ガス遮断器開閉極位相制御装置の開発

正員 蔦田 広幸 正員 平位 隆史 正員 香山 治彦
正員 伊藤 弘基 正員 宇佐美 照夫 (三菱電機)

Development of Synchronous Switching Controller for Gas Circuit Breakers.

Hiroyuki Tsutada, Takashi Hirai, Haruhiko Kohyama,
Hiroki Itoh, Teruo Usami (Mitsubishi Electric Corporation)

Synchronous switching controller (SSC) for gas circuit breakers (GCB) has been developed. SSC is able to close and open a GCB at the appropriate point on wave for minimizing the switching surges. This paper proposes the new synchronous switching algorithm to minimize the control delay time, and the control error for the desired point on wave. New algorithm for (1) detecting voltage and current zero crossing points and (2) predicting the next operation time of GCB is introduced. 145kV GCB with SSC built in new algorithm has been tested several condition. SSC performed well from -30 degrees C to 60 degrees C at various control voltage condition and the standard deviation from the target phase is within 0.5msec. And the closing at two target points with voltage zero and peak works well in a capacitive load circuit at 145kV.

キーワード：開閉極位相制御，ガス遮断器，コンデンサバンク開閉，シャントリアクトル開閉

Keywords: controlled switching, gas circuit breaker, capacitor bank switching, shunt reactor switching

1. まえがき

ガス遮断器開閉動作時に発生する過電圧および過電流は機器の寿命・絶縁耐力・系統電圧の安定性に影響を及ぼすことが知られている⁽¹⁾。例えば、無負荷変圧器の励磁投入時に遮断器の投入位相によっては過大な励磁突入電流が発生し、これに伴う系統電圧の変動、保護リレーの誤動作等を誘発する可能性がある。また、調相用リアクトル遮断時には、遮断器極間の再発弧により遮断器電極の消耗量の増加や、過大な再発弧過電圧が発生する可能性がある⁽²⁾。これらの遮断器開閉時の過電圧・過電流は、遮断器を系統電圧または電流の特定位相において開閉することにより抑制することができる⁽³⁾。このような方式を遮断器開閉極位相制御方式と呼んでおり、90年代後半から欧米を中心に急速に普及してきている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

通常、制御室からの開閉極指令が遮断器の操作コイルを直接駆動することで開閉動作を開始し、一定時間経過後に主回路接点を開閉する（以下、この時間を開閉極時間と呼ぶ）。これに対して開閉極位相制御では、系統電圧または電流の目標位相において主回路接点を開閉させるため、開閉極指令が入力されると、目標位相から予測される開閉極時間だけさかのぼった時点で、操作コイルを駆動させて開閉動作を行う。つまり指令入力から操作コイルを駆動させて開閉動作を開始させるまでの時間（以

下、同期遅れ時間と呼ぶ）を変化させることで開閉位相の制御を行っている。

制御という観点から見ると、制御による遅れ時間である同期遅れ時間を小さくすることは重要な課題である。そこで本報告では、開閉極位相制御を行う上で、同期遅れ時間を小さくする方式を提案する。

また、制御精度を向上させることも重要な課題である。開閉極位相制御の制御精度は、目標位相を決定する際の基準となる系統電圧または電流位相の検出精度、周囲温度・制御電圧等の遮断器環境条件により変化する開閉極時間の予測精度、及び遮断器の機械的動作ばらつきに依存している。本報告では、目標位相検出の基準となる系統電圧または電流の零点を精度良く検出する方式、及び遮断器の開閉極時間を精度良く予測する方式を提案する。

また、提案したアルゴリズムを実装した開閉極位相制御装置（Synchronous Switching Controller: SSC）を開発し、開閉試験及び投入・遮断試験を行ったので、その結果について報告し、提案するアルゴリズムの有効性及びSSCの性能について示す。

2. 開閉極位相制御方式について

<2.1>開極位相制御 開極位相制御の方式について図1のフロー及び図2のタイムチャートを用いて説明する。開極の場合は機械的な開極以前にプレアークの発生によ

り電氣的な通電，すなわち投入が行われるので，ブレイクの発生点（投入点）を目標位相に制御することが要求される。零点から時間 T_{phase} だけ経過した目標位相 t_{make} で投入するには，目標位相からブレイク時間 T_{arc} を考慮した予測投入時間 T_{making} 以前に，遮断器操作装置を駆動させる信号である閉極制御信号を出力すればよい。

図1 位相制御フロー

Fig.1. Flow chart of synchronous switching.

図2 閉極位相制御タイムチャート

Fig.2. Time chart of controlled switching (close).

制御装置に時刻 t_{com} で閉極指令が入力されると，遮断器閉極時間である予測閉極時間 $T_{closing}$ を動作環境条件に基づいて予測し，あらかじめ求めておいたブレイク時間 T_{arc} を差し引いて予測投入時間 T_{making} を求める（動作時間の予測方法については4章を参照）。

次に，目標位相から T_{making} 手前の時点 t_{cc} で閉極制御信号が出力されるように，閉極制御信号の出力を遅らせる時間幅であるディレイ時間 T_{cont} を計算し，これを制御装置のタイマにセットする。以上の計算はマイクロプロセッサで計算時間 T_w 以内に行うようにする。計算時間 T_w が経過するとタイマをスタートさせて，ディレイ時間 T_{cont} が経過した時点 t_{cc} で閉極制御信号を出力させて T_{making} 経過後の目標点 t_{make} で投入させる。従って，制御装置の同期遅れ時間は $T_w + T_{cont}$ となる。

<2.2>ディレイ時間の算出 ディレイ時間 T_{cont} を算出するため，閉極時は極間電圧の零点，開極時は主回路電流の零点を基準として用いる。本方式では開閉極指令入力の有無に関わらず常に零点を検出しておき，指令が入力された時点で最近の零点時刻 t_{zero} を用いて直ちに T_{cont} を計算する（零点の検出方法については3章を参照）。

零点時刻 t_{zero} ・指令入力時刻 t_{com} ・閉極制御信号出力時刻 t_{cc} 及び計算時間 T_w を用いると式(1)の関係となる。

$$T_{cont} = t_{cc} - t_{com} - T_w = (t_{cc} - t_{zero}) + t_{zero} - t_{com} - T_w \quad (1)$$

一方，目標位相で投入するために，閉極制御信号出力時刻 t_{cc} と零点時刻 t_{zero} との差が満たすべき条件は式(2)で示され，(1)(2)を用いてディレイ時間 T_{cont} が式(3)で得られる。

$$(t_{cc} - t_{zero}) = \frac{1}{2f} n - ((T_{making} - T_{phase}) \bmod \frac{1}{2f}) \quad (2)$$

$$T_{cont} = \frac{1}{2f} n - ((T_{making} - T_{phase}) \bmod \frac{1}{2f}) + t_{zero} - t_{com} - T_w \quad (3)$$

ただし， f は系統の周波数(Hz)， T_{phase} は零点と目標位相との時間差， $(A \bmod B)$ は A を B で割った剰余， n は $T_{cont} \geq 0$ かつ T_{cont} が最小となる整数値とする。

従来より提案されている方法では，開閉極指令が入力されてから次の零点を検出し，これを基準としてディレイ時間を変化させて位相制御を行っていたので，開閉極指令のタイミングによっては零点検出までの間にむだ時間が存在し，結果として同期遅れ時間が大きくなるという問題があった(6)(7)。本方式では，計算時間 $T_w \approx 0$ の時，どのようなタイミングの開閉極指令入力に対しても，半サイクル以下の同期遅れ時間で遮断器に開閉極制御信号を出力することが可能である。

<2.3>開極位相制御 次に開極位相制御方式について図3のタイムチャートを用いて説明する。開極の場合は，アーク時間を制御することが求められる。アーク時間とは，接点が機械的に開離してから実際に電流遮断される電流零点までの時間であり，これを制御するには機械的な開極点を目標位相に制御する必要がある。零点から時間 T_{phase} だけ経過した目標位相 t_{make} で開極するためには，目標位相より予測開極時間 $T_{opening}$ 以前に，遮断器操作装置を駆動させる信号である開極制御信号を出力すればよい。計算方法は閉極の場合と同様である。

図3 開極位相制御タイムチャート

Fig.3. Time chart of controlled switching (open).

3. 零点検出方式

前述したように，開閉極位相制御における目標位相の

基準として電圧または電流信号の零点を用いている。そのため位相制御の精度を向上させる上で、零点を精度よく検出することは重要である。本章では、通常開閉時における零点検出方式について検討した結果を述べる。

<3.1>検出フロー 零点検出の精度を低下させる要因として以下のような項目が想定される。

- (1) 測定系に重畳するホワイトノイズ
- (2) 測定系・原信号に重畳するインパルスノイズ
- (3) 測定系に重畳する高調波

これらを除去する目的で、図4に示す検出フローで測定信号から零点検出を行った。

図4 零点検出フロー

Fig.4. Flow of detecting zero crossing points.

(2)については、発生するインパルスノイズの周波数帯域はMHz帯域のものが大半であり減衰時間も短いので、ヒゲ状のノイズとなる。これを取り除くことを目的として中央値フィルタを前処理として施した。

(3)については、対象遮断器の周辺機器により測定系に3次及び5次高調波が最大5%程度重畳することが考えられるが、この場合においても位相制御精度を定格として保証する必要がある。位相情報が重要であるため、直線位相特性を持ちながら高調波成分を除去することが可能なFIRローパスフィルタを使用した。これにより(1)の影響も低減される。

以上のようにフィルタリングされた波形が、ゼロクロスする前後のサンプリング点を逐次検出し、サンプリング点間を直線内挿することで零点時刻を検出する。

<3.2>検出シミュレーション 前記零点検出方式の妥当性を検証するために、60Hz基本波に3次高調波5%と5次高調波5%をランダム位相で重畳させて波形を作成し、零点検出のシミュレーションを行った。

図5 高調波重畳時の零点検出結果

Fig.5. Result of detecting zero crossing points.

上記条件下では、元信号の零点は基本波零点に対して最大 $\pm 0.26\text{msec}$ ($\pm 6.69^\circ$) 変動するが、本手法適用後の零点検出誤差は $\pm 0.07\text{msec}$ ($\pm 1.46^\circ$) 以下となることを確認した。本手法により、高調波重畳時においても $\pm 0.1\text{msec}$ 以下の精度で零点検出可能であることが確認された。図5に検出結果の一例を示す。フィルタにより高調波成分が除去された波形から精度よく零点が検出されていることがわかる。

4.開閉極時間予測

本章では、三相独立操作可能なばね操作GCBへの適用を目的として、遮断器本体の動作特性について検討を行い、それに基づいて動作時間補正方式の検討を行った結果について述べる。

<4.1>遮断器特性の検討 遮断器の操作電圧である制御電圧、及び周囲温度を変化させた時の開閉極時間の変動について検討した。供試器として三相独立操作が可能な145kV40kAばね遮断器を使用し、制御電圧及び周囲温度を変化させて開閉極時間を各20回測定した。平均特性を図6及び図7に示す。

図6 制御電圧一開閉極時間特性

Fig.6. Operating characteristics vs. control voltage.

図7 周囲温度一開閉極時間特性

Fig.7. Operating characteristics vs. temperature.

図6及び図7から、制御電圧及び周囲温度により遮断器の平均開閉極時間が変化していることがわかる。これは、遮断器操作装置の係止機構部における操作コイルの操作力や遮断器可動部の摩擦力が制御電圧及び温度に依存しているためであると考えられる。なお、組み立て条件等により各々の遮断器における平均動作速度には多少の差があるものの、同一型式の遮断器においては、制御電圧・周囲温度による開閉極時間の変化特性は各台および各相毎にはほぼ同一であることを確認している。そこで、制御電圧及び周囲温度を変数とした補正時間の関係を予め求めておき、動作時の制御電圧・周囲温度を計測して補正することで開閉極時間の予測が可能であると考えられる。

次に、遮断器の多数回動作による経時変化について検討した。前記と同型遮断器を用い、制御電圧及び周囲温度を一定として多数回動作させた時の平均開閉極時間の変化について図8に一例を示す。

図8 閉極時間の経時変化の一例

Fig.8. Example of long term closing characteristics.

図8に示されるように、経時変化により閉極時間の中心値が変化していることがわかる。このような経時変化に加え、電流開閉に伴う接点摩擦の影響や各台毎の微妙な特性差を吸収するという点で、各回の実開閉極時間を次回以降の開閉極時間予測にフィードバックすることが必要であると考えられる。

<4.2>動作時間補正方式の概要 前節の検討より、遮断器の開閉極時間は制御電圧・周囲温度・累積動作による接点摩擦・経時変化・個別の特性差等の要因により中心値が変化することがわかった。そのため、

(1) 制御電圧・周囲温度に基づいた補正時間 ΔT_{env}

(2) 過去の動作履歴に基づいた補正時間 ΔT_{const}

を開極・閉極についてそれぞれ求め、標準環境条件（＝例えば制御電圧125V・周囲温度20℃）の平均開閉極時間として与えられた標準開閉極時間 T_{std} を補正して、予測開閉極時間を式(4)により求める。

$$\text{予測開閉極時間} = T_{std} + \Delta T_{env} + \Delta T_{const} \quad (4)$$

以下に、制御電圧及び温度補正、及び動作履歴補正の詳細について述べる。

<4.3>制御電圧・温度補正 制御電圧及び周囲温度による補正時間 ΔT_{env} については、予め各動作条件における平均開閉極時間を計測し、標準開閉極時間 T_{std} に対する差の関係を図9に示すようなメッシュマップの形式で作成しておく。前節の検討より、このメッシュマップデータは同型遮断器に対して共通の変化特性として使用することができる。

開閉極指令が与えられた時点で、その時の制御電圧及び周囲温度における補正時間 ΔT_{env} をメッシュマップを用いて算出する。現在の動作条件における補正時間が存在しない場合は、現在の動作条件に最も近い4点の補正時間データから双一次補間を用いて内挿する。

図9 制御電圧・温度補正マップ

Fig.9. Calibration time map.

<4.4>動作履歴補正 投入時には主回路電流、遮断時には遮断器可動部の動作行程を表すトラベル信号に基づいて開閉極時間を各動作毎に計測し、最近10回の動作履歴に基づいて補正時間 ΔT_{const} を算出する。

ここでは主回路電流に基づいた閉極時間の算出方法についてのみ詳細に述べる。図10に示すように、投入点では電流波形に不連続点が存在する。そこで、測定された主回路電流に不連続点を強調するハイパスフィルタを施し、フィルタ後波形が閾値を超えた点を投入点として検出し、投入時間と投入位相を得る。予め対象遮断器の極間耐電圧減少率を求めておき、得られた投入位相との関係から遮断器のブレイク時間を推定する。閉極時間は、得られた投入時間に上記ブレイク時間を加えた値として算出する。

図10 投入点検出結果

Fig.10. Result of detecting making points.

以上のように計測された開閉極時間を用いて、式(5)により補正時間 ΔT_{const} を算出し、予測開閉極時間の定常誤差を開極・閉極それぞれについて補正する。

$$\Delta T_{const} = \sum w(n) \{ \text{計測開閉極時間}(n) - T_{std}(n) - \Delta T_{env}(n) \} \quad (5)$$

ただし、 n は0~9の整数値、 $w(n)$ は重み係数である。重み係数は総和が1となるように設定する。

最近の動作時データの重み係数を大きくするほど、開閉極時間の変動に対する応答性がよくなるが、開閉極時間のばらつきの影響を受けて安定性が悪くなる傾向があるため、操作装置の特性に応じた係数の設定を行う必要があると考えられる。

そこで係数間の比率である $w(n)/w(n-1)$ を係数増加率と定義し、係数増加率を変化させて計測値と予測値の誤差の標準偏差が最小となるような係数を選択することとした。係数増加率を大きくするほど、最近の動作時のデータの重み係数を大きくしていることに相当する。また係数増加率=1の場合とは、 $w(0) \sim w(9) = 0.1$ に相当する。

4.1節の検討で得られた各条件の開極時間データに対し制御電圧・温度補正を施した上で、係数増加率を様々な値に変化させて動作履歴補正の効果を調べた。予測誤差の標準偏差を調べた結果を図11に示す。

図 11 係数増加率と予測誤差

Fig.11. Predicting error characteristics vs. coefficients.

図からわかるように係数増加率を徐々に小さくしていくと、開極時間のばらつきに対する安定性が良くなり、予測誤差が小さくなっていく。しかしある程度以上小さくすると、ばらつきに対する安定性が向上するものの、逆に予測誤差が増大する。よって、このグラフの極小値を本遮断器の係数として用いれば最適な制御が行われると考えられる。

5. ハードウェア

前述したアルゴリズムを実装したSSCの外観を図12に示し、H/Wブロック図を図13に示す。SSCの主要特徴は以下の通りである。

- (1) 指令入力部及び制御信号出力部を3相分(6点)備え、各相毎に開閉極タイミングの制御を行うことが可能。

- (2) 32ビットデジタルリレー用CPUを採用し、高い信頼性を確保するとともに、制御演算・動作結果解析等を高速に実行可能。
- (3) 遮断器の動作時刻・温度・制御電圧・油圧・開閉極時間等の動作履歴、及び動作時の主回路電流・極間電圧・トラベル信号の波形及びアラーム信号をフィールドネットワークを通じて上位系PCからモニタリングが可能。
- (4) 遮断器操作ハウジングまたは現地制御盤に設置可能とするため、電氣的サージや温度変化等に対する耐環境性を確保。
- (5) コントローラ及びセンサの自己診断機能や位相制御の成否・再点弧の有無等を判定する機能を有し、異常検出時にはアラーム出力と共に装置を短絡あるいは開放で固定可能。

図12 SSC外観

Fig.12. Synchronous switching controller.

図13 H/Wブロック図

Fig.13. Hardware architecture of SSC.

6. 試験

<6.1>単体での制御性能評価 SSC単体の機能を確認するため、指令入力後、一定時間で接点のオンオフを行う遮断器模擬回路を用いて試験を行った。予め模擬回路の動作ばらつきが $1 \mu \text{sec}$ 以下であることを確認した。SSCの系統電圧及び電流入力部に60Hz正弦波の基準信号を直接入力し、目標開閉極位相を電気角0度として、ランダムなタイミングで開閉極指令を入力した時の誤差を調べた(図14)。基準となる系統電圧信号または電流信号にノイズがない条件下では、制御誤差は $\pm 10 \mu \text{sec}$ 程度であった。

図14 SSC単体での制御誤差
Fig.14. Control error of SSC.

<6.2>開閉試験 次に遮断器と組み合わせた状態で、環境条件の変動に対する制御性能を評価するため、三相独立操作可能な145kV40kAばね操作ガス遮断器を用いて開閉試験を行った。主回路にはAC125Vを印加し、制御の基準電圧とした。制御電圧一定条件として周囲温度を $-30^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ で変化させた時の制御誤差を図15、図16に示す。周囲温度一定条件で制御電圧を75V～140Vで変化させた時の制御誤差を図17、図18に示す。図中左側のプロットは誤差の平均値、上下のバーは誤差の標準偏差を示し、図中右側は全測定における誤差分布を示している。目標開閉極位相は電気角0度とした。

周囲温度・制御電圧の変動に関わらず、予測誤差は0を中心に正規分布状となっており、定常誤差もなく良好に位相制御できていることがわかる。

各動作条件における誤差の標準偏差値は、図6及び図7で示した遮断器単体での動作ばらつきとはほぼ一致していること、及び制御装置単体での動作ばらつきは $\pm 10 \mu\text{sec}$ 程度であったことから、同一環境条件において制御誤差が発生する要因の大半は遮断器本体の機械的な動作ばらつきに起因していると考えられる。本遮断器との組み合わせでは標準偏差 σ は0.5msec以下であり、CIGRE報告書⁽⁷⁾にある許容動作ばらつきの指針 $\pm 1.5\text{msec}$ を3 σ で満足していることから、開閉極位相制御を実施するための十分な性能を有しているといえる。

制御電圧一定・常温条件下（DC125V、 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ）で多数回動作させた時の制御誤差（開極時）を図19に示す。図8で述べた経時変化による開極時間の変化に対しても、定常誤差なく制御できていることがわかる。

図15 周囲温度変化時の開極位相制御誤差
Fig.15. Control error of the opening vs. temperature.

図16 周囲温度変化時の閉極位相制御誤差
Fig.16. Control error of the closing vs. temperature.

図17 制御電圧変化時の開極位相制御誤差
Fig.17. Control error of the opening vs. control voltage.

図18 制御電圧変化時の閉極位相制御誤差
Fig.18. Control error of the closing vs. control voltage.

図19 多数回動作時の開極位相制御誤差
Fig.19. Control error of the long terms opening.

<6.3>投入試験 次に実負荷での制御性能を評価するため、図20に示す回路で零点投入及びピーク点投入の試験を行った。用いた供試器は前節と同様である。遮断器の動作ばらつきとブレイク時間を考慮し、零点投入では

目標投入位相を13度、ピーク点投入では目標投入位相を86度とした。図21に零点投入の結果を示し、図22にピーク点投入での結果を示す。目標投入位相に対して最大±1msec程度の誤差であり、実負荷でも良好に位相制御できていることが確認できる。また、ピーク投入時のサージに対してもSSCが問題なく動作することを確認した。

図20 投入試験回路

Fig.20. Circuit of making test.

図21 零点投入試験結果

Fig.21. Result of synchronous closing at voltage zero.

図22 ピーク点投入試験結果

Fig.22. Result of synchronous closing at voltage peak.

7. むすび

本報告では、半サイクル以下の同期遅れ時間で位相制御可能な制御アルゴリズムを提案するとともに、制御精度を向上させる方法について検討し、提案したアルゴリズムを実装した開閉極位相制御装置について述べた。145kV遮断器に搭載して評価を行った結果、開閉極位相

制御GCBとして十分な精度を達成していることを確認した。今回検討したアルゴリズムは、主に145kVGCBにおけるコンデンサバンク・シャントリアクトルの開閉等への適用を前提として検討を行った。今後、残留磁束を考慮した無負荷変圧器投入への対応など、開閉極位相制御装置の適用範囲を拡大していく上での課題について更なる検討を行う予定である。

(平成12年9月14日受付)

文献

- (1) 尾崎：「高電圧電力工学」，電気書院，1997
- (2) CIGRE Working Group 13.02：「Interruption of Small Inductive Currents. Chapter 1 and 2」，ELECTRA, No.72, pp.73-103, 1980
- (3) E.Andersen et al.：「Synchronous Energizing of Shunt Reactors and Shunt Capacitors」，CIGRE 13-12, 1988
- (4) R.J.Majotte et al.：「Field Tests of a Circuit Breaker Synchronous Control」，IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.3, 1995
- (5) J.F.Reid et al.：「Controlled Switching Issues and the National Grid Company's Experience of Switching Shunt Capacitor Banks and Shunt Reactors」，CIGRE 13-112, 1998
- (6) 山形・戸田・熊谷・石川・西脇・横田：「ガス遮断器の開極位相制御によるシャントリアクトル電流遮断に伴う再発弧過電圧の抑制」，電学論B, Vol.112-B, No.2, 1992
- (7) CIGRE Working Group 13.07：「Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers」，13-98(WG 07)IWD 01, 1998

薦田 広幸

(正員) 1997年3月大阪大学大学院基礎工学研究科システム工学専攻修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社産業システム研究所において、プラント機器の信号処理技術に関する研究開発に従事。

平位 隆史

(正員) 1989年3月京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社産業システム研究所において、画像処理・信号処理・ネットワークシステムの産業応用に関する研究に従事。工学博士。システム制御

情報学会会員。

香山 治彦

(正員) 1991年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。

伊藤 弘基

(正員) 1984年3月東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社後、1989～1991年イリノイ大学に留学。現在、三菱電機(株)系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。工学博士。

IEEE及びCIGRE13.07「Controlled Switching」会員。

宇佐美 照夫

(正員) 1971年大阪市立大学工学部応用物理卒。1973年3月修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社産業システム研究所にてプラント機器の診断に関する研究に従事。計測自動制御学会、IEEE会員。