9]	95.2 [95.2]
6年度 (1994)	96.9 [99.7]	98.1 [99.4]	96.3 [98.2]	99.6 [100]	99.1 [100]
7年度 (1995)	97.9 [99.9]	97.6 [99.6]	97.7 [97.7]	99.1 [100]	99.0 [99.9]
8年度 (1996)	97.9 [99.9]	96.5 [98.0]	94.8 [97.7]	96.8 [98.4]	98.8 [100]
平均 (H2,3~H8)	96.6 [99.0]	96.6 [98.2]	95.6 [97.7]	98.0 [99.0]	98.4 [99.3]

[注] 単位；％、〔 〕内は普通点検を除いた運転稼働率

5. まとめ

本論文の特徴を要約すると、次のようである。

(1) 大容量同期調相機を適用し、系統の電圧安定性改善をめざした重負荷の500kV 変電所送電系統モデルでの基礎検討では同期調相機はSVCに比べP-V曲線の限界である安定限界電圧Vcの上昇を1/2～1/3に抑えつつ、安定限界電力Pcを大幅に延伸でき負荷力率95%で約35%増加させることができる。

(2) 大容量同期調相機を適用し、系統安定度向上をめざした大容量揚水送電系統モデルでの静的な基礎検討では送電系統の中間点に同期調相機を設置すれば、無い場合に比べ揚水可能電力を約20%増加できる。また、同期調相機の慣性効果を考慮した動的なシミュレーションでも同機を設置すれば安定度が維持できるのに対し、同機が無いと第1波の脱調となる。

(3) 電圧安定性が厳しい大規模実系統の解析例では大容量同期調相機を設置する場合は電力用コンデンサを設置する場合に比べ、ほぼ同一の需要断面で500kV 系統の安定限界電圧を3.5～4 kV程度低下できる。

(4) 大規模実系統に適用した大容量同期調相機の運転実績は年間、昼夜間連続して稼働しており定期点検を除けば98～99%程度の良好な運転状態で所期の目標を達成した。

今後は、同期調相機とSVC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。

日ごろご指導をいただく東京大学名誉教授・東京理科大学関根泰次教授に深く感謝の意を表する次第である。

また、系統解析の一部に従事された東京電力(株)技術部高木邦夫君に謝意を表す。

(平成10年9月18日受付、同11年1月18日再受付)

文 献

(1) 関根泰次、川路恭郎、高橋一弘：「解説 電力系統における電圧安定性」，電学誌，第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) 関根泰次、林宗明、田村康男、鬼頭幸生、他：「電力系統安定運用技術」，電協研，第47巻，第1号（平3）

(4) 道上勉、尾崎愛一郎、鬼塚長徳、大嶋静男：「電圧安定性を向上する励磁方式(PSVR)の系統特性改善効果とシミュレーション」，平2電気学会電力・エネ部門大会，I-J, No.11

(5) 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

(6) 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）

(7) 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」，コロナ社

(8) G.E.Gless: "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability", IEEE, Trans. P159 (Feb. 1966)

(9) 宮田明則、道上勉：「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と実証」，平10電気学会電力・エネ部門大会，I-A, No.19

付録 SVCと同期調相機の dV_c/dP_c の比率R

SVC設置時の安定限界電圧 V_{cs} と安定限界電力 P_{cs} は本文(2), (3)式で $Q_c=0$ として求められ、SVC設置量 Q_{sc} の関数であるから、いま $4.841=A$ 、 $35.515/2=B$ 、 $Q_{sc}=q$ とおき $R_s=dV_{cs}/dP_{cs}$ を求めると次式となる。

$$R_s = \frac{dV_{cs}}{dP_{cs}} = \frac{\frac{dV_{cs}}{dq}}{\frac{dP_{cs}}{dq}} = \frac{\sqrt{1-\alpha}(\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha)}{\sqrt{B}(\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha)} \dots\dots\dots (付1)$$

一方、同期調相機設置時の安定限界電圧 V_{cr} と安定限界電力 P_{cr} は本文(2), (3)式で $Q_{sc}=0$ として求められ、SVC設置と同様に $Q_c=q$ とおき $R_r=dV_{cr}/dP_{cr}$ を求めると次式となる。

$$R_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{1+\alpha^2+2\frac{A}{B}q}-\alpha}{\sqrt{B}\sqrt{1-\alpha}(\sqrt{1+\alpha^2+2\frac{A}{B}q}-\alpha)+\frac{A}{B}q} \dots\dots\dots (付2)$$

従って求めるSVC設置と同期調相機設置の dV_c/dP_c の比率Rは次式となる。

$$R = \frac{R_s}{R_r} = 2 \cdot \frac{\sqrt{1-\alpha}(\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha)}{(\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha)} \times \frac{\sqrt{1-\alpha}(\sqrt{1+\alpha^2+2\frac{A}{B}q}-\alpha)+\frac{A}{B}q}{\sqrt{1+\alpha^2+2\frac{A}{B}q}-\alpha}$$

$$= 2\beta\beta' \sqrt{(1-\frac{\alpha}{\beta})(1+\frac{A}{B}q-\frac{\alpha}{\beta})} \dots\dots\dots (付3)$$

ただし $\beta = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}-\alpha}$, $\beta' = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2+2\frac{A}{B}q}-\alpha}$

宮田 明則 (正員) 1933年10月24日生。58年3月東京大学電気工学科卒業。58年4月東京電力(株)入社。主として電力系統の計画に従事。97年6月(株)東京電気工務所社長、現在に至る。IEEE会員(SM)

道上 勉 (正員) 1943年6月16日生。69年3月東京電機大学大学院工学研究科修士課程終了。62年4月東京電力(株)入社。主として基幹系統の系統運用計画、技術課題検討に従事。98年4月福井工業大学助教授に転出。工学博士。91年電気学会進歩賞、95年論文賞。IEEE会員(SM)