

過渡安定度からみた同期調相機と電力用蓄電器の比較

Comparison of the Transient Stability between Synchronous Condensers and Power Capacitors

高林 乍人* 奥田 健三*
Hayato Takabayashi Kenzō Okuda

内 容 梗 概

調相設備として同期調相機と電力用蓄電器とを比較する場合、建設、運転、電力損失、電圧調整法、価格などの種々の問題があるが、ここでは過渡安定度の見地から両者を比較検討する。検討方法は、交流計算盤により超高圧モデルシステムを設定して各種系統、条件のもとに計算を行う。

おもな検討項目とその結果は下記のとおりである。

- (1) 過渡安定度に及ぼす故障点の位置の影響はわれわれの設定した 200 km 級の送電線で同期調相機系で 10~20%、電力用蓄電器系で 10~13% であって、送電端故障が最もひどい。
- (2) 同期調相機と電力用蓄電器が過渡安定極限電力に及ぼす影響は両端電源の系統運転状態では電力用蓄電器のほうがまさり、極限電力にして 15~35% 同期調相機より上回る。
- (3) 受電端故障に対し、受電端発電機が発電機運転では電力用蓄電器がまさり、電動機運転ではわずかではあるが同期調相機がまさる。

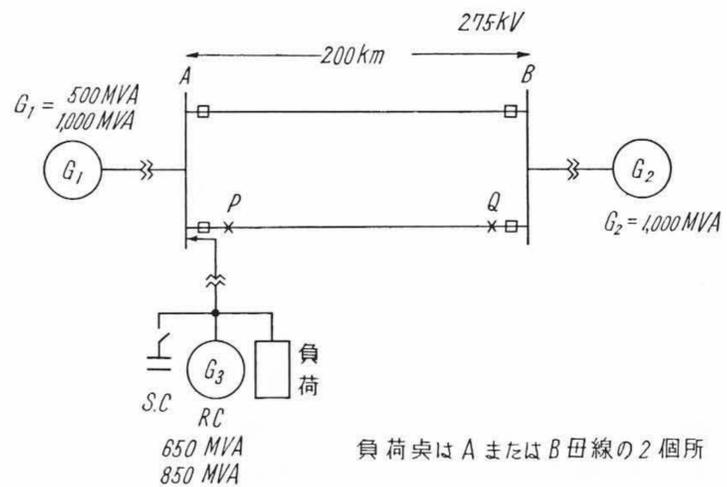
1. 緒 言

送電システムの運用にあたり、送電損失を少なくするために送電線にはできるだけ無効電力をのせないようにし、負荷への無効電力の供給は受電端の調相設備によるのが通例であり、これら系統の無効電力制御が重要な問題になってきている。従来、一次変電所の調相設備として同期調相機と電力用蓄電器（以下それぞれ RC および SC と略記する）の両者が使用されているが、その比較にあたっては、建設、運転、保守、電力損失、故障率、電圧調整法、安定度に及ぼす影響など、技術的経済的に検討すべきいくつかの問題があり、多くの研究がなされているが^{(1)~(8)}、結論は必ずしも十分ではない。われわれは過渡安定度の立場から本問題を採り上げ対象を超高圧送電線におき、保護方式は超高圧系統に広く採用されている高速度再閉路の条件のもとに、日立製作所日立研究所の交流計算盤を用いて各種系統につき検討を行った。

2. モデル系統の設定

この種の問題を検討するにあたり、最も重要な点はモデル系統の設定であるが、以下にモデル系統設定にあたっての考え方を示す。

電 圧	275 kV
距 離	200 km
機 数	3 機 (RC を含む)
系統周波数	50~
送 電 線	
リアクタンス	0.4 Ω/km
インピーダンス角	80度
対地静電容量	0.01 μF/km
負 荷	静止負荷、力率=0.85 おくれ
	負荷の位置は調相設備と同一地点とする。
故 障	三相地絡
再閉路方式	故障除去時間 5~ (0.1秒)
	無電圧時間 20~ (0.4秒)
機 器 定 数	
同期発電機	$x_d' = 33\%$ M=7 秒
同期調相機	$x_d' = 29\%$ M=2.1秒
変 圧 器	$x = 10\%$



第1図 モデル系統

調相設備容量 一概に決定しうる性質のものではないが次式に基くものと仮定する。

$$\begin{aligned}
 & \text{(RCあるいはSC) MVA} \\
 &= (G_1 + G_2) \text{MVA} \times (\text{発電機力率}) \times (\text{送電効率}) \times 0.5 \\
 &= (G_1 + G_2) \text{MVA} \times 0.95 \times 0.9 \times 0.5 \\
 &= (G_1 + G_2) \text{MVA} \times 0.428
 \end{aligned}$$

系統運転条件=原則的に受電側発電機はほぼ全負荷運転とし、これに対し、送電側発電機出力を変化せしめて過渡安定極限電力を求める。
系統電圧は受電端電圧 100%、送電端側電圧 110% とする。
発電機の運転力率は原則的に 95% 以上とする。

第1図は以上のような系統各部の定数に基づいて設定したモデル系統である。

3. 実験ならびに実験結果

第1表に実験項目の一覧表を示す。このうち系統Ⅲはわが国に多くみられる逆放射状の系統に属するので、特にこの場合について各種条件を変化してその影響を調べる。なお過渡安定度の判定は、原則的に過渡安定極限電力によることとした。これは発電機の運動方程式が非線形であり、かつ過渡安定度の判定は相差角約 120 度程度で行わねばならないので、安定範囲の比較的小さい相差角(約 60 度以下)において各種条件における過渡安定度のきびしさを比較することはできない。第2図はこの間の事情を示すもので、相差角の大きさによる判定では正確を期しにくい。

* 日立製作所日立研究所

第1表 実験項目一覧表

系 統	実 験 項 目
	1. P, Q点故障における過渡安定極限電力
	2. P, Q点故障における過渡安定極限電力
	3. P, Q点故障における過渡安定極限電力 (G ₂ 全負荷および 1/3 負荷) 4. 受電側発電機 G ₂ 出力の影響 5. R.C.とS.C.とを併用の場合の過渡安定極限電力 6. G ₂ の運転力率の影響
	7. 負荷端子電圧 8. 多機系統における実験

第2表 系統Iにおける送電極限電力 (MW)

系 統	故障点	受電端 (P)	送電端 (Q)	故障点による差(P-Q)
R C 系	P	720	650	70
S C 系	P	845	765	80
SC, RC 系による差		125	115	

(受電側発電機出力=全負荷)

第3表 系統IIにおける送電極限電力 (MW)

系 統	故障点	受電端 (P)	送電端 (Q)	故障点による差(P-Q)
R C 系	P	750	630	120
S C 系	P	960	860	100
SC, RC 系の差		210	230	

(受電側発電機出力=全負荷)

第3図は過渡安定極限電力比較図であって、計算結果の総まとめに相当するもので、RC系、SC系間の相違、故障点による影響を要約して記してある。

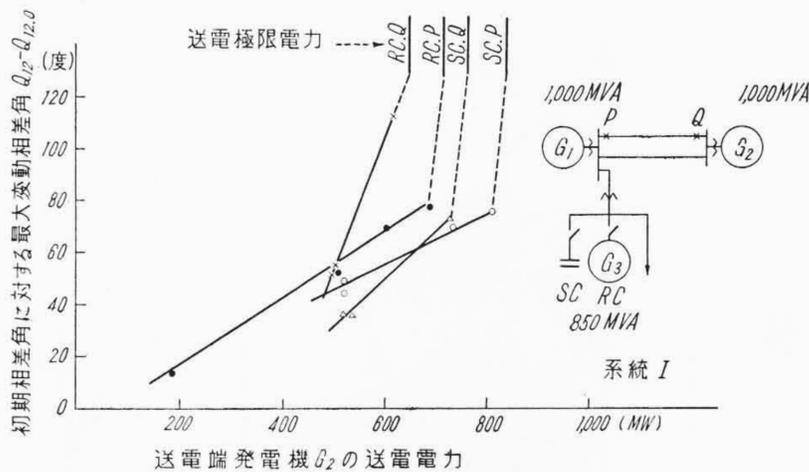
3.1 系統Iにおける過渡安定極限電力

受電側発電機 G₁ の出力をほぼ全負荷に保ち、送電側発電機 G₂ の出力を変化せしめて過渡安定極限電力を求める。第2表は送電側発電機 G₂ の送電極限電力で、これから明らかなように G₂ の送電極限電力はSC系のほうがRC系より 120 MW 多く、明らかにすぐれている。故障点の影響はRC, SC, いずれの系統でも送電端故障のほうが過酷であり、故障点による差は両系統とも 70~80 MW 程度である。なおこの系統ではRCが最初に同期外れすることはなく、近接発電機 G₁ に追従して正弦波状の振動を行い、G₁G₂ 間で同期外れしてのち G₁ との同期がはずれてゆく。RCの動揺振幅は発電端故障で 30 度、送電端故障で 20 度であり、受電端故障のほうが大きい。

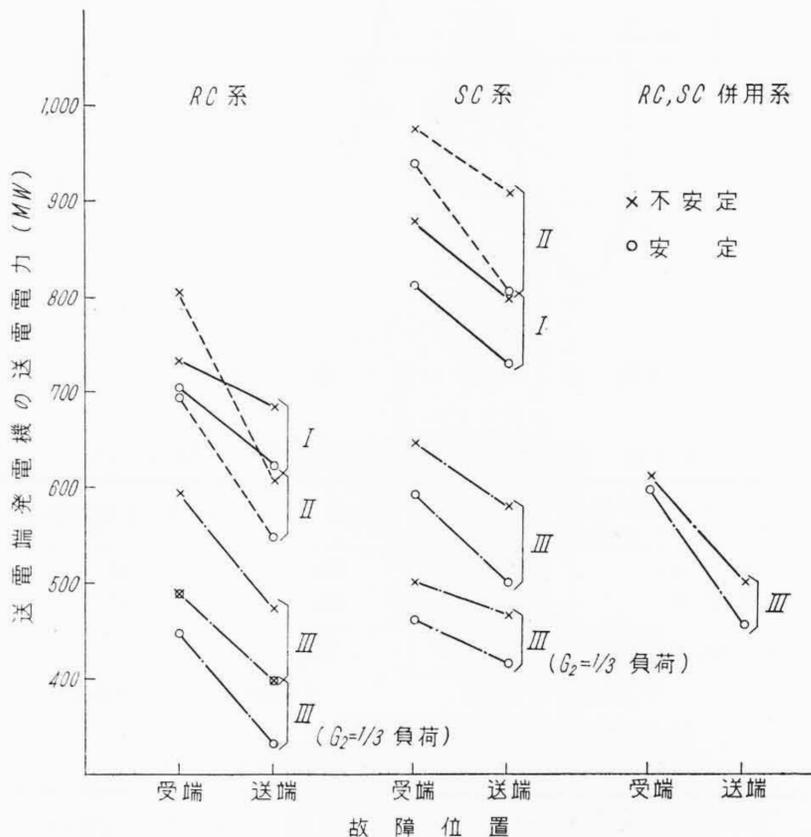
3.2 系統IIにおける過渡安定極限電力

受電側発電機 G₁ の出力をほぼ全負荷に保ち、送電側発電機 G₂ の出力を変化せしめて過渡安定極限電力を調べる。この場合系統Iと異なる点は受電側発電機容量が1/2の 500 MVA になっていることである。第3表は系統IIにおける送電側発電機 G₂ の送電極限電力を示す。

同表より明らかなとおり、G₂ の送電極限電力はSC系のほうが



第2図 送電電力対最大変動相角曲線



送端故障=系統I IIIではQ点, 系統IIIではP点
受端故障=系統I IIではP点, 系統IIIではQ点
I II III=系統番号
特記せぬ限り, 受電側発電機は全負荷運転

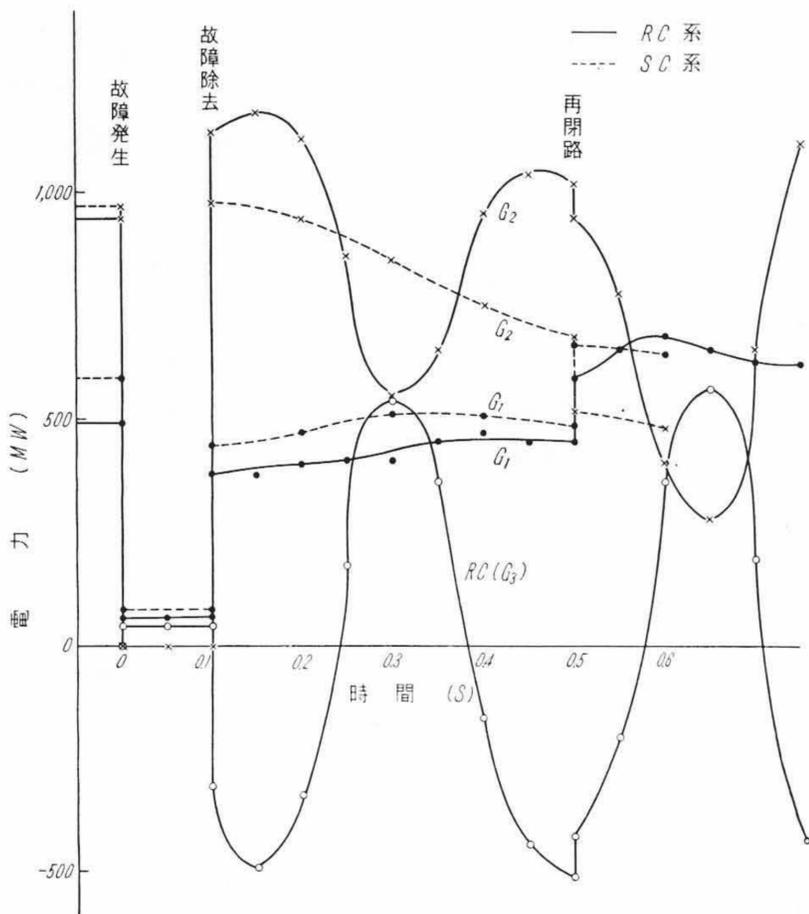
第3図 過渡安定極限電力比較図

RC系より約 220 MW 多く、明らかにすぐれている。故障点の影響はいずれの系統でも送電端故障のほうがひどいのであり、故障点による差は両系統とも約 1,000 MW 程度である。次にRCの相角動揺の傾向は系統Iと同様近接発電機 G₁ を中心に正弦波状の振動をするが、G₁G₂ 間の同期外れとともにRCも G₁ との間で同期外れして行く。以上の傾向は系統Iの場合と同じであるが、系統IIのほうがRC系SC系間の G₂ の送電極限電力の相違が大きく表われている。

この系統において、送電端故障に対しRCのリアクタンス x_a' を短絡して電氣的に無限大容量とした場合(慣性定数はそのまま)の極限電力を求めると、 x_a' を短絡せぬ場合は前述のように G₂ の極限送電電力=約 630 MW に対し、 x_a' を短絡すると、約 520 MW 程度になり極限電力は低下する。またRCの動揺振幅は、 x_a' を短絡せぬ場合 32 度に対し、42 度になり増加の傾向を示している。これは同期機の出力が同期機のインピーダンスに逆比例することからして当然であろう。

3.3 系統IIIにおける過渡安定極限電力

系統IIIは系統I, IIと異なり、逆放射状系統に属し、わが国にもっとも多い形である。受電側発電機 G₂ の出力をほぼ全負荷に保ち、送電側発電機 G₁ の出力を変化せしめて過渡安定極限電力を求め



第 4 図 電 力 変 動 曲 線

第 4 表 系統 III における送電極限電力 (MW)

系 統	故障点	送電端 (P)	受電端 (Q)	故障点による差(Q-P)
RC 系		430	540	110
SC 系		540	620	80
SC, RC 系の差		110	80	

(受電側発電機出力=全負荷)

第 5 表 系統 III における送電極限電力 (MW)

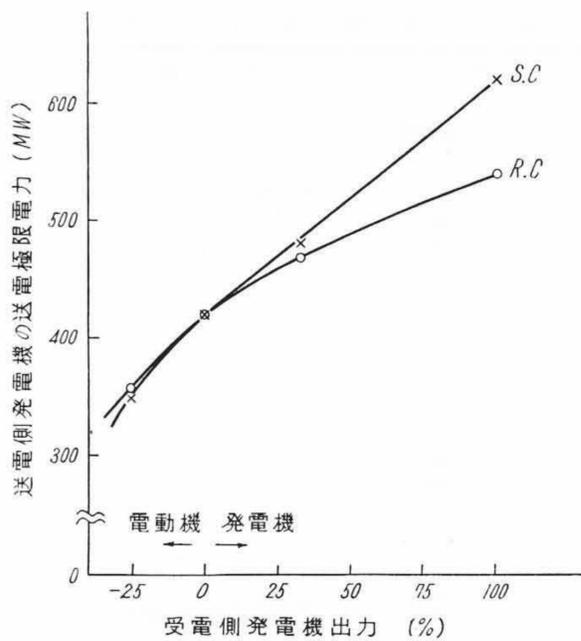
系 統	故障点	送電端 (P)	受電端 (Q)	故障点による差(Q-P)
RC 系		360	470	110
SC 系		440	480	40
SC, RC 系の差		80	10	

(受電側発電機出力=1/3負荷)

る。第 4 表は RC 系, SC 系で, 故障点を送受両端 P, Q 点にとった場合の G₁ の送電極限電力を示す。同表によれば, G₁ の送電極限電力は SC 系のほうが RC 系より約 100 MW 多く, すぐれている。故障点による影響は RC 系 SC 系とも送電端のほうが過酷であり, 故障点による差は約 100 MW 程度であり, SC 系のほうが故障点の影響はやや少ない。RC の相差角動揺の傾向は, 系統 I, II と同様近接発電機 G₂ を中心に正弦波状の振動をする。

これを系統 II と比較すると, RC 容量 = 650 MVA に対し受電側発電機容量は系統 II では 500 MVA, 系統 III では, 1,000 MVA であるため, RC と発電機間の同期化力および慣性効果は系統 III のほうがすぐれているので, G₁G₂ 間が同期外れしたのちも, なおしばらく近接発電機 G₂ との同期を保っている。この際の動揺振幅は送電端故障で 20 度, 受電端故障で 32 度あって, 受電端故障のほうが動揺は激しい。

第 4 図に系統 III における安定限界付近の各同期機の電力変動曲線を示す。RC 系と SC 系との顕著な相違は, SC 系では緩慢な動揺を行うのに対し, RC 系では G₁, G₂ の出力が大きく動揺する。これは RC が大幅に位相角振動をするため, 特に近接発電機 G₂ がその影響を受けている。RC の動揺は受電端故障のほうが送電端故障よりはるかに過酷である。



第 5 図 受電端発電機出力が送電極限電力に及ぼす影響

第 6 表 受電側発電機出力の影響 (系統 III, 受電端故障)

受電側発電機 G ₂ 出力 (MW)	G ₁ 出力 (MW) (極限電力対する%)	G ₁ 極限電力 (MW)	最大相差角 θ ₁₂ 度	RC の動揺振 幅 (度)
全 負 荷	RC 系 486 (90%)	540	63°	32
	SC 系 592 (95%)	620	87.5°	—
1/3 負 荷	RC 系 444 (95%)	470	111°	13
	SC 系 460 (95%)	480	96°	—
無 負 荷	RC 系 396* (95%)	420*	105°	5
	SC 系 400* (95%)	420*	105°	—

* 印は極限電力を求めているので最大相差角より推定

3.4 受電側発電機出力の影響 (系統 III)

前項までは受電側発電機 G₂ の出力を全負荷としたが, これを約 1/3 負荷に保つ場合の送電側発電機 G₁ の送電極限電力を求めると第 5 表のようになる。

同表によれば, 受電端故障では, RC 系と SC 系との相違はほとんどないが, 送電端故障では G₁ の送電極限電力は SC 系のほうが 80 MW 多い。また, 故障点の影響はいずれの場合も送電端故障のほうが過酷であるが, RC 系では送電極限電力に 110 MW の差があるのに対し, SC 系では 40 MW で故障点による影響は SC 系のほうが少ない。RC の動揺振幅は受電端故障において 13 度であり, 前項の G₂ 全負荷運転の場合の半分以下にすぎない。

第 5 図は受電端故障において受電側発電機 G₂ の出力が送電側発電機の送電極限電力に及ぼす影響を示したものである。第 6 表は受電端故障において, G₁ の送電極限電力および RC の動揺振幅を比較したものである。これらにみられるように G₁ の送電極限電力は受電側発電機 G₂ の出力が全負荷の場合には SC 系のほうがすぐれているが, G₂ の出力が無負荷の場合には両系統の送電極限電力はほぼ同等であり, 電動機運転の場合には逆に RC 系のほうがわずかながらすぐれている。この理由は G₂ と RC の位相角変化が, G₂ の電動機運転により両者ともほぼ同様の傾向をたどるため, 受電側発電機 G₂ と RC をまとめた等価電動機の慣性効果が SC 系に比し強まるため, このことは RC の動揺振幅の少ない点からも推定される。

RC の動揺振幅は受電側発電機 G₂ が全負荷で 32 度に対し, 無負荷では 5 度に減少し振動的なじょう乱をほとんど与えていない。

3.5 RC, SC 併用の場合の過渡安定極限電力 (系統 III)

第 7 表は RC, SC おのおのの単独系と両者併用系とを比較したものであって, 同表によればこの場合は, 送電端故障では RC 系に似た動作をするのに対し, 受電端故障では SC 系に近い動作をする。

第7表 系統Ⅲにおける調相設備別にみた G₁ の送電極限電力 (MW)

調相設備	故障点	P (送電端)	Q (受電端)
RC系		430	540
RC, SC併用系		430	600以上
SC系		540	620

第8表 受電側発電機 G₂ の運転力率の影響 (系統Ⅲ)

G ₂ の運転力率	RC SC の区別	故障点	ΔP (MW)			θ ₁₂ (度)	θ _{12,0} (度)	θ ₃₂ の動揺振幅 (度)	備考
			G ₁	G ₂	G ₃				
99% (低励磁)	RC	P	396	160	-106	67	+8	20	
		Q	424	938	-42	63	+15.5	32	
85%以下 (高励磁)	SC	P	500	344	—	89.5	+20.5	—	
		Q	512	974	—	87.5	+25	—	
99% (低励磁)	RC	P	400	144	-80	74.5	14.5	13	
		Q	416	920	-29	65	22	29	
85%以下 (高励磁)	SC	P	500	262	—	104	24.5	—	
		Q	516	980	—	97	31.0	—	

* θ₁₂=最大相差角 ** θ_{12,0}=初期相差角

この場合のRCの動揺量は受電端故障で約32度でRC単独系の場合と同程度である。

3.6 受電側発電機 G₂ の運転力率の影響 (系統Ⅲ)

受電側発電機 G₂ の運転力率の影響をみるため、力率99%程度と85%以下につき比較を行う。この場合、極限電力は求めず単に傾向だけを調べることとしたので、力率99%程度の安定限界付近の試験条件と同様の潮流分布とし、受電側発電機 G₂ と調相設備との無効電力の分担を変化せしめることとする。

第8表にその結果を示してあるが同表によればPQいずれの故障でも G₁G₂間の最大相差角は低励磁運転のほうが若干小さい。これは初期差角が低励磁運転のほうが小さいことが主因と考えられる。RCの動揺振幅は受電端故障のほうが大きく、送電端故障では低励磁運転のほうが若干大きい。

3.7 負荷端子電圧

第6図は安定限界付近の条件で負荷端子電圧を検討した結果の一例である。各系統に共通していえることは、故障中の負荷端子電圧はRC系のほうがSC系より明らかに高い。これはRCが内部誘起電圧を有するのに対して、SCは単なるインピーダンスであるから当然の結果である。故障除去後の電圧変動は第6図によればRC系のほうが著しく、なかんづくRCに近接した受電端故障の場合がもっとも顕著である。

3.8 多機系統における実験

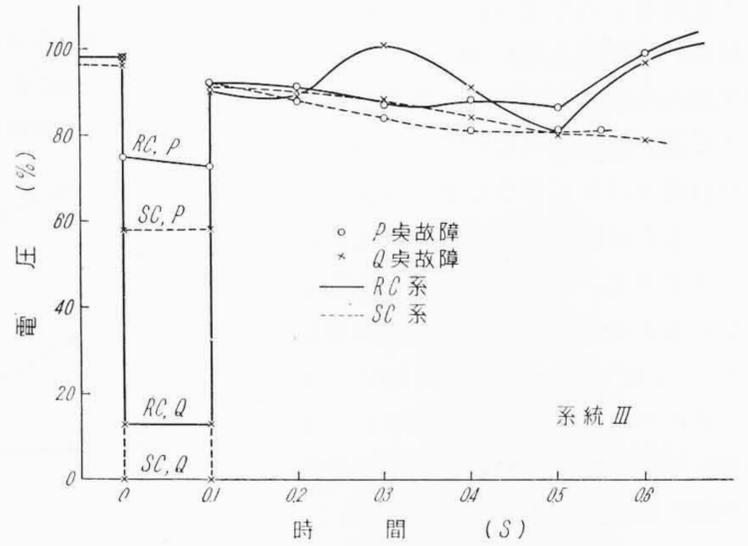
以上は3機構成のモデル系統の場合であるが、第7図のように6機系統の場合について述べる。この系統は170kV 並行2回線200kmの送電線で山側の水力発電所と里側の大系統および負荷地帯が接続されている。

計算条件は水力発電所全負荷運転 (C点における受電電力300MW) の状態でF点にて3線地絡故障を起し、保護方式は5〜遮断、20〜再閉路 (再閉路区間AB点間) とする。RC, SCの比較に当たっては系統内の全調相設備をRCまたはSCおのおの単独に設置するものとする。第8図は計算結果を示す相差角変動曲線であって、これから明らかなように相差角動揺はSC系のほうが約10度少ない。

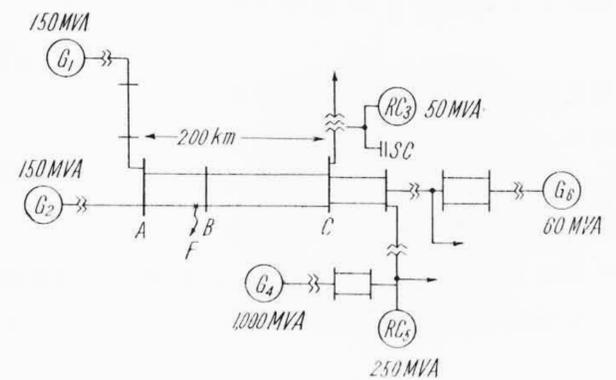
4. 実験結果の検討

4.1 RC系, SC系の比較

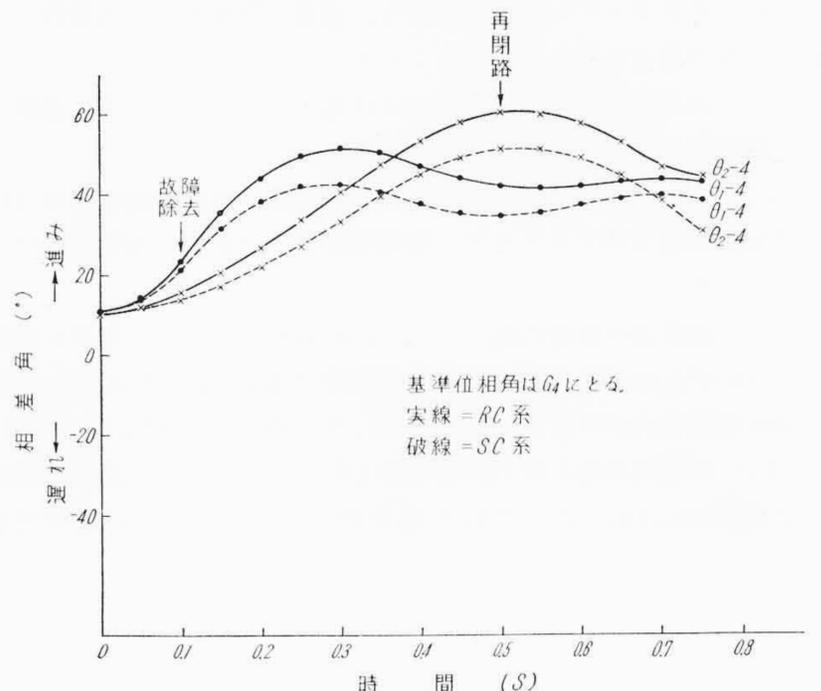
第9図は第2〜4表からRC, SC系間の比較を行ったものである。すなわち、受電側発電機が全負荷の場合、過渡安定極限電力は



第6図 負荷端子電圧変動曲線



第7図 系統図



第8図 相差角変動曲線

両端の電源状態により異なるが、SC系のほうが15〜35%すぐれており、かつ両系統間の相違は送電端故障のほうが著しい傾向がみられる。

4.2 故障点の影響

第10図は第2〜5表の結果から故障点の影響を求めたものである。過渡安定度において送電端故障のほうが一般に過酷なことはないが、故障点による送電極限電力の相違は両端の電源状態その他でことなるが、受電側発電機が全負荷の場合RC系で10〜20%, SC系で10〜13%であってSC系のほうが概して少ない。系統Ⅲについて受電側発電機 G₂ の出力の影響をみると、RC系では全負荷、SC系では1/3負荷のほうが故障点の影響は少ない。

4.3 受電側発電機出力の影響

系統Ⅲにつき、受電側発電機の出力を全負荷から電動機運転の範

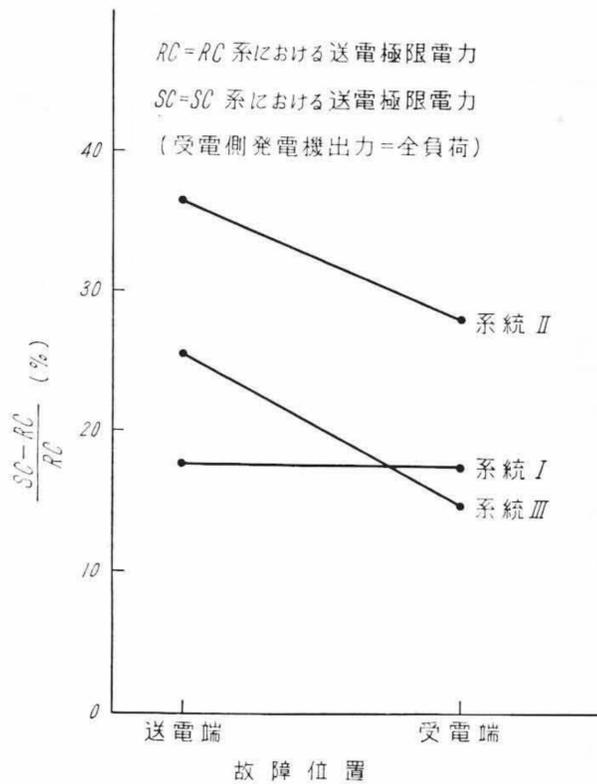
囲まで変化せしめた場合につき比較を行った結果、受電端故障において注目すべき変化がみられる。すなわち、全負荷の場合はSC系が有利なのに対し、1/3負荷ないし無負荷ではRC系SC系の両者同等であり、さらに電動機運転の場合はRC系が若干まさる。この場合のRCの動揺振幅をみると受電側発電機が全負荷運転のときは32度であったものが、出力が少なくなるにつれて動揺振幅が減少し、電動機運転ではほとんどRCと受電側発電機との間に相差角の振動はみられない。すなわち、この状態は受電側の等価同期機の慣性定数が増加したことを意味し、RC系の優位をうら書きするものである。

ここで考えねばならぬことは負荷の取扱い方である。すなわち、安定度の計算では一般に負荷は静止負荷として取扱っており、現地試験の結果と比較した場合その妥当性が報告されている⁽⁶⁾。しかし、負荷が同期電動機で表現されるような系統では、RC系が優位にある場合も生じよう。

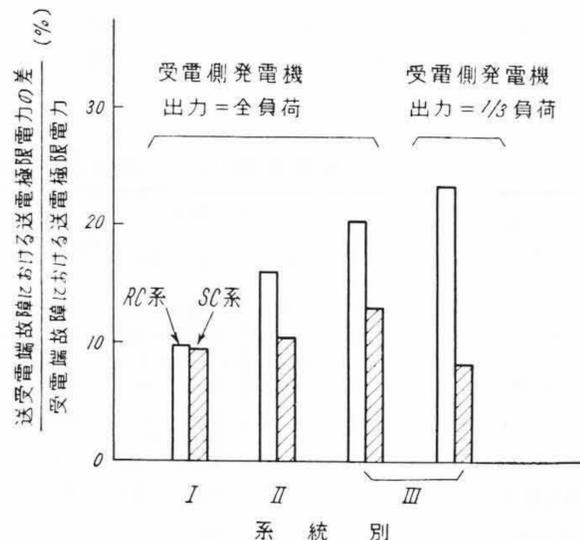
5. 結 言

送電系統の過渡安定度の見地から同期調相機と電力用蓄電器の比較を行う目的でモデル系統を設定し、交流計算盤を用いて検討した結果、次の諸点を明らかにすることができた。

- (1) 両端電源の系統運転状態では電力用蓄電器のほうが過渡安定極限電力は15~35%多く、すぐれている。
- (2) 受電側故障において、受電側発電機が電動機運転の場合は同期調相機が若干まさるが、発電機運転では電力用蓄電器がすぐれている。
- (3) 故障点の影響に関しては、われわれの設定したモデル系統ではいずれの調相設備でも送電端故障では受電端故障に比し過渡安定極限電力はRC系で10~20%、SC系で10~30%減少する。
- (4) 同期調相機と電力用蓄電器とを併用した場合の過渡安定度は概略的にはおのおの単独の場合の中間程度とみることができ



第9図 RC系, SC系の比較



第10図 故障位置の影響

る。

以上から明らかのように両端電源の通常の運転状態では電力用蓄電器のほうが若干すぐれているが常にすぐれているというのではない。したがって両者の選択に当たっては場合々々に検討を要し、ほかの要因が重要な役割をもつと思われる。

終りに臨み終始ご激励を賜った日立製作所日立研究所今尾部長、国分工場川井課長をはじめ関係各位に衷心より謝意を表す。なお交流計算盤の計算に協力された日立研究室の村田氏をはじめ各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 別宮, 山田: OHM (S27.7)
- (2) 益子, 中村, 中西: 電学誌 76, 247 (昭31-3)
- (3) 山下編: 電力機器便覧(オーム社) 222
- (4) J. W. Buttler, W. Ridgeway: TAIEE 1,130 (1944)
- (5) 富山, 朽木: 電力 33, 2
- (6) 山田, 森, 日高: 電学誌 69, 350 (昭24-11)
- (7) 山田, 日高: 電誌彙 14 (昭25-1)
- (8) 電気協同研究 9, 6

日 立 評 論 Vol. 42 No. 5

目 次

- ◎回 転 翼 の 振 動
- ◎三次巻線付単巻変圧器の負荷損測定について
- ◎大形熔接構造物の誘導加熱法
- ◎日立 MPU-2 形常磁性共鳴吸収装置
- ◎日本炭鉱株式会社三島鉱業所坑底操車装置
- ◎巻胴の強さに及ぼす真円度の影響
- ◎エジプト鉄道納ディーゼル動車
- ◎最近の小容量クロスバ自動交換機の標準化

- ◎高調波水晶振動子を用いた水晶濾波器
- ◎電子顕微鏡によるケーブル絶縁紙のコロナ放電劣化現象の究明
- ◎合金工具鋼の靱性に及ぼす熱処理の影響(第2報)
- ◎高C~高Crダイス鋼CRDの窒化について
- ◎リングポテンシャルの概念と流体工学への応用
- ◎高温面に接触する液粒の蒸発と燃焼に関する研究
- ◎工業用電動機発電機の据付および試運転(その2)

発行所 日立評論社
取次店 株式会社オーム社書店