

制御性、安全性を追求して進化し続ける PID 制御アルゴリズム

PID Control Algorithm for Superior Control in Various Applications

中川 浩一
K. Nakagawa

垂石 肇
H. Taruishi

広井 和男
K. Hiroi

分散形制御システム (DCS: Distributed Control System) には、機能を分散して受け持つ各ステーションが制御 LAN を介して水平接続されている。その中の制御を担うコントロールステーションには各種の制御機能が搭載される。制御機能は、各メーカーの特有技術や技術開発によって差違が現れる部分であり、制御システム全体の善しあしを左右する重要な要素である。当社はファジィ制御やモデル予測制御などの制御アルゴリズムに加え、制御方法の基本である PID (比例, 積分, 微分) 制御をより深く研究し、“制御性”と“安全性”を一段と強化した PID アルゴリズム“ハイパー PID”を開発した。

ここでは、統合制御システム CIEMAC_{TM} に搭載されている PID アルゴリズム“ハイパー PID”を、制御の観点からメリットとともに解説する。ハイパー PID は、プラント運転に求められているニーズに対して、一つのソリューション (解決策) を提供するものである。

A distributed control system (DCS) consists of functional stations on a control LAN. The control stations are the most important of these stations, since they carry out the main function of the DCS, the control function, with the field input/output signals. A control function that incorporates the expertise of the DCS suppliers delivers good performance for both the control system and plant operations.

As part of its continuous research on control algorithms, Toshiba has developed a superior PID algorithm called “Hyper PID” which is suitable for various control processes. “Toshiba integrated control system CIEMAC_{TM}”, with the Hyper PID control algorithm provides the ideal solution for plant operations.

1 まえがき

制御技術は、実際にプラントから入力される制御信号を使って、現場機器に操作指示をどのように与えるかを決定するという重要な役目を担っている。オープン化が進み、ハードウェア単体の差がなくなりつつある時代において、制御技術は DCS メーカーの技術力の差が出る技術の一つである。制御技術は、優れた制御という魅力のあるメリットをユーザに提供する。

制御技術には、PID 制御・予測制御・ロバスト制御などの手法や、ファジィ・ニューラルネットワークなどの人工知能技術を補助的に用いる手法などさまざまな技術があり、当社もこれらの技術を精力的に開発し、製品化を行っている。

ここで紹介する“ハイパー PID”は、数多く存在する制御技術の中の一つである PID 制御において、当社の特有技術を組み合わせた PID 制御アルゴリズムであり、優れた制御特性の実現と安定適用範囲の広さが大きな特長である。

2 ハイパー PID

プラント制御でもっとも多用されている制御方法は PID

制御である。PID 制御はもっとも基本的な制御方法であり、制御偏差に対し PID の三つの制御動作による制御演算を行い、各出力を加算合成したものである。

プラント運転制御システムにおいて、PID 制御は 90 % 以上の制御系で用いられており、PID 制御を高度化してゆくことはプラント運転性能改善のための策の一つといえる。

このような背景から、統合制御システム CIEMAC_{TM} においては、ファジィ制御やニューラルネットワーク、モデル予測制御などをラインアップするとともに、PID アルゴリズムとしては“ハイパー PID”を標準搭載している。このハイパー PID は、従来に比べて優れた“制御性”と“安全性”を提供する。ハイパー PID は、次の三つの当社特有技術を組み合わせたものである。

- (1) スーパー 2 自由度 PID
- (2) 本質継承・速度形デジタル PID 演算方式
- (3) 改良形デジタル微分

それぞれについて詳細を解説する。

2.1 スーパー 2 自由度 PID

制御には、外乱が入ったときに外乱の影響を小さく抑える“外乱抑制”と、設定値が変更されたときに制御量を的確かつ迅速に設定値へ近づける“目標値追従”という二つの基本機能がある。しかし、これらの機能は同じ制御系内

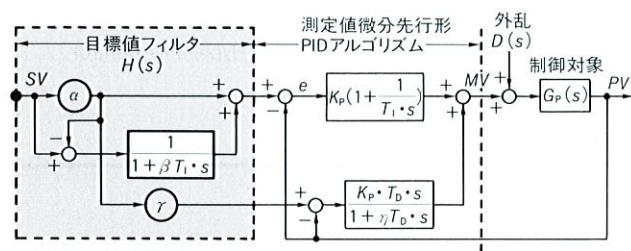
で同時に最適化する必要があるにもかかわらず、単純PID制御においては最適化の両立ができなかった。

そこで、この両立を実現するために考え出されたアルゴリズムが2自由度PIDである。2自由度PIDは従来のPIDパラメータとは別の組のパラメータを用意し、パラメータの最適設定によって外乱抑制最適と目標値追従最適を両立させるものである。しかし、従来の2自由度PIDには、PID制御に付加する補償が複雑であるという難点があった。

スーパー2自由度PIDはこの点を改善し、1個の時間補償要素の付加で完全2自由度を実現したアルゴリズムである。図1にスーパー2自由度PIDの機能構成を示す。

スーパー2自由度PIDを用いた場合の制御特性を図2に示す。設定値(SV)の変更および外乱(D)混入時に最適かつ迅速にプロセス値(PV)が設定値に整定(合致し、安定に保たれた状態)していることがわかる。

また、スーパー2自由度PIDは、2自由度化係数(α, β, γ)の設定によって、現存するすべてのPIDを実現できる“統合形PID”という特長も兼ね備えている。



SV: 設定値 MV: 操作量 PV: プロセス値
e: 制御偏差 K_p : 比例ゲイン T_i : 積分時間 T_d : 微分時間
s: ラプラス演算子 α, β, γ : 2自由度化係数 η : 微分係数

図1. スーパー2自由度PID機能構成 時間補償要素を一つ付加することで、外乱抑制最適と目標値追従最適の両立が実現できる。

Functional block diagram showing super two degrees of freedom PID with 1st lag

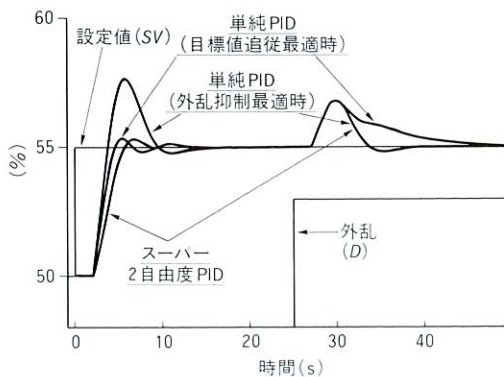


図2. 単純PIDとスーパー2自由度PIDの応答比較 スーパー2自由度PIDでは、外乱抑制最適と目標値追従最適が両立されている。

Trace graph of super two degrees of freedom PID

2.2 本質継承・速度形デジタルPID演算方式

統合制御システムCIEMAC_{TM}における制御演算は、前回の出力値に変化分信号(速度形制御信号)を加算して今回値を求める速度形PID演算を行っている。もし、操作量が上下限や変化率制限に抵触した場合は、比例動作と微分動作に対する速度形制御信号は切り捨てないで、積分動作に対する速度形制御信号だけを切り捨てるといった信号処理を行わなければならない。このアルゴリズムを本質継承・速度形デジタルPID演算方式と呼んでいる。このアルゴリズムの適用によって、制御偏差が急変したときや制限値近傍の操作量で制御している際の不安定な制御動作を引き起こす原因が除去されることになる。

本質継承・速度形PIDを用いた場合の制御特性を図3に示す。操作量(MV)が上制限100%の近傍を推移しながら、設定値(SV)に対してプロセス値(PV)が追随している例である。整定途中で設定値を大きく下方に変化させたとき、このアルゴリズムを適用しない場合には、比例動作と微分動作のマイナスの信号がそのまま出力されるために操作量が減少するという誤った制御動作を起こしていることがわかる。しかし、このアルゴリズムを適用した場合には影響が出ないことがわかる。

さらに、このアルゴリズムの適用により、操作量が上下限や変化率制限に抵触した場合の不安定な制御動作も解消される。

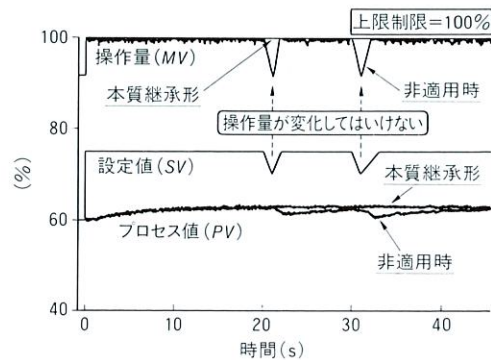


図3. 本質継承・速度形デジタルPID演算方式の動作 PID制御の安全性が高まるため、適用範囲が広がる。

Trace graph of velocity type PID proper

2.3 改良形デジタル微分

微分動作は、むだ時間を含む制御系の応答性改善に威力を発揮する。しかし、微分演算をデジタル近似する場合、各種の離散化方式や省略近似がなされ、制御周期(Δt)と微分時間(T_d)の組合せによっては、微分動作の安定適用領域が変動し、微分動作を入れると逆に不安定になるケースがあり、微分動作は必ずしも十分活用されているとは言えない。

い状況にあった。そこで、各種離散化方式の比較検討を行い、安定適用領域を拡大した改良形デジタル微分を生み出した。

統合制御システム CIEMAC_{TM}では、後退差分方式あるいはさらに改良を加えた改良形双一次変換方式のデジタル微分アルゴリズムがコントローラに搭載されている。

(1) 後退差分方式

$$d_n = d_{n-1} + \frac{T_D}{\Delta t + \eta T_D} (e_n - e_{n-1}) - \frac{\Delta t}{\Delta t + \eta T_D} \times d_{n-1}$$

(2) 改良形双一次変換方式

・ $\Delta t \leq 2 \eta T_D$ のとき

$$d_n = d_{n-1} + \frac{2 T_D}{\Delta t + 2 \eta T_D} (e_n - e_{n-1}) - \frac{2 \Delta t}{\Delta t + 2 \eta T_D} \times d_{n-1}$$

・ $\Delta t > 2 \eta T_D$ のとき (完全微分形)

$$d_n = d_{n-1} + \frac{T_D}{\Delta t} (e_n - 2 e_{n-1} + e_{n-2})$$

d : 微分出力, e : 制御偏差, η : 微分係数

改良形双一次変換方式では、不完全微分と完全微分を使い分けることにより、双一次変換方式がもつ固有の振動領域を避けて、安定適用範囲の拡大を図っている。

図4に各種デジタル微分の安定適用領域の比較を示す。前進差分方式に対し、後退差分方式で約2.6倍、改良形双一次変換方式では約8倍に適用領域が広がり、さまざまな制御系で安定した微分動作の適用が可能になる。

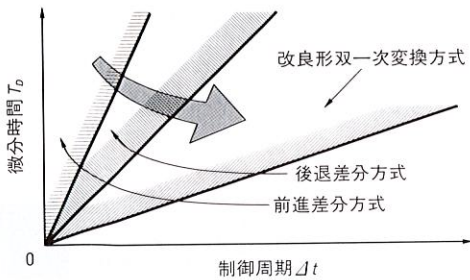


図4. 各種デジタル微分の安定適用範囲 前進差分方式, 後退差分方式, 改良形双一次変換方式の順で安定適用範囲は広がる。

Stable area applying digital derivative action

3 ハイパー PID の適用によるメリット

ハイパー PID は、これまで述べてきたようにコントローラの機能・性能を最大限に引き出すだけでなく、プラントの運転面においても大きな効果を発揮することができる。

3.1 制御機能に対するメリット

- (1) 制御パラメータの決定が容易になるため、チューニング作業を簡素化・効率化できる。
- (2) PID 制御を安全に適用できる範囲が広がるため、PID で自動制御できる制御系が増える。

3.2 プラント操業に対するメリット

プラント全体の制御系にハイパー PID を適用することにより、個々の固有効果およびそれらの相乗効果によって、次のメリットが得られる。

- (1) 省エネルギー・省力化が可能となる。
- (2) 原単位の削減と生産効率の向上が見込める。
- (3) 生産品の高品質化と均一品質が向上できる。さらにマクロ的な見地から、次のことが期待できる。
- (4) プラント全体の制御性の高度化
- (5) 本格的フレキシブル運転への対応

このように、プラント制御システムにハイパー PID を全面的に適用すれば、数多くのメリットが得られる。

4 あとがき

統合制御システム CIEMAC_{TM}に標準搭載されている PID 制御アルゴリズム“ハイパー PID”を紹介した。“制御”という本来の製品目的において、従来製品と比較した場合に優位になる技術であると考えている。

しかし、PID アルゴリズム改良の追求にゴールはない。制御性、安全性、調整の容易さなどを、さらに高度化する新しい技術開発をさまざまな角度から続けており、その成果を速やかに製品に反映していきたい。

文献

- (1) 広井和男: 計装・電気・計算機技術者のための実戦デジタル制御技術, 工業技術社 (1992)
- (2) 広井和男, 他: ハイパー PID (HYPER PID), 計測技術, 2-4月号 (1997)
- (3) 特許第 2531796 号「調節装置」



中川 浩一 Koichi Nakagawa

電機計装機器事業部 電機計装機器プロダクトマーケティング部。制御システムの企画・立案に従事。計測自動制御学会会員。

Control & Instrumentation Div.



垂石 肇 Hajime Taruishi

府中工場 マイクロエレクトロニクスシステム機器部主務。制御システムの開発に従事。計測自動制御学会会員。

Fuchu Works



広井 和男 Kazuo Hiroi

府中工場 技監。制御アルゴリズムおよび制御システムの開発に従事。計測自動制御学会フェロー。

Fuchu Works