Hopf分岐理論に基づく電力系統安定領域の評価

学生員 渡 邊 政 幸 (大阪大学)

正 員 三 谷 康 範 (大阪大学)

正 員 辻 毅一郎 (大阪大学)

Evaluation of Power System Stable Region Based on Hopf Bifurcation Theory

Masayuki Watanabe, Student Member, Yasunori Mitani, Member, Kiichiro Tsuji, Member (Osaka University)

Power system is a dynamic system, which includes several kinds of nonlinear elements. Transient stability is a typical example originated in the nonlinearity of power swing. On the other hand, the use of nonlinear analysis method based on the Hopf bifurcation theory tells us the existence of limit cycle around an operating point and the stability of limit cycle. In this paper power system global stability formed by an unstable limit cycle, is evaluated. The limit cycle mainly results from the excitation control. Therefore, it is important to consider the effect of flux change in the field winding in addition to the δ - ω variables. This paper presents a method to calculate the correct stability boundary associated with the unstable limit cycle. Some numerical results using a model power system demonstrate the accuracy of method.

キーワード：電力系統，過渡安定度，Hopf分岐，安定領域

Keywords: Power system, Transient stability, Hopf bifurcation, Stable region

1. はじめに

近年，高度情報化，生活環境の向上に伴い，エネルギー需要における電力エネルギーの重要性はますます高くなっており，電力需要は増加の一途をたどっている。それに伴う電源設備や送電設備の増設は環境および立地上の制限により難しく，さらに，電力自由化に伴いコスト削減が迫られる中，十分な余力を持った設備を確保することは困難になってきている。こうした電源設備の大容量，偏在化，送電設備の大規模化，分散電源の増加に伴うさらなる複雑化が進む中で電力系統の運用を取り巻く状況は厳しくなっており，安定送電限界点付近での運用も余儀なくされ，系統の安定度の低下が大きな問題となる可能性がある。

系統の安定度を検討する方法の一つとして，運用点近傍での線形化状態方程式を得ることにより，その運用点における固有値を用いて運用点近傍における安定度を判別することが可能である。しかし，電力系統は随所に非線形要素を含む大規模な非線形システムであるため，過渡的な現象を把握するにはこのような手法では十分とは言えず，非線形性を考慮した解析が必要となる。

非線形動特性解析の一つの方法である Hopf 分岐理論を電力系統に適用した研究により，AVR 系の影響に基づく非線形周期軌道の特性の解析を行なった結果が報告されて

いる⁽¹⁾⁽²⁾。それによると，AVR 系の影響により，系統に安定または不安定な非線形周期軌道が存在し，その特性および形状が系統の安定度に多大な影響を与えることが明らかになっている。このとき周期軌道が安定な場合には，電力系統内に持続性の振動現象が存在する可能性がある。また，周期軌道が不安定な場合にはこの軌道が安定領域と不安定領域の境界を作り，系統の状態がその軌道を越えてしまうような擾乱が発生した場合，系統は不安定な状態に陥り，発電機の同期が失われる。そして，系統の状態によっては従来の過渡安定度の議論によって定まる領域に比べてはるかに狭い範囲でしか安定性を保てない恐れが生じる。従って，Hopf 分岐特性を正確に把握することは電力系統の非線形動特性および安定度を検討する上で重要となる。

電力系統の安定度は発電機の位相角 δ - 位相角速度 ω の関係から決まる 2 次動揺特性が支配的である。そのため，これまでの研究においては，潮流の増加に伴い不安定になる電力動揺モードに着目し，安定度を論じる際には δ - ω 平面上に描かれた位相特性によって説明が加えられてきた。

しかし，電力システムの非線形動特性の解析においては一つの発電機を対象とした場合でも，モデルを記述する状態空間が多次元となるため， δ - ω 平面上に描かれた位相特性では正確に安定領域を表現できない場合も生じる。したがって，多次元空間内で安定領域を求めれば，正確な評価

図 1 分岐図

Fig. 1. Bifurcation diagram.

が行えるようになる。例えば、非線形性を考慮した固有空間上への座標変換を行い、安定判別を行った結果が報告されている⁽³⁾が、座標変換の結果系統状態を物理的な意味において直感的に理解することが困難となる。そこで、本論文では、実用上一般に用いられる δ - ω 平面において誤差を生じる要因を考慮することにより安定判別の精度の向上をはかることとした。具体的には界磁巻線の電氣的応答を考慮する。 δ - ω 平面上における古典的な過渡安定度解析では、大容量発電機の d 軸開路時定数 T'_{do} が 6 ~ 10 (sec) と大きいので、界磁巻線の磁束に対応する電圧 e'_q は一定であるとして扱われている。しかし、実際には、 e'_q は事故直後に過渡的な応答を持ち、その後も徐々にではあるが変化していくため、系統の動特性が変化し、それに伴って非線形周期軌道も変化していくものと考えられる。

そこで本論文では、こうした励磁系の影響を考慮に入れた非線形周期軌道を求めることにより、 δ - ω 平面上での解析においてより正確な安定領域によって電力系統の安定性を判定する手法を提案する。以下では、この手法をモデル系統へ適用し、シミュレーションによる評価を行った結果について述べる。また、励磁系の制御により系統を安定な方向に制御する方法についても言及する。

2. Hopf 分岐理論と電力系統の安定度

図 1 はある非線形システムに対して、可変パラメータ μ を動かすことによる非線形システムの特性的変化を描いたもので分岐図と呼ばれる。ただし、変数 r はシステムの支配モードに対応する変数を極座標変換したときの半径方向の大きさを表している。

μ を変化させたときに平衡点の安定性が変わり、そこから周期軌道が現れるとき、その点を Hopf 分岐点という。ここで、Hopf 分岐点から安定周期軌道を形成する場合を supercritical Hopf 分岐、不安定周期軌道を形成する場合を subcritical Hopf 分岐という。周期軌道の特性的もパラメータの変化に伴い変化する場合がある。

電力系統が supercritical Hopf 分岐を持つ場合、図 1 に示したように不安定平衡点のまわりに安定周期軌道が存在する。通常は図中の点 A のような安定平衡点上の状態が発電機を運転するが、仮に点 B の状態で運転した場合でも発電機は脱調せず、運用点は安定周期軌道に捉えられるため、系統は脱調しないが持続振動を生じる。

表 1 系統の諸定数

Table 1. System constants.

Generator: Park's 3rd model, 4000MVA base			
$x_d = 1.79$ (p.u.)	$x'_d = 0.355$ (p.u.)	$T'_{do} = 7.90$ (s)	
$x_q = 1.66$ (p.u.)	$x'_q = 0.570$ (p.u.)		
$D = 2.00$ (s)	$M = 7.527$ (s)		
Transmission System: 4000MVA, 500kV base			
$x_l = 0.15$ (p.u.)	$x_{l1} = 0.30$ (p.u.)	$x_{l2} = 0.20$ (p.u.)	

これに対し、subcritical Hopf 分岐を示す場合は、安定平衡点のまわりに不安定周期軌道を持ち、この軌道が大域的な安定限界を作り出す。例えば図中の点 C で発電機を運転中に何らかの擾乱によって系統の状態が周期軌道の外側の点 D に移れば、周期軌道から離れる方向に軌道が作られるためそのまま脱調してしまうことになる。したがって、不安定周期軌道の内側の領域が安定領域となる。そして、系統状態によっては従来の過渡安定度の議論によって定まる領域に比べてはるかに狭い範囲でしか安定を保てない可能性がある。このように運用点が Hopf 分岐点に近い場合には運用点の周りの周期軌道の特性を把握することが安定度解析上重要になってくる。特に、subcritical Hopf 分岐を持つ場合は運用点における大域的安定性に多大な影響を与えることになる。そこで、以下では、過渡安定度への影響が大きい不安定周期軌道に着目し、図 1 の点 C のようにシステムの動作点が Hopf 分岐点の近傍にあり、動揺の収束性が悪い状態において非線形構造を解析し、系統の過渡安定度への影響を調べる。

なお、以上で述べた特性を持つ電力系統としては、長距離大容量送電系統のように特定のモードのみが不安定となる場合が該当する。これに対して、複数のモードが不安定となる場合はより複雑な議論を必要とし、本論文での解析の対象外である。

3. 非線形構造の解析と励磁系の影響

〈3・1〉 系統モデル 解析対象として、図 2 に示すように一機の発電機だけに着目し、長距離送電線を介して電力系統網に接続されている場合を想定し、系統網の慣性定数は十分に大きく無限大母線とみなしてよいと仮定する。ただし、簡単のために、送電線および発電機巻線の抵抗は無視している。発電機のモデルは、界磁巻線の応答のみを考慮した Park の 3 次モデルである。

$$T'_{do} \frac{de'_q}{dt} = -e'_q - (x_d - x'_d)i_d + E_{fd} \cdots \cdots (1)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = -D(\omega - 1) + P_m - e_q i_q \cdots \cdots (2)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0(\omega - 1) \cdots \cdots (3)$$

ここでは、系統の諸定数として表 1 を設定し、発電機には図 3 に示す 1 次遅れで表現した AVR を考慮した。

〈3・2〉 非線形構造と系統安定度 モデル系統に対して、図 2 の×印で三相地絡事故が発生し、事故回線の遮断

図2 一機無限大母線システムモデル
Fig. 2. One machine and infinite bus system.

図3 AVRのブロック図
Fig. 3. Block diagram of AVR.

図4 分岐図
Fig. 4. Bifurcation diagram.

により故障除去された状態を想定する。まず、分岐図を描いてシステムの分岐特性を計算し、非線形構造を解析する。なお、系統の非線形分岐特性はすべて故障除去後のシステム状態に対して解析を行っている。発電機の機械入力 P_m をパラメータとして分岐特性を求めると図4のようになる。ただし、周期軌道は軌道の最大値のみを示している。分岐図より、安定平衡点の周りに不安定周期軌道が存在する subcritical Hopf 分岐であることがわかる。いま、分岐点に近い、 $P_m = 0.81$ (p.u.) において運転している状態を想定する。このときの不安定周期軌道を δ - ω 平面上に表すと図5のようになる。なお、ここで求めた分岐図および周期軌道は、汎用の非線形特性解析プログラム⁽⁶⁾を用いて計算した。図5には、事故発生後 0.092 sec で事故除去を行った際の系統の軌道も示してある。周期軌道内の安定領域内で事故除去を行い、その後は軌道の内側に捉えられているため、その状態を見る限りでは安定であると判断されるにもかかわらず、軌道付近を回りつつ徐々に動揺が大きくなっていき、周期軌道外に出てやがて脱調する。このように、 δ - ω 平面上に描いた不安定周期軌道が必ずしも安定領域を正確には表現していないことがわかる。

この原因は、主に励磁系の影響によるものと考えられる。発電機の動特性は状態変数 δ , ω によって代表される回転子の動揺特性、電機子巻線の特性、制動巻線の特性、界磁

図5 位相特性
Fig. 5. Phase characteristic.

図6 δ - ω - e'_q で見た位相特性
Fig. 6. Phase characteristic in δ - ω - e'_q space.

巻線の特性によって表現される。本論文で述べている系統の安定性は主に回転子の動揺特性によって決まり、この応答特性と比較すると、電機子巻線や制動巻線の過渡応答は事故後短時間で終了する現象である。それに対して、界磁巻線の応答は遅いため、 δ - ω の2次元平面のみでの解析は、この e'_q の変化が反映されておらず、正しい解析を行えていないと考えられる。そこで、 δ - ω 平面上に表した図5に e'_q の変化を加え、 δ - ω - e'_q の3次元空間で系統の軌道を見ると図6のようになる。

事故の発生により、 e'_q は一時的に大きい値になり、変化の速い過渡応答を示すが、短時間の間に、システムの状態は周期軌道近辺に落ち着き、その後振動しながら(図では回転しながら)徐々に e'_q の値は大きくなる。一方、不安定周期軌道は e'_q をほぼ一定とした面上の閉曲線を表している。このように、空間内での閉曲線である不安定周期軌道からは安定性の境界線としての情報は読み取り難い。その結果、これを δ - ω 平面に投影した図5を用いると安定判別に誤差を生じる。

事故直後の短時間の過渡応答が終了し、 e'_q の変化が小さくなった状態を準定常状態と考えることにすると、この準定常状態では δ - ω 位相面の振動に対して徐々に e'_q が変化しているものと見ることができる。そこで、初期励磁電圧値をパラメータとして変化させながら幾つかの周期軌道を

図 7 不安定周期軌道
Fig. 7. Unstable limit cycles.

図 8 安定領域の比較
Fig. 8. Comparison of stability region.

求めることによって、それらの集合から安定性の境界を定義することを試みる。

4. 励磁系の影響を考慮した安定性判別法

前章の問題点を解決するためには、 e'_q の変化を考慮に入れた周期軌道を求め、徐々に変化する系統の e'_q に対応させて安定判別を行う必要がある。ここでは、 δ - ω - e'_q 空間で見た周期軌道をそのときの励磁の状態に対応した一つの準位と考える。この準位の変化は δ, ω の動的な変化に比べて十分遅く、準静的な状態である。これは、 d 軸開路時定数 T'_{do} が、一般的に大容量発電機の場合は 6 ~ 10 sec と大きいいため、 e'_q は準静的に変化すると考えることができる。従って、事故後の e'_q の過渡応答が終了した任意の時刻における系統状態を同じ e'_q の準位にある周期軌道と比較することによって正確な安定性判別を行うことが可能になると考えられる。AVR の電圧参照値 V_{ref} をパラメータとして初期励磁を変えることにより、励磁の準位が異なる周期軌道を求めた結果を図 7 に示す。 V_{ref} の変化に伴って e'_q 方向に推移した周期軌道が求められている。

図 8 の点線は、事故直後の過渡応答が終了した後、 e'_q の変化が小さくなり準定常状態となった 1.50 sec ~ 2.60 sec のほぼ一周期の軌道を δ - ω 平面上に投影して描いたものである。一点鎖線は事故軌跡と励磁の状態が等しい周期軌道

図 9 位相角動揺波形
Fig. 9. Oscillations of generator phase angle.

図 10 AVR のブロック図
Fig. 10. Block diagram of AVR.

表 2 系統の諸定数

Table 2. System constants.

Generator: Park's 3rd model, 4000MVA base			
$x_d = 1.70$ (p.u.)	$x'_d = 0.35$ (p.u.)	$T'_{do} = 4.857$ (s)	
$x_q = 1.60$ (p.u.)	$x'_q = 0.35$ (p.u.)		
$D = 2.00$ (s)	$M = 7.00$ (s)		
Transmission System: 4000MVA, 500kV base			
$x_l = 0.15$ (p.u.)	$x_{l1} = 0.43$ (p.u.)	$x_{l2} = 0.24$ (p.u.)	

(修正した周期軌道と呼ぶことにする)である。また○印の軌道は元の系統状態で求めた不安定周期軌道を δ - ω 平面上に投影したもので (図 5 と同じ)、修正した周期軌道はこれに比べてやや領域が狭くなっている。図 8 に示すように、事故後の軌跡は修正した周期軌道の僅かに外側にあるため不安定な状態に陥ったことが判断できる。元の周期軌道で判断すると安定判別を誤るが、 e'_q の状態を考慮することにより正確な安定性判別を行うことが可能になることがわかる。実際に、図 9 に示すように、次第に動揺が大きくなり最終的に発電機が脱調している。また、事故除去時間を 0.090 sec と少し早くしたときは図 8 および図 9 の実線で示すように、系統は安定となっており、正しい判定を行えていることがわかる。

5. モデル系統を対象とした幾つかの解析例

〈5・1〉 一機無限大母線系統 図 2 の系統の諸定数と AVR の特性を変えた系統について、同様の解析を行った。系統定数を表 2 に、AVR の特性を図 10 に示す。先程と同様、発電機至近端における三相地絡事故発生後の故障回線遮断を想定した。

図 11 分岐図

Fig. 11. Bifurcation diagram.

図 12 不安定周期軌道

Fig. 12. Unstable limit cycles.

事故除去後の系統状態に対して P_m をパラメータとして分岐図を描くと図 11 となり、この系統が subcritical Hopf 分岐を持つことがわかる。いま、分岐点に非常に近い $P_m = 0.56$ (p.u.) において運転している状態を想定する。このとき、 V_{ref} をパラメータとして変化させて励磁の状態が異なる不安定周期軌道を求めた結果は図 12 のようになる。図 7 に示した結果と同様に、 e'_q をほぼ一定とした周期軌道が求められていることがわかる。事故除去時間を 0.076 sec としたとき系統は不安定となり、図 13 に示すように、 e'_q の準位を対応させた軌道によって大域的安定性が失われていると判定される。なお、系統の軌跡は事故後 1.10 sec ~ 2.21 sec の軌道を示している。また、図 13 に示した安定な場合の故障除去時間は 0.074 sec である。一方、時間波形は図 14 に示すとおりで、上述の議論が正確であることを示している。

〈5・2〉 3 機串形系統 次に、多機系統への適用例として図 15 に示す 3 機串形系統に対して解析を行う。串形系統では、両端の発電機間で動揺する長周期モードが不安定になりやすく、このモードに着目した場合、これまでと同様の議論が可能になるものと考えられる。ここでは発電機のモデルを、制動巻線の応答も考慮した Park の 5 次モデルとした。発電機の各定数は表 3 に示す。また、各発電機にはそれぞれ図 16 に示す AVR を考慮している。

図 13 安定領域の比較

Fig. 13. Comparison of stability region.

図 14 位相角動揺波形

Fig. 14. Oscillations of generator phase angle.

表 3 系統の諸定数
Table 3. System Constants.

Generator: Park's 5th model. 4000MVA base		
Transmission System: 4000MVA. 500kV base		
$x_d = 1.79$ (p.u.)	$x'_d = 0.355$ (p.u.)	$x''_d = 0.275$ (p.u.)
$x_q = 1.66$ (p.u.)	$x'_q = 0.570$ (p.u.)	$x''_q = 0.275$ (p.u.)
$T'_{do} = 7.90$ (s)	$T''_{do} = 0.032$ (s)	$T'''_{do} = 0.055$ (p.u.)
$D = 2.00$ (s)	$MI = 7.527$ (s)	

前述の一機無限大母線系統の場合は無限大母線が位相角基準となっていたが、串形系統の動揺特性を議論する場合、一つの発電機の位相角を基準として設定した方が解析が容易になる。ここでは、1 番機を位相角基準に設定する。すなわち、各発電機について、 $\tilde{\delta}_n = \delta_n - \delta_1$, $\tilde{\omega}_n = \omega_n - \omega_1$ ($n = 2, 3$) として計算する。このようにして分岐特性を求めた結果、この系統が不安定周期軌道を持つことがわかった。Hopf 分岐点より少し安定側の動作点として、 $P_{m1} = 0.915$ (p.u.), $P_{m2} = P_{l1} = P_{l2} = 0.9$ (p.u.), $P_{m3} = P_{l3} = 1.25$ (p.u.) において運転している状態で、3 番機至近端における三相地絡事故を想定する。注目する長周期モードは両端の発電機間の動揺であるので、以下では 3 番機の諸量に注目して解析を行う。

これまでと同様に、励磁の状態が異なる不安定周期軌道を求めると図 17 となる。これは、3 番機の V_{ref} をパラメータ

図 15 3 機串形系統

Fig. 15. Longitudinal power system.

図 16 AVR のブロック図

Fig. 16. Block diagram of AVR.

図 17 不安定周期軌道

Fig. 17. Unstable limit cycles.

として求めた結果であるが、1 番機あるいは 2 番機の V_{ref} をパラメータとしても図 17 とほぼ同一の安定領域が得られた。図 7 や図 12 に示した一機無限大母線系統における結果では、各周期軌道の e_q' はほぼ一定で δ - ω 平面に対してほぼ水平であったのに対し、この場合は一周内で e_q' が変化する。しかし、周期軌道で囲まれた閉曲面がある励磁の状態を表す準位と見ることに変わりはなく、この 3 機系統に対しても、一機無限大母線系統の場合と同様な安定性判別を試みる。図 17 のように周期軌道が δ - ω 平面に対して傾きを持つため、安定性判別をより行いやすくするために、振動周期に同期した一定の周期で安定領域と系統状態の比較を行う方法を考える。まず、図 17 において、それぞれの周期軌道について $\omega_3 - \omega_1$ が最大のときの e_q' の値を求める。それらを ω - e_q' 平面に投影して点を結ぶと一つの曲線が得られ、これが ω 最大時において評価した安定性の境界線となる。図 18 には○印を付した実線でその結果を示し

図 18 ω - e_q' 平面における安定領域Fig. 18. Stable region in ω - e_q' plane.

図 19 励磁制御による安定化

Fig. 19. Stabilization by field control.

ている。一方、事故後の系統の動揺について、 $\omega_3 - \omega_1$ が最大値をとる時点での e_q' を求め、これを上記の ω - e_q' 平面上に描いて安定性の境界線との位置関係を比較することにより、その時点での系統の安定度を評価する。すなわち、境界より ω の値が小さい領域は安定平衡点を含む側で、系統状態がここにあり、安定と判断される。また、 ω の値が大きい領域は不安定平衡点を含む側で、系統状態がここにあり、不安定と判断される。安定性の境界線と事故後の系統が安定および不安定な場合の ω の最大値の軌跡を図 18 に示す。ただし、安定な場合の事故除去時間は 0.101 sec で、不安定な場合は 0.103 sec である。

このように求めた安定領域を用いることで図 18 に示したように、 $\omega_3 - \omega_1$ が最大値をとる時点での e_q' を求めて、その状態をプロットして安定限界曲線との距離から系統の安定度余裕を評価できる。また、この図から系統を安定にする制御として、励磁状態を上昇させ、系統の状態を図中の上方に推移させればよいことが示唆される。そこで、系統状態が不安定領域に入ったと判定された時点で、3 番機の AVR の電圧参照値 V_{ref} を初期設定値の 1.00 (p.u.) から 1.01 (p.u.) に制御することによって e_q' を上昇させた場合のシミュレーション結果を図 19 に示す。制御によって安定な領域へ状態が移行したことがわかる。なお、図 20 は、その時の位相角動揺波形を示している。

図 20 位相角動揺波形

Fig. 20. Oscillations of generator phase angle.

6. む す び

本論文では、励磁系の動作による系統の状態変化に対して、Hopf 分岐理論に基づく非線形周期軌道が変化するものと考え、時々刻々変化する系統の状態に周期軌道に対応させることにより、正確な安定領域を求める手法を提案し、モデル系統への適用を行い、シミュレーションによる評価を行った。以下に、結論を要約する。

- (1) 位相面解析による過渡安定度評価における問題点を指摘し、励磁系の影響を考慮に入れた非線形周期軌道を導出した。そして、励磁の変化に伴い周期軌道も変化すると考え、励磁の状態に対応させた周期軌道との比較による安定性判別の手法を提案した。
- (2) 長距離大容量送電系統モデルに対して、求めた安定領域をシミュレーションによって評価し、提案手法の有効性を確認した。
- (3) 多機系統への応用として、3 機串形系統に対して励磁の状態を考慮した安定領域を求め、そこから、発電機の位相角速度と e'_q に着目した安定判別法を提案した。

本研究の遂行にあたり科学研究費補助金基盤研究(c)(2)(No.12650277)の補助を受けたことを記し、謝意を表したい。

(平成 13 年 2 月 27 日受付, 同 13 年 7 月 19 日再受付)

文 献

- (1) C.D.Vournas, M.A.Pai and P.W.Sauer: "The effect of Automatic Voltage Regulation on the bifurcation evolution in power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.4, Nov. 1996, pp.1683-1688
- (2) 川崎光喜・苗 沛耘・今村 司・三谷康範・辻 毅一郎: 「非線形動的システム理論に基づく発電機動揺の動特性解析」電気学会論文誌 B, Vol.120-B, No.3, pp.325-332, 2000
- (3) 天野博之・熊野照久・井上俊雄・谷口治人: 「電力系統における振動現象のホップ分岐理論による安定性判別」電気学会論文誌 B, Vol.121-B, No.6, pp.708-714, 2001
- (4) J.Guckenheimer, P.Holmes: "Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields", Applied Math-

- ematical Sciences 42, Springer-Verlag, New York, 1983
- (5) S.Wiggins: "Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos", Springer-Verlag, New York, 1990
- (6) E.J.Doedel, A.R.Champneys, T.F.Fairgrieve, Y.A.Kuznetsov, B.Sandstede, X.Wang: "AUTO97: Continuation and bifurcation software for ordinary differential equations (with Hom-Cont)", February, 1997

渡 邊 政 幸 (学生員) 2001 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程に進学, 現在に至る。主に電力系統の非線形解析に関する研究に従事。

三 谷 康 範 (正員) 1986 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1988 年同大学低温センター助手, 同工学部電気工学科講師を経て, 1994 年同助教授, 現在に至る。1994 年 California 大学 Berkley 校客員研究員。主に電力系統の動特性解析, 系統安定化制御に従事。工学博士。システム制御情報学会, IEEE 等の会員

辻 毅 一郎 (正員) 1968 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1973 年 6 月 Case Western Reserve 大学大学院システム工学専攻博士課程修了。同年 8 月大阪大学工学部電気工学科助手, 同講師, 同助教授を経て, 1988 年 12 月同教授。この間, 一時国際応用システム分析研究所 (IIASA) 研究員。Ph.D.。主に応用システム分析に従事。エネルギー資源学会, IEEE 等の会員