実践研究論文

知的シーケンス制御とPID制御の複合制御系の構築とエチレン装置での整定操作の自動化[†]

谷 哲次*・竹内 健史*

PID制御は適用が容易で、信頼性の高いフィードバック制御法として広く装置制御に用いられている。しかしながら、スタートアップ、シャットダウン時や原料切替え時などの動特性が大きく変化するようなプロセスに対しては、十分な制御性能が得られないことがある。

このような場合、熟練ボードマンは経験に基づいた知識や判断により、PID制御だけでは十分な制御性能が得られない場合において、適切な介入を行うことにより制御性能を継続的に満足させることが可能である。

エチレン装置ではデコーキング操作があり、このときプロセスが大きく変動するため、熟練ボードマンはPID制御に対して操作介入してプロセスを整定している。そこで、ボードマンの介入部分をインテリジェントをもつシーケンス制御（知的シーケンス制御）に置換え、知的シーケンス制御とPID制御の複合制御系を開発し、実装置で有効であることを実証した。

キーワード：知的シーケンス制御、PID制御、複合制御、石油化学、エチレン装置

1. はじめに

石油業界は典型的な装置産業であり、高度成長期の新製油所建設時に大量に運転員が採用された。設備の新設が一段落すれば運転員を継続採用する必要性が薄れ、さらにコスト競争力の観点から、省力化を積極的に進めており、結果的に運転員の高齢化に拍車がかかっている。数年後には勇退の時期を迎えるため、製造現場の運転レベル低下が危惧されている[1]。

一方、プラント運転に目を向けると、PID制御は適用が容易で、信頼性の高いフィードバック制御法として広く石油精製プラントや化学プラントの制御に用いられている[2, 3]。しかしながら、むだ時間や応答遅れが大きいプロセスや、原料切替え時などの動特性が大きく変化するようなプロセスに対しては、十分な制御性能が得られないことがある。

石油精製プラントや化学プラントでは、むだ時間や応答遅れが大きいプロセスにモデル予測制御を適用している[4, 5, 6, 7]。また、原料切替などで操作手順が一意に定まるときは、シーケンス制御を用いることもある[8]。しかしながら、後で述べるクエンチ系自

動化制御のように動特性が大きく変化し、操作のタイミングや操作量が一定でないとき、シーケンス制御やモデル予測制御では対応できなかった。

このような悪構造のプロセスにおいても、熟練運転員は経験に基づく知識や判断により、状況に応じて適切な制御を行うことができる。実際の現場において、PID制御だけでは十分な制御性能が得られない場合においても、運転員が適切な介入を行うことにより制御性能を満足させることが可能である。

そこで、この事実に着目し、熟練運転員の介入部分を知的シーケンス制御システムに置き換えて、PID制御と知的シーケンス制御システムの複合制御系を構築した。本制御方法は、運転員による介入部を知的シーケンス制御システムで置き換えるという自然な形で表現されており、現場での適用やチューニングのしやすさを考慮したものである。

開発した制御方法は、その型から見ると、知的シーケンス制御システムがフィードバック的にPID制御の出力(MV)を助勢する型と、フィードフォワード的にPID制御のセットポイント(SV)を変更する型がある。

本制御方法を出光興産(株)千葉工場エチレン装置デコーキング時のクエンチ系変動対応に適用した結果、良好な制御性能を得ることができ、運転員の操作を自動化できた。

[†] Design of Hierarchical System using PID Control with Intelligent Sequence Control and Its Application to Ethylene Plant in Unsteady State

Tetsuji TANI and Takeshi TAKEUCHI

* 出光興産(株)技術部 プロセスシステムセンター
Process System Technology Center, Technology & Engineering Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd

2. エチレン装置の概要と課題

2.1 エチレン装置クエンチ系の概要

エチレン装置はナフサを熱分解して、エチレンやプロピレンを製造する装置である。主原料であるナフサにスチームを混合後、分解炉で熱分解する。ナフサを分解したガスにはエチレン、プロピレンなどが含まれる。これを分留し、必要とする成分を取り出す。概略のフローは分解炉以降、高温の分解ガスを冷却する「クエンチ系」、ガスを昇圧する「圧縮系」、主にガス中の水素を取り出す「深冷・脱メタン系」と各留分にける「蒸留系」から成る(図1)。

クエンチ系内のフローを図2に示す。クエンチ系の主な蒸留塔は、ガソリン塔、クエンチ塔、排水蒸留塔と排水蒸発塔の塔4基である。分解炉で熱分解されたプロセスガスはガソリン塔で冷却された後、さらにクエンチ塔で冷却され、圧縮系へ供給される。ここで、クエンチ塔の冷却に用いる水をクエンチウォータ(以下、QWと記す)と呼ぶ。分解ガスと熱交換したQWは約90℃の熱水であり、熱の有効活用とクエンチ塔の冷却に再度利用するため、下流系プロセスで熱回収される。

図1 エチレン装置の概要

図2 クエンチ系のプロセスフローと監視／操作対象

2.2 エチレン装置の現状と自動化への課題

分解炉では運転時間の経過とともに分解管内の内壁にコークが付着し、徐々に堆積するため、定期的に分解管内のコークを除去(以下、デコーキングと呼ぶ)必要がある。デコーキング時の分解管内と分解炉切替えラインを模式的に示す(図3)。デコーキングは、分解炉1基をプロセスから切離して行う。ナフサ供給を停止し、分解炉をプロセスから切離した後、エアーを供給して分解管内のコークを燃焼除去する。コーク除去後はエアーの供給を停止し、分解炉をプロセスに再接続し、分解炉へのナフサ供給を再開する。

分解炉をプロセスから切離するとき、または接続するときには、クエンチ系内の物質収支および熱収支が急激に変化するため、プロセスが大変動する。このときQW温度が変動するため、QWを熱源とする下流系のプロセスも変動する。プロセスには変動を吸収するだけの十分な余力はなく、運転への対応が遅れるとさらなる変動を引き起こす。このため、ボードマンは短時間に集中して複数の操作を行い、プロセス変動を安定しなければならなかった。物質収支、熱収支の変化は、流量、温度などの計測データのみでは十分に捉えきれないため、運転要領書など文書による具体的な記述が難しく、ボードマンは判断基準や操作方法を経験的に体得せざるを得なかった。さらに、プロセス変動パターンは分解炉切替のたびに異なるため、これまで、シーケンス制御などによる自動化は困難であった。

しかし、運転員がPID制御に対し適切な介入を行うことにより、運転は可能である。そこで、熟練運転員の介入部分を知的シーケンス制御システムに置き換えた知的シーケンス制御システムとPID制御の複合制御系を構築することにより自動化(クエンチ系自動化システムの構築)を試みた。

図3 デコーキング時の分解管内模式図と分解炉切替えライン

3. 自動化手法の開発

3.1 知的シーケンス制御システムの概要

弊社がベンダーと協力して開発した知的シーケンス制御システムの概要を示す[9, 10, 11].

この知的シーケンス制御システム(以下, ISCS: Intelligent Sequence Control System)は, 個別機能を持ったアイコンを組み合わせることで, ボードマンの操作手順を組み込みやすくしたソフトウェアで, このツールには, 操作支援機能と監視支援機能がある.

ボードマンの運転操作を単位作業に分解して整理すると, ア)ポンプ起動/停止などのDCS操作, イ)アラーム監視などのDCS監視, ウ)手動弁の開閉などのフィールドマンへの作業依頼, エ)操作後の結果が現れてくるまでの時間待ち, あるいは条件待ちの4つのカテゴリーに分けることができる.

そこで, ISCSでは, ボードマンの操作を支援する機能として, これらの単位作業ごとにアイコンを用意し, システムに内蔵したエキスパートシステムの推論エンジンが, 装置の状況に応じて実行順序を自動変更するようにした. この基本アルゴリズムによる実行結果は, 図4上部に示すような連(れん)を成す.

また, 図4下部のように, 認知, 判断, 実行などの監視操作を繰り返すループを監視支援機能として開発した. さらに, 一連の手順を実行する操作シーケンスと監視シーケンスを同一システム環境上で実施できるようにしている. したがって, 監視シーケンスがデコーディング開始を常時監視して, デコーディングが始まれば, その対応操作を自動起動させることも可能としている.

図4 操作支援機能と監視支援機能の概要

3.2 運転調整方法の調査と定量化

熟練ボードマンへの聞き取りの結果, クエンチ系の監視対象は7箇所, 操作対象は9箇所であった(図2). 監視対象のうち温度が1箇所であり, 他の6箇所は液面レベルである. 操作対象は全て流量である. 温度は冷媒との熱交換量で調整し, 液面レベルはベッセルの抜き出し量または供給量で調整する.

分解炉切替え操作は, チャージカット, チャージイン, チャージカット&インの3パターンに分類される(図5). チャージカットは, 分解炉1基に供給するナフサとスチームの割合を全量スチームになるまで入替えた後, 分解炉をプロセスから切離す. チャージインは, 全量スチーム供給の状態で分解炉1基をプロセスに接続した後, 分解炉に供給するナフサとスチームの割合を通常運転条件に至るまで入替える. チャージカット&インは, 分解炉2基に対し, チャージカットとチャージインをそれぞれ同時に実施する.

分解炉切替え時のクエンチ塔の代表的なトレンドデータを図6に例示する. 分解炉切替え後, 温度, 液面レベルが急変化して変動している.

熱量変化は, 温度変化として表れるが, 時定数が数分~数十分と長いので, 温度が変化した時点では既に熱バランスが大きく崩れてしまっている. このため, 熟練ボードマンは分解炉切替えと同時に冷媒熱交換量のSVを必要量変更し, 熱バランスを調整する. その

(a) チャージカット

(b) チャージイン

(c) チャージカット&イン

図5 分解炉ナフサチャージ量の変化とガスリン塔リフラックス量の操作パターン

図6 分解炉切替え時のクエンチ塔トレンドデータ

後、熱バランス調整の過不足分により温度変化する場合、微調整を行って目標の温度領域内に収める。

また、物質質量変化により液面レベルが変化するが、PID制御のみでは調整量が不足するため、レベルが大きく変動する。熟練ボードマンはレベル指示値や変化量などから運転状態を判断し、制御量が不足しているときはPID制御を一旦切離し、必要量調整して、再度PID制御を稼動させる。特に、ベッセルへの供給量と排出量が一対一に対応する場合は、供給量の変化分を排出量に加算して、物質収支を調整する。

熟練ボードマンからの聞き取り調査の操作方法は9箇所全て異なるが、操作方法を整理すると基本的な流れに共通部分があることが判った。詳細は、3.3.2節で述べる。

3.3 PID制御とISCS(知的シーケンス制御システム)の複合制御系の構築

3.3.1 構築した複合制御系

熟練ボードマンが行う操作を形式知化してISCSに置換えることで、PID制御とISCSの複合制御系を構築した[12]。以降、ISCSによりPID制御のSVを変更する手法を「SV変更型」、PID制御を一旦切離して制御出力に加算する手法を「MV加算型」と呼ぶ。クエンチ系自動化システムでは、熱量変化の調整に「SV変更型」、物質質量変化の調整に「MV加算型」を適用した。

一般的に、「SV変更型」は、フィードフォワード的にSVを変え、大きな変動に耐えられるように、変動が始まる前に事前に調整を開始する。さらに、この調整だけで対応できない場合は、フィードバック的にSVをさらに変更する。クエンチ系自動化システムでは、熱量調整への適用が多い。一方、「MV加算型」は、フィードバック的にMVを変え、PID制御単独での不足調整分を補う。クエンチ系自動化システムで

は、レベル調整への適用が多い。

その結果、クエンチ系自動化システムでの、複合制御系の活用は、「SV変更型」が4箇所、「MV加算型」が5箇所となった（表1）。また、3.2節で述べたように、分解炉切替え操作は3パターンあり、それぞれで、対応操作が異なるため、クエンチ系自動化システムに常時稼動している監視機能が、デコーディングの開始だけでなく、どのパターンかも判定して、9箇所のそれぞれの操作手順を自動選択するようにした。

「SV変更型」の適用例としてガソリン塔の温度調整（図7）、「MV加算型」の適用例として排水蒸留塔の液面レベル調整（図8）を紹介する。

分解炉切替えによりガソリン塔の熱量は大きく変化するが、温度変化として表われるのは数分後である。温度変化した後では、プロセスの整定が難しいため、分解炉切替えと同時に塔頂のリフラックス量を「SV変更型」で変更し、ガソリン塔の熱バランスを調整する。その後、熱バランス調整の過不足により温度変化が生じる場合は、「SV変更型」でリフラックス量を微調整する。

また、排水蒸留塔では、分解炉切替え後、QWの供

表1 クエンチ系の監視／操作対象と出力方式

監視対象	操作対象	出力方式
ガソリン塔頂温度	ガソリン塔リフラックス	SV変更型
	ガソリン塔除熱量	
	クエンチ塔リフラックス	
クエンチ塔底界面レベル	クエンチ塔底油拔出	MV加算型
クエンチ塔頂レベル	クエンチ塔頂水拔出	
クエンチ塔底界面レベル	クエンチ塔頂油拔出	
クエンチ塔底レベル	クエンチ塔底水拔出	MV加算型 (FF付)
排水蒸留塔底レベル	排水蒸留塔底拔出	
排水蒸留塔底レベル	排水蒸留塔底拔出	

FF：フィードフォワード

図7 ガソリン塔の温度調整

図8 排水蒸留塔の液面レベル調整

給量が大きく変化し、液面レベルが変動する。PID制御のみでは変動が収束しないため、排水蒸留塔への供給量の変化分を「MV加算型」で制御出力先の抜き出し量に加算して、変動を収束させる。

3.3.2 代表的な操作対象の操作フロー

前章で述べたガソリン塔の温度調整や排水蒸留塔の液面レベル調整には、2通りの操作の流れが存在した。図9(a)は、ガソリン塔温度調整を(b)は排水蒸留塔液面レベル調整の流れをブロック化して示している。これらのプログラムは、ボードマンが必要なときに起動するのではなく、常時稼働のプログラムである(図9のブロック①)。以下にその流れを述べる。

- 1) ボードマンがDCSに入力する切替信号を読み込んで分解炉が切替ったことを自動判断して(図9のブロック②)以下の操作を行う。
- 2) プロセスの変化を確認し、チャージカット、チャージイン、チャージカット&インのうちのどのパターンかを自動判断し、そのパターンに適合した操作パラメータを選択する(図9のブロック③)。
- 3) これから起こる変動に対して、(a)ガソリン塔温度調整の場合は早期に熱量変化に対応する必要がある。しかし、切替えごとの熱量変化を予測できず、また測定できないので、切替え初期か否かを判断して(図9のブロック④)経験的に決められた操作量で対応する(図9のブロック⑤(a))。一方、(b)排水蒸留塔液面レベル調整の場合は、切替えごとに供給量は変更するが、排水蒸留塔への供給量を測定できるため、供給された量だけ抜き出す(図9のブロック④と⑤(b))。
- 4) 許容範囲の温度になっているか、あるいは許容範囲のレベルになっているかを判断する(図9のブロック⑥)。そして、調整不足であれば、経験則に従いその補正量を計算する(図9のブロック⑦)。

(a) ガソリン塔温度調整

(b) 排水蒸留塔液面レベル調整

図9 ISCS (知的シーケンス制御システム) による運転調整方法の流れ

5) PID制御に対して4)で計算した補正量に基づいて、(a)ガソリン塔温度調整ではSVを変更する。(b)排水蒸留塔液面レベル調整では、PID制御を切離し、MVを変更し、再度PID制御をオンラインする(図9のブロック⑧)。再び①に戻り、プロセスが安定するまで②から⑧までのループを続ける。

4. クエンチ系自動化システムの適用結果

デコーキングに伴う分解炉切替え時にクエンチ系自動化システムを適用して、効果を確認した。最も優れたボードマンの運転操作を自動化し、さらにシステム化により絶え間なく確実に操作することにより、ボードマンが最善を尽くした手動操作と同等となった。ガソリン塔の温度とリフラックス量、ならびに排水蒸留塔の液面レベルと抜き出し量について、自動化前の平均的な運転員のトレンドデータと自動化後と比較する。ガソリン塔は、運転状況の変化に合わせてリフラックス量を適量調整することにより、熱収支が適切に調整され、温度振れ幅が小さく安定化している。排水蒸留塔は、供給量の変化分を制御出力先の塔底抜出へ加算することにより塔の物質収支が調整され、液面レベル振れ幅が小さく安定化している(図10)。

ボードマンによる手動操作回数は、適用前87回に対し適用後は5回となり、大幅に削減された(図11)。適用後の手動操作5回は、フィールドオペレータからの指示によるものであり、システムでは自動化できない。これらの操作を除き、ボードマンによるクエンチ系の手動操作は皆無であり、現状機器での完全自動化を達成した。

分解炉切替え時にクエンチ系で発報したアラーム件数を図12に示す。適用前は、ボードマン3名のアラーム件数にばらつきが生じている。これは、ボードマン

図10 自動化前後のトレンドデータ比較

図11 自動化前後のクエンチ系の手動操作回数

図12 自動化前後のクエンチ系のアラーム件数

のスキルの違いが、運転の安定性に影響していることを示している。適用後のアラーム件数は、最も安定した運転を行ったボードマンCと同等である。本システムにより、熟練ボードマンの操作を常に再現できるようになり、安全安定運転の維持に大きく寄与できた。

5. おわりに

定常状態のみならず、プロセスの動特性が一時的に大幅に変わる場合にもPID制御を連続的に適用するために、熟練運転員のPID制御への介入部分を知的シーケンス制御システムに置き換えて、知的シーケンス制御システムとPID制御の複合制御系を開発した。暗黙知として熟練運転員に依存していた操作方法には、一定のパターンが存在していた。この複合制御系を出光興産(株)千葉工場エチレン装置デコーキング時のクエンチ系整定操作の自動化に適用した結果、良好な制御性能が得られた。

今後は、各装置にも展開し、さらなる安全安定運転に貢献したい。

参考文献

- [1] 谷哲次, “2007年問題と日本知能情報ファジィ学会”, 知能と情報, Vol.18, No.4, p1 (2006)
- [2] 広井和男, “実用アドバンスト制御とその応用”, 工業技術社 (1996)
- [3] H.Takatsu, T.Itoh, “Future needs for control theory

- in industry-report of the control technology survey in Japanese industry”, Control Systems Technology, IEEE Transactions, Vol.7, No.3, pp298-305 (1999)
- [4] C.R.Cutler and B.L.Remaker, “Dynamic Matric Control-A Computer Control Algorithm”, Joint Automatic Control Conference, 1979
- [5] J.A.Richalet, J.L.Testud and J.Papon, “Model Predictive Heuristic Control, Application to Industrial Process”, Automatica, Vol.14, No.5, pp413-428, 1979
- [6] S.Joe Qin and T. A. Badgwell, “A survey of industrial model predictive control technology”, Control Engineering Practice, Vol.11, pp733-746, 2003
- [7] 野口芳和, 小針昌則, 橋本芳宏, “第一原理モデルに基づくモデル予測制御によるパッチプロセスの制御”, システム/制御/情報, Vol.52, No.8, pp285-290 (2008)
- [8] 宮崎誠一, パッチプロセスの制御, 「プロセス計装におけるディジタル制御系の設計と改善」, 工業技術社 (1989)
- [9] T. Tani, K. Nakane, “Automation in Transition Stage Utilizing AI Techniques”, Proceeding of Honeywell user group symposium, Phoenix, USA (1996)
- [10] 高橋公一, “運転支援によるDCSの高度活用と生産性向上”, 計装, vol.43, No.11, pp42-47 (2000)
- [11] 新名伸仁, 運転効率向上支援パッケージ, 「次世代のプラント運転支援技術」, 電機学会編, 大学教育出版 (2007)
- [12] 谷哲次, 田中一男, “ファジィ制御とPID制御の複合系の構成とその加熱炉温度制御への適用”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No.11, pp274-1280 (1991)
(2008年6月11日 受付)
(2008年11月5日 採録)
- [問い合わせ先]
〒299-0194 千葉県市原市姉崎海岸2番地1
出光興産(株)技術部プロセスシステムセンター
谷 哲次
TEL: 0436-61-7895
FAX: 0436-60-1959
E-mail: tetsuji.tani@si.idemitsu.co.jp

著者紹介

谷 哲次 [正会員]

1976年広島大学大学院修士課程修了。同年出光興産(株)に入社。2008年から出光興産(株)技術部プロセスシステムセンター上席主任技師。現在に至る。この間、主として石油精製部門におけるベテラン運転員のノウハウ抽出やデータ解析, AI技術やITを応用した運転自動化・運転支援システムの開発に従事。1993年技術士(情報工学部門)取得, 1995年工学博士(大阪大学)取得, 2005~2006年日本知能情報ファジィ学会副会長, 計測自動制御学会, 石油学会, 化学工学会などの会員。

竹内 健史 [非会員]

1994年広島大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年出光興産(株)に入社。千葉工場化成品製造現場での経験を経て, 2002年に技術部プロセスシステムセンターに配属となり, 現在に至る。この間, 石油精製, 石油化学部門における高度制御システムの開発やITを応用した運転自動化・運転支援システムの開発に従事。化学工学会の会員。

Design of Hierarchical System using PID Control with Intelligent Sequence Control and Its Application to Ethylene Plant in Unsteady State

by

Tetsuji TANI and Takeshi TAKEUCHI

Abstract :

PID control methods remain popular in industrial applications. However, due to their poor ability to react appropriately in an unsteady operational environment, they sometimes fail to control the actual plant, including operations such as feed oil changing and process line changing. On the other hand, well-experienced operators can easily manage these operations by appropriately manipulating the set points or adjusting the output of the PID controller using their experience and knowledge. In an ethylene plant, the decoking operation of the cracking furnace is highly unstable. To mimic the well-experienced operators' procedures, we have developed a hierarchical system that consists of an intelligent sequence control and a PID control. The intelligent sequence control plays the role of the well-experienced operator. We applied the hierarchical system to the decoking process in ethylene plant in order to demonstrate its effectiveness.

Keywords : Intelligent Sequence Control, PID Control, Hierarchical System, Petrochemical Plant, Ethylene Plant

Contact Address : **Tetsuji TANI**

*Process System Technology Center, Technology & Engineering Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd
2-1 Anegasaki-kaigan, Ichihara, Chiba, 299-0194 JAPAN*

TEL : 0436-61-7895

FAX : 0436-60-1959

E-mail : tetsuji.tani@si.idemitsu.co.jp