アナログ型電力系統シミュレータによる内部型パラメータ共振の発生の確認および計測技術の検討

正員 富山 勝幸 (関西電力)

正員 中西 要祐 (富士電機総研)

正員 田村 康男 (早稲田大)

Confirmation of the Auto-Parametric Resonance Phenomena on an Analog-Type Power System Simulator and Promotion of Problem-Oriented Instrumentation Technique

Katsuyuki Tomiyama, Member (Kansai Electric Power Co., Inc), Yosuke Nakanishi, Member (Fuji Electric Corporate R & D, Ltd), Yasuo Tamura, Member (Waseda University)

Auto-parametric resonance has not been detected nor observed in a real power system, probably because the problem-oriented instrumentation network is not available today. It has been confirmed by our research group from the viewpoint of theory, digital simulations, and artificial transmission system with rotating machines that the auto-parametric resonance may come out in a power system where certain types of resonance conditions are satisfied as when the initial transient impact such as line opening, generator tripping, and a line-to-ground fault has been applied.

The objective of this paper is to confirm the auto-parametric resonance phenomena on a large-scale advanced-type power system simulator (APSA) which features various functions which are very close to those of a real power system, and to promote the instrumentation techniques needed to record and analyze such infrequent phenomena.

キーワード：パラメータ共振, APSA, 多重尺度法, 長時間動特性(LTD), 寄与率行列, 最大エントロピー法 (MEM)

1. ま え が き

異常現象は一般に構造上、運用上の悪条件を背景とし、これに許容値を超える外乱が組み合わされて発生するものと考えられる。また近年、電力系統では有効電力の不均衡による従来の不安定性に加えて、無効電力の不均衡による新しいタイプの不安定性を経験するに至った。新しい現象に遭遇するということは、どこかに稀頻度現象が隠れていて、電力系統状態の悪条件性の進行に伴い、顕在化するものと考えられる。図1は電力系統において、現象と遭遇し確認する際のいろいろな形態を示したものである⁽¹⁾。理論に基づく予見

(A)、発見的事実・連想(B)に始まって、実系統での観測、試験(F)に終わる。遭遇や確認の筋道は場合によって異なり、当初発見的事実と考えられていた現象が理論によって裏づけられたり、現象の存在がディジタルシミュレーション(C)によって確認されることもある。専用のシミュレータ(D)や模擬送電系統(E)は、限られた範囲で実系統と酷似しているので、その結果は説得力があり、ディジタルシミュレーションの結果を追認してくれる。実系統での試験・観測・解析(F)に基づく現象確認は現在非常に困難である。近い将来、常時監視用の計測体制を整備のうえ、系統現象について知識を蓄積していくことが切望される。

電力系統のパラメータ共振現象は、著者らが近年その存在の可能性を力説している特異現象で、(i)交流送電特性の非線形性 ($\sin \theta$)、(ii)系統のもつダンピングの低下、(iii)地絡事故のショックなどが重なり合って発生する。ある時間断面で求めた線形化常微分方程式の固有値がすべて左半平面にあっても、その幾つかが虚軸に近く、かつ共振条件が成立すると、(i)系統周波数や系統間を行き来する電力の振動が持続し、系統運用のマージンが減少し、送電線の利用率が低下したり、(ii)系統事故や線路開閉などのショックにより、系統動揺が発生したりする可能性がある⁽²⁾。

本論文に述べるパラメータ共振の確認は、図1における発見的事実・連想(B)から出発し、理論(A)、デジタルシミュレーション(C)、模擬送電系統(E)、における現象の確認を経たのち、専用のアナログ型電力系統シミュレータ(D)による検証段階に入っている。ここでは(D)として大型電力系統シミュレータ APSA (Advanced Power System Analyzer) を選定した^{(3)~(9)}。これは実系統(F)における現象確認のための、長時間現象記録装置および電力系統の常時監視方式がいまだ不十分な段階にあり、専用シミュレータ(D)による解析は有効な手段であると考えためである。さて、パラメータ共振は外部型パラメータ共振と内部型パラメータ共振に大別できるが、外部型パラメータ共振については、既に簡略モデルおよび詳細モデル (Park モデルのみと Park モデル+AVR+ G_{ov}) を用いてデジタルシミュレーション(C)を行ったが、考察対象となる外乱周波数の範囲においては、状態変数の振幅が描く共振曲線の全貌は大局的に一致している。

しかし、第4章で示した内部型パラメータ共振の時

間軸波形は、簡略モデルのそれと詳細モデルのそれはかなり相異し、しかも詳細モデルの波形は APSA と酷似していることが判明した。

一方、電力系統のパラメータ共振は長時間動特性⁽¹⁰⁾ (Long-Term-Dynamics; LTD) の典型的な例であると考えられるので、デジタルシミュレーション(C)では、 $\tau_{\max}/\tau_{\min}$ が極めて大きなものの代表例となり、デジタルシミュレーション(C)を用いた場合の計算精度の低下、計算の能率の低下は免れない。このような環境の下では APSA のようなアナログシミュレータは、その欠点を解決してくれる可能性が大であり、また、計測技術の確立を目指し今回の研究を行った。

2. 電力系統におけるパラメータ共振現象の分類⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

複数台の発電機を Xd' モデルにより簡略表現しても、大局を把握した共振条件の導出が可能であると考え、摂動法の一つである Multiple Scales 法 (多重尺度法)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ の一次近似を用いて共振条件を導出した。これを表1に示す。同表の内部型共振において、共振条件は異なる3モード p, q, r の固有周波数の関係を表しており、 $q=r$ ($=i$) の場合も含んでいる。すなわち、異なる2モード p, i の間の共振として、 $\omega_p = 2\omega_i$ の共振も意味する。以下に述べる APSA による試験は、この2モード間の内部共振現象のケースについて検討したものである。

3. APSA によるシミュレーション

パラメータ共振に対する現象波形の分析手法と、その現象確認の手法を確立するため、アナログシミュレータによるシミュレーションを行った。このアナログシミュレータとしては、電力系統に発生する多様な現象を極力忠実に再現でき、かつ未経験の系統現象を的確に予測するために、平成元年より運用されている大規模高性能系統解析試験装置 (APSA) を選定した^{(3)~(19)}。

表1 電力系統におけるパラメータ共振の分類
Table 1. Classification of parametric resonance in power systems.

タイプ	共振条件
線形共振	$\omega_p \approx \Omega_r$
外部型 HETERO I	$\omega_p \approx \pm (\Omega_r \pm \Omega_s)$
外部型 HETERO II	$\Omega_r \approx \pm (\omega_p \pm \omega_q)$
内部型 AUTO	$\omega_p \approx \pm (\omega_q \pm \omega_r)$

ω_k : 系統の固有角周波数
 Ω_j : 外乱角周波数

図1 現象との遭遇と確認

Fig.1. Encounter with phenomena & confirmation thereof.

本シミュレータでは、既の実系統試験に対する再現試験を行い^{(15)~(17)}、系統現象に対する妥当性を得ているが、今回、本シミュレーションのような系統の非線形現象に注目した、共振現象の確認実験とその現象波形の分析を初めて実施し、各種のデータを収集した。

〈3・1〉 実験手順 今回解析した系統は図2の3機9母線系統⁽¹⁸⁾である。図中に示した計測情報(各発電機の P, δ) は、ワークステーションより選択し、データロガーやアナライジングレコーダに出力した。また、現象の動揺周期を考慮し、サンプル周期 Δt は 50 ms (f sample=20 Hz) とした。

試験前の検討として、 Xd' モデルによるデジタルシミュレーションと APSA における外部共振実験により、内部共振実験の共振周波数の手掛かりを得ることにした。すなわち、 Xd' モデルの固有値解析によって求めた固有周波数のなかで、二つの固有周波数が、内部共振の共振条件(表1)を満たすように、パラメータ(単位慣性定数)を調整した。

〈3・2〉 波形分析手法 計測波形に対するパラメータ共振現象の把握を行うために、その波形に含まれるモード周波数・減衰を分析、あるいは雑音除去などを行う必要がある。また、この技術は実系統での現象解析にとっても重要な技術であるといえる。

今回適用した波形分析手法は、FFT によりモード周波数を試験中に確認し、試験後に FFT の窓枠の時間方向への移動(移動 FFT)を行い、その減衰状態の数値検討を行うことにした。FFT は、時間領域の波形を高速フーリエ変換し、各周波数成分のスペクトル密度を求めるものであり、計測波形の振動モードを確認できるが、その解析窓枠を時間軸方向に逐次移動させ、各周波数成分の時間的変化をも調べることができる。

一方、共振状態で発生する振幅のビートの現象を解釈するためには、周波数成分が非常に近寄っているため、スペクトル分解能が優れている必要があり、このため今回は最大エントロピー法⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を適用した。最大エントロピー法(以下、MEM)は、時間領域の波形の自己相関関数を求め、これをフーリエ変換するもので、上記の FFT とは Wiener-Khinchine(W-K) の公式により図3の関係で結ばれている。また、MEM によるスペクトル解析は、確率過程に自己回帰式をあてはめることに等しく、このため予測誤差フィルタの項数の決定法に問題があるものの、非常に精度の高いスペクトル周波数分解能を与える。今回用いたスペクトル解析の設定は以下のとおりである。

図2 A & F 3機系の系統図および潮流
Fig. 2. A & F 3-machine-system and load flow.

図3 FFT と MEM の関係
Fig. 3. Relationship between FFT & MEM.

サンプリングタイム Δt : 0.05 s

データ数 N : 512 個

窓枠 T : 25.6 s ($=\Delta t \times N$)

Nyquist 周波数 f_N : 10 Hz ($=1/(2\Delta t)$)

基本周波数幅 Δf : 0.039 Hz ($=1/T$)

窓枠移動幅: 1 s

4. APSA の実験とデジタルシミュレーションとの比較

本章では、APSA の測定データおよびデジタルシミュレーション(Parkモデルおよび Xd' モデル)の三者に対して、固有周波数および時間軸波形を比較し、更に、内部型パラメータ共振の発生の確認を行う。

〈4・1〉 実験ケース 表2に、対象とする二つの実験ケースについて記す。両ケースは、制動巻線の有無および事故時間が異なっている。

実験に先立ち、およその共振条件を成立させるために、あらかじめ簡略モデル(Xd' モデル)による固有周波数が 1:2 の関係になるように H_2 を 6.40 から 7.5 に調整した。

両ケースの特徴を把握するために、固有値および寄与率について調べる。発電機を Park の 7 次式で表現した場合、固有値は、7(次) $\times$ 3(機) = 21 個存在する。また、 Xd' モデルの場合の固有値は、2(次) $\times$ 3(機)

表 2 実験ケース
Table 2. Cases of experiment.

Case No.	事故時間 [sec]	制動 巻線	慣性定数 H_b	Xd'モデルによる共振 条件の概略設定 (固有周波数[Hz])	
				0.94	1.88
Case 1	0.208	無	17.5	0.94	1.88
Case 2	0.333	有	17.5	0.94	1.88

表 3 Case 1 の優勢な複素固有値
Table 3. Dominant eigenvalues in Case 1.

発電機 モデル	モード	固有値 実部	固有値 虚部	関係の深い状態変数 (寄与率より推定)
Park	No.1	-0.0712	± 4.5835	$\delta_1, \dot{\delta}_1, \delta_2, \dot{\delta}_2$
	No.2	-0.1662	± 8.7714	$\delta_3, \dot{\delta}_3$
Xd'	No.1	0.0000	± 5.8951	$\delta_1, \dot{\delta}_1, \delta_2, \dot{\delta}_2$
	No.2	0.0000	± 11.7740	$\delta_3, \dot{\delta}_3$

表 4 Case 2 の優勢な複素固有値
Table 4. Dominant eigenvalues in Case 2.

発電機 モデル	モード	固有値 実部	固有値 虚部	関係の深い状態変数 (寄与率より推定)
Park	No.1	-0.1985	± 4.6000	$\delta_1, \dot{\delta}_1, \delta_2, \dot{\delta}_2$
	No.2	-0.6204	± 8.8705	$\delta_3, \dot{\delta}_3$
Xd'	No.1	-0.0847	± 5.8937	$\delta_1, \dot{\delta}_1, \delta_2, \dot{\delta}_2$
	No.2	-0.4882	± 11.7624	$\delta_3, \dot{\delta}_3$

注 1) 固有値の単位は (rad/s)

注 2) Case 2 において, Xd' モデルの制御係数 D は以下の式で求めた (21)。

$$D = (Xd' - Xd'') T d o'' / (Xd' + 0.1) \sin^2 0.349 \\ + (Xq - Xq'') T q o / (Xq + 0.1) \cos^2 0.349$$

この式より,

$$D_1 = 0.00827, D_2 = 0.02767, D_3 = 0.01983$$

と求められた。

また, Case 1 の Xd' モデルにおいては, 制動巻線なしという状態を, 制御係数 D を零とすることによって模擬したため, 固有値の実部が零となっている。

=6 個となる。3 機系の場合, どちらのモデルにせよ発電機の慣性に関係の深い優勢な複素固有値は 2 組存在するが, Case 1 および Case 2 のそれぞれについて, これらの複素固有値を表 3 および表 4 に示す。各固有値について, 寄与率を参考に関係の深い状態変数を右側に記した。

なお, 固有値は EISPACK Ver. 8.2 を用いて計算した。表 3 および表 4 より, 発電機 3 とモード No. 2 の関連が深いことが寄与率により推定できる。

〈4・2〉 出力 P の時間軸波形 図 4 および図 5 に, Case 1 および Case 2 の発電機出力 P の時間軸波形を示す。ここで, 各列はそれぞれ

(I) APSA の計測波形

(II) Park モデルを用いたデジタル計算の波形

(III) Xd' モデルを用いたデジタル計算の波形に対応する。また, 各々の列において, (a)~(c) 図は発電機出力 P_1, P_2, P_3 をそれぞれ示す。ここで, 数値積分手法は Runge-Kutta 法 (4 次) を用い, 時間刻み幅 $\Delta t = 0.3 \text{ ms}$ とした。

図 4 および図 5 を見ると, APSA の計測波形と Park モデルによる計算結果は, 前者に雑音による高周波成分が含まれていることと, 事故前から既に動揺が認められたことを考慮すれば同様な波形を得ている。また, APSA, Park モデルの両者において, 出力 P_3 の振幅が最初の 3 秒間程度増大し, その後減少している点は, 非線形システムの特徴を示しているように思われる。

一方, Xd' モデルの時間軸波形は, APSA および Park モデルの波形とはかなり異なったものとなっている。すなわち, Park モデルの P_3 の波形は APSA のそれと似ていて, 初期振幅の増大および減少が図によく表れている。これに対して, Xd' モデルの P_3 の波形はこのような増大および減少が見られない。

〈4・3〉 モード領域の波形およびその減衰定数に着目したエネルギー授受の確認 (Park モデル)

図 6 および図 7 に, デジタルシミュレーション (Park モデル) における Case 1 および Case 2 の各状態変数をモード変換した値のうち, 優勢なモードである (a) モード No. 1 および (b) モード No. 2 の時間軸波形を示し, それぞれのモードのエンベロープの減衰を (c), (d) 図に示す。

(1) 波形の観察 図 6 および図 7 を見ると, モード No. 2 の時間軸波形において, 振幅が最初のうちは増大し, 次いで減少していることがわかる。表 3 および表 4 より, モード No. 2 は発電機 3 と関連が深いモードであることが寄与率により推定されるが, これは, 発電機出力 P_3 と, モード No. 2 の波形がよく似た傾向を示していることから確かめられる。これはまさに寄与率の示していることと矛盾しない。

(2) エネルギー授受の確認 系統にダンピングが存在し, それによる減衰効果がエネルギー授受による振幅の増加を一部相殺してしまう場合には, モード波形を直接観察するだけではエネルギー授受の確実な判定はできない。そのため, エネルギーの移動方向が変わったとき, 両モードの減衰定数が変化するのであるという考え方にに基づき, エネルギー授受の有無を判定した。この方法は, モード波形を求め得るデジタル計算に対してのみ適用でき, ここでは Park モデル

(I) APSA

(II) Park モデル
Runge-kutta 使用 $\Delta t=0.3$ ms

(III) $X_{d'}$ モデル
Runge-kutta 使用 $\Delta t=0.3$ ms

図 4 Case 1 の有効電力の時間軸波形 (事故時間: 0.208 s, 制動巻線: なし)

Fig. 4. Time domain waveforms of real power in Case 1.

(I) APSA

(II) Park モデル
Runge-kutta 使用 $\Delta t=0.3$ ms

(III) $X_{d'}$ モデル
Runge-kutta 使用 $\Delta t=0.3$ ms

図 5 Case 2 の有効電力の時間軸波形 (事故時間: 0.333 s, 制動巻線: 有)

Fig. 5. Time domain waveforms of real power in Case 2.

の波形を考える。

図 6 および図 7(c), (d) は, それぞれの(a), (b)図に示されるエンベロップの全幅を読み取り, その常用対数を 0.5 秒ごとに 10 秒までプロットしたも

のである。

Case 1(制動巻線なし)について考えると, 図 6(c), (d)より, 減衰定数が 4 秒近辺を境に性質が変化している様子がわかる。つまり, モード No.2 は 4

図 6 減衰定数の変化 Case 1(Park)
Fig. 6. Change in attenuation constant Case 1 (Park).

図 7 減衰定数の変化 Case 2(Park)
Fig. 7. Change in attenuation constant Case 2 (Park).

秒以前は傾きは正でエネルギーが増大に向かっているが、その後負に変化し減少方向になっている。一方、モード No.1 は、減衰定数が負から正へと変化すれば、モード No.2 からのエネルギーの授受といえるが、実際は、4 秒以後の減衰定数が正まで変化せずに若干小さくなっている。これは、系統のダンピングによりその変化が弱まったものと考え、4 秒の時点でそのエネルギーが逆方向に移動しているものと考えられる。

一方、図 7 に示す Case 2(制動巻線あり)では、モード No.1 のエンベロープの減衰定数には変化が見られず、エネルギー授受は起こっていないものと思われる。

両ケースの判定結果より、Case 1 は制動巻線なしのケースであるため、ダンピングが比較的小さく、内部共振が顕在化しやすいと考えられる⁽²²⁾。更に、計測から明らかではないが、より大きな外乱を与えた場

合には制動巻線ありの場合にも内部共振が発生するのではないと思われる。

〈4・4〉 スペクトル解析による分析 デジタル計算結果に対して内部型パラメータ共振発生の有無は、ダンピングが比較的小さい場合にはモード波形を計算し、その形状を直接観察することで判定でき、更にダンピングが比較的大きく、エネルギー授受がマスクされやすい場合でも、モード波形の減衰定数の変化によって判定できる。しかし、モード波形に必要な固有値解析は、正確な数式モデルを前提とするため、APSA の計測波形に対しては、いずれの判定方法も適用することはできない。

そこで本節では、スペクトル解析による判定を試みた。移動 FFT による解析では線形の減衰時定数および固有周波数に対する判定には有効であるが、パラメータ共振の確認には必ずしも良好な結果を与えておらず、非線形現象を含んだ波形の解析が必要となる。こ

図 8 FFT によるスペクトル密度 Case 1 (APSA)
Fig. 8. Spectral density computed by FFT Case 1 (APSA).

表 5 固有周波数の比較
Table 5. Comparison of mode frequencies.

Case No.	モデル	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
Case 1	APSA	0.70~0.78	1.41
	Parkモデル	0.73	1.40
	Xd'モデル	0.94	1.88
Case 2	APSA	0.78	1.48
	Parkモデル	0.73	1.41
	Xd'モデル	0.94	1.88

表 6 減衰定数の比較
Table 6. Comparison of attenuation constants.

ケース	モード周波数	減衰定数の平均値	固有値実部
Case1	P1の f_1	-0.155	-0.0712
	P2の f_1	-0.155	
	P3の f_2	-0.171	
Case2	P1の f_1	-0.179	-0.1985
	P2の f_1	-0.180	
	P3の f_1	-0.294	

単位[1/sec]

図 9 MEM によるスペクトル密度 Case 1 (APSA)
Fig. 9. Spectral density computed by MEM Case 1 (APSA).

のため、更に MEM によるスペクトル分布形状を調べることでその特徴を把握した。

(1) 移動FFTによる解析 移動FFTの計算結果の一例を図8に示す。また、これから得られたAPSAの固有周波数とデジタル計算の固有値を比較したものが表5である。これを見ると、Parkモデルの計算結果はAPSAの固有周波数とかなり近接しているといえる。これに対しXd'モデルで求めた値

は大きく離れており、Parkモデルの有用性が確認される。

次に、各モードの周波数成分の1秒ごとの減衰定数を平均したものを表6に示す。同表には比較のためにそれぞれのモードに対応するParkモデルの固有値実部も示した。これより次のことがいえる。

(i) 減衰定数と固有値を比較するとCase1では f_2 が、Case2では f_1 がほぼ一致している。

(ii) 両ケースとも減衰定数からモード No.1 のほうが、モード No.2 より減衰が速いことがわかるが、これは固有値の与える情報と一致する。

(iii) P_1, P_2 に含まれる周波数成分 f_1 の減衰定数の平均値について、Case 1 は両者とも -0.155 、Case 2 は -0.179 と -0.18 と各々の Case で、相等しい。

以上のことより、移動 FFT による解析結果は固有値との比較という観点から、振動モードの振舞いの線形な部分の特徴を十分表しているといえる。

(2) MEM による解析 エンベロープが比較的低い周波数 f_{EN} で振動する場合、一般にスペクトル密度の山は振動周波数 f から $\pm f_{EN}$ だけずれたところに現れるが、FFT ではこのような特徴を抽出することはできなかった。FFT に比べより優れた分解能を有する、MEM によって求めたスペクトル密度分布を図 9 に示す。(b)、(c) 図ではモード周波数 f_1 および f_2 の付近に二つの山が見られる。(c) 図から概算される f_{EN} は、この二つの山の周波数差より $f_{EN} = (1.482 - 1.365)/2 \approx 0.058$ Hz であり、周期は $1/0.058 \approx 17.3$ s となる。このことは Case 1 のモード No.2 に $17.3/2 \approx 8.7$ s のビート現象を指摘することができ、これは図 4 (I)-(c) の P_3 のビート現象が約 12 秒であることと比較的よく一致するといえる。

以上の分析結果を以下にまとめる。

(i) Park モデルを用いたディジタル計算結果は APSA との比較において時間軸波形がよく一致した。また、固有値の与える知見は APSA の振動モードの振舞いと比較的良好一致した。

(ii) モード波形の減衰定数の変化に着目した解析によって、内部型パラメータ共振のエネルギー授受発生の有無に関する情報がある程度得られることがわかった。

(iii) MEM によるスペクトル解析を用い、その高い周波数分解能により内部型パラメータ共振のビート現象を近接した周波数としてとらえた。

本章の分析において内部型パラメータ共振のエネルギー授受の現象の性質には現れなかったが、この理由として次のことが考えられる。すなわち、本試験で取り上げた潮流は、発電機の出力配分を、スペクトル解析を行わなくても特定の発電機の出力端で比較の純粋な振動モードが観測できるよう調整したものであった。これは、いわばモード No.1 とモード No.2 の相互作用を疎にする操作であったのではないかと考えられる。つまり、この操作が振動モード間のエネルギー授受として特徴づけられる内部型パラメータ共振の発生を困難にさせた可能性を指摘する。

5. ま と め

本論文では、内部型パラメータ共振に対する現象波形の分析手法とその現象確認の手法を確立するため、APSA によるシミュレーションとディジタル計算との比較を行い、エネルギー授受の有無について検討した。

今回得た解析技術により、試験を行う前に Park モデルの固有値や時間軸の生波形およびモード領域の波形、更にはスペクトル解析の波形まで検討することができ、内部共振の起こりやすい条件を事前に各方面から探索することが可能となった。

また本論文では、試験によって得た波形に対する解釈の方法について提案し、内部型パラメータ共振の発生を確認した。

本研究を実施するにあたり、多くの方々から多大の御支援を賜った。就中、関西電力(株)総合技術研究所森岡靖夫、加藤正直 両副主任研究員、関西計器工業(株)西田周治、中野武誠 両氏は APSA の運転管理、計測を全面的に担当された。他方、試験データの整理・解析に努力を傾注した早稲田大学田村研究室大学院生 本吉高行(現、東京電力(株))、緒方隆雄(現、東京ガス(株))、梅田信雄、坂下健二、斎藤 寛、張 徳評(以上、修士 2 年)の六氏に対し感謝の意を表したい。最後に、大規模アナログ型電力系統シミュレータ APSA を活用する機会をお与え下さった関西電力(株)総合技術研究所 和廣所長ならびに藤井正規副所長に深甚なる謝意を表する。(平成 4 年 12 月 7 日受付)

文 献

- (1) 田村：「電力系統の非線形現象について」、計測と制御, 29, 251 (平 2-3)
- (2) Y. Tamura, N. Yorino, et al.: "On the Possibility of Parametric Resonance in Power Systems-A New Concept of Power System Stability", Proc. PSCC-VIII, Helsinki (1984)
- (3) 沖, 他：「大規模アナログ電力系統シミュレータの開発(その 1・設備概要と技術課題)」, 昭 63 電気学会大会, No. 927
- (4) 西森, 他：「大規模アナログ電力系統シミュレータの開発(その 2・発電機ユニット)」, 昭 63 同上, No. 928
- (5) 福本, 他：「大規模アナログ電力系統シミュレータの開発(その 3・負荷ユニット)」, 昭 63 同上, No. 929
- (6) 広部, 他：「大規模アナログ電力系統シミュレータの開発(その 4・自動結線システム)」, 昭 63 同上, No. 930
- (7) 須崎, 他：「大規模アナログシミュレータ構成ユニットの特性」, 電気学会電力技術研資, PE-89-116 (平元)
- (8) 森岡, 他：「大規模アナログシミュレータ運用システム」, 同上, PE-89-117 (平元)
- (9) 加藤：「パラメータ共振現象との遭遇」, R & D News Kansai (平 3-4)
- (10) Y. Tamura & N. Yorino: "On Quantitative Analysis of Nonlinear Long-Term Phenomena in Power Systems from Parametric Resonance Viewpoint", IASTED, Montana (1986)

- (11) 餘利野・田村, 他: 「電力系統におけるパラメータ共振について」, 電学論 B, **105**, 805 (昭 60-10)
- (12) 餘利野・田村: 「電力系統におけるパラメータ共振の分類と特徴抽出」, 同上 B, **106**, 503 (昭 61-6)
- (13) A. H. Nayfeh & D. T. Mook: *Nonlinear Oscillations* (1979) John Wiley & Sons
- (14) 斎藤・田村, 他: 「電力系統における内部型パラメータ共振の高次近似の必要性」, 平 4 電気学会全大, No. 1035
- (15) 須崎・土井・広部: 「高性能系統解析試験装置の特性試験結果—実系統試験との対比結果—」, 電気学会電力技術研資, PE-90-37 (平 2)
- (16) 森岡・吉田・斎川: 「高性能系統解析試験装置の特性試験結果—モデル系統による電圧問題解析—」, 電力技術研資, PE-90-37 (平 2)
- (17) 土井・森岡・須崎, 他: 「高性能系統解析試験装置の特性試験結果—TAGEC 機能の検証結果—」, 同上, PE-90-39 (平 2)
- (18) P. M. Anderson & A. A. Fouad: *Power System Control and Stability* (1977) Iowa State University
- (19) 日野: スペクトル解析 (昭 52) 朝倉書店
- (20) J. P. Burg: "Maximum Entropy Spectral analysis", 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys., Oklahoma (1967)
- (21) 内田, 他: 「長距離串型系統の不安定動揺現象とその対策」, 電中研報告, T88001 (昭 63)
- (22) 餘利野・田村, 他: 「電力系統における内部型パラメータ共振とその解析手法について」, 電学論 B, **108**, 328 (昭 63-7)

富山 勝幸 (正員)

昭和 20 年 3 月 25 日生。38 年 3 月淀川工業高校電気学科卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。46 年 3 月姫路工業大学電気工学科卒業。現在, 総合技術研究員。主として, 電力系統の安定度関係の研究に従事。

中西 要祐 (正員)

昭和 30 年 1 月 6 日生。55 年 3 月早稲田大学大学院修士卒業。同年 4 月富士電機(株)入社。現在, 富士電機総合研究所主査。主として, 電圧不安定性現象の解析, シミュレーション手法の研究に従事。平成 3 年 IEEE 表彰 (電力系統教育委員会)。IEEE 会員。

田村 康男 (正員)

昭和 6 年 9 月 21 日生。28 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。30 年同大学理工学部助手嘱任。32~33 年アメリカの Univ. of Michigan 交換研究員。44 年早稲田大学理工学部教授嘱任, 現在に至る。工学博士。46~47 年シドニー大学交換教授。45 年, 48 年電気学会論文賞。48~54 年 CIGRE SC-32 国内委員長。59 年中国武漢水利電力学院名誉教授。59~60 年電気学会東京支部長。60 年ベルギー Liege 大学国際学術賞 (パラメータ共振), 61 年電気学会電力賞受賞。62~64 年電気学会副会長。平成 2 年 IEEE tutorial コース (電圧安定性) 講師。3 年 IEEE 表彰 (電力系統教育委員会)。IEEE Fellow。