

佐野 泰史
H.Sano

大越 靖二
S.Ohkoshi

竹谷 伸行
N.Takeya

業務用インバータエアコンの高性能化を図るため、電子膨張弁を用いた冷凍サイクルの最適制御システムを開発した。遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)による制御の最適化手法を膨張弁制御に応用し、さまざまな運転条件、環境条件、据付条件などの変化要因に対し、応答性に優れ、安定した冷凍サイクルを保持できるようにした。この膨張弁制御システムでは空調機容量や室内機形態、設置条件といった変動要因をあらかじめ考慮しているため、どのようなシステムに対しても即応性、安定性、信頼性の高い制御を行うことができる。その結果、外乱などの影響による冷凍サイクルの変動を最小限に抑え、信頼性、省エネルギー性に優れた制御を実現できた。

An optimal control system for refrigerant cycles with a pulse motor valve has been developed to permit higher performance by inverter-aided commercial air conditioners.

An optimizing method employing a genetic algorithm (GA) was applied to the pulse motor valve control to maintain stable refrigerant cycles with excellent response to various operational, environmental and installation conditions. By taking variable factors into account in advance, such as the air conditioner capacity, the indoor unit type and the installation conditions, higher control performance was achieved providing quick response, stability and reliability for any refrigerant cycle.

As a result, refrigerant cycle fluctuations due to disturbances are minimized and a control system with excellent reliability and energy conservation has been realized.

1 まえがき

業務用エアコン市場におけるインバータ機種の占有率は、家庭用エアコンほどには大きくない。しかし、省エネルギー化のニーズが大きくなっており、インバータ制御技術は欠くことのできないキー技術である。

インバータエアコンに電子膨張弁を用いることは、冷凍サイクルの制御性を高めるために非常に有効な手段である。その反面、起動時や周波数変動時、その他の外乱などに対する弁の即応性、サイクルの安定性などに問題点があるのも事実である。特に、サイクルの安定性は省エネルギーに大きな影響を与えるポイントでもある。今回開発した制御は、電子膨張弁のもつこれらの問題点を解決する制御である。

以下に新しく開発した冷凍サイクル(図1)の基本制御システムと、GA手法による膨張弁制御の最適化について述べる。

2 冷凍サイクル基本制御

冷凍サイクルを電子膨張弁で制御するためには、冷凍サイクルの状態を何で判断し、どのように膨張弁開度にフィード

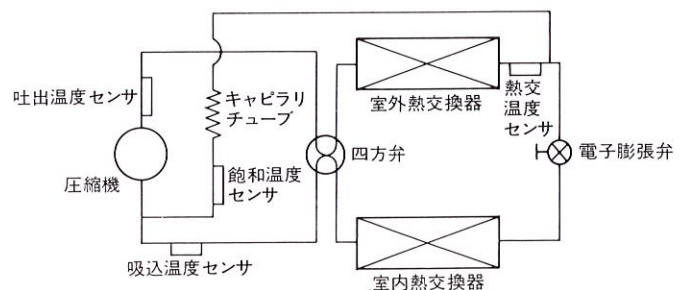


図1. 冷凍サイクルの基本原則 4本の温度センサの検出値によって電子膨張弁の最適制御を行う。

Refrigerant cycle

バックするかという基本制御方式の決定が一つのポイントである。また信頼性、省エネルギー性に大きく影響する起動時の膨張弁制御方式の決定も重要なポイントである。

以下に制御方式について述べる。

2.1 基本制御方式

冷凍サイクル制御でもっとも信頼性のある制御としてスーパーヒート(SH)制御がある。この制御は、冷媒が圧縮、凝縮、絞り、蒸発の過程をたどる最終の蒸発器出口部の冷媒状態を制御する方式である。この制御により、圧縮機は冷媒の

液戻りによる故障から保護される。基本制御の柱はこのSH制御である。

しかし、運転条件によってはSH制御だけでは吐出温度が上昇しすぎ、そのまま運転を継続すると、圧縮機内部温度の上昇、潤滑油の劣化などにつながる。この場合は圧縮機の吐出温度値で過熱を検知し、吐出温度一定制御(TD制御)に移行する。このTD制御の特徴は、圧縮機の吐出温度が高く圧縮機が過熱している間は、あえて少量の液戻りを生じさせて圧縮機を冷却するところにある。

以上の理由で、基本制御はSH値あるいはTD値を検出し、電子膨張弁の開度補正値を操作量としたフィードバック制御とした。しかし、このままではSH制御とTD制御の間の制御移行時に一時的に圧縮機が過熱したり、サイクルが不安定になるなどの問題点があった。

そこで、制御の切り替えは図2の制御図に基づき、TD値を検出しながらその上昇に伴い目標SH値を徐々に液戻り側に補正するように改善した。最終的に過熱が続けばTD制御に制御を手渡すことになる。SH制御からTD制御への移行時のサイクル状態変化を滑らかなものにし、圧縮機の信頼性を向上させることができた。図3に改善効果を示す。

2.2 起動制御

起動時の冷媒の挙動は起動前の停止状態によっても大きく異なり、配管の長さや冷媒量などによっても大きく変化するため、予測は困難である。そのために、電子膨張弁の起動制御は初期開度を開きぎみとし、その後、室内の要求能力に応じた開度に移行する制御が基本である。しかし、短い間に運転・停止を繰り返すときは、前述の起動開度のままでは液戻りが多量となり、圧縮機の信頼性が低下する。逆に、起動開度が絞りぎみの場合は、低圧の低下などにより適切な冷凍サイクル状態を保つことができない場合があった。

今回開発した起動制御は、SH値で冷媒の状態を予測し、

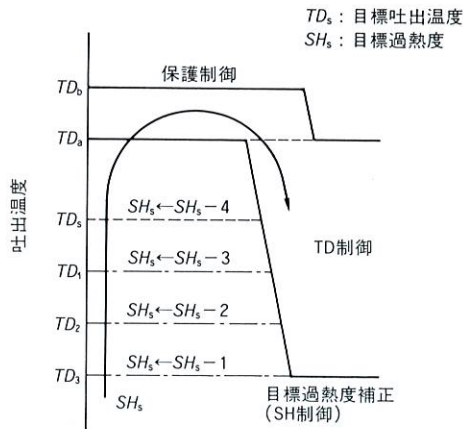


図2. 冷凍サイクルの基本制御 過熱度制御と吐出温度制御の制御範囲を示す。安定した制御の移行が可能となる。

Basic control diagram

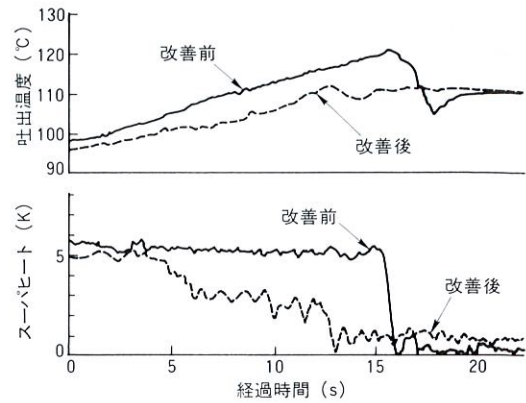


図3. 制御移行時の改善効果 冷凍サイクルの過熱を抑え、滑らかに制御が移行している。

Improved changeover between SH and TD control

速やかに最適な開度へと移行することを目的とした。起動後のSH値により、開度を大きくすべきかどうかを判断し、開度を大きくした場合はその後の絞るタイミングと絞り量をSH値と経過時間によって決定する。起動時のSHと弁開度の挙動の例を図4に示す。この制御により、冷房低負荷条件における短断続運転時の圧縮機内の潤滑油希釈度を約10%改善するとともに、圧縮機の信頼性を向上させた。

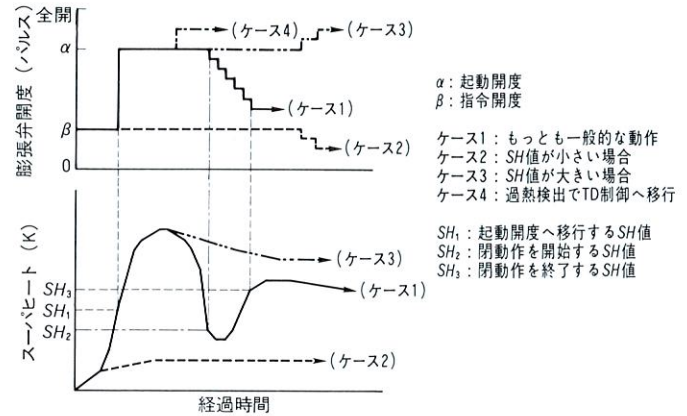


図4. 起動例 起動時のSHの挙動により、さまざまな膨張弁の動作が可能になった。

Examples of starting pattern

3 GAによる制御の最適化

3.1 GAの概要

当社は、エアコンの室温制御に関する制御規則最適化に対し、GAを用いて、良好な制御性をもつ制御器を開発している⁽¹⁾。

今回設計した制御規則は、室温制御と同じ手法を電子膨張弁制御に応用した。GAのアルゴリズムの具体例を図5に示

す。

冷凍サイクルの外乱や特性変化のパラメータとして、冷暖運転モード、圧縮機運転周波数、室内外ファン回転数、室内外温湿度、配管長、室内機形態(天井カセット、天井吊り、床置き)、設置落差、能力(馬力数)などがある。今回特に運転モード、圧縮機周波数、ファン回転数、温湿度、配管長、室内機形態に着目して制御器の設計を行った。

まず冷凍サイクルの周波数応答を計測し、応答の速さと弁開度1パルス分がサイクルに与える影響度を測定し、最適化設計すべき冷凍サイクルの応答性の範囲を定める。それから、計算機によるシミュレーションで最適化を行う。

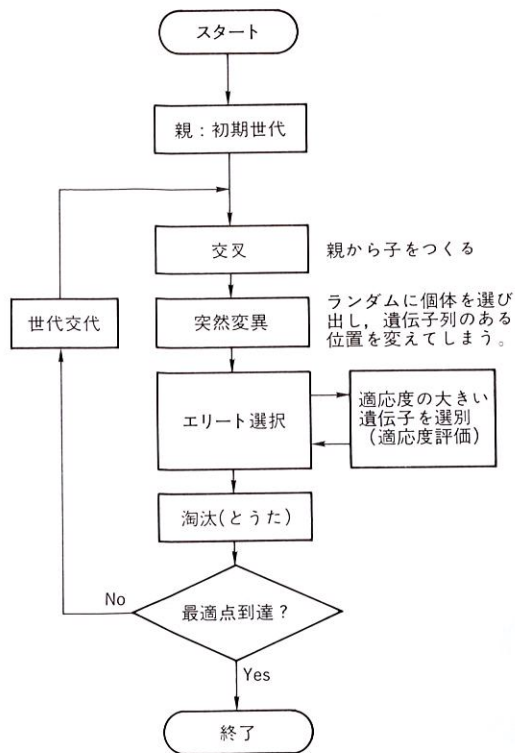


図5. GAの具体例 GAを応用することにより、効率的に制御を最適化できる。

Example of GA

3.2 冷凍サイクルの周波数応答

冷凍サイクルシステムは、弁開度補正值を入力としてSH量を出力とする系ととらえられる。そこで、前述の特性パラメータを種々の条件とした場合の周波数応答を計測し、図6に示す冷凍サイクルの応答特性を得た。図は、弁開度変化の影響がもっとも大きい条件と、小さい条件を示したものである。この範囲内で制御規則を決定することが制御の最適化である。

図6では、点線で示した特性は、弁開度変化に対する応答が遅くサイクルへの影響が小さいことを意味する。この場合、目的の開度に至る速さが十分であれば、開度変化の影響

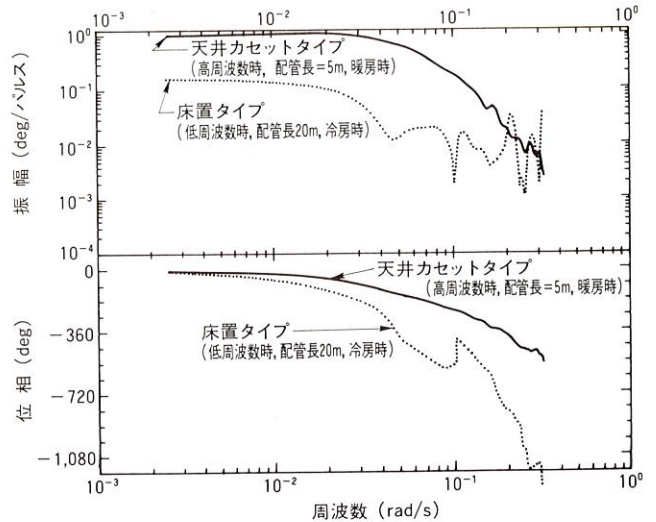


図6. 冷凍サイクルの周波数応答特性 膨張弁の開度変化に対する影響がもっとも大きな条件と、小さな条件を示す。

Bode diagram

が小さいため、安定性についてはあまり問題がない。これに対し、実線で示した特性は、弁開度変化に対する応答が速くサイクルへの影響が大きいことを意味する。この条件は開度変化に対する感度が鋭く、ハンチングなどの不安定現象が起りやすい条件である。そこで、後者の条件に対して安定化を図ることに重点をおき、制御規則を最適化した。

3.3 GAによる制御規則の最適化と実機検証

まず周波数応答の実験結果から制御モデルを定め、制御系シミュレータを計算機上に設けた。そのうえで、設計範囲で考慮すべきモデル、初期条件などを含めた形で制御シミュレーションを行い、GAにより最適な制御規則を探索した。

最適化のための評価関数は、次の3要素を正規化し、荷重平均した関数 J とした。

- (1) 目標値 SH_s からの偏差の指標： J_1
- (2) 電子膨張弁の信頼性の指標： J_2
- (3) 制御規則の滑らかさの指標： J_3

$$J = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3 \quad (0 < J < 1)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$$

今回の検討では $(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (0.75, 0.05, 0.20)$ とし、弁開度変化の影響が大きな条件を選んでモデリング+GAによる最適制御器を設計した。シミュレーション結果の一例を図7に示す。図示したのは設定した66条件中のもっとも安定しにくい三つのケースである。若干のハンチングが見られるが、目標値($SH=5$)に収束していることがわかる。

この結果に対し、図8に実機による検証例を示す。制御規則の最適化後は運転周波数変動に対して安定したサイクルを維持している。 SH の変動はそのまま能力変動となり、 SH が大きくなっている部分では効率の悪い運転状態である。

周波数ダウンは、エアコンの起動から室内負荷を満足する

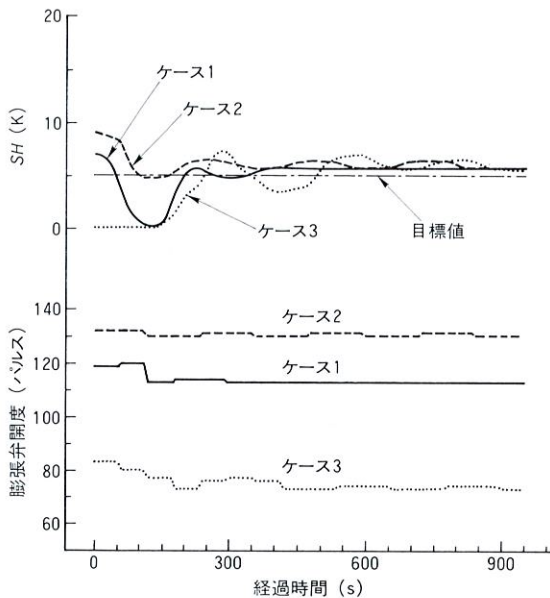


図7. GAによる制御規則のシミュレーション結果 もっとも安定しにくい3条件でもSHは目標値に収束している。

Simulation results

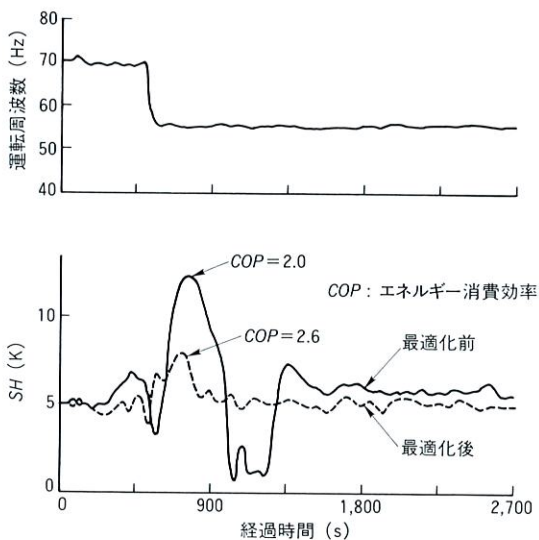


図8. GAによる制御規則の実機検証結果 運転周波数の変化に対し安定性、省エネルギー性に優れた制御が検証できた。

Experimental results

までに必ず通る過程である。また、図8のような変動は、周

波数アップ時や室内風量変化時にも発生する。さらに、出入口付近のドアの開閉時や使用中の負荷変動時などを考慮すると、実用上でサイクルを不安定にする要因はきわめて多い。このような外乱に対して安定性を求めることが省エネルギー実現に重要である。

また、安定したサイクルを維持することで、室内の快適性と冷凍サイクルの信頼性も向上させた。特にSHの変動のなかで、SHが小さく液戻りぎみの運転状態が改善されていることは、圧縮機の液圧縮による故障を防止する効果を意味し、信頼性が向上できたことを示している。

4 あとがき

電子膨張弁を用いたインバータエアコンにおいて、外乱などの影響による冷凍サイクルの変動を最小限に抑え、安定性、省エネルギー性に優れた冷凍サイクル制御を実現した。

また、この制御により、インバータ機種の冷凍サイクルの信頼性を向上させることができた。

今後は、さらなる省エネルギー性の改善を追求するとともに、より高性能の空調機を目ざして努力をしていく所存である。

文献

- (1) 平原茂利夫, 他: GA最適化制御によるエアコン室温制御, 日本冷凍協会 学術講演会論文集(1994)



佐野 泰史 Hirofumi Sano

1990年入社。業務用エアコンの開発設計に従事。現在、富士工場空調機器部。Fuji Works



大越 靖二 Seiji Ohkoshi

1985年入社。エアコンの基礎開発に従事。現在、富士工場開発技術部主務。Fuji Works



竹谷 伸行 Nobuyuki Takeya

1992年入社。エアコンの基礎開発に従事。現在、富士工場開発技術部。Fuji Works