空気分離装置の制御特性解析[†]

加藤 洋明*・三河 広治*

Control Characteristic Analysis of Air Separation Plant

Yomei KATO* and Hiroji MIKAWA*

This paper presents dynamic characteristics and control characteristics of a double-rectifying column for an air separation plant.

The dynamic characteristics of the rectifying column were examined by changing its various parameters. It was cleared that the oxygen concentration in the upper column of the double-rectifying column is influenced by the reflux flow rate changes from lower column. In order to minimize the reflux flow rate changes, a sampling control method was developed.

As a result of this experiment, a supervisory control method, which keeps the ratio of the liquid flow rate to the vapor flow rate constant in the column has been developed. It was recognized by use of dynamic simulator that the product oxygen concentration can be controlled by this method.

Keyword: air separation plant, rectifying column, plant dynamics, process control, computer control

1. 緒 言

空気分離装置は大気中の窒素、酸素、アルゴンなどを分離する装置であり、液化された空気を分離する複式精留塔、低温の分離ガスの熱回収を行う可逆式熱交換器、断熱膨張により寒冷を発生させる膨張タービンなどで構成されている。分離されたガスは、別のプラントの原料として使用されることが多く、濃度並びに発生量を所定の値に維持することが要求される。可逆式熱交換器は、空気中に含まれている二酸化炭素などを除去させるため、流路を定期的に切替

えるが、このとき空気流量や圧力が急変する。このような変動のもとでの制御特性を詳細に解析した例はなく、運転は従来経験的に行われていた。そこで、先に開発した動特性解析用シミュレータ¹⁾に制御系を組み込み、製品酸素発生量増加時の精留塔内濃度分布を解析し製品ガスの酸素濃度を所定値に保持させる運転方法を開発することにした。

本論文では、下塔部より上塔部への還流液流量変化時の動特性実験結果について述べたあと、下塔々底部液面制御方式を提案し、つぎに、本制御方式を組み込んだシミュレータによる製品酸素発生量増加時の制御特性解析結果について述べる。

2. 空気分離装置の構成

空気分離装置は、窒素、酸素、アルゴンのどれを主成分にするかによって装置の構成は若干異なるが、代表的な構成図および基本的な制御系を Fig. 1 に示す。

空気は圧縮機で約 6 ata {約 600 kPa} まで圧縮され、可逆式熱交換器で飽和温度近くまで冷却される。この

Fig. 1 Control system of air separation plant

[†] 第 17 回自動制御連合講演会で発表 (昭 49・11)

第 18 回自動制御連合講演会で発表 (昭 50・11)

* (株)日立製作所エネルギー研究所 日立市森山町 1168

* Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi

(Received June 12, 1981)

(Revised December 28, 1981)

Fig. 2 Switching method for reversing heat exchanger

過程で空気中に含まれている二酸化炭素などの不純ガスは凝固し、空気は浄化される。冷却された空気の一部は膨張タービンで断熱膨張によりさらに低温になり、精留塔の上塔部に供給され、残りの空気は下塔部に供給される。精留塔下塔部で分離された空気は上塔部に還流液として送られ、ここで精製されて塔頂より窒素、塔底より酸素、塔中段より窒素を多く含んだガスを取り出す。分離されたガスは、 $-180 \sim -193^{\circ}\text{C}$ と低温のため、可逆式熱交換器で空気と熱交換し、常温のガスとして送出する。

実験並びに解析で用いた空気分離装置で、可逆式熱交換器は4台設置されており、流路の切替えに Fig. 2 に示す手順で2基ずつ実施される。Fig. 2(a)は切替え直前の状態で、熱交換器Aは空気中の二酸化炭素などを凝固中、Bは凝固された二酸化炭素などを昇華中である。Fig. 2(b)は、流路切替え中で熱交換器A、Bの圧力をバランスさせる。Fig. 2(c)は流路切替え後の状態で、凝固、昇華の熱交換器はFig. 2(a)と逆になる。Fig. 2(b)から(c)になる過程で空気の供給が一時停止され、精留塔の圧力が変動する。

3. 精留塔動特性

空気分離装置用精留塔は、圧力の異なる2台の塔を直列に接続し、下塔部の凝縮器と上塔部の再沸器を一体化した複式精留塔である。下塔部に供給された空気はFig. 1で示すように塔の上部(20段)および中部(12段)より還流として上塔部に送られ、酸素濃度の

Fig. 3 Effect of heat exchanger switching (Experimental)

Table 1 Calculating and experimental conditions of air separation plant

Item	Condition
Saturated air flow rate (Total)	10000 (Nm ³ /h)
Saturated air flow rate (Lower column)	8000 (Nm ³ /h)
Saturated air flow rate (Upper column)	2000 (Nm ³ /h)
Reflux flow rate of pure N ₂	600 (Nm ³ /h)
Reflux flow rate of impure N ₂	3800 (Nm ³ /h)
Reflux flow rate of liquid air	3600 (Nm ³ /h)
Nitrogen gas flow rate	600 (Nm ³ /h)
Oxygen gas flow rate	1500 (Nm ³ /h)
Waste gas flow rate	7900 (Nm ³ /h)
Pressure in lower column	600 (kPa)
Pressure in upper column	150 (kPa)

高い液体空気は塔底部に留ったあとに上塔部に送られる。この液体空気還流量は液面制御系 $\frac{40}{1}$ で調整される。

空気分離装置では可逆式熱交換器での流路が定期的に切替えられ、その都度精留塔に外乱が与えられる。この外乱は液面制御系 $\frac{40}{1}$ にも影響を及ぼし還流液体空気流量が変動する。Fig. 3 は定常運転時における還流液体空気流量と、上塔部 65 段(不純窒素ガス抜出段)の酸素濃度変化実測値を示したもので、制御定数をパラメータにしている。精留塔の運転条件は Table 1

のとうりである。制御系の比例帯 PB (Proportional Band) が 40% と小さいときは、還流液体空気流量は破線のように大きく変動し、上塔部 65 段の酸素濃度変動幅は 4% に達している。比例帯を 300% にした場合は還流液体空気流量の変動は、実線で示すように小さく、上塔部 65 段の酸素濃度はほぼ一定となる。

つぎに、液面制御系の定数を Fig. 3 の実線に対応する Table 2 に設定し、下塔部への空気供給量をステップ状に増加させて液面制御系の特性を求めた。結果を Fig. 4 に示す。還流液体空気流量は Fig. 4(a) のように 17 分周期で減衰振動している。このときの、上塔部 65 段の酸素濃度は Fig. 4(b) の破線のとおりであり、還流液体空気流量と同一周期で振動している。これは、上塔部の特性は下塔部の特性、特に、塔底よりの還流液体空気量の変動に大きく影響されることを意味している。

下塔部への空気流量変化時には、還流液体空気流量

Table 2 Calculating and experimental conditions of liquid air level control

Item	Condition
Level meter range	0.4 (m)
Maximum flow rate of control valve	7200 (Nm ³ /h)
Proportional band	300 (%)
Integration time	35 (s)
Reflux flow rate of liquid air (steady state)	3600 (Nm ³ /h)

Fig. 4 Reflux flow rate and oxygen concentration change for saturated air increase (+13%)

を速やかに追従させる必要があるが、Table 2 の条件では比例帯が大きいため応答性が悪くなっている。実験では、比例帯を 40~300% の範囲で変化させたが、定常時の流量変動幅が小さく、しかも、空気流量変化時の追従性が優れている条件を見付けることができなかった。

なお、Fig. 4(b) の実線は、先に開発したシミュレータ¹⁾で計算した結果である。計算結果は実験結果とよく一致しており、精留塔の動特性計算用に活用できると考え、5 章の制御特性解析で使用することにした。

4. 下塔々底液面制御方式の検討

精留塔上塔部の酸素濃度変動幅を小さくするには、下塔々底部液面制御系の制御特性を改善させる必要がある。可逆式熱交換器切替えによる流入流量の変動に対しては、還流液体空気流量はなるべく変化させないようにし、一方、精留塔の運転条件変更などにより下塔部への空気流量を変化させた場合には、還流液体空気流量を速やかに追従させることが望ましい。この要求を満たす制御方式として Fig. 5 のサンプリング調節計を考案した。

Fig. 5 で S_1, S_2 はスイッチ、 H_1, H_2 はホールド回路、 K は調節計ゲイン (通常は 1) であり、つぎのように動作させる。

(1) スイッチ S_1, S_2 は Fig. 6 のタイミングで動作させる。これは、塔底部液面は可逆式熱交換器切替え直前が安定しているためである。

(2) スイッチ S_1 をオンにすると調節計の出力は次式となり、つぎのサンプリング時まで H_1 により

Fig. 5 Block diagram of sampling controller

Fig. 6 Switching timing of sampling controller

保持される。

$$\left. \begin{aligned} A_n &= -(R - 2 \cdot x_n + x_{n-1}) \cdot K \cdot \delta \\ A_n &= A(nT) \\ x_n &= x(nT) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 A ：調節計出力

T ：サンプリング周期

K ：調節計ゲイン

x ：液面計出力

R ：液面設定値

δ ：Fig. 8 で説明する先行制御信号

一周期前の液面計出力を用いるのは、現在の液面が上昇中か下降中かを判断するためで、一種の微分動作を加えたものである。

(3) スイッチ S_2 をオンにすると、液面計出力がホールド回路 H_2 に保持され、つぎのサンプリング時に(1)式で使用する。

下塔々底液面制御系に Fig. 4 のサンプリング調節

Table 3 Calculating conditions of sampling control

Item	Condition
Lower column area	0.785 (m ²)
Liquid air level	0.2 (m)
Level meter range	0.4 (m)
Controller gain	0.44
Controller out put (steady state)	0.5
Maximum flow rate of control valve	7200 (Nm ³ /h)
Reflux flow rate of liquid air	3600 (Nm ³ /h)
Control period	0.1 (h)

Fig. 7 Control characteristics of sampling controller for saturated air increase (+10%)

計を組み込み、Table 3 の条件に設定して空気流量変化時の制御特性を計算で求めた。計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a)は還流液体空気流量、(b)は下塔々底液面の特性である。空気流量は可逆式熱交換器切替え直後に 10% 増加させた。調節計は Fig. 6 で示したように、熱交換器切替えの直前で動作するため、つぎの切替え直前まで流量制御弁開度は一定に保持される。この結果還流液体空気流量は Fig. 7(a) のように階段状に変化し、PID 調節計での特性 Fig. 4 (a)より短時間で定常に達している。

5. 酸素流量増加時の制御特性解析

空気分離装置で精製したガスは、別のプラントの原料として使用されることが多く、濃度並びに発生量を所定値に保持することが要求される。本章では、先に開発した動特性解析用シミュレータ¹⁾に、サンプリング調節計を組み込み、製品酸素発生量増加時の精留塔内および製品ガスの酸素濃度変化特性を解析する。

5.1 制御系の構成

空気分離装置の基本的な制御系の構成を Fig. 1 に示したが、制御系は設定値を外部より変更できる方式のものを主体とし、設定値は Fig. 1 上部に示した制御装置より与えるようにした。精留塔内の濃度は、液流量 L と蒸気流量 V の比 L/V でほぼ定まることが古くから知られており、制御装置では L/V を一定にさせるようにした。動作手順は Fig. 8 のとおりである。

Fig. 8 Block diagram of supervisory set point controller

酸素流量を定常時の δ 倍に増加させる場合は、最初に空気流量を増加させる (Fig. 8③). 空気流量が安定したなら (Fig. 8④), 膨張タービン入口圧力制御系, 還流液流量制御系の設定値を定常時の δ 倍にする (Fig. 8⑤, ⑥). つぎに, 還流液体空気流量を速に変化させるためサンプリング調節計の出力を δ 倍に変化させる. これは, サンプリング調節計のスイッチ S_1, S_2 が動作するまで, ホールド回路 H_1 の出力が変化しないため, 先行制御信号を加えて制御弁を動作させ, 還流液体空気流量を δ 倍にさせる制御である (Fig. 8⑦). 最後に酸素流量を定常時の δ 倍に増加させて (Fig. 8⑧) 制御は完了する.

Table 4 Calculating conditions of air separation plant control characteristics

Controller		RUN		
		1	2	3
$\text{PC } \frac{1}{1}$	Saturated air flow rate		○	○
$\text{PC } \frac{2}{2}$	Reflux flow rate of pure N_2			○
$\text{PC } \frac{3}{3}$	Reflux flow rate of impure N_2			○
$\text{PC } \frac{4}{4}$	Nitrogen gas flow rate	○	○	○
$\text{PC } \frac{5}{5}$	Oxygen gas flow rate	○	○	○
$\text{LC } \frac{1}{1}$	Liquid air level			○
$\text{TC } \frac{1}{1}$	Air temperature	○	○	○
$\text{PC } \frac{1}{1}$	Air pressure		○	○

○ : Set point change control

酸素流量を減少させる場合には, 最初に酸素流量制御系の設定値を変更させ (Fig. 8②), 最後に空気流量を減少させる (Fig. 8⑩). これは, 過渡時の空気流量を一時的に過剰気味にして酸素濃度の低下を防止するためである.

5.2 酸素流量増加時の制御特性解析

本節では, 酸素流量増加時の制御特性解析結果について述べる. 酸素流量増加要求に対しての各部制御系の効果を明らかにするため, **Table 4** で示した3ケースについて計算した. **Table 4** で○印は Fig. 1 の制御装置出力で設定値を変更させた制御系である.

酸素流量を1.2倍に増加させた場合の精留塔内の酸素濃度変化を **Fig. 9** に示す. Fig. 9(a)は還流液取出し棚段である下塔中部 (12段), (b)は還流液体空気の供給段で濃度変化の最も大きい上塔中部 (56段), (c)は製品酸素の濃度である. この結果より,

RUN-1: 各部制御系の設定値を一定にし, 酸素流量のみを増加させると, 製品酸素の濃度は低下する. 下塔部の濃度は大きく変化せず, 可逆式熱交換器切替えの影響による脈動のみである.

RUN-2: 空気供給流量および膨張タービン入口圧力を調整すると製品酸素の濃度低下は小さくなるが, 下塔 (12段) の酸素濃度は低下する. また, 下塔々底よりの液体空気流量が変動し, 上塔 (56段) の酸素濃度は大きく変動する.

Fig. 9 Oxygen concentration change for product O_2 increase (+20%) (Calculated)

RUN-3: 精留塔内の L/V が一定となるように, Fig. 1 の制御装置で設定値を変更させると, 約 10 分後には下塔部, 上塔部ともに外乱印加前の濃度とほぼ等しくなり, 製品酸素濃度も所定値以上に保持される.

なお, 酸素流量減少時には, 空気流量減少の操作を最後にする効果で, 空気が一時的に過剰供給され, 製品酸素濃度が所定値以上に保持されることを確認している.

6. 結 言

以上に, 空気分離装置用複式精留塔の動特性および酸素流量変化時の制御特性について述べたが, これをまとめるとつぎのようになる.

(1) 上塔部の酸素濃度変動幅を小さくするためには, 下塔々底液面制御系の制御特性を改善する必要がある. 可逆式熱交換器切替えによる流入流量の変動に対しては, 還流液体空気流量はなるべく変化させない

ようにし, 一方, 下塔部への空気流量を変化させる場合には, 還流液体空気流量を速かに追従させることが望ましい.

(2) 上記の要求を満たす制御方式として, 可逆式熱交換器の流路切替え直前に動作するサンプリング制御方式を開発した.

(3) 酸素流量変化要求時の制御方式を開発した. この方式は, 精留塔内の液流量と蒸気流量の比が一定となるように制御系設定値を変更させるもので, シミュレーションにより製品酸素濃度が所定値に保持されることを確認した.

最後に, 本研究を進めるにあたり有益なご助言, ご指導をいただいた(株)日立製作所エネルギー研究所 谷口 薫所長, 並びに, 同社, 笠戸工場斎藤 章氏に厚く御礼申し上げます.

参 考 文 献

- 1) 加藤: 精留塔の動特性モデル, 計測と制御, 19-7, 649/653 (1980)