

吸収冷凍機の省エネ制御システム

Energy-Saving Control System for Absorption Chiller

技術本部 小野 仁 意^{*1} 園 田 隆^{*2}
 藤 原 誠^{*3}
 冷熱事業本部 福 島 亮^{*4}

吸収冷凍機は、排ガス等の低質熱源で駆動可能であるため、分散電源と組み合わせたコジェネ機器として需要拡大が見込まれている。一方、吸収冷凍機は、熱源駆動の熱交換システムであるため熱容量が大きく、起動、停止、負荷追従に時間を要する。そこで、冷水出口温度と溶液濃度の同時制御により、負荷追従性ととも部分負荷性能も改善する省エネ制御システムを構築した。さらに、同時制御に伴う制御系調整作業の煩雑さ回避のため、制御系の自動調整機能を付加した。本報では省エネ制御システムの概要を示し、本システムが過冷却防止、運転コスト低減に有効であることを紹介する。

Demand for an absorption chiller is expanding, because it works by poor quality heat source and it applies to cogeneration systems for distributed power supply. However it consists of many heat exchangers and has large heat capacity of a lot of solution and refrigerant. Therefore, it takes a long time to start, stop and change the cooling load. This paper describes energy-saving control system for absorption chiller. This system simultaneously controls the chilled water temperature and the concentration of solution, and automatically tunes for control parameters. This system contributes prevention of over-cooling and reduction of running costs.

1. はじめに

吸収冷凍機は、2成分系の媒体を用いて濃度差による飽和蒸気圧力差を駆動源とする熱駆動型の冷凍機である。よって、ガスエンジン、マイクロガスタービン等の排ガス、燃料電池の排ガスを使って発生する蒸気等の低質熱源での駆動が可能であり、分散電源の普及に伴いコジェネ機器としての需要拡大が見込まれている。

一方、吸収冷凍機の課題として、熱容量が大きく起動、停止、負荷追従に時間を要する点がある。吸収冷凍機をコジェネ機器として用いる場合は、単体で用いる場合に比べ、熱源となる分散電源側の変動を冷凍機側で吸収する必要がある、従来以上の負荷追従性が求められる。

本報では、冷水出口温度と溶液濃度を同時制御することで負荷追従性能と部分負荷性能をともに改善し、さらに同時制御に伴う制御系調整作業の煩雑さを回避する2入出力PID (Proportional Integral Derivative) 制御器の自動調整機能を付加した省エネ制御システムを開発したので紹介する。

2. 省エネ制御システム

2.1 感度解析

吸収冷凍機における制御は、冷水の入口温度と流量及び冷却水の入口温度の変動に対し、制御量である冷水出口温度を所定値に維持するために高圧再生器への熱源流量を操作することである。コジェネで用いる場合は、上記変動に加え分散電源側の運転状況による熱源自身の温度、流量変動も考慮する必要がある。

上記変動に対する制御システムを構築するには、変動の時

間軸が異なることを十分考慮する必要がある。冷水側の変動要因は冷凍機に要求される冷凍負荷の変動であり、冷凍機は、数分オーダーの変動に対し速やかに追従することが要求される。分散電源側の運転状況による熱源の変動もこれと同様である。一方、冷却水側の変動要因は、主に外気温等の変化による大気への放熱量の変化であり、数時間オーダーの変動に対し緩やかに追従すれば良い。

以上の観点から、冷水、冷却水の変動に対し冷水出口温度を安定に制御するために有効な操作量をシミュレータ⁽¹⁾による感度解析を行い抽出した。なお、本検討では、臭化リチウム水溶液を吸収器から高圧再生器、低圧再生器へ並列に送水するパラレルフロー型の直焚二重効用型吸収冷凍機を対象としている。図1に当社最新シリーズ機であるMGU/MDUシリーズの外観及びシステムフローを示す。

感度解析の結果、冷水側の変動に対して有効な操作量は蒸発器内の冷水配管への冷媒散布量を操作する冷媒ポンプのインバータ回転数、冷却水側の変動に対しては溶液循環量、特に高圧再生器出口の濃溶液流量を操作する溶液循環量制御弁が有効であることが判明した。

2.2 システム構成

省エネ制御システムの構成を図2に示す。本制御システムは、吸収冷凍機の従来制御システムに2.1に示した冷媒ポンプインバータ回転数と溶液循環量制御弁の2つの操作量を付加した構成となっている。冷媒ポンプインバータ回転数は、冷水入口温度の計測値に基づいて、蒸発器内の冷媒散布量を先行的に変化させる。本操作量を付加することにより、熱源流量制御弁のみでは追従できなかった負荷変動、特に低負荷時の変動にも追従可能となり、過冷却の防止に繋がる。一方、

^{*1}高砂研究所制御システム研究室

^{*3}高砂研究所燃焼伝熱研究室主席

三菱重工技報 Vol.39 No.2 (2002-3)

^{*2}高砂研究所制御システム研究室主席

^{*4}大型冷凍機部設計課

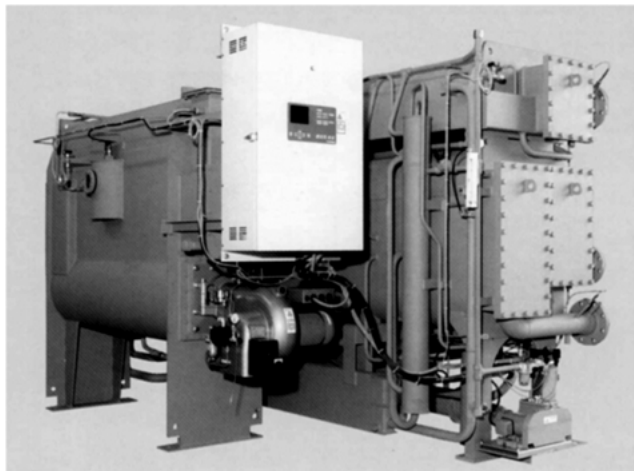


図1 当社最新シリーズ機MGU/MDUシリーズ外観，及びパラレルフロー型直焚二重効用型吸収冷凍機のフロー シリーズ機MGUの外観，及びパラレルフロー型直焚二重効用型吸収冷凍機のフローを示す。
External view of latest model MGU/MDU series, and Parallel flow type of double-effect absorption chiller

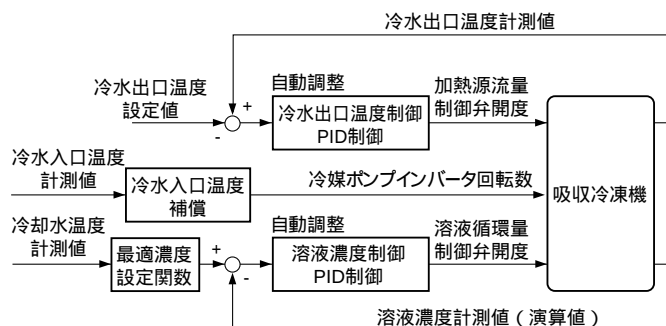
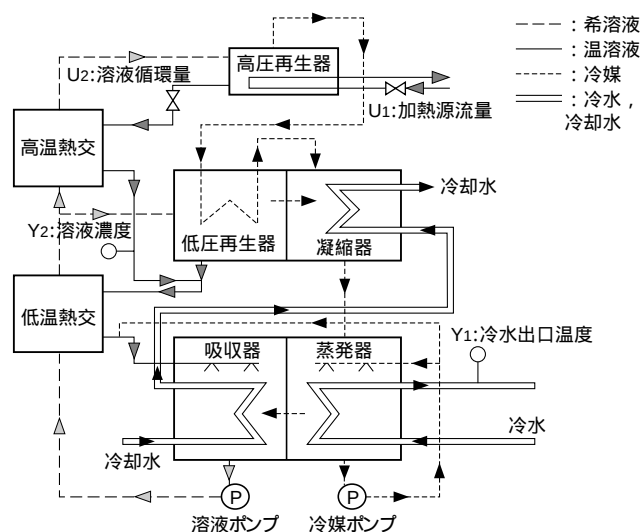


図2 省エネ制御システムの構成 省エネ制御システムの構成を示す。
Structure of energy-saving control system

溶液循環量制御弁は、溶液濃度計測値（及び温度、圧力から決まる換算値）に基づいて、高圧再生器から流出する濃溶液流量を変化させる。本操作量を付加することにより、これまで高圧再生器圧力により一意に決まっていた循環量を変化させて、溶液濃度を制御することが可能となる。溶液濃度設定値は、冷却水温度を基に結晶余裕を確保しながらできるだけ高濃度に設定することにより、溶液の結晶防止と部分負荷の効率向上が実現できる。

省エネ制御システムの制御効果を図3に示す。冷水入口温度が75%負荷定常状態から50%負荷定常状態まで1/30秒の変化レートで急減した場合のシミュレーション結果を示す。実線が同時制御、点線が従来制御の結果である。同時制御では、従来制御に対して冷水出口温度の低下幅を0.9 から0.5 に低減できる。さらに溶液濃度制御により、部分負荷においても溶液濃度を高濃度に維持することで、50%負荷定常時の加熱源流体流量は49%から39%に低減することが可能となる。

以上の結果から省エネ制御システムは、負荷変動時の過冷却トリップに対する余裕度を約45%改善するとともに、部分負荷性能の向上で約20%運転コストを低減するシステムであることが確認できた。

3. 制御系の自動調整

3.1 限界ゲイン適応同定法

2章で述べた吸収冷凍機の省エネ制御システムは、冷水出口温度を加熱源流量制御弁で制御する冷水出口温度制御と溶液濃度を溶液循環量制御弁で制御する溶液濃度制御の2つのフィードバック（PID）制御ループを有する。

従来は、冷水出口温度制御のみの1ループであり、制御パラメータの調整は比較的容易であった。しかし、同時制御では、高圧再生器を介して干渉する溶液濃度制御がこれに付加されるため、制御パラメータの調整は格段に難しくなる。そこで、多入出力化に伴う制御パラメータの調整負担を低減するため、省エネ制御システムに制御パラメータの自動調整機能を付加した。

調整方法には、限界ゲイン適応同定法⁽²⁾を用いた自動調整法⁽³⁾を適用した。本手法は、運転状態を大きく乱すことなく制御対象の特性を精度よく同定することが可能であり、制御ループ間の干渉が強いシステムにも有効である。以下に限界ゲイン適応同定法の概要を示す。

限界ゲイン適応同定法は、PID制御器のパラメータ調整指針である限界感度法に使われる限界ゲイン決定法の一つで、図4に示す構成を持つ。本手法の特長は、式(1)に示すように飽和要素の入力 $e(t)$ 、出力 $u(t)$ の偏差に基づいて飽和要素の傾き（可変ゲイン k ）を変化させる点であり、可変ゲイン k が一定値に収束した状態、すなわち飽和要素の入出力波形の偏差が小さくなった状態では、正弦波に近い持続振動波形が得られる。そのため、本手法は、従来法に比べより高精度な限界ゲインを同定することができる。

$$\frac{dk}{dt} = -\alpha \sum |e(t) - u(t)| + \varepsilon$$

ここで、

- α : 適応の速さを調整するパラメータ
- ε : 充分小さい正数

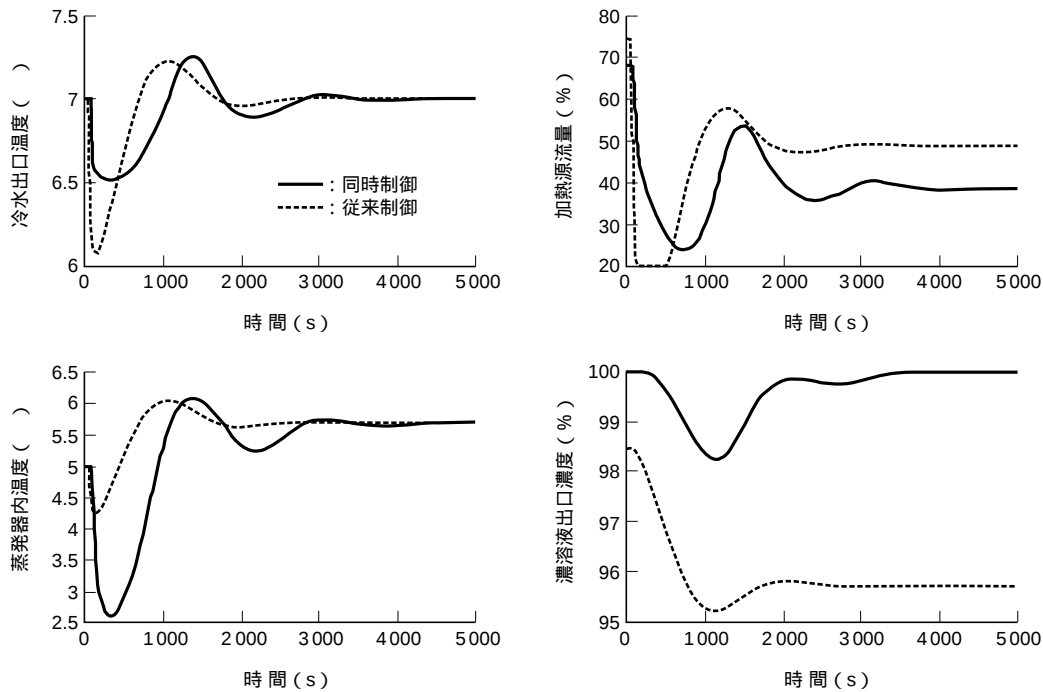


図3 省エネ制御システムの制御効果 冷水入口温度変動に対する省エネ制御システムの制御効果を示す。
Effect of energy-saving control system

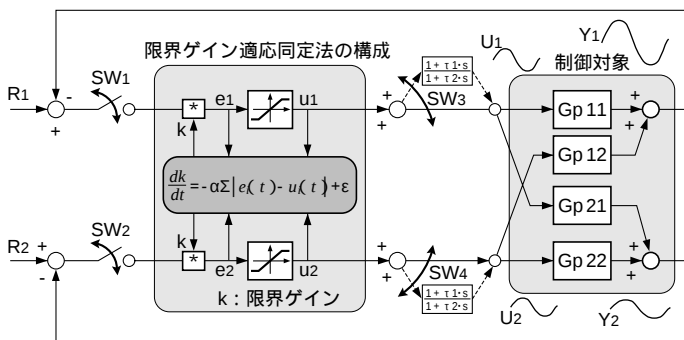


図4 限界ゲイン適応同定法の構成、及び2入出力系の自動調整システムの構成 限界ゲイン適応同定法の構成、及び2入出力系の自動調整システムの構成を示す。
Structure of adaptive identification of critical gain, and Structure of automatic tuning control system for TITO (Two-Input Two-Output) system

3.2 多入出力系の自動調整法

限界ゲイン適応同定法の特徴は、運転状態を大きく乱すことなく限界ゲインを精度よく同定できる点にある。この長所を用いると、非干渉器を含めた任意の多入出力PID制御器パラメータの自動調整が、比較的単純な同定作業の繰り返しにより可能となる。以下に図4に示す2入出力系を例に自動調整法の調整ステップを図5に示す。まず、ステップ1～4を実行し、吸収冷凍機の伝達特性を同定する。同定した伝達特性を用いて干渉を打ち消す非干渉器をステップ5で導出する。その後、非干渉器を付加したシステムの限界ゲインをステップ6で同定し、最後に得られた限界ゲインを使い限界感度法により制御器のパラメータを決定する。制御対象の特性が2次遅れ系で近似可能な場合には、制御対象の周波数特性を同定するために6回、非干渉器を付加した後の限界ゲインを同定するために1回の計7回の同定作業を繰り返すこと

制御対象の同定

STEP1: 2入出力系の4つの伝達特性に関し、SW1をON, SW2をOFFとし、Gp11の限界ゲイン、限界周期を同定する。
STEP2: SW1をON, SW2をOFFの状態ですW3を切り換え、Gp11の限界ゲイン以外で数点の周波数特性(ゲインと周期)を同定する。
STEP3: 上記数点に周波数特性を用いてGp11, Gp21のパラメトリックモデルを同定する。
STEP4: 同様の手順により、SW1をOFF, SW2をONとし、SW4を切り換えてGp22, Gp12のパラメトリックモデルを同定する。

非干渉器の導出

STEP5: Gp11, Gp21, Gp22, Gp12のパラメトリックモデルを用いて非干渉器を求める。

限界ゲインの同定

STEP6: 非干渉器を付加したシステムに、SW1, SW2をともにONとして限界ゲインを同定する。

PID制御器のパラメータ決定

STEP7: STEP6で得られた限界ゲインを用いて限界感度法によりPID制御器のパラメータを決定する。

図5 自動調整法の手順 限界ゲイン適応同定法を用いた自動調整法の調整手順を示す。
Tuning steps of automatic tuning control system for TITO (Two-Input Two-Output) system

で、非干渉器を含めた2つのPID制御器パラメータの自動調整が可能となる。

4. 吸収冷凍機への自動調整法の適用

吸収冷凍機の冷水出口温度制御と溶液濃度制御の2つのPID制御器パラメータ調整に、3章に示した自動調整法を適用した。ここでは、操作量 u_1 を加熱源流量制御弁、 u_2 を溶液循環量制御弁とし、制御量 y_1 を冷水出口温度、 y_2 を溶液

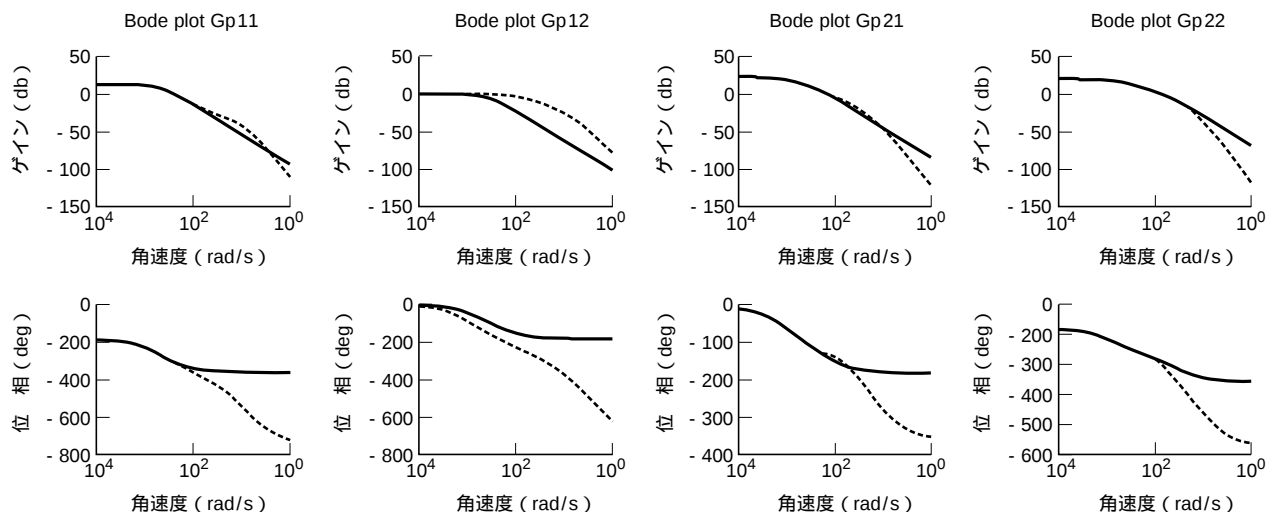


図6 吸収冷凍機の周波数特性同定結果 吸収冷凍機の周波数特性同定結果を示す。
Frequency characteristics of absorption chiller

濃度としている。

制御対象を二次遅れ系で近似し、図5に示す自動調整法のうちステップ4までを適用して制御対象の周波数特性を同定した。自動調整法による同定結果（実線）と、75%負荷定常状態における周波数特性（点線）を図6に示す。伝達特性Gp11、Gp21、Gp22は、二次遅れ系で近似したことによる誤差が高周波域で残るものの、0.02 rad/sec以下の低域では良好な同定結果が得られている。一方、Gp12は、溶液循環量（濃溶液流量）から冷水出口温度までの挙動が逆応答特性を有しているにもかかわらず、同定を簡易化する目的で二次遅れ系として近似したことから誤差が大きくなっている。しかしながら、本手法の有効性を確認する上では、いずれも問題ない精度である。

図6に示した同定結果を用いて非干渉器を求め（ステップ5）、これを付加したシステムに対して限界ゲイン適応同定法を適用し（ステップ6）、限界ゲインを同定した。

同定結果を基に、図6のステップ7にて限界感度法を用いて制御パラメータを決定した。冷水入口温度変動に対する冷水出口温度と溶液濃度変動の比較結果を図7に示す。点線が非干渉器なしの場合、実線が非干渉器ありの場合の結果である。非干渉器により冷水出口温度低下幅は0.6 から0.4 に低減、溶液濃度変動幅も1.2%から0.4%に低減し、温度、濃度制御性能がともに向上、過冷却によるトリップまでの余裕度が33%改善できた。以上の結果から、3章に示した自動調整法が、吸収冷凍機の冷水出口温度制御と溶液濃度制御のPID制御器パラメータの自動調整に適用可能であることをシミュレータにより確認した。

5. おわりに

吸収冷凍機の運転特性を大幅に改善する省エネ制御システムの概要を紹介した。従来制御に新たに2つの操作量を加え、

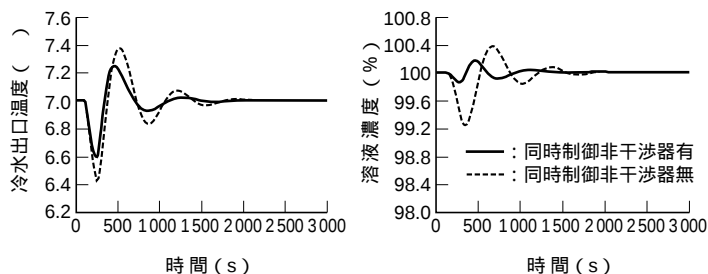


図7 自動調整法の有効性 冷水入口温度変動に対する制御性から自動調整法による制御パラメータの有効性を示す。
Effect of automatic tuning control system for absorption chiller

冷水出口温度と溶液濃度を同時制御する新制御システムは、負荷追従性を改善して過冷却によるトリップまでの余裕度を60%以上改善するとともに、部分負荷性能を向上し約20%（部分負荷運転時）の運転コスト低減が期待される。さらに、同時制御に伴う制御系調整作業の煩雑さ回避のため、制御系の自動調整機能も有しており、経年劣化等による制御パラメータの再調整が必要な場合にも、サービスマン等を介することなく容易に対応可能であり、機器の稼働率向上に繋がる。本システムは、吸収冷凍機の次世代機へ適用し、運転特性の観点から吸収冷凍機の信頼性向上を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 藤原誠ほか、吸収冷凍機の制御性向上、三菱重工技報 Vol.35 No.2 (1998) p.120
- (2) 佐伯正美、多入出力プラントに対する限界ゲイン同定法、SICE 中国支部シンポジウム予稿集 (1998) p.22
- (3) Ono, Hitoei. et al., Automatic Tuning of PID Controllers for MIMO Processes, IFAC Workshop on Digital Control (2000) p.83