

蒸留塔製品組成の予測推定制御

化学プロセスでは、オンライン測定が困難な製品品質を制御する技術が重要であり、ソフトセンサーや推定制御に関する研究が盛んに行われている。本研究では、多成分連続蒸留塔を対象に、蒸留塔の特性を活かした実用的な推定制御系の設計方法を提案する。これまでの研究では、ある時刻の塔内温度と圧力から同時刻の製品組成を推定する静的モデルと比較して、プロセスの動特性を考慮した動的モデルの推定精度および推定制御性能がより優れていることを明らかにした。さらに、従来の塔内温度制御系を組成推定制御系に単純に置き換えることによって高い制御性能を実現できないため、塔内温度制御系を内側に、組成推定制御系を外側に有するカスケード制御系を利用すべきであることを示した。

カスケード制御系の利用によって制御性能が向上する理由として、1) 温度制御下で得られた運転データを用いて構築した組成推定モデルは温度制御時の運転状態を良く表現できること、2) 原料変化などの外乱は製品組成よりも先に塔内温度に影響するため、塔内温度制御によって外乱が製品組成に及ぼす影響を低減できること、が挙げられる。理由1は閉ループ系の同定とも関連するが、塔内温度制御を組成推定制御に切り替えると、運転状態が大きく変化してしまう(例えば、制御されていた塔内温度が大きく変化するようになる)ため、温度制御下で構築した推定モデルでは新しい運転状態を表現できないことが問題である。本研究では、モデル構築用データを取得するために、温度コントローラの設定値を変化させた。この設定値変更は、カスケード制御適用時に組成推定制御系の操作量を変化させることに等しい。したがって、構築した組成推定モデルはカスケード制御下で高い性能を示すことができる。一方、理由2は、カスケード制御が原料変化などの外乱に対してフィードフォワード制御の機能を有することを意味している。このようなフィードフォワード制御効果は、カスケード制御を適用する場合だけでなく、静的モデルを推定制御に用いる場合にも現れる。実際、静的モデルによる推定値は組成実測値に比べて数分程度進む傾向にあり、静的モデルの推定精度は動的モデルと比較して極端に悪いにもかかわらず、両モデルを用いた推定制御の性能には

推定精度ほどの差は見られない。この結果は、静的モデルが有するフィードフォワード効果として説明できる。

このフィードフォワード効果を積極的に活用して制御性能を向上させるために、現時刻の製品組成を推定する従来型モデル

$$\hat{x}(t) = f(u(t), u(t-s_1), u(t-s_2), \dots) \quad (1)$$

の代わりに、将来の製品組成を予測するモデル

$$\hat{x}(t+\alpha) = g(u(t), u(t-s_1), u(t-s_2), \dots) \quad (2)$$

を利用する。ここで、 \hat{x} は製品組成推定値、 u はプロセス変数である。式(2)で計算される製品組成の予測値を制御量とする推定制御を予測推定制御と呼ぶことにする。予測推定制御では適切な α の選択が極めて重要であるが、ここでは試行錯誤により $\alpha = 10$ min とした。

各種制御系による制御結果を表1にまとめた。従来型の推定制御では塔内温度制御と同等かそれ以下の性能しか実現できていない。さらに、表1に示した制御性能を得るために、モデル構築と制御系設計を3回繰り返したことに注意する必要がある。繰り返しを行わなければ、推定制御の性能はさらに悪くなる。提案する予測推定制御の性能は温度制御や従来型推定制御よりは良いが、理想的な組成制御を行った場合の性能には遠く及ばず、またモデル構築と制御系設計の繰り返しが必要となる。ところが、カスケード制御と予測推定制御を組み合わせることによって、モデル構築と制御系設計の繰り返しを行うことなく、表1最下段に示したような優れた制御性能を実現できた。現在、共沸蒸留シミュレーションおよびパイロットプラントを用いて、提案法の検証と拡張を進めている。

表1 推定制御性能の比較

| 制御手法 | 平均二乗誤差 (塔頂と塔底の和) |
|---------------------------|---------------------|
| 理想的な組成制御 (オンライン組成測定可能) | 12.92 |
| 塔内温度制御 | 15.76 |
| 推定制御(静的モデル) | 17.47 |
| 推定制御(動的モデル) | 15.27 |
| 予測推定制御(動的モデル) | 14.40 |
| カスケード型予測推定制御 (動的モデル) | 13.16 |