フィードフォワード型電圧制御による
密閉形圧縮機の振動低減*

(第1報, シミュレーションによる制御効果の基礎検討)

辻内 伸好^{*1}, 小泉 孝之^{*1}, 稲田 征治^{*2}
富沢 正雄^{*3}, 丁野 篤^{*4}Vibration Suppression of a Rotary Compressor for a Room Air Conditioner
by using a Feedforward Voltage Control
(1st Report, Basic Study of the Control Effects by Computer Simulation)Nobutaka TSUJIUCHI, Takayuki KOIZUMI, Seiji INADA,
Masao TOMISAWA and Atsushi CHONO

This paper presents a method of vibration suppression of a rotary compressor for a room air conditioner by using a torque control. First, the dynamic characteristics of a compressor driven by an induction motor are confirmed using analytical simulation and experimental data. Second, the feedforward control of input voltage for an induction motor which increases motor output torque in the range of the required angular position of a load torque is applied. The analytical study indicates that the reduction of compressor vibration is possible in a low frequency range.

Key Words: Vibration Control, Digital Control, Computer Control, Induction Motor, Rotary Compressor, Torque Control, Feedforward Control

1. はじめに

冷熱機器に関する技術開発は目覚ましい発展を遂げている。インバータによる容量制御の発達に伴い、圧縮機の高速回転による能力向上が要求される一方で、低負荷時にも対応できるように最低回転速度をより低く設定し、冷熱機器の最小能力を引き下げる必要がある。運転領域を低速側に拡大していくと、ガス圧縮に伴う負荷トルク変動が大きくなり、また、圧縮機支持系の共振点に近づくため、低振動化を図る上で大きな問題となっている。

最近、電動機をアクチュエータとして利用することが試みられており、圧縮機のトルク脈動を打ち消すために、電動機ロータ側の発生トルクを負荷トルクに追従させる制御が実施されている(トルク制御と呼ぶ)⁽¹⁾⁽²⁾。圧縮機の密閉容器に発生するトルク変動による振動を低減するための制御方式として、3相4極のブラシレスDCモータに対して繰り返し制御を適用したフィードバック方式が提案されている⁽¹⁾。

一方ここで対象とする圧縮機は、耐久性とコストの低減から2極の誘導電動機が用いられており、PWM形インバータによるV/f制御によって電動機トルクが一定となるように制御されている。家庭用エアコンでは、制御が簡単で電動機効率が良いためにV/f制御を用いることが多いが、電動機トルクを一定に制御するため圧縮機の負荷トルクとの差が増大し密閉容器に大きな振動が発生する。

そこで本論文では、あらかじめ誘導電動機のロータに対するステータの振動特性を求めておき、1回転1回のロータ位置検出信号を基にフィードフォワード制御を行うCPUに負担のかからない簡単な電圧制御方式を提案し、制御効果についてシミュレーションにより検討する。

制御を行うにはまず適切なモデル化を行い、シミュレーションによって加振力の発生する機構を明らかにする必要がある。そこで本論文では圧縮機を圧縮部と電動機部に分けてそれぞれをモデル化し、インバータの影響も考慮した電動機-圧縮機の連成振動解析を行う。そして提案した電圧制御の制御特性を数値シミュレーションによって明らかにし、制御効果について検討する。

* 原稿受付 1995年6月12日。

^{*1} 正員、同志社大学工学部 (〒610 03 京都府綴喜郡田辺町多々羅都谷)。^{*2} 同志社大学大学院。^{*3} 正員、三菱電機(株) (〒661 尼崎市塚日本町8-1-1)。^{*4} (株)住原製作所 (〒144 東京都大田区羽田旭町11-1)。

2. 密閉形圧縮機の試験システム

2・1 密閉形圧縮機の特⼾解析 ローリングピス

トン形圧縮機の概略図を図 1 に示す。圧縮機は、電動機部と圧縮部から構成されている。電動機部と圧縮部はクランクシャフトを介して直結されて回転系を構成しており、それらは密閉容器に格納されている。また、圧縮機全体は防振ゴムで支持されている。今電動機部にモータトルク T_M を発生させると圧縮機は回転し、偏心ローラの回転による圧縮室の体積変化により冷媒ガスを圧縮する。この時冷媒ガスの圧力変化によって軸一回転ごとに 1 サイクルの変動をする負荷トルク T_L が発生する。

以下電動機部と圧縮部の連成振動系について検討する。

まず電動機部のモデル化について述べる。誘導電動機の等価回路を図2に示す。この等価回路から誘導電動機の電流・電圧方程式は、固定子巻線と回転子巻線に対し、それぞれ同期角周波数 ω_0 とすべり角周波数 $\omega_s (= \omega_0 - \omega_r)$ の相対角速度で回転する相対座標軸 $d^e - q^e$ 軸を導入することにより、式(1)で表現できる。従って電動機の瞬時トルクは、式(1)から導かれる電流値を用いて式(2)で求められる。

$$\begin{bmatrix} V_{d^*s} \\ V_{q^*s} \\ V_{d^*r} \\ V_{q^*r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 P & -\omega_0 L_1 & PM & -\omega_0 M \\ -\omega_0 L_1 & R_1 + PL_1 & \omega M & PM \\ PM & -(\omega_0 - \omega_r)M & R_2 + PL_2 & -(\omega_0 - \omega_r)L_2 \\ (\omega_0 - \omega_r)M & PM & (\omega_0 - \omega_r)L_2 & R_2 + PL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d^*s} \\ i_{q^*s} \\ i_{d^*r} \\ i_{q^*r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_M = M(i_{d^e r} i_{g^e s} - i_{d^e s} i_{g^e r}) \quad (2)$$

ここで, R_1, R_2 : 固定子, 回転子抵抗

 L_1, L_2 : 固定子, 回転子インダクタンス

M : 相互インダクタンス

 $P(= d/dt)$: 微分演算子

ω_0, ω_r : 同期角速度, 回転角速度

 i_{d^e}, i_{q^e} : 固定子側の $d^e - q^e$ 軸電流 $i_{d^e r}, i_{q^e r}$: 回転子側の $d^e - q^e$ 軸電流 V_{d^e}, V_{q^e} : 固定子側の $d^e - q^e$ 軸電圧

次に圧縮機回転系のモデル化について述べる。ここで簡単化のため圧縮機の各機械要素が剛体であるとすると、圧縮機回転系の回転速度変動は、回転軸回りの次の運動方程式によって与えられる。

$$I \cdot \ddot{\theta} = T_M - T_L \quad (3)$$

ここで、 I : 回転部の慣性モーメント

θ : クランク軸回転角度

T_M : モータの瞬時発生トルク

 T_L : 圧縮機の負荷トルク

以上の各要素を考慮した $d^e - q^e$ 軸における電動機部と圧縮部の連成振動系のブロック線図を図 3 に示す。モータ部は Main Block で、圧縮機負荷トルクは T_L で表す。frq は指令周波数、Vdc は入力電圧である。

Fig.1 Structure of Rotary Compressor

Fig.2 Equivalent Circuit for Induction Motor

Fig.3 Block Diagram for Rotary Compressor

Fig.4 Experimental Set-up

2.2 試験システムの構成 実験装置の全体構成を図4に示す。圧縮部に与える負荷として実際の家庭用エアコンの室内機と室外機から成る冷凍サイクルを使用した。圧縮機はロータのステータに対する位相情報について詳細に検討するため、ロータエンドリング部について回転検出用の変位センサを取り付けた。センサを埋め込むため、3つに分離されたフランジ付きの圧縮機を使用する必要がある。重量および慣性モーメントは汎用圧縮機よりも大きい。従って防振用の支持マウントも製品と異なるものを使用している。制御に用いるCPUは、制御の汎用性を考えメインマイコンとDSPの2CPU構成としている。インタフェース用のロジック回路は、メインマイコンとDSP間でデータ授受を行うためのラッチおよびセクタである。メインマイコンはモータ制御回路を内蔵しておりPWM波形生成等のインバータ制御を行い、DSPで各種制御の検討を行う。実験に用いた誘導電動機の諸元を表1に示す。

Table 1 Specification of Induction Motor

Stator resistance R_1	1.187 [Ω]
Rotor resistance R_2	0.841 [Ω]
Staror inductance L_1	83.75 [mH]
Rotor inductance L_2	82.77 [mH]
Mutual inductance M	80.44 [mH]
Leakage factor σ	0.067
Number of pole pair p	1
Rotor inertia J	1.785×10^{-3} [kgm ²]

本実験では、周波数指令装置によって駆動目標周波数を1Hzきざみで順次入力し、表2に示す運転条件における圧縮機の振動特性を計測した。誘導電動機は、指令周波数に対して、所定のV/f対応テーブルに従って演算された基準電圧で駆動される。振動成分は密閉容器表面に振動加速度計を90度おきに4個取り付け、ステータの回転方向加速度を計測し、差動アンプを用いてトルク脈動成分とロータ不釣り合い成分を分離して計測する。

Table 2 Operating Condition of Air Conditioner

Discharge pressure	1.27 [MPa]
Suction pressure	0.39 [MPa]
Condensing temperature	40 [$^{\circ}$ C]
Evaporating temperature	3 [$^{\circ}$ C]
Operating frequency	72 [Hz]
Refrigerant	R-22

2・3 動特性検討結果 シミュレーションに用いる負荷トルクは、ベーンに作用する力と圧縮室内のガス圧の釣り合いから運動方程式をたて理論的に求め⁽³⁾、クランク軸1回転の成分を、12次のフーリエ級数に展

開して用いた。駆動周波数34Hzと50Hzにおける1回転に対する回転数変動の実験とシミュレーション結果の比較を図5に示す。両者はよく一致しており圧縮機の動特性をこのモデルを用いて検討できることがわかる。指令周波数を20Hzから50Hzまで変化させた場合の電動機発生トルク T_M と圧縮機負荷トルク T_L の最大値発生位置の位相差を図3に示したブロック線図に基づくシミュレーションによって求め、その結果を図6に示す。位相差は指令周波数の増大とともに少しずつ大きくなるが、最大でも30度以下であることがわかる。

本制御を行う上で、指令周波数の変化に対して位相差の受ける影響が重要となるので、この実験結果について以下に示す。図7は、ロータエンドリング部の位置検出信号を基準信号とし、ステータのトルク方向の応答加速度の回転数成分をトラッキングフィルタを用いてナイキスト線図で示したものである。100Hzから1Hzきざみで15Hzまでゆっくり指令周波数を下げて測定した。図中に記入された数字は、指令周波数を示したものである。密閉容器で測定されたトルク成分は圧縮機支持系の動特性の影響を受ける。そこで同図は、

Fig. 5 Rotational-speed Fluctuations at 34Hz and 50Hz

Fig. 6 Phase Lag of Angular Position of Peak Value between Motor Torque and Load Torque

予め支持系の動特性を求め、ロータ角変位とトルク間の伝達関数を示すように補正したものである。

図7より、角変位に対しトルクは18Hzから58Hzの領域ではほぼ一定の位相遅れ（25度以内）を示すことがわかる。58Hzをすぎると徐々に遅れは増大し、100Hzまで58Hzを基準とし最大65度遅れる。ただし19Hzから27Hzの領域は圧縮機支持系の共振の影響を考慮する必要がある。本結果は既に示したシミュレーション結果ともよく一致している。圧縮機が大きなトルクを必要とする区間内で、例えば図7中に示す矢印の方向に制御ベクトルをフィードフォワード制御によって加えると、トルク変動を効果的に低減できる可能性がある。

Fig.7 Nyquist Diagram of Transfer Function between Rotor Angular Position and Motor Torque

3. フィードフォワード形電圧制御

図7で示した様な回転数によって制御ベクトルの大きさや方向を変化させない簡単な制御を用いた場合の振動低減効果について、シミュレーションによって検討した。図8に示したフローチャートに基づき、制御アルゴリズムについて説明する。発生トルクと負荷トルクの最大発生位置の位相を合わせるために、ロータ位置を示す基準信号を1回転1回出力する。この信号を基準として、負荷トルクが大きいクランク角が130度～270度の間では電圧をV/f制御の基準電圧に対し10%上げ、トルクが小さい0度～130度および270度～360度では電圧を10%下げる。そして電圧変化による回転速度の変動を押さえるため、回転速度が指令周波数より1Hz以上大きくなると電圧を10%下げ、指令周波数より7Hz低下すると電圧を10%上げる。このアルゴリズムに従って制御シミュレーションを実施した。

図9に指令周波数50Hzにおける制御時の発生トルクと負荷トルクの間を、図10に50Hzにおける制御の有無による加振力の比較を示す。また図11に指令周

Fig.8 Algorithm of Feedforward Voltage Control

Fig.9 Relationship between Motor Torque and Load Torque

Fig.10 Comparison of Excitation Force with and without Control

波数を変化させた場合の加振力低減効果を示す。図11より、電圧制御を行うことによって加振力を12～42%低減でき、指令周波数が大きいほど低減効果が大きいことがわかる。低周波で低減効果が小さいのは、低周波ほど基準電圧に対する負荷変動が大きいため、基準電圧に対して同じ割合で制御ベクトルを加えた場合、トルクを上げるべき所でトルクが不足し、下げるべき所で発生トルクが大きいためと考えられる。よって低周波の場合、制御ベクトルの基準電圧に対する割合を、本シミュレーションで用いた10%よりも大きくする必要がある。

Fig.11 Effect of Feedforward Voltage Control

4. 結言

本研究では、トルク制御を行うにあたり、誘導電動機で駆動される密閉形圧縮機の動特性をシミュレーションと実験により明らかにし、フィードフォワード形の電圧制御方式の制御効果についてシミュレーションによって検討した。その結果以下の事項が明らかとなった。

- (1) 指令周波数が18Hz～58Hzの領域では、誘導電動機発生トルクと圧縮機負荷トルクの最大値を示す位置の位相差は周波数に関わらずほぼ一定（25度以内）であり、制御ベクトルの方向が一定の簡単な制御でトルク変動を低減できる。
- (2) 1回転1回の負荷トルク変動に同期した位置センサ信号に基づき、フィードフォワード形の電圧制御を行うことによって、加振力を12～42%低減できる目処を得た。

本研究の一部は、同志社大学学術奨励研究費の援助を受けた。記して謝意を表す。

文献

- (1) 中村・ほか4名, 機論, 56-527, C (1990), 1797.
- (2) 門向・ほか4名, 機論, 59-560, C (1993), 1023.
- (3) Tadashi Yanagisawa・ほか3名, Comperssor Tech. Conf., 1982, pp.185