

高機能制御方式“SNAC”と その火力プラント蒸気温度制御への適用

Method of Simple Nonlinear Adaptive Control “SNAC” and
Its Application to Steam Temperature Control of Thermal Power Plant

エレクトロニクス事業部 藤原 敏 勝*¹ 野村 真 澄*²
神戸造船所 宮川 裕 和*³ 平 山 裕*⁴

制御方式を実用化する場合、非線形な多変数系が扱え、プラントの経時変化にも耐え、かつ高制御性能が得られることが重要である。そこで、それらの機能を備えた高機能制御方式を提案した。本方式は、制御偏差が大きいときには、制御ゲインを大きな値に持続させて積極的な制御を行い、その結果、制御偏差が小さくなると制御ゲインを元の小さな値に戻して、定常状態の安定化を図るものである。また、目標値変化時と外乱変化時を識別して制御機能を変えられる2自由度形である。本方式の有効性を、シミュレーション計算及び火力プラントの蒸気温度制御の実機試験で確認した。

For practical use of control, it is important that a multi-variable system can be used, that it is available when the performance of a plant varies, and that high controllability can be performed. Therefore, we have proposed a Simple Nonlinear Adaptive Control “SNAC” method to comply with the above requirements. In this method, when control errors are high, active control is done by maintaining a high control gain. Accordingly, if control errors become small, the stability of the steady state can be done by changing the control gain to the original low value. Furthermore, it has two degrees of freedom in which control functions can be changed by discriminating between changes of set values and of disturbances, and it is possible to apply differential functions without derivative elements. The effectiveness of the proposed method has been confirmed by simulation and field testing of steam temperature control in a thermal power plant.

1. ま え が き

実機を制御する場合、非線形かつ多変数系の問題に遭遇する。また、経時変化に耐える必要もある。そこで、ここでは非線形な多変数系に対応でき、かつ経時変化に耐える単純適応制御方式⁽¹⁾をベースにした新しい制御方式を提案する。そして、提案方式を高機能制御方式(SNAC)と名付ける。SNACとは、Simple Nonlinear Adaptive Controlの頭文字を取ったものである。この方式は、従来の単純適応制御方式⁽¹⁾に比べて制御方式を簡易化した点^{(2)~(5)}、目標値変化と外乱変化を識別して制御機能が変えられる2自由度形にした点、PI調節器を含めた点に特長を持つ。なお、この方式は、プロセス⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾及びサーボ系⁽³⁾の全体に有効であるが、ここでは、プロセスを対象とした場合のシステム構成、原理とその有効性を示すシミュレーション計算、火力プラントの蒸気温度制御の実機試験結果を述べる。

2. 高機能制御方式(SNAC)

2.1 原 理

本方式は、従来の単純適応制御方式に比べて制御方式を大幅に簡単にしている。従来の方式は目標値追従型の制御であるために、それに必要な規範モデルを採用する必要があり、それに伴い、制御偏差、規範モデルの状態変数及び目標値の各変数を使って可変ゲインを決定するために回路が複雑である。そこで、ここでは規範モデルを使わずに、しかも最小限に必要とされる制御偏差のみを可変ゲイン決定のために使用した。また、従来の方式では比例及び積分的な作用によりゲインを決めていたのに対して、本方式は積分的な作用のみでゲインを決めている。このような対策を取ることで多変数系の際の回路構成は極端に単純化される。

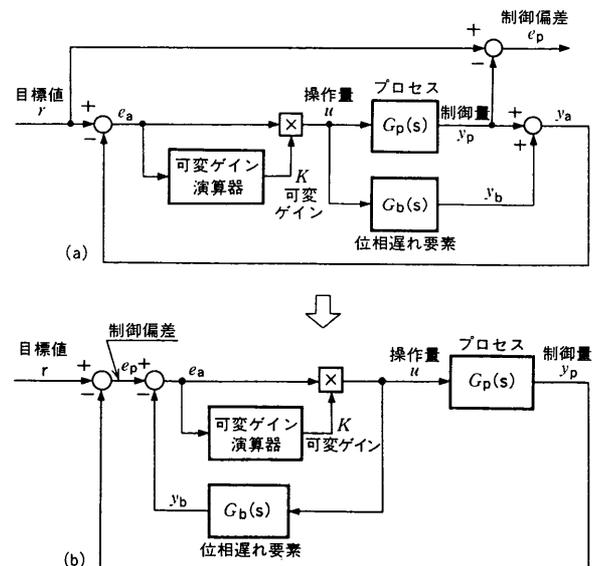


図1 SNACの基本原理解説図 (a)は高機能制御方式の基本的な構成図を示し、(b)は(a)の等価変換図。
Fundamental principle of SNAC

まず、本方式の基本的な原理を述べる。

図1(a)に示すように、プロセスに並行して伝達特性が $G_b(s)$ の位相遅れ要素を配置する。そして、プロセスの制御量 y_p と $G_b(s)$ の出力 y_b を加算して得られる拡張したプラントの出力 y_a を目標値 r になるように制御する。そのとき、ゲイン K は可変で、拡張したプラントの出力 y_a と目標値 r の差 e_a により後述の方法で求める。ここで、注意しなければならない点は、図1(a)は拡張したプラントの出力 y_a を目標値 r に追従させる系になってお

*1 開発・製造部主査 工博

*3 原動機技術部電気・制御設計課長

*2 開発・製造部制御システム二課

*4 原動機技術部電気・制御設計課

り、本来の制御偏差 e_p を制御する系にはなっていない。そこで、図1(a)を等価変換して図1(b)の構成にする。なお、等価変換した際の関係式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} y_a &= y_p + y_b \\ y_b &= G_b(s) u \\ e_a &= r - y_a \\ e_p &= r - y_p \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、

$G_b(s)$: プロセスをバイパスするために設けた位相遅れ要素の伝達特性

y_p : 制御量

y_b : 操作量 u を入力したときの $G_b(s)$ の出力

y_a : 拡張したプロセスの制御量

r : 目標値

e_a : 拡張したプロセスの制御偏差

e_p : 制御偏差

s : ラプラス演算子

以上の関係式より

$$\begin{aligned} e_a &= r - y_a \\ &= r - y_p - y_b \\ &= e_p - y_b \\ &= e_p - G_b(s) u \end{aligned} (2)$$

が得られる。したがって、図1(a)を図1(b)のように等価変換できる。

まず、SNACの基本的な特性を把握するために、図1(b)において、 e_p と u の間の伝達特性を誘導する。

ここで、 $G_b(s)$ として種々な特性が考えられるが、本方式では2次微分の効果を得るために次式を位相遅れ要素の伝達特性とする。

$$G_b(s) = \frac{1}{2 k_{max}} \left[\frac{1}{1 + \tau s} + \frac{1}{(1 + \tau s)^2} \right] (3)$$

このことにより、 e_p と u の間の伝達特性 $G_c(s)$ は、次式になる。

$$G_c(s) = \frac{k_{max}(1 + \tau s)^2}{\left(\frac{k_{max}}{K} + 1\right) + \left(\frac{2k_{max}}{K} + 0.5\right)\tau s + \frac{k_{max}}{K}\tau^2 s^2} (4)$$

そこで、式(4)において $K \rightarrow \infty$ にすれば、

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{k_{max}(1 + \tau s)^2}{1 + 0.5\tau s} \\ &= k_{max}(1 + \tau s) \frac{1 + \tau s}{1 + 0.5\tau s} \end{aligned} (5)$$

の関係が得られる。すなわち、 k_{max} 及び τ の値は指定値であり、SNACは K の値が無限大になっても定常ゲインは k_{max} を超えることはない。また、式(5)から分かるように位相遅れ要素を配置した回路にもかかわらず、SNACとしては1次遅れ特性のフィルタが付いた2次進み特性が得られることになる。

次に、式(4)において、 $k_{max} \gg k_{min}$ の関係が満たされ、かつ $K \rightarrow k_{min}$ になったとすれば、

$$\begin{aligned} G_c(s) &\approx \frac{k_{min}(1 + \tau s)^2}{(1 + \tau s)^2} \\ &= k_{min} \end{aligned} (6)$$

の関係を得る。すなわち、SNACは K が小さくなるに従いゲインが k_{min} の比例動作となる。なお、 k_{min} の値は指定値である。

2.2 SNACの構成及び機能

図2にSNACの概略構成図を示す。構成は、図2に示すよう

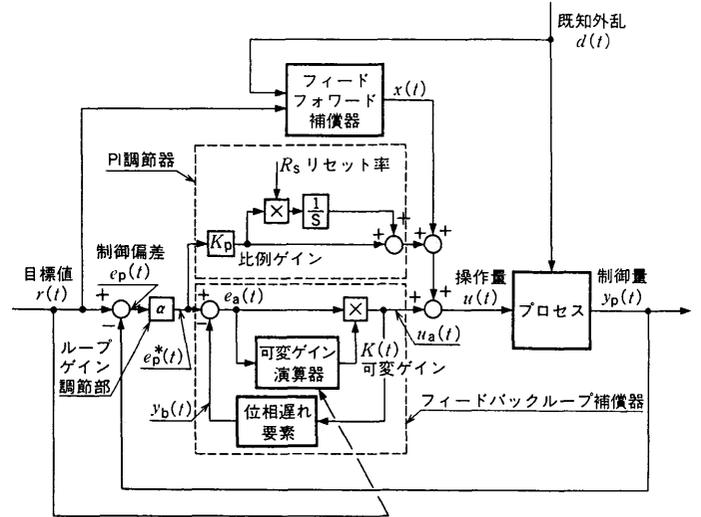


図2 SNACの概略構成図 SNACのシステム構成の概略を示すブロック線図で、多変数系の中からNo.1制御系のみを表示。
General construction of SNAC

に、フィードバックループ補償器(可変ゲイン演算器と2.1節で述べた位相遅れ要素から成る)、PI調節器及びフィードフォワード補償器から成る。ここで、PI調節器及びフィードフォワード補償器を付加している理由は、従来の方式のままでは比例動作であるため、定常偏差を零にすることができないからで、また、フィードフォワード補償器は、フィードバックによる操作量の動きを待つよりかは、フィードフォワードで概略的操作量を動かした方が制御性能が向上されるからである。

可変ゲイン演算器の出力であるゲイン $K(t)$ は、制御偏差に関連した値の自乗積分値で求められ、制御偏差のピーク値が大きいたまには、大きな値のゲインの状態が持続され、積極的な制御が行われる。その結果、制御偏差のピーク値が小さくなると同時に、ゲインは元の小さな値に戻り定常状態の安定化が図られる。すなわち、外乱があった直後の過渡状態とか目標値が変わった直後の過渡状態には、ゲインを大きくして制御偏差を抑えこみ、定常状態になればゲインを元の小さな値に戻して安定な状態を確保する。詳しくは、可変ゲイン演算器の出力 $K(t)$ の値は、図2の $e_a(t)$ の値を自乗し、そして、その値を一次遅れ特性要素を介して得られる $K_e(t)$ の値に k_{min} の値を加算して、 $K(t)$ の値を算出している。

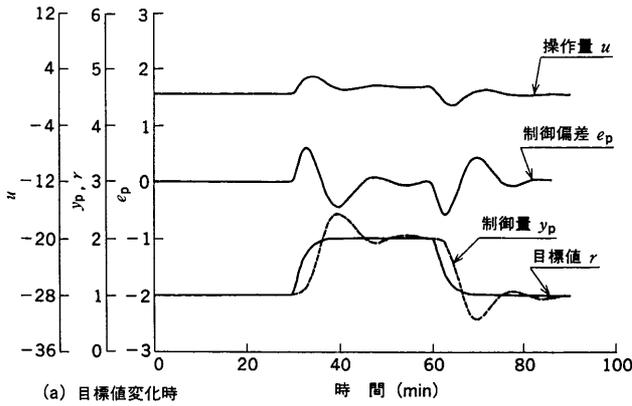
また、多変数系の場合、相互干渉を抑えるために、制御偏差の大きくなった系統のみの制御ゲイン $K(t)$ を前述の方法で大きくするだけでなく、制御偏差の少ない他の系統の制御ゲイン $K(t)$ も連動して大きく変えるようにしている。

さらに、従来の方式では目標値変化と外乱変化を識別して制御機能は変えられないが、SNACでは目標値変化と外乱変化を識別して制御機能を変えられる2自由度形にしている。すなわち、目標値変化時には、外乱変化時と比べて一般に制御偏差は大きくなるので、そのときに起こる制御ゲインの大幅な変動を抑えるために目標値変化時に修正する回路を設けている。

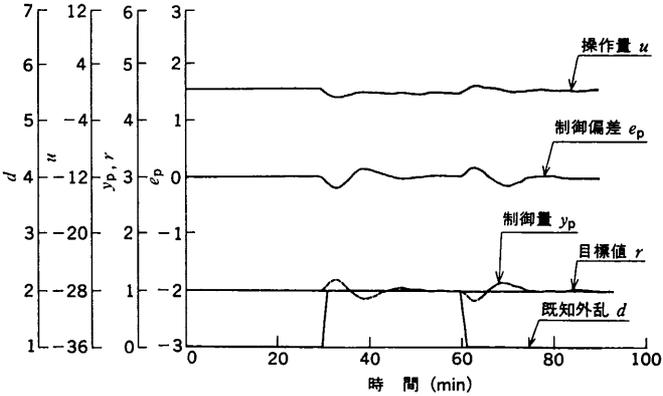
そのほか、ループゲイン調節部を設けてその値を調整員が調節することにより、SNACから見たプロセスの定常ゲインをほぼ1の値にできるようにしている。

3. シミュレーション計算結果

簡単なプロセスとして、次式の3次遅れを取り上げる。



(a) 目標値変化時



(b) 既知外乱変化時

図3 PI制御による例題計算の制御性能 (a)は目標値変化時で、(b)は既知外乱変化時を示す。制御量の目標値への追従性に注目されたい。Result of exercise by PI control (Change of set value and known disturbance)

$$y_p = 0.5(1 + T_4 s)^{-1}d + [(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + T_3 s)]^{-1}u \quad (7)$$

ここで、

- $T_1 = 1$
- $T_2 = 2$
- $T_3 = 4$
- $T_4 = 3$

前述の制御対象で、目標値及び既知外乱が増減したときのPI制御とSNACの制御性能の比較をシミュレーション計算で行った。

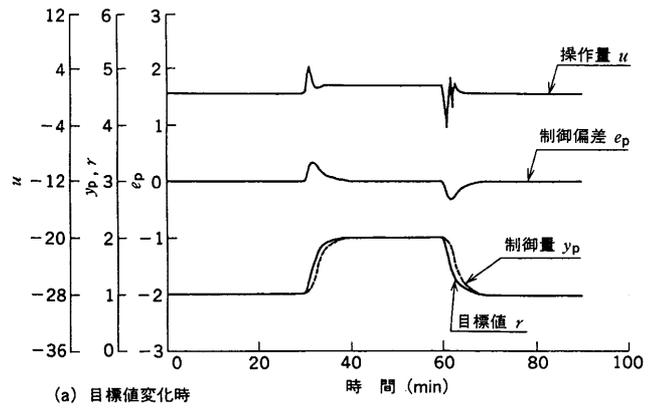
まず、PI制御の制御性能を述べる。

図3は、目標値変化及び既知外乱変化時のPI制御による制御性能の結果である。なお、PI調整器のパラメータはChien, Hrones and Reswickの手法で決めた。また、フィードフォワード補償は付加している。

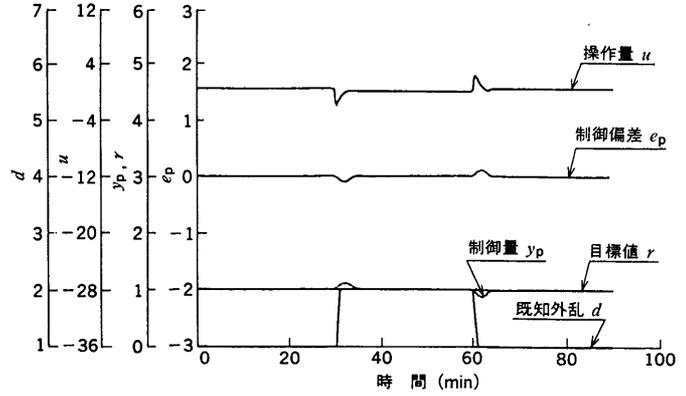
次に、SNACの制御性能を述べる。

図4は、目標値変化及び既知外乱変化時のSNACによる制御性能の結果である。

図4に示すようにSNACの制御性能が良いのは、制御偏差を自乗した値を1次遅れ特性を介して得られる値で制御ゲインを変えており、図3のPI制御の場合のように一定のゲインではないからである。すなわち、図4で制御偏差が大きいたまにはゲインが大きくなり、制御を活発にして制御偏差の変動を抑込んでいる。そして、制御偏差が小さくなった時点では指定した最小のゲインに戻ってくるために系が安定な状態となる。さらに、SNACで



(a) 目標値変化時



(b) 既知外乱変化時

図4 SNACによる例題計算の制御性能 (a)は目標値変化時で、(b)は既知外乱変化時を示す。制御量の目標値への追従性を図3と比較されたい。Result of exercise by SNAC (Change of set value and known disturbance)

は図2に示すように位相遅れ要素をフィードバックしているので微分動作的な効果が得られ、これによっても制御性能の向上が図られている。

以上の結果、SNACの方がPI制御に比べて格段に制御性能は良く、SNACの有効性は明らかである。

4. 実機試験結果

主蒸気流量420 t/hクラスのドラム型ボイラのうち制御の難しい主蒸気温度制御系を例にとりSNACを適用し、実機検証試験を行った。本プラントは、重油に加え高炉ガス、コークス炉ガスを混焼しているため、負荷変化のみならず混焼比の変化による蒸気温度への外乱が大きく、各燃料によるフィードフォワード信号や負荷による可変PID制御等の従来手法を駆使しても制御が難しかったものである。

そこで、主蒸気温度制御装置(PID)を補完する形でSNACを適用した。すなわち、図5に示すように主蒸気温度偏差を入力値とするSNACの出力を主蒸気温度制御装置の出力に加算する形で改善を試みた。そのときの検証結果の一部を、従来のPID制御時とSNAC適用時を比較して図6に示す。

通常プラント運転中に試験を行ったため、条件に若干の差があるものの、負荷30%相当の負荷変動時にPID制御時に±5℃程度であった主蒸気温度の変動が、SNAC適用時には±2℃程度に抑えられており、SNACの有効性が分かる。なお、検証では、図5に示すように対象が1系統であったこともありワンループコントローラ(8ビットCPU、制御周期0.25s)を用い、その四

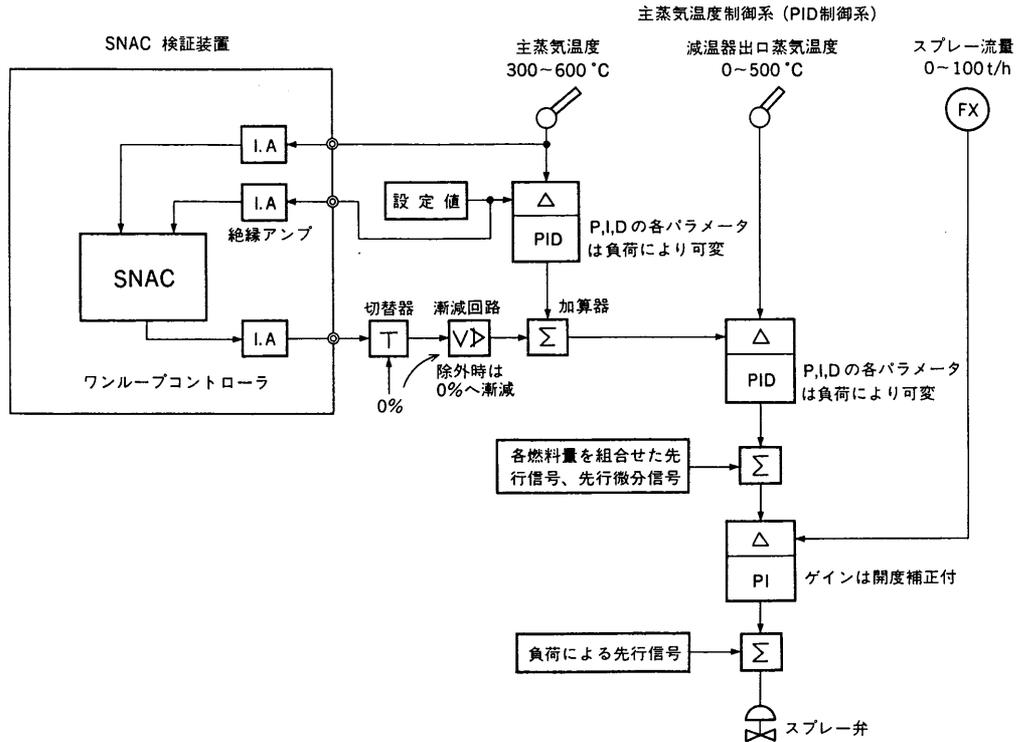


図5 SNAC 検証装置の構成とその接続関係図
 気温度制御系との接続関係を示す。
 Outline of test device and its connection with steam temperature control system

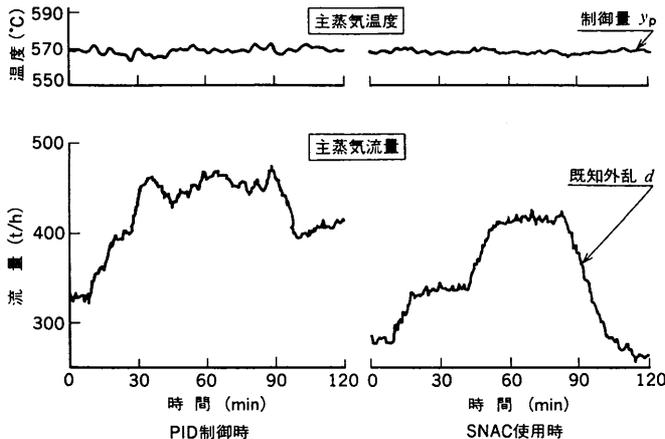


図6 実機検証結果 負荷30%相当分変化させたときの主蒸気温度特性の比較。
 Result of field test by SNAC

則演算、積分等の汎用的な演算機能を組合せてアルゴリズムを実現した。また、異常時には、その出力が0%へ漸減するような安全回路及び絶縁アンプを介して、その出力を既設のデジタル式ボイラ自動制御装置に入力した。SNACの導入により、本プラントでは、試運転初期の約3hの間に2回のパラメータ調整を行ったのみで、あとはSNACの補完により高い制御性を実現できた。このことから、SNACは制御性の向上のみならず、調整時間の短縮にも役立つことが明らかとなった。

5. あとがき

本報では、非線形かつ経時変化がある制御困難な多変数制御系を対象に有効な2自由度形の高機能制御方式(SNAC)を提案した。SNACは、四則演算や積分など汎用的な演算機能の組合せで実現できるため、デジタル式制御装置への組み込みが可能であり、たとえ、多変数制御系が対象であっても、構成するシステムを大幅に増加することなく実現できる。

その有効性は、シミュレーション計算及び火力プラントの蒸気温度制御の実機試験で確認できた。なお、本制御方式は、制御対象に応じたハードを選定すれば、プロセスに限らずサーボ系にも適用できるものである。

参考文献

- (1) Bar-Kana, I., Robust Simplified Adaptive Stabilization of Not Necessarily Minimum-Phase Systems, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. and Control, Vol. 111 (1989) p.364
- (2) 藤原敏勝, 簡易非線形適応制御方式(SNAC)の提案, 第35回自動制御連合講演会(1992-10) p.215
- (3) 藤原敏勝, ニューラルネットワーク利用の簡易非線形適応制御, 日本機械学会講演論文集 No.924-4 (1992-11) p.156
- (4) 藤原敏勝, 産業界における適応制御, INTERMAC' 93 SICEシンポジウム(1993-10) p.5-23
- (5) 藤原敏勝, プロセス制御への単純適応制御(SAC)の応用, 計測と制御 Vol.32 No.12 (1993) p.1.007