

シミュレーションによるコンデンサモータのトルクと騒音との解析

The analysis of the Torque and Noise of the Permanent-split Capacitor Motor

村瀬 正敬^{*1}
Masataka Murase^{*1}
岩井 祐二^{*1}
Yuji Iwai^{*1}
細江 仁^{*1}
Hitoshi Hosoe^{*1}
土本 僚一^{*1}
Ryouichi Tsuchimoto^{*1}
鈴木 正見^{*1}
Masami Suzuki^{*1}
太田 久義^{*1}
Hisayoshi Ohta^{*1}

1 まえがき

今日、あらゆる産業や一般家庭において、多種多様なモータが様々な用途に利用されている。中でも、コンデンサモータは、堅牢、安価などの特長により、洗濯機、扇風機、空調機用ファン、圧縮機といった電化製品の動力源に多く用いられている。

しかしながら、コンデンサモータは、効率が低い、出力体格比が小さい、騒音が大きいなどの問題点を持っている。近年、空調機の静音化が進む中で、空調機用ファンの動力としてコンデンサモータを適用した場合、モータの発生する騒音が、大きな問題となっている。さらに、ファンを可変速運転するために位相制御電源によってモータをドライブすると、騒音の問題は一層顕著なものとなる。

著者らは、コンデンサモータを位相制御電源でドライブした場合に発生する騒音の問題について、多方面より実験・検討を行ってきた。

本報告は、位相制御電源でドライブされたコンデンサモータを用いて空調機用ファンを駆動するとき、モータが発生するトルクと騒音との関連について、シミュレーション結果と実測値を比較検討したものである。

2 検討手法

本報告は、次の手順に従い実験・検討を行った。

- ① シミュレーションによるコンデンサモータの解析
- ② 実機モータの電圧電流および騒音測定試験
- ③ シミュレーションによるコンデンサモータのトルク解析(以後、トルクシミュレーションと記す)の結果と騒音実測値の比較

以下に各手順の内容を記載する。

2.1 シミュレーションによるコンデンサモータの解析

コンデンサモータを数学的に取り扱いやすい構造にモデル化し、このモデルに基づき電氣的挙動および力学的挙動をシミュレートするプログラムを作成した。そして、このシミュレーションプログラムを用いて、位相制御電源でドライブされるコンデンサモータの端子電圧・線電流・発生トルクなどの瞬時値を算出した。

コンデンサモータのモデル化には種々の方法があるが、ここでは最もポピュラーなモデル化を行っている⁽¹⁾。使用したモデルを図1に示す。

図1において、コンデンサモータの固定子側主巻線・補助巻線は、それぞれ直交座標上のd軸・q軸上に配置され、回転子側は、直交する2つの等価な2次巻線とみなして同様に配置されている。

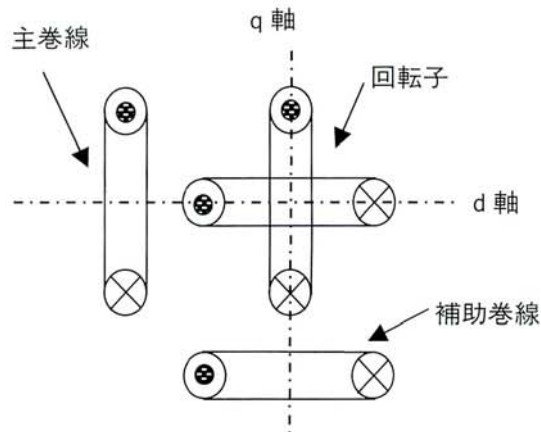


図1 / モータモデル
Fig.1/ Model motor for simulation

*1 機電事業本部 技術部

2.2 実機モータの電圧電流および騒音測定試験

式(1)から式(3)に、シミュレーションに用いた基本式を示す。式(1)は図1のモータモデルより得られる瞬時電圧電流方程式、式(2)はトルクへの変換式、式(3)は運動方程式である。

式(1)中、固定子側補助巻線を表す項(4行4列目)はLCRの方程式で記述している。これは今回の対象モータが、1次側補助巻線に常時コンデンサが直列に接続されて運転されるコンデンサラン形モータであることに起因している。

また、式(1)、式(2)に用いられた回路定数はモータ設計値より算出したものである³⁾。

式(3)の第3項は、負荷トルクであるが、ここではファンを負荷としているので、実際には回転数の2乗に比例した方程式として記述した。また、慣性モーメントなどの定数は、モータ設計値・ファン設計値より算出した値を用いている。

$$\begin{pmatrix} v_{d1} \\ 0 \\ 0 \\ v_{q1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{d1} + pL_{d1} & pM_d & 0 & 0 \\ pM_d & R_2 + pL_2 & \omega_r L_2 & \omega_r M_q \\ -\omega_r M_d & -\omega_r L_2 & R_2 + pL_2 & pM_q \\ 0 & 0 & pM_q & R_{q1} + pL_{q1} + \frac{1}{pC_{q1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{q1} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$T = M_q i_{1q} i_{2d} - M_d i_{1d} i_{2q} \dots\dots\dots(2)$$

$$T = J \frac{d\omega_r}{dt} + D_r \omega_r + T_L \dots\dots\dots(3)$$

v_{d1}, v_{q1} :1次供給電圧 i_{d1}, i_{q1} :1次電流 i_{d2}, i_{q2} :2次電流 R_2, L_2 :2次巻線各定数
 $R_{d1}, L_{d1}, R_{q1}, L_{q1}$:1次巻線各定数 C_{q1} :コンデンサ容量 M_d, M_q :相互インダクタンス
 ω_r :回転子角速度 T :トルク J :慣性モーメント D_r :制動係数 T_L :負荷トルク

図2に実機モータ試験の方法を示す。試験は、実機モータに負荷ファンを取り付け、これを空調機ファンユニットに組み付けてファンユニットを構成し、このファンユニットを暗騒音が約20dBの騒音試験室に設置して、外部雑音の遮蔽と反射音の抑制を図った上で実施した。同様に制御回路部・計測器・記録装置などは騒音試験室外に設置して、これらから発生する雑音の影響も防いでいる。

制御回路部で単相交電圧を位相制御してコンデンサモータをドライブし、この時発生する騒音を騒音計のマイクロフォンで検出して、スペクトラムアナライザで周波数スペクトル解析を行い、チャートに記録した。

なお、通常、騒音測定を行う場合は人間の聴感特性(フィルタ効果)を考慮して、周波数特性をA特性として計測するが、今回はシミュレーション結果との対比を容易とするために、よりフラットな特性であるC特性を用いて実施している。

コンデンサモータを位相制御ドライブする場合に、主巻線に供給する電圧のみ制御する方法、補助巻線に供給する電圧のみ制御する方法、および主巻線・補助巻線に供給する電圧の両方を制御する方法が考えられるが、本実験では主巻線供給電圧のみをトライアックで位相制御する方式を採用した。

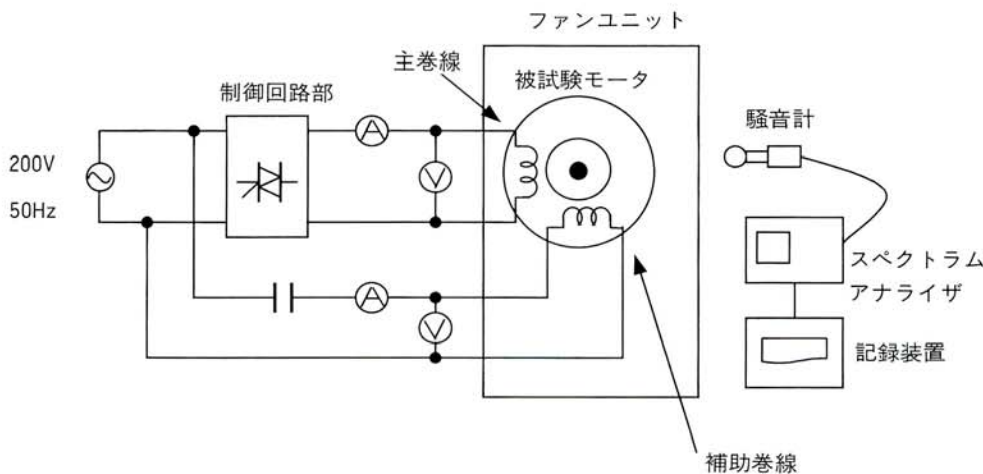


図2 / 試験方法図
 Fig.2/The setup for measurement

また、比較のために正弦波ドライブ時の騒音スペクトルの測定も同時に行っている。正弦波ドライブ時は位相制御ドライブ時と同様に主巻線供給電圧のみをスライダックで調整し、ファンの回転数が同一となるように整定して測定した。

2.3 トルクシミュレーション結果と騒音実測値の比較

シミュレーションにより得られたトルクの時間的変化を周波数分析し、その結果と、実機モータの騒音スペクトル測定結果との対比により、相互の比較検討を行った。

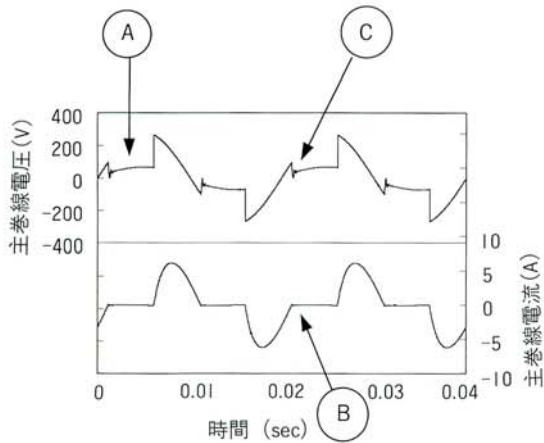


図3 / 電圧・電流シミュレーション結果
Fig.3/Simulation curve of voltage and current

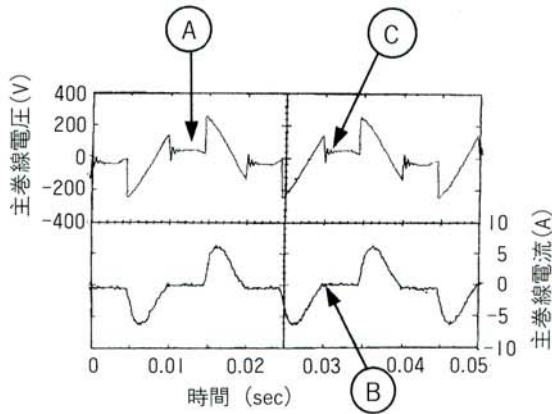


図4 / 電圧・電流測定値
Fig.4/Measurement curve of voltage and current

3 試験結果

3.1 電圧・電流のシミュレーション解析結果と測定値の対比

図3は位相制御ドライブ時の主巻線端子電圧波形と線電流波形のシミュレーション(以後、電圧シミュレーション、電流シミュレーションと記す)の結果である。また、図4は、これらの実測値の波形であるが、電圧および電流シミュレーション結果は実際の波形を良く再現している。

両図において供給電圧がoffの期間(図3-A、図4-A)に現れている電圧は、2次電流(回転子巻線電流)によって発生する速度起電力である。

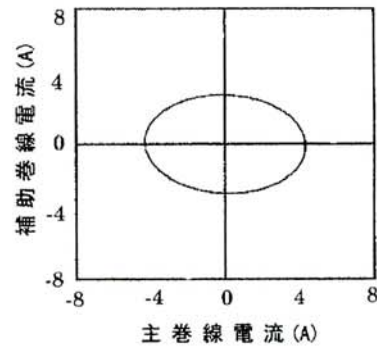


図5 / 電流シミュレーション結果のリサージュ図形
(正弦波ドライブ時)
Fig.5/Lissajous figure of current by simulation (sinusoidal wave drive)

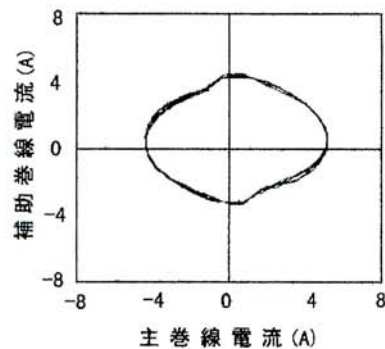


図6 / 電流測定値のリサージュ図形(正弦波ドライブ時)
Fig.6/Lissajous figure of actual current (sinusoidal wave drive)

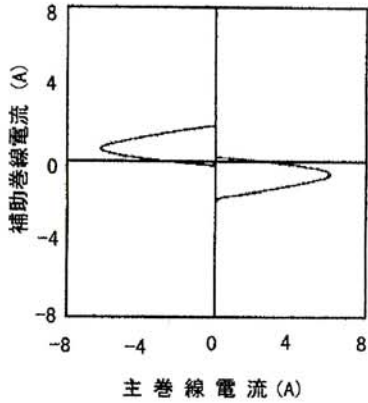


図7 / 電流シミュレーション結果のリサージュ図形
(位相制御ドライブ時)

Fig.7/Lissajous figure of current by simulation (phase-control drive)

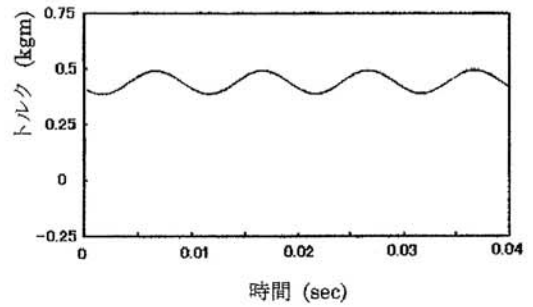


図9 / トルクシミュレーション結果
(正弦波ドライブ時)

Fig.9/Simulation result of torque wave (sinusoidal wave drive)

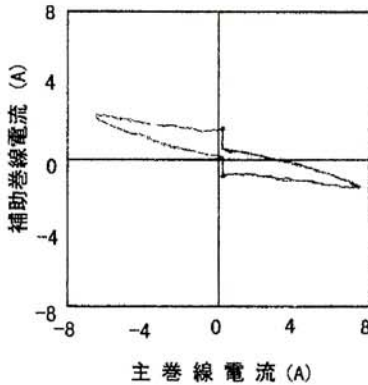


図8 / 電流測定値のリサージュ図形
(位相制御ドライブ時)

Fig.8/Lissajous figure of actual current (phase-control drive)

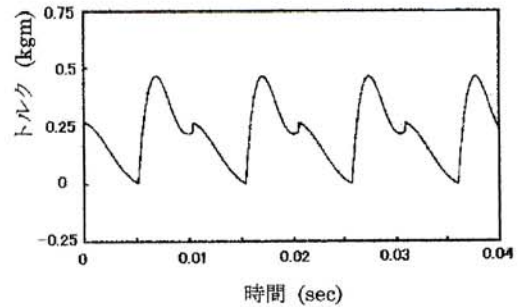


図10 / トルクシミュレーション結果
(位相制御ドライブ時)

Fig.10/Simulation result of torque wave (phase-control drive)

また、電流がゼロとなった時点(図3-B, 図4-B)に現れている電圧の振動(図3-C, 図4-C)は、スナバ回路とモータのコイルにより構成されるLCR回路の共振現象により発生したものである。

3.2 主巻線・補助巻線電流リサージュ図形

図5から図8は、コンデンサモータの主巻線に流れる電流を x とし、補助巻線に流れる電流を y としたときに、 $x-y$ の直交座標上に描かれるリサージュ図形を表したも

のである。図5は正弦波ドライブ時の電流シミュレーション結果によるリサージュ図形であり、図6は正弦波ドライブ時の電流実測値によるリサージュ図形である、同様に図7, 図8は位相制御ドライブ時の電流シミュレーション結果と電流実測値によるリサージュ図形である。

実測値の場合、磁気飽和により図形に歪みが現れる。正弦波ドライブ時と比較すると、位相制御ドライブ時の場合、明らかに正弦波ドライブ時より複雑なリサージュ図形が観測される。これは主巻線・補助巻線に流れる電流の合成ベクトルの大きさが激しく変動していることを示しており、電流と磁界によって発生するトルクもまた激しく変動することを示している。

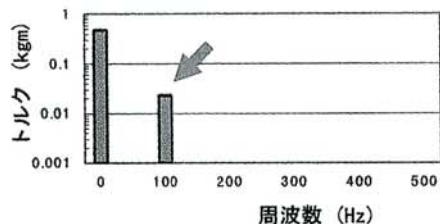


図11／トルクシミュレーションの周波数分析結果
(正弦波ドライブ時)

Fig.11/Spectrum analysis torque simulation (sinusoidal wave drive)

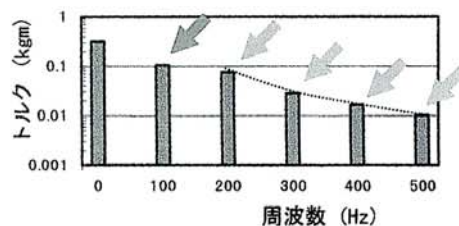


図13／トルクシミュレーションの周波数分析結果
(位相制御ドライブ時)

Fig.13/Spectrum analysis of torque simulation (phase-control drive)

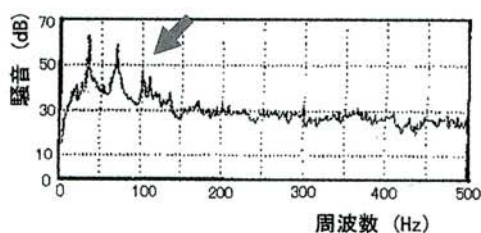


図12／騒音スペクトル測定結果(正弦波ドライブ時)

Fig.12/Actual noise level spectrum (sinusoidal wave drive)

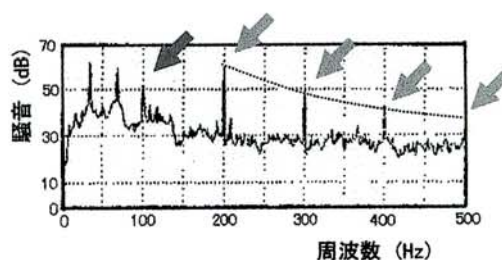


図14／騒音スペクトル測定結果(位相制御ドライブ時)

Fig.14/Actual noise level spectrum (phase-control drive)

3.3 トルクシミュレーション波形

図9, 図10はシミュレーションにより得られたトルクの時間的変化の波形である。

図9は正弦波ドライブ時の波形, 図10は位相制御ドライブ時の波形である。正弦波ドライブ時には主巻線・補助巻線に流れる電流の不均衡に起因するトルクの脈動が現われている。位相制御駆動時には, さらに複雑な歪みを伴った脈動波形が観察される。

3.4 スペクトル解析結果

図11から図14にトルクシミュレーション波形の周波数分析結果と騒音のスペクトル測定結果を示す。図11, 図12は正弦波ドライブ時のトルクシミュレーション波形の周波数分析結果と騒音のスペクトル測定結果であり, 図13, 図

14は位相制御ドライブ時のトルクシミュレーション波形の周波数分析結果と騒音のスペクトル測定結果である。

図11のトルクシミュレーション波形の周波数分析結果には, 供給電圧周波数の2倍の周波数成分(以後, $2f$ と記す)が現れている。

このことから, 前記, 図9に現れている脈動成分が $2f$ の成分であることがわかる。同様に図12の騒音のスペクトル測定結果にも, $2f$ の成分がピークとして出現している。

図13の位相制御ドライブ時トルクシミュレーション波形の周波数分析結果では, $2f$ の成分以外に $2f$ の整数倍の周波数成分が現れている。これより, 図10に示された歪み波形が, $2f$ と $2f$ の整数倍の周波数成分により構成されていることがわかる。また, 図14の騒音のスペクトル測定結果にも同様に, $2f$ の整数倍成分のピークが出現している。さらに, $2f$ の整数倍成分のピークを結んだ抱絡線も, トルクシミュレーションと騒音測定値の間に, 高い類似性を示している。

なお、騒音スペクトル測定結果にある100Hzより低い周波数に現れている2つのピーク成分は、負荷に使用したファンの羽根の風切り音であるが、これはファンの羽根の枚数と回転数より決まる値であり、トルクシミュレーション波形のスペクトル解析結果にある0 Hzの成分は、トルクの定常分である。

上記シミュレーションと実験の比較検討結果により、モータが発生するトルクの周波数分析結果と騒音のスペクトル測定結果には、高い相関性が認められる。この事実は、モータのシミュレーションを行うことにより、モータの発生する騒音の傾向をある程度予測可能であることを示している。

4 あとがき

コンデンサモータをモデル化し、基本的な式を用いてシミュレーションを行い、シミュレーションより得られたトルク解析結果と騒音の実測結果と比較したところ、両者に一致する点のあることが分かった。

しかしながら、今回のシミュレーションにおいては、負荷に使用したファンの弾性による振動、ユニットの共振の影響、磁気飽和やスキューなどの影響が考慮されていない。

今後これら未検討要素を加えたシミュレーション解析を行い、各種条件下における実測データの収集を行えば、設計段階においてコンデンサモータの騒音の推定が、ある程度可能になると考える。

なお、本研究に関しては、平成9年8月7日～8日に長岡市で開催された、電気学会産業応用部門全国大会においても発表を行っている。

参考文献

- (1) 難波江，金，高橋，中村，山田：「電気学会大学講座 電気機器学」，電気学会 1987
- (2) 難波江，金，高橋，中村，山田：「電気学会大学講座 基礎電気機器学」，電気学会 1988
- (3) 石黒，坪島：「単相誘導電動機とその応用」，オーム社 1959
- (4) Cyril G.Veinott："THEORY AND DESINE OF SMALL INDUCTION MOTORS". McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1959

筆者紹介



村瀬 正敬

機電事業本部 技術部
モータの特性，騒音，振動解析に従事



岩井 祐二

機電事業本部 技術部
モータの設計および試験に従事



細江 仁

機電事業本部 技術部
モータの磁場解析に従事



土本 僚一

機電事業本部 技術部
電子制御装置の開発および設計に従事



鈴木 正見

機電事業本部 技術部
担当課長
モータの開発および設計に従事



太田 久義

機電事業本部 技術部
課長
電子制御装置の開発および設計に従事