

ルーズカップラーによる電力系統過渡安定度の向上

小林英夫 一柳勝宏 川口種夫 森 勝行

Improvement of Tvansient Stability of Electrical Power System Usig Loose-Coupler

Hideo KOBAYASHI, Katsuhiko ICHIYANAGI
Taneo KAWAGUCHI, Katsuyuki MORI

電力送電網の特定の一分枝にそう入された可飽和リアクトルは健全時には、電力系統をゆるやかにカップリングしているに過ぎないが、事故発生時に、その電圧電流特性の非線型性によって系統を密に結合させて、送電電力を健全時の状態に回復せしめ、これによって過渡安定度の向上をはかることができる。

デジタルシミュレーションによって得られた結果は、このルーズカップラーの安定度向上に与える効果が著しく大きいことを示している。

1. ま え が き

近年、電源立地の関係から生ずる基幹送電線の長距離化および電力需要の増大に伴う系統規模の複雑化と相俟って、電力系統の故障発生時における過渡安定度の向上対策の必要がますます高まっている。

過渡安定度向上のために、ここで取りあげる一つの方法は、可飽和リアクトルの電圧電流特性の非線型性を積極的に利用し、系統故障直後の系統の結合を密にすることにより、故障除去等に伴う送電電力の低下による電力動揺の発生を極力抑制し、過渡安定度の向上に役立てようとするものである。

すなわち、電力系統のなかの特定の送電線分枝にそう入された可飽和リアクトルは、定常時はインピーダンスが極めて大きく、ルーズなカップラーの役目をしているにすぎない。然し、事故発生時には故障回線のしゃ断に伴い、ルーズカップラーの働きをしていた可飽和リアクトルは電流の急激な増加によりインピーダンスは急速に低下し、短絡に近い効果を生ぜしめ、系統の送電電力を急速に回復し安定度を維持することができるようになる。

この研究では、ルーズカップラーの過渡安定度向上に与える効果が著しく大きいことが、電子計算機によるシミュレーションによって知ることができたので、ここに報告する。

2. ルーズカップラーと直流送電装置による系統結合効果

一般に電力系統の事故時における脱調などの安定性喪失の主な原因は、故障回線のしゃ断により送電電力が急激に低下し、このため発電機の加速トルクが増加し、エネルギーの不均衡が招来されることにある。

このようなエネルギーのアンバランスを防止するには、故障回線の除去から生ずる発電機間の等価アドミタンスの低下により送電電力の減少が現われるのであるから、ルーズカップラーの動作により上記の等価アドミタンスの低下を防止し、これを補償することが安定性の維持に必要なことになる。

この発電機間の等価アドミタンスの低下を防止し、これを補償する方法としては、本研究でとりあげるルーズカップラーの非線型性の利用によるもののほかに、直列コンデンサー投入による等価アドミタンス増加の方法が考えられる。

また直流送電装置を設け、この交直変換器の位相制御による電力潮流の制御なども、交流送電網の、その分枝のアドミタンスを自由に増減調整することに相当するので、交流回路網中の、適当な分枝に設けられた直流送電装置は、過渡安定度の向上に著しい効果をもつことができる。⁽¹⁾

以上のような与えられた電力系統の中のある特定の枝路のアドミタンスの増加から得られる、系統結合度の増加による安定度向上の方法に対して、系統構成を変化す

ることにより、系統の結合を密にして、過渡安定度の向上をはかることが考えられる。

多数の同期発電機を運転し、リング状回路網の構成が可能である電力系統の場合に特に有効であると思われるので、これを次章で考察する。

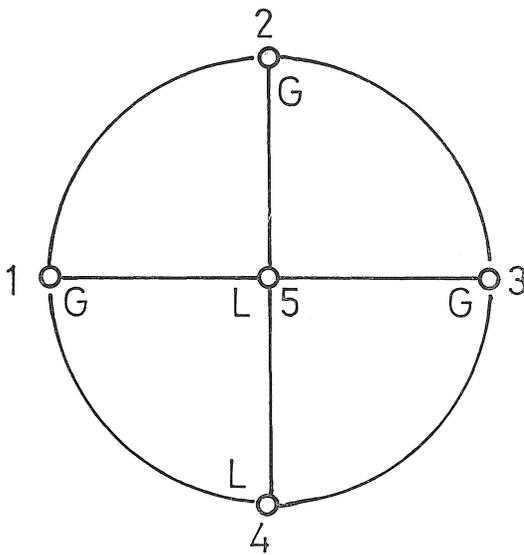
3. 電力系統構成変更による過渡安定度向上対策

(1) アドミタンス行列

発電機、負荷の数が一定である送電回路網において各種の系統構成を考え、それぞれの場合について導かれる発電機間の等価アドミタンス行列の固有値から、系統構成の在り方を考え、系統の結合度と安定性の関係について検討する。(2)

(2) モデル系統と各種の系統構成

第1図のモデル系統のグラフで、ノード1, 2, 3は電源で、ノード4, 5は負荷であり、すべての線路の on-off が可能であるとする。



第1図 モデル系統のグラフ

過渡応答をみるため電力動揺方程式を解く必要があるが、そのためには、予め負荷ノードを消去し、発電機ノード間の3×3のアドミタンス行列を求めなければならない。

各種の系統構成とそれぞれのアドミタンス行列の固有値と如何なる関係があるかを調べてみることは興味あるものと思われるが、これについて次のような考え方で系統構成とアドミタンス行列の固有値との関係を調べてみた。

(i) グラフ理論で用いられる tree を第1図のモデル系統から一つ選ぶ。ここでは、ノード数5、ブランチ数4として第2図のaの列にみるように選ぶとする、次に負

	a (4)	b (5)	c (6)	d (7)	e (8)
例1					
例2					
例3					

第2図 系統構成の1例。()内の数字はブランチ数

荷ノードを消去し発電機ノード間のアドミタンス行列をつくり、この固有値を求める。

(ii) 次に cotree のうちの一つのブランチを(i)において選んだ tree に追加した時のアドミタンス行列の固有値を求める。(第2図b)

(iii) (ii)で得られた系統にもう一つの、cotree のブランチを追加し、その時の発電機間のアドミタンス行列の固有値を求める。(第2図c)

(iv) 以下同様にモデル系統のグラフが完結するまでブランチを追加し、それぞれの場合の発電機間のアドミタンス行列の固有値を求める。(第2図d, e)

(3) 結果の考察

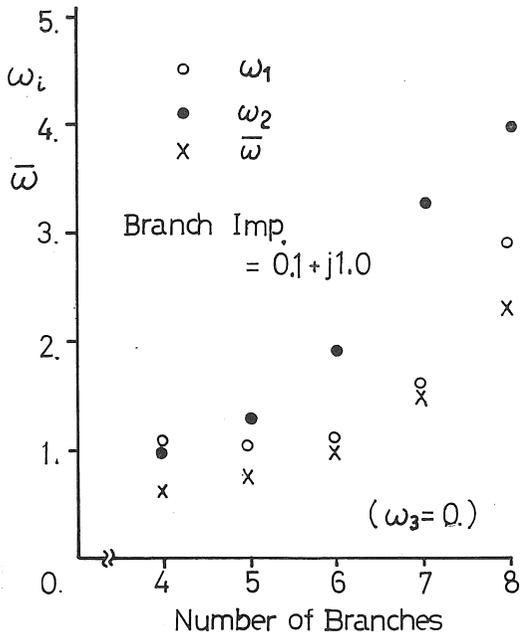
アドミタンス行列の固有値 $\alpha_i + j\omega_i$ ($i=1,2,3$) の物理的意味については、実部 α_i は、与えられた構成をもつ系統の固有減衰状況を表わし、虚部 ω_i は、系統の固有振動状況を表わすものと考えられる。各ブランチのインピーダンスの値はすべて等しいとした。

計算結果によると第3図と第4図から判るように、ブランチ数が増加、すなわち系統の結合が密になるにつれて、系統の減衰と振動のメジャー $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\omega}$ が増加している。ここに、 $\bar{\alpha} = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)/3$ 、 $\bar{\omega} = (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)/3$ である。

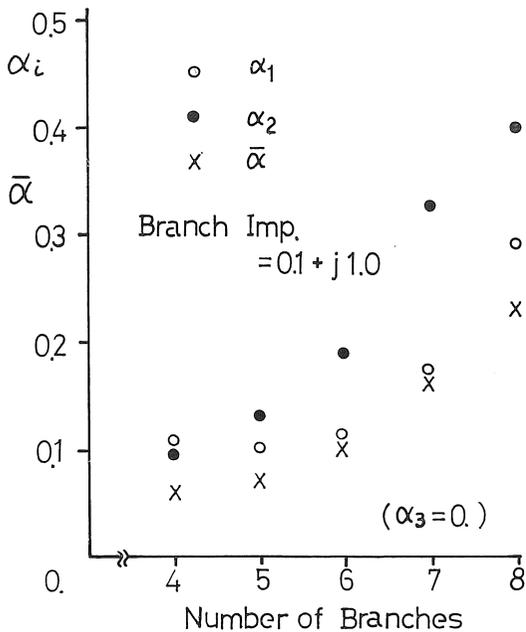
各ブランチの線路インピーダンス Z が、抵抗分を無視した純リアクタンスである場合、固有値の実部 α_i の値はすべて零となっているので、これにより最初に述べた固有値の物理的意味を改めて明確に理解できるであろう。

以上のように与えられた多機系統を、各種ノードを結ぶ送電線ブランチを on-off して、有効適切な系統の構成を選定することにより、安定かつ強じんな系統を構成することが可能であると、著者らは考えている。

ただし、系統の構成変更により事故時の多機系統の過渡安定度の向上をはかるうとして、off の状態にあったブランチを on する場合、同期投入のタイミングをも考慮する必要があり、これについては改めて検討したいと



第3図 固有振動数と結合度の関係



第4図 減衰率と結合度の関係

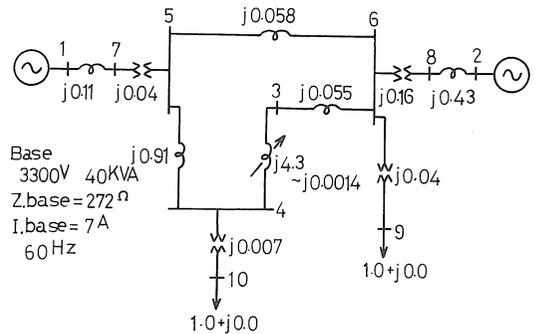
考える。

4. ルーズカップラーを含むモデルシステムの過渡応答のデジタルシミュレーション⁽³⁾

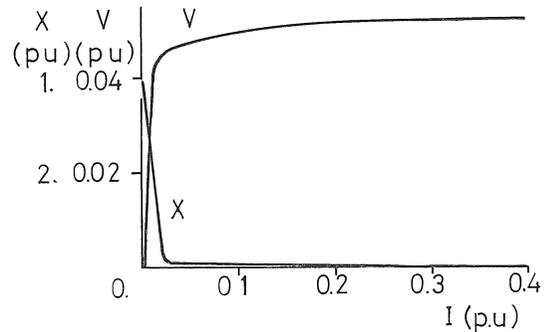
(1) ルーズカップラーの特性と仮定

シミュレーションの対象とするモデルシステムを第5図に

示す。第6図にルーズカップラーの電圧-電流の静特性および、これより得られたリアクタンス-電流の特性の両曲線を示す。



第5図 モデル系統



第6図 ルーズ・カップラーの電圧・電流およびリアクタンス・電流特性

従来の過渡計算では系統の回路定数は終始一定不変であるものとして取扱っているが、ここでは、ルーズカップラーのリアクタンスが電流の非線型関数となっているので、抵抗分は一定であるとし、リアクタンス分は計算の one step 毎に電流の値から求め、その都度その線路のインピーダンスを修正しながら、時間応答の状況を検討していくことにする。

ここでは、AVR やガバナーなどの制御装置の動作を考慮せず、また円筒回転子型の同期機を用い、過渡時の内部誘起電圧および機械的入力として一定としている。

第1表に発電機関係の定数を示す。

発電機 ノード	慣性 定数	電 性 数	過渡リアクタンス 背後電圧		発電機 入力	
			大きさ	位相の 初期値		
1	8.	(sec)	(p.u) 1.1	(p.u) 1.034	(rad) 0.151	(p.u) 1.399
2	8.	(sec)	(p.u) 4.3	(p.u) 1.066	(rad) 0.262	(p.u) 0.600

第1表 発電機定数 (p.u, 値)

(2) 計算方法

シミュレーションとして第5図のモデル系統における、ノード5, 6間の線路の無事故しゃ断と3相短絡除去しゃ断の二つの場合について行ってみた。これらの計算手順を示すと次のようになり、第7図に計算のフローチャートを示してある。

(イ). 初期値の設定

潮流計算によってシミュレーション開始時の初期値を求める。

(ロ). 系統のアドミタンス行列 Y の作成

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{GG} & Y_{GF} \\ Y_{GF}^T & Y_{FF} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 Y_{GG} , Y_{FF} はそれぞれ発電機、浮遊点（発電機以外のノードで、負荷点をも含む）の、自己および相互アドミタンス要素からなる小行列であり、 Y_{GF} は発電機と浮遊点の間の相互アドミタンス要素からなる小行列である。

(ハ). 発電機ノード1, 2のアドミタンス行列 Y_G の計算⁽⁴⁾

$$Y_G = (\dot{Y}'_{ij}) \quad i, j=1, 2$$

$$\dot{Y}'_{ij} = \dot{Y}_{ij} - \frac{\dot{Y}_{ik} \dot{Y}_{kj}}{\dot{Y}_{kk}} \quad \dots\dots(2)$$

式(1)を用い $k=0$ から $k=3$ まで逐次計算を8回くり返すことによって Y_G が求められ、これは次の電力動揺方程式をルンゲ・クッタ・ジル法により解いていく時に用いられる。

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} + P_{Ei} = P_{Mi}, \quad i=1, 2 \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 δ : 発電機回転子位置を電気角に換算したものの、 M : 慣性定数、 D : 制動係数、 P_E : 発電機の電气的出力、 P_M : 発電機の機械的入力である。

(ニ). ルーズカップラーを流れる電流値の計算

発電機ノード電圧 V_G が知られれば、付録1により、浮遊ノード電圧 V_F は次式により求められる。

$$V_F = -Y_{FF}^{-1} Y_{GF}^T V_G \quad \dots\dots(4)$$

これより、ルーズカップラーのそう入さされている両端の、浮遊ノード3の電圧 \dot{V}_3 とノード4の電圧 \dot{V}_4 が得られるから、電位差を \dot{V}_{LC} とすれば次の式がかかる。

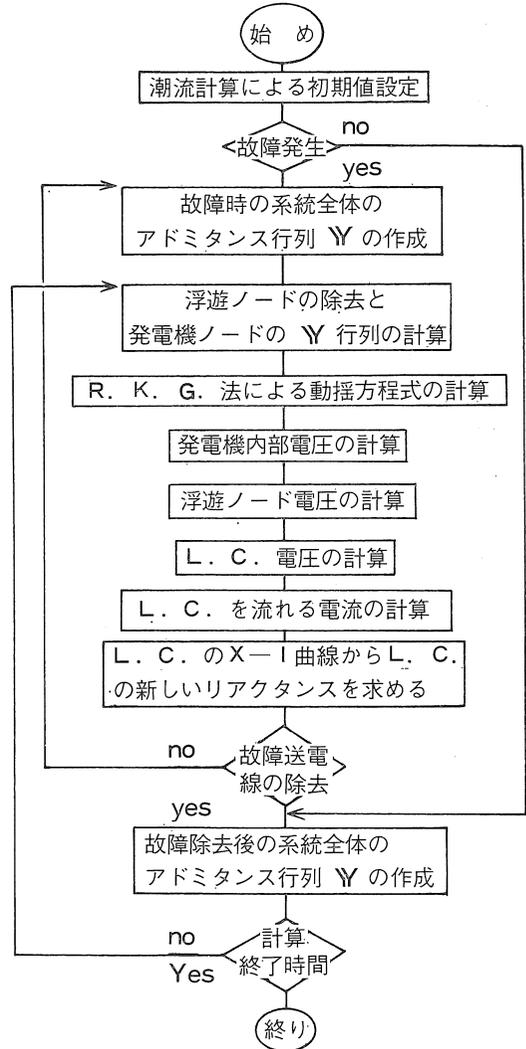
$$\dot{V}_{LC} = \dot{V}_3 - \dot{V}_4 \quad \dots\dots(5)$$

ルーズカップラーの電流 \dot{I}_{LC} は電圧 \dot{V}_{LC} を用いて次式から求められる。

$$L \frac{d \dot{I}_{LC}}{dt} + R \dot{I}_{LC} = \dot{V}_{LC} \quad \dots\dots(6)$$

(ホ). ルーズカップラーの新しいリアクタンスおよびアドミタンス行列の計算

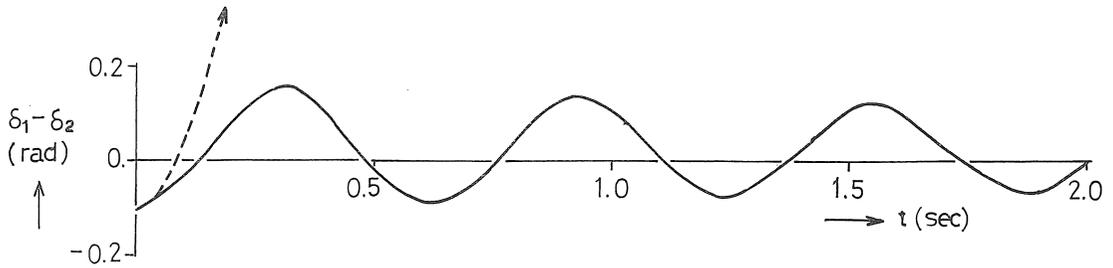
上式から得られた one step 後の電流 I_{LC} を用いて、新しいリアクタンスを第6図の $X_{LC}-I_{LC}$ 曲線から求める。次に系統全体の中で、ルーズカップラーのインピーダンスが変化してから、one step 後の系統の新しいアドミタンス行列を求め、ハ)の計算にもどる。



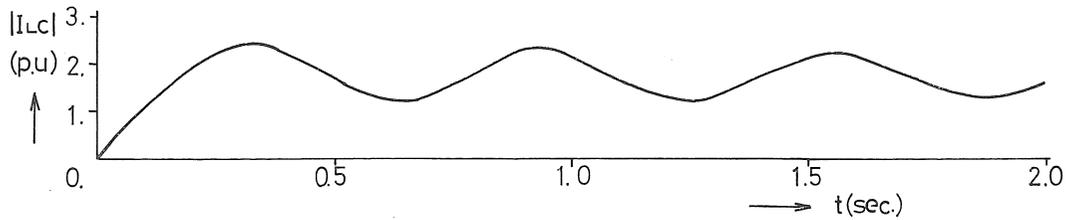
第7図

5. シミュレーション結果の考察^{(5), (6)}

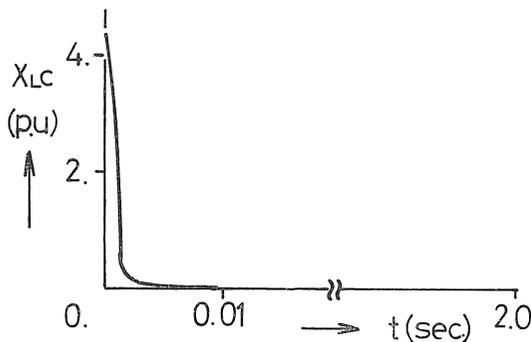
(1) ノード5, 6間のブランチの無事故しゃ断の場合 この場合の主な結果を第8, 9, 10図および第2表に示す。ここでは二つの発電機で、ともに $M=9.0$, $D = 0.02$ を用いている。



第8図 位相角の時間応答曲線



第9図 ルーズカップラー・電流の時間応答曲線



第10図 リアクタンスの時間変化状況

第2表 実験結果との比較

	実験値	計算値
周期	0.72 (sec)	0.62 (sec)
$ I_{Lc} $ の減衰率 (I_{m1}/I_{m2})	1.07	1.03
$ I_{Lc} $ の最大値	1.41 (p.u)	2.39 (p.u)

(ノード5・6間無事故しゃ断)

第8図は二つの発電機間の電圧位相差角の時間応答を示すが、ルーズカップラーの効果により安定していく状況が判る。破線の曲線はリアクタンスが始めの大きい値のまま不変と仮定した場合、急速に不安定となることを示す。

第9図は健全時に殆ど流れていなかったルーズカップラーの電流が振動しながら時間と共に一定値に収束していくことを示している。第10図はルーズカップラーのリアクタンスが動作開始と共に瞬時に極めて小さい値となる様子を示すが、この時のルーズカップラーの両端の電位差は、正常時の0.17 [p.u] から、 0.5×10^{-3} [p.u] に低下し、短絡に近い状態となる。

第2表にT社の模擬送電装置を用いた実験結果との比較をのせているが、多少の差が現われている。これはAVRやガバナーの動作を無視したことや、制動係数の算定が正確でないことなどの要因が影響しているものと思われる。(5), (6)

(2) 3相短絡故障除去しゃ断の場合

ノード5・6間のブランチの中央地点で3相短絡故障が発生し、0.05秒で故障除去した時のシミュレーション結果を第11, 12, 13図および第3表に示す。

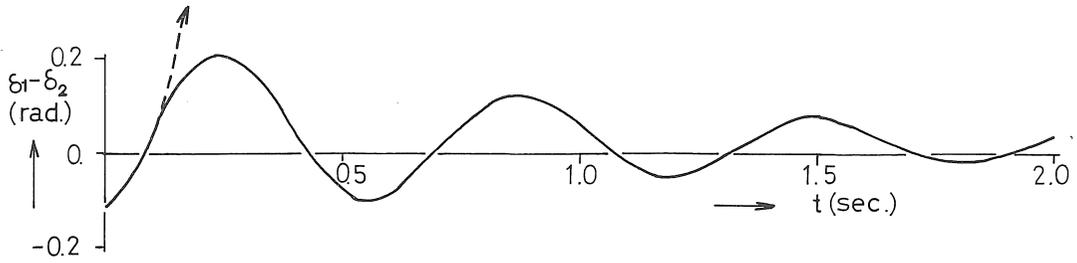
第11図では制動係数Dを第8図の場合より大きい値にとっているため、振動が早く収束していく。第12図、第13図はルーズカップラーの電流と電圧の時間応答の状況を示すが、0.05秒の故障除去の時点で不連続変化がみられる。

第3表は模擬送による実験結果との比較をのせているが、第2表と同様な傾向がみられる。

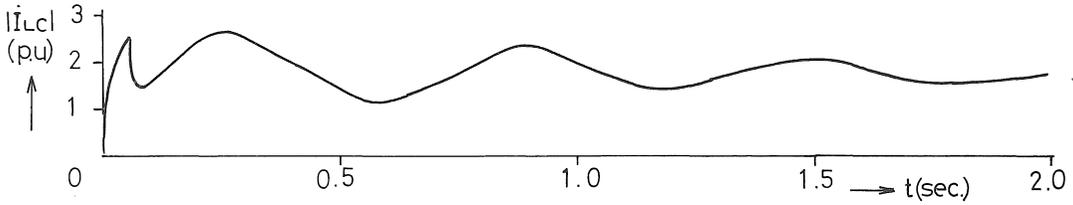
以上のように、多数のシミュレーション結果をまとめると、ルーズカップラーの使用による過渡安定度改善の効果は顕著であるといえる。

6. リアプノフ安定範囲との関係

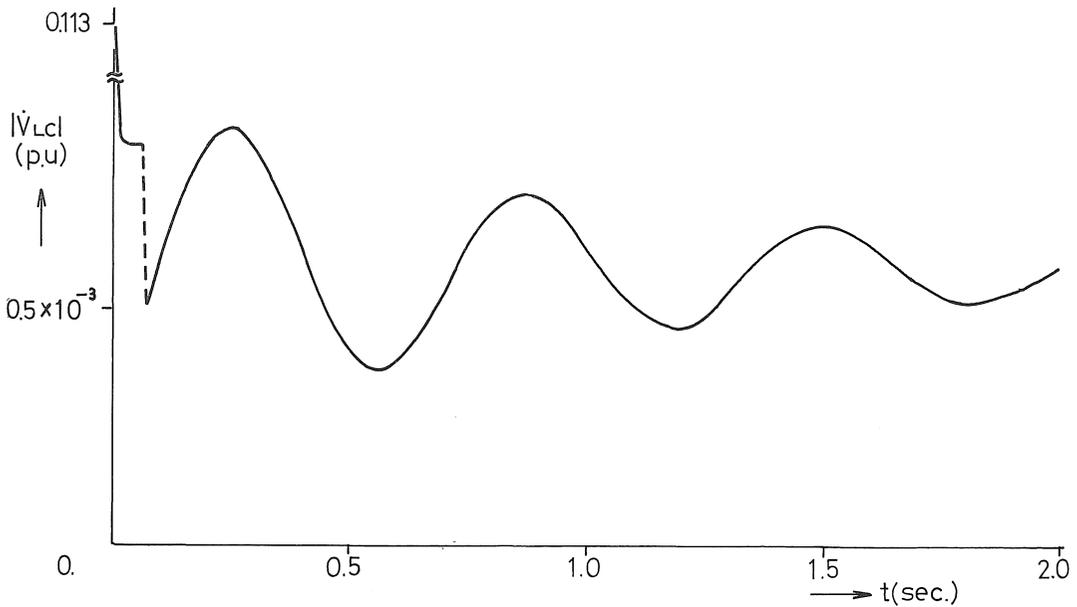
ルーズカップラーの使用により事故発生時の電力系統



第11図 位相角の時間応答曲線



第12図 ルーズカップラー電流の時間応答曲線



第13図 ルーズカップラー電圧の時間応答曲線

第3表 実実験結果との比較

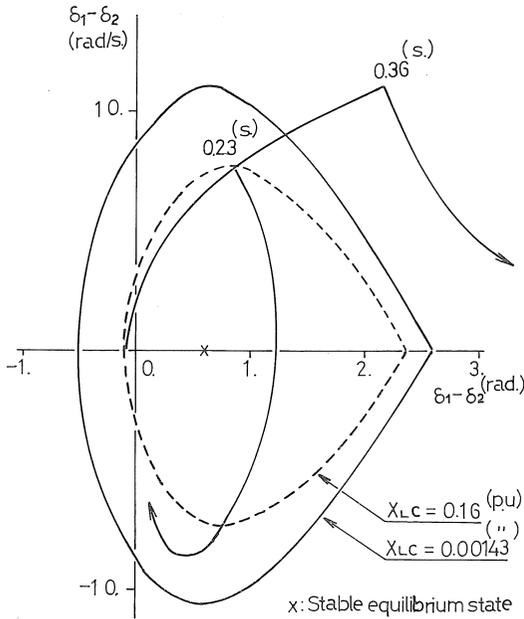
	実験値	計算値
周期	0.68 (sec)	0.63 (sec)
$ I_{Lc} $ の減衰率 (I_{m1}/I_{m2})	1.12	1.17
$ I_{Lc} $ の最大値	1.71 (p.u)	2.64 (p.u)

(ノード5・6間三相短絡故障シャ断)

の過渡安定度向上への寄与が大きく期待されることが、これまでの検討で明らかになった。

系統の状態方程式が与えられると、リアプノフの安定理論によると、システムの安定範囲を示す境界が十分条件を満足する立場から、控え目であるが求められる。

ルーズカップラーのインピーダンス低下は、これまでのシミュレーション結果のみならず瞬時的であるから安定の境界との関係から、故障除去時刻の臨界許容値が求められる筈である。



第14図 リアプノフ安定領域と位相面軌道

El-Abiad⁽⁷⁾によるエネルギー関数(付録2)を用いて、第5図のモデル系統の電力動揺方程式の不安定平衡点を求め、リアプノフ安定範囲を求めた結果を第14図に示す。

ルーズカップラーのリアクタンス X_{LC} が 0.00143 と 0.16の二つの値をとる場合の安定範囲が画いてあるが、事故時に系統の状態が経過する位相面軌道がこれらの安定の境界を横断離脱するまでの時刻以内に、故障除去しゃ断を行えばよいわけである。

X_{LC} が 0.00143 の時、 $T=0.23$ 秒で故障除去を行うと、系統は安定であるが、 $T=0.36$ 秒で故障除去すると安定にならないことを、図から判断することができる。

7. むすび

この研究ではルーズカップラーの非線型特性の利用による電力系統の事故発生時の過渡安定度の向上を取扱う限り、大きなメリットのあることが判るが、健全時に、擾乱など不明確な原因によってルーズカップラーの突然の動作が生じた場合の系統状態や対策の如何については考えていない。これについては今後更に検討が必要となろう。

終りに、この研究を行うに際して資料の提供や、その他の御協力をいただいた、中部電力設備運営室の小林、相馬の両氏に厚く御礼申し上げます。

8. 参考文献

- (1) 小林・一柳・藤田：交直連系送電系統の過渡安定度計算のためのデジタルシミュレーション，昭49電気関係学会東海支連大，10月
- (2) 小林・森・一柳：送電回路網アドミタンス行列の特性からみた電力系統構成，昭48電気四学会東海支連大，11月
- (3) 小林・川口・一柳：ルーズカップラーを含むモデル系統のデジタルシミュレーションについて，昭48電気四学会東海支連大，11月
- (4) 関根：電力系統解析理論，電気書院
- (5) 中部電力系統運用専門部会(資19-2)：事故時緊急連系装置(ルーズカップラー)第1次模擬試験結果と今後の検討方針
- (6) 中部電力設備運営室：ルーズカップラーの特性試験結果(第2報)
- (7) El-Abiad et al: Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, No. 2, 1966, Feb. pp 169-179

付 録

1. 過渡計算における浮遊ノード電圧の求め方
 発電機ノードをG, 残りノード(浮遊ノードという)をFの記号で書くと、系統全体のアドミタンス行列Yは次のように書ける。

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{GG} & Y_{GF} \\ Y_{GF}^T & Y_{FF} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ノード電圧V, ノード電流Iは次のようになる。

$$V = \begin{pmatrix} V_G \\ V_F \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} I_G \\ I_F \end{pmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

したがって

$$I = YV \quad \dots\dots(3)$$

$$\therefore I_G = Y_{GG} V_G + Y_{GF} V_F$$

$$I_F = Y_{FG}^T V_G + Y_{FF} V_F$$

第二式では、浮遊ノード電流 $I_F = 0$ であるから

$$Y_{GF}^T V_G + Y_{FF} V_F = 0 \quad \dots\dots(4)$$

$$\therefore V_F = -Y_{FF}^{-1} Y_{GF}^T V_G \quad \dots\dots(5)$$

この式は発電機電圧 V_G が与えられれば、残りのすべてのノードの端子電圧 V_F が求められることを示している。

2. El-Abiad のエネルギー関数⁽⁷⁾

n 機系の電力動揺方程式

$$M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} + P_{Ei}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) = P_{Mi} \dots\dots\dots(6)$$

および

$$P_{Ei} = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \dots\dots\dots(7)$$

$$i = 1, 2, \dots\dots\dots n$$

に対するリアプノフ関数は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} V(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \\ = \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{2} M_k \omega_k^2 + (V_k^2 G_{kk} - P_{Mk})(\delta_k - \delta_{k0}) \right] \\ + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n V_k V_j B_{kj} [\cos(\delta_{k0} - \delta_{j0}) - \cos(\delta_k - \delta_j)] \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

ここでは発電機 j と k の間の相互アドミタンス $\dot{Y}_{jk} = G_{jk} + jB_{jk}$ のコンダクタンス分 G_{jk} ($j \neq k$) を無視している。

(8)式で、 $(\delta_{10}, \delta_{20}, \dots, \delta_{n0})$ は与えられた系統の安定平衡点で $P_{Ei}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) - P_{Mi} = 0, i = 1 \sim n$ の解である。

不安定平衡点 $(\delta_{1c}, \delta_{2c}, \dots, \delta_{nc}, 0, 0, \dots, 0)$ における V 関数の値を V_c とすれば、リアプノフ安定範囲は次式を満足するような系統の状態の集合である。

$$0 \leq V(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) < V_c \dots\dots\dots(9)$$