コンプレッサ駆動用モータの停止時振動低減法 塩井 太介* 熊谷 崇宏 伊東 淳一(長岡技術科学大学)

Reduction Method of Vibration at Motor Stop for Compressor Taisuke Shioi*, Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a reduction method of a vibration at motor stop. Compressor motor generates the vibration due to load torque fluctuations and rebound of rotor at stop. The proposed method combines the free-run part and the short brake part in order to suppress the bounce of the rotor. In addition, this method reduces influence of load torque by stopping the motor during the suction operation. Furthermore, suppressing over currents during short brake by hysteresis current control. As the result, proposed method reduced the amplitude of vibration by 53%.

キーワード: 永久磁石同期モータ, コンプレッサ, 短絡制動, 停止時振動, (Keywords: PMSM, compressor, short brake, vibration at stop)

1. はじめに

近年,埋め込み磁石同期モータ(IPMSM)は小型・高効率 といった特徴を有することからエアコンや冷蔵庫などの家 電製品に幅広く使用されている^{(1)~(4)}。エアコンや冷蔵庫な どの電化製品では,生活環境に影響を与えないように,静 音・低振動であることが求められる。これらの家電製品に は,いずれも冷媒を圧縮するためにコンプレッサが内部に 組み込まれており,モータを用いてコンプレッサを駆動す ることで熱交換を行う。この熱交換は,吸引,圧縮,吐出の 3動作を繰り返すことで行われるが,これらの繰り返し動作 により周期的な負荷トルクの変動が生じる⁽⁵⁾。加えて,熱交 換に伴い内部が高温・高圧の過酷な環境になるため,内部の モータに速度センサや位置センサを取り付けられない。ま た,製品コストの観点から制御用マイコンの処理能力が制 限されるため,複雑な演算ができないなどの制約がある。

コンプレッサを駆動する際,消費電力削減のために内部 のモータが頻繁に起動・停止を繰り返す。そのため,静音化 のためには,(i)起動,(ii)運転,(iii)停止の三つの動作におい て,振動の低減が求められる。

(i)起動は通常,滑らかに回転数を上げるために,停止→位 置決め(直流通電)→同期駆動(オープンループ)→センサレス 制御のシーケンスで行われる。起動時騒音に関しては,ゼロ 速から正弦波駆動しつつ,制御モードの切換ショックを抑 制することで,騒音を低減する手法を提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。 文献[6]では,dq軸電流を制御した状態で,回転速度指令値 をオープンループで徐々に増加させることで,正弦波駆動 を行っている。加えて,センサレス制御に切り替える際に, 負荷に応じて速度制御系に初期値を補正することで、セン サレス切り替え時に発生する切換ショックを抑制してい る。文献[7]では、同期駆動(オープンループ)→センサレス制 御の代わりに、ブースト電圧を通常より高めに設定した位 置センサなし V/f 制御で始動することで、簡易な振動低減を 達成している。

(ii)運転は通常,センサレスベクトル制御⁽⁸⁾や V/f 制御⁽⁹⁾が 用いられる。運転時に関しては、コンプレッサ特有の周期的 な負荷トルク変動をモータ出力トルクで打ち消すことで、 騒音を低減する手法が提案されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。文献[11]では、 簡易フーリエ変換を用いてモータ出力トルクを負荷トルク に一致させることで、速度リプルを抑制し振動を低減して いる。また、負荷トルク脈動の影響が小さい中~高速域で は、モータ電流波高値が最小となるように制御を切り替え ることで、高効率運転を実現している。

これまで,(i)起動時や(ii)運転時における振動を低減する 研究は数多く行われているが,(iii)停止時の振動に着目した 研究は著者らの知る限り無い。そこで,本論文では速度セン サを用いない簡単な停止法を提案し,コンプレッサ駆動用 モータの停止時に発生する振動を低減する。

本論文では、はじめにフリーランによりモータを停止さ せた際に生じる振動を測定および分析を行う。そこで、停止 時の騒音には、(i)減速中の負荷トルク脈動に伴う振動と(ii) 停止際の跳ね返りに伴う振動があり、(ii)の振動がより深刻 であることを明らかにする。そして、とりわけ、(ii)の振動を 簡易に抑制するために、フリーランおよび短絡制動を組み 合わせた低振動停止法を提案し、停止時の振動を低減でき ることを確認したので報告する。

2. 供試モータと振動評価環境の構成

図 1(a)にコンプレッサの概略図,図 1(b)にコンプレッサの トルク特性を示す。図 1(b)より、コンプレッサは吸引動作で はほとんどトルクが発生せず、圧縮、吐出動作で大きなトル クが発生するため、トルクが周期的に変動する⁽⁷⁾。ここで、 本論文では吐出から吸引に切り替わる点を上死点(Top Dead Center: TDC)、吸引から圧縮に切り替わる点を下死点(Bottom Dead Center: BDC)と呼ぶ。また、本論文では、TDCを機械 角 0deg、BDC を機械角 180deg と定義する。

表1に実験に使用するモータのパラメータおよび実験条件を示す。なお、モータ振動はコンプレッサに取り付けた加速度センサ(小野測器, NP-3120)とプリアンプ(小野測器, M-3111)により測定する。図2に示す負荷トルク特性はコンプレッサ内部の圧力条件によって変化するため、試験条件を同一にするにはコンプレッサ内部の圧力条件をそろえる必要がある。本実験では、まずコンプレッサ圧力が一定になるまでコンプレッサ駆動用モータを運転する。その後、各種停止法を用いてモータを停止した際に発生する振動を比較する。なお、コンプレッサの圧力条件および回転速度は家庭用の冷蔵庫の運転特性を参考にして決定する。

3. フリーランによる停止と停止時振動の分析

最も簡単な停止法として,インバータ側の全スイッチを オフにすることで印加電圧を遮断し,フリーラン状態で負 荷トルクによって減速・停止させる手法がある。本節では, フリーランで停止させた際に発生する停止時振動を実測お よび分析することで,コンプレッサ停止時の振動発生原因 を明確化する。

図2にモータ停止時の線間電圧(速度起電力)波形および加 速度センサ出力波形を示す。フリーランでは、インバータの 出力電圧がゼロとなるため、線間電圧に速度起電力が直接 現れる。図2より線間電圧振幅は徐々に減少しゼロになっ た後、相順が反転している。線間電圧振幅がゼロになる点で は回転速度がゼロであり、相順が反転している区間ではモ ータは逆回転していることを示しており、ロータが跳ね返 りにより、逆回転していることが予想される。また、加速度 センサ出力より、(i)減速時と(ii)跳ね返り後に振動が発生し ており、特に跳ね返りの直後に大きな振動が発生している。 以上の結果より、フリーラン停止時には、負荷トルクにより 徐々に減速した後に数回跳ね返りが生じ、完全に停止する ことが予見できる。

図3にフリーラン停止時の回転速度および加速度センサ 出力波形を示す。ここで、本検討に用いたモータには速度セ ンサを取り付けられないため、図2に示した線間電圧波形 の周波数から回転速度を推定している。図3より、フリーラ ン停止時の回転速度は周期的に変化している。ここで、回転 速度*w*と負荷トルク*TL*の関係は(1)式で求められる。





rig.n. compresson

Ta	ble	1. E	±xper	iment	al	cond	liti	ons
----	-----	------	-------	-------	----	------	------	-----

Parameter	Symbol	Value	
Rating rotation speed	Øn	80 rps	
Rating torque	T_n	0.237 N•m	
Polar logarithmic	P	3	
Winding resistance	R	6.2 Ω	
d-axis inductace	L_d	76.3 mH	
q-axis inductace	L_q	136 mH	
DC-link voltage	V_{dc}	280 V	
Switching frequency	f_{sw}	16 kHz	
Dead time	T_d	0.5 µs	







Fig.2. Line voltage waveform and acceleration sensor output.

ここで, ω0は回転速度の初期値, Tout はモータの出力トルク, Jは慣性モーメント,sはラプラス演算子である。(1)式より フリーラン停止時にはモータの出力トルクはゼロになるた め、回転速度は負荷トルクにより変化する。そのため、図3 の回転速度の周期的な変化は図 1(b)に示した負荷トルク特 性に依存しており、大きな負荷トルクが生じる圧縮および 吐出動作では、速度が急激に低下していると予想される。そ して、(i)負荷トルク脈動による速度変化と(ii)跳ね返りが生 じた際に振動が発生している。

以上の結果より, コンプレッサ駆動用モータの停止時振 動は, (i)減速中の負荷トルク脈動に伴う速度リプルと(ii)停 止時の跳ね返りによって発生している。そのため、本論文で は、特に大きな振動発生原因となっている(ii)ロータの跳ね 返りを抑制することで、停止時振動の低減をはかる。

4. 停止時振動を低減する停止法

フリーラン停止時には、コンプレッサの負荷トルク脈動 に伴うロータの跳ね返りによって,振動が発生する。本論文 では振動の原因となるロータの跳ね返りを抑制するため に、フリーランと短絡制動を組み合わせた低振動停止法を 提案する。提案法では、フリーランにより十分減速した後に 短絡制動に切り替え、負荷トルクが小さい吸引動作中に停 止させることで,跳ね返りを抑制する。本制御では,フリー ランにより減速させた後に、吸引動作が始まる上死点で短 絡制動に切り替えることで、吸引動作中の停止を実現する。

図4に短絡制動時の回路動作を示す(12)。図4に示すよう に、短絡制動ではインバータの出力電圧をゼロにし、モータ の出力端を短絡させる。そして、モータと負荷が持つエネル ギーを巻線抵抗で熱に変えることでモータを停止させる。 この時、モータ巻線には速度起電力に依存した大きな電流 が流れるため、過電流トリップが発生したり、モータ焼損や 不可逆減磁を招く恐れがある(13)。そのため,停止動作に起因 する過電流によって,モータ損傷や不可逆減磁が発生しな いよう、モータ電流を制御する必要がある。

図5に、コンプレッサの負荷トルク特性を模擬し、上死点 および下死点で短絡制動に切り替え減速したときのモータ トルクおよび回転速度のシミュレーション結果を示す。図5 より上死点で短絡制動に切り替え、負荷トルクの小さい吸 引動作中に停止させることで、負荷トルクによるロータの 跳ね返りを抑制できる。

吸引動作中にモータを停止させるには、(i)回転速度を閾値 以下まで減速し、(ii)ロータ位置が上死点に一致したタイミ ングで制動トルクを発生させる必要がある。そのため、モー タを減速させながら回転速度と上死点を推定する必要があ る。提案法では、フリーランにより減速させることで、速度 起電力から回転速度と上死点の推定を行う。 その後, 短絡制 動により停止する。以下に、提案法における回転速度推定 法、上死点の推定方法および制御ブロック図を示す。

<4.1> 制御ブロック図 図 6 に提案法の制御ブロック図 を示す。本制御は V/f 制御を用いたデューティ比決定部,速







Fig.4. Circuit operation of short brake.







-20



度推定部,電流制御部,動作モード選択部およびスイッチン グパターン選択部で構成される。

図 7 に提案する停止法のフローチャートを示す。提案法 では、はじめに"Flg_stop"を1にすることでインバータの全 スイッチをオフにし、V/f 制御による運転状態からフリーラ ンに移行する。次に、フリーラン減速時の速度起電力から回 転速度および上死点を推定する。そして、回転速度が閾値以 下かつ上死点になったタイミングで、"Flg_hysterisis"を1に し、ヒステリシス電流制御に移行する。電流ベクトルの大き さ*i*が上側閾値 *ih_upper* を上回る場合には短絡制動へ切り替 えることで、電流ベクトルの大きさを制御する。

<4.2>回転速度推定法 一般的なセンサレスベクトル制 御では、オブザーバや適応制御を用いて推定した誘起電圧 より回転速度を求める⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかし、これらの方式では誘 起電圧が小さくなる低速域において、推定精度が悪化する。 しかし、提案制御では、はじめにモータをフリーランさせる ためモータの線間電圧より誘起電圧を直接求めることがで きる。よって、モータの電気角*θ*, は(2)式で求められる。

(2)式より,インバータの出力電圧から電気角を求められる。そして,(2)式で求めた電気角を微分することで回転速度が得られる。

<4.3>上死点の推定方法 本制御では、コンプレッサの負荷トルクの周期性に着目し、速度の変化量より吐出から吸引への切り替わりである上死点を推定する。図2に示すように、フリーラン減速時の回転速度は負荷トルクが小さい吸引動作中にはほとんど変化せず、負荷トルクの大きくなる圧縮・吐出動作で急激に減速する。そのため、回転速度が低下した後に速度変化が小さくなる点が、上死点となる。

図8に上死点推定のシーケンスを示す。本制御では、まず 機械角10 deg ごとに回転速度を推定し、前回値と比較する ことで速度変化量Aav を算出する。そして、速度変化量Aav が閾値Aavh以下であり、Aav の前回値が閾値Aavh以上となる 点を上死点とする。

<4.4> 電流制御法 図 9 にヒステリシス電流制御を適用した際の電流ベクトルの振幅を示す。本制御では,電流ベクトルの大きさに応じて短絡制動とゲート遮断を切り替えることで,モータ電流を制御する。短絡制動時に流れる電流振幅は速度起電力に依存するため,モータの減速に伴い電流が小さくなり,自然にモータは停止する。

5. 実験結果

4章で述べた提案法の有用性を実機実験により検証した。 実験条件は、3章に記したフリーラン停止時の振動測定試験 と同様である。短絡制動へと切り替える回転速度閾値は、短 絡制動に切り替える前に跳ね返りが発生しないように、定 格回転速度の20%である15 rpsとし、速度変化量の閾値 Δω_h



Fig.6. Control brock with V/f control and motor stop control.





Fig.8. Detection sequence of the zero degree of crank.

は実験的に1 rps に設定した。また、ヒステリシス電流制御の上側閾値と下側閾値はそれぞれ1Aと0.9Aとした。

図10に電流制御を適用した場合と適用していない場合の

電流ベクトルの振幅および,加速度センサ出力波形を示す。 図 10 より,電流制御を用いずに停止させた場合には,短絡 制動時に 1.6A 程度の大きな電流が流れる。一方,電流制御 を適用することで,モータ電流の最大値を 1A 以下に抑制 できていることが確認できる。そのため,ゲート遮断を組み 合わせることで,短絡制動時の過電流を抑制可能である。

図11に提案法によりモータを停止させた際の回転速度推定値,UV相電流波形および加速度センサ出力波形を示す。 短絡制動時には速度起電力を検出できないため,回転速度は推定できない。図11(b)より,負荷トルクにより回転速度が低下した後に短絡制動へ切り替わり,電流が流れ始めることがわかる。これは、上死点付近で短絡制動へ切り替わっていることを示している。提案手法を用いてモータを停止させることで、図2に示したフリーラン停止時と比較して、停止時の振動を大幅に低減していることが、加速度センサ出力波形よりわかる。しかし、本制御はロータの跳ね返りを抑制することのみに着目しているため、停止時に発生する振動の完全な抑制には至っていない。

次に,提案法の妥当性を検証するために,上死点以外で短 絡制動へ切り替えた際の振動を測定する。ここでは,負荷ト ルクが大きくなる下死点で短絡制動へ切り替えた際の振動 波形を測定する。

図12に下死点で短絡制動に切り替えた際の実験結果を示 す。ここで、下死点での切り替えは、推定した上死点から一 定の遅延を設けることで実現している。下死点で短絡制動 に切り替えた場合、負荷トルクが大きい圧縮動作中にモー タが停止するため、負荷トルクによる急激な速度変化によ り、大きな振動が発生する。よって、停止時振動を低減する ためには、負荷トルクが小さい吸引動作中にモータを停止 させる必要がある。

図 13 に各種停止法でそれぞれ 30 回モータを停止させた 際の振動振幅の発生確率を示す。(a)に示すフリーラン停止 時は負荷トルクによって減速するため、停止時の振動は負 荷トルク特性に依存する。よって、停止時の振動振幅にばら つきが生じる。一方、提案法では停止時の磁極位置を一定に 制御しているため振動振幅のばらつきが小さい。下死点で 短絡制動に切り替えると、負荷トルクによる跳ね返りが発 生するため、(c)に示すように 10 m/s²以上の大きな振動が発 生している。これに対して、上死点で短絡制動に切り替え、 負荷トルクが小さい吸引動作中に停止させることで、(b)に 示すように振動を 10 m/s²以下に抑制可能である。

表 2 にフリーランと提案法で停止させた際の振動振幅の 平均値および標準偏差を示す。表 2 より,提案法を用いるこ とでフリーラン停止時と比較して,振動振幅の平均値を 56%,標準偏差を 61%低減できる。

6. まとめ

本論文では、コンプレッサ駆動用モータを停止する際に 発生する振動を低減可能な停止法を提案した。はじめに、停 止時に発生する振動の発生原因を明確にするために、フリ



Fig.9. Amplitude of current vector with hysteresis control.







(b)with current control.







(a) Estimation speed and acceleration sensor output at stop.

(b) Enlarged the waveform at control change point.

Fig.11. Acceleration sensor output by short brake at TDC.

ーランにより停止させた際の振動を測定・分析した。その結 果,停止時の振動は(i)コンプレッサ特有の周期的な負荷トル ク脈動に速度変化に伴う速度リプルと,(ii)ロータの跳ね返 りによって生じることが分かった。次に,特に大きな振動原 因となっているロータの跳ね返りを抑制するために,フリ ーランと短絡制動を組み合わせた停止法を提案した。提案 法は,フリーラン減速時に回転速度と機械角を推定し,負荷 トルクが小さい吸引動作中に停止させることで,跳ね返り による振動を低減可能である。実機実験により,提案法を用 いることでフリーラン停止時と比較して,振動振幅の平均 値を 56%,標準偏差を 61%低減できることを確認した。

今後は,振動の原因となる急激なトルクステップを加え ることなく,減速時および停止時の振動を低減可能な停止 法について検討を行う。

文 献

- 川端幸雄,遠藤常博,高倉雄八:「位置センサレス・モータ電流センサレス永久磁石同期モータ制御に関する検討」,電学論 D, Vol. 134, No. 6, pp. 579-587(2014)
- (2) 大森英樹, 岩井利明, 中島昇:「拡大期を迎えた家電・モバイル機器のエネルギーエレクトロニクス」, 電学論 D, Vol. 124, No. 11, pp.1087-1093(2004)
- (3) 関原聡一,蛭間淳之:「エアコン用正弦波駆動インバータ -- コンプレッサモータの高性能駆動」,東芝レビュー, Vol. 57, No. 10, pp. 42-45(2002)
- (4) Kwang-Woon Lee, Sungin Park, and Seongki Jeong, : "A Seamless Transition Control of Sensorless PMSM Compressor Drives for Improving Efficiency Based on a Dual-Mode Operation", IEEE Transactions of Power Electronics, Vol.33, No.10, pp. 1446-56(2015)
- (5) 岩田博,中村満,松下修己,須藤正庸,:「空調用圧縮機の振動と騒音」,日本冷凍協会論文集,Vol.7,No.2, pp.1-13(1990)
- (6) 李東昇,能登原保夫,鈴木尚礼,安藤達夫,:「位置センサレス PMSM の広範囲負荷起動に適した同期始動の切替ショック低減方法」,電 学論 D, Vol.130, No.9, pp.1075-1080(2010)
- (7) 河合一弥,熊谷隆宏,渡辺大貴,伊東淳一,:「センサレス永久磁石 モータの起動時騒音の低減法服部」,SPC-20-159, HCA-20-52, VT-20-48(2020)
- (8) 福本哲哉,濱根洋人,林洋一,:「圧縮機用 PMSM 位置センサレス ベクトル制御のための BPF を用いた周期的速度変動抑制制御」,電
 学論 D, Vol.127, No.7, pp.715-722(2007)
- (9) 伊東淳一,豊崎次郎,大沢博:「永久磁石同期電動機の V/f 制御の 高性能化」,電学論 D, Vol. 122, No. 3, pp. 253-259, (2002)
- (10) 服部知美:「動作点変動に対応した学習制御による PMSM の振動 抑制制御法」,電学論 D, Vol. 137, No 1, pp. 10-16(2017)
- (11) 能登原保夫,李東昇,岩路喜尚,田村正博,月井浩二:「ロータリ 圧縮機向け振動抑制制御の検討」,電学論 D, Vol.140, No.11, pp.841-847(2020)
- (12) 池防泰裕,柿木健史,松實孝友,青木尚彦,:「DD(ダイレクトドラ イブ)方式による全自動洗濯機用モータおよびインバータの開発」, パワーエレクトロニクス研究会論文誌, Vol.25, No.1(1999)
- (13) 伊東淳一,長野剛,青木渉,鳥羽章夫,:「回生中のインバータ緊急
 停止時における直流コンデンサ電圧上昇抑制制御法」,電学論 D,
 Vol.136, No.2, pp90-99.
- (14) Chao Gong, Yihua Hu, Jinqiu Gao, Yangang Wang, Liming Yan, :"An Improved Delay-Suppressed Sliding-Mode Observer for Sensorless Vector-Controlled PMSM", IEEE Transactions of Industrial Electronics, Vol.67, No.7, pp.5913-5923(2020)
- (15) Donglai Liang, Jian Li; Ronghai Qu, Wubin Kong: "Adaptive Second-Order Sliding-Mode Observer for PMSM Sensorless Control Considering VSI Nonlinearity", IEEE Transactions of Power Electronics, Vol.33, No.10, pp.8994-9004 (2018)



(a) Estimation speed and acceleration sensor output at stop.



Fig.12. acceleration sensor output by short brake at BDC.



Fig.13.

Table 2. Comparison results of vibration at stop.

	Free-run	Proposed method		
	Tiee Tuii	TDC	BDC	
Average value [m/s ²]	13.4	5.9	17.2	
Standard deviation [m/s ²]	4.1	1.6	2.5	