

電流兆候解析に基づく DC モーターのオンライン故障検知

大窄 直樹[†] 神原 弘之^{††} 石浦菜岐佐[†]

[†] 関西学院大学 理工学部 〒669-1337 兵庫県三田市学園 2-1

^{††} 京都高度技術研究所 〒600-8813 京都市下京区中堂寺南町 134 番地

あらまし 本稿では, DC モーターのオンライン故障検知を電流兆候解析により行う. 電流兆候解析は, 個々のモーター関連設備にセンサーを設置することなく故障検知できるため実装及び管理のコストを削減できるが, 周波数解析の計算量が大きいという課題がある. 本手法ではハードウェアの併用により, 電流兆候解析に基づくモーター故障検知のオンライン化を試みる. 故障検知は, 故障したモーターではモーターに流れる電流の低周波数帯の高調波成分が増加することを利用して行う. 計算量の多い FFT をハードウェア実装し, 他の計算量の少ない処理をソフトウェア実装する. プログラマブル SoC に実装を行った結果, PWM 信号の duty 比を変更しても故障検知が可能で, 周波数解析の高速化によりオンラインの故障検知が可能になった.

キーワード 電流兆候解析, 故障検知, 組み込みシステム, ハードウェア/ソフトウェア協調設計, プログラマブル SoC, DC モーター

Motor Current Signature Analysis Based On-Line Fault Detection of DC Motor

Naoki OSAKO[†], Hiroyuki KANBARA^{††}, and Nagisa ISHIURA[†]

[†] Kwansei Gakuin University, Gakuen 2-1, Sanda, Hyogo, 669-1337, Japan

^{††} ASTEM RI/KYOTO, 134 Chudoji Minamimachi, Shimogyo-ku, Kyoto, 600-8813, Japan

Abstract This article presents a method for online detection of DC motors' fault based on current signature analysis. While current signature analysis does not require sensors for individual motors and hence is cost effective, it needs frequency analysis which is a computationally heavy task. We attempt to achieve online fault detection based on current signature analysis by combined implementation of software and hardware. Fault detection is based on an observation that faulty motors exhibit large harmonic components in low frequency band. Heavy computation of FFT is offloaded to hardware while the other tasks are executed by software. We implemented a fault detection system on a programmable SoC, which ran fast enough for online use and were able to detect faults for variable duties of the input PWM signal.

Key words motor current signature analysis, fault detection, embedded systems, hardware/software codesign, programmable SoC, DC motor

1. はじめに

モーターは家電製品から鉄道, 電気自動車, 産業機器等多岐に渡る機器に内蔵されている. モーターの故障は日常生活から社会活動にまで大きな影響を与えるため, それを未然に防ぐ対策が非常に重要になっている.

従来行われてきた故障への対策としては時間基準保全がある. しかし, 保全作業を行う時期は経験則に基づいており, 実際に個々の電気機器に対してその時期が適切であるかどうかの判断は難しい. 交換のサイクルが短い場合にはコストが増大し, 長

い場合には安全に対するリスクが高まる. そこで近年では, 使用機器の日常的な診断により機器状態を推定する状態基準保全方式が採用されるようになって来ている. モーターの寿命や故障の時期を詳細に予測し, これに基づいて整備, 修理, 交換を行うことにより, 総合的なコストを削減することができる [1].

機器の状態を推定する手法には振動解析, 温度解析, 電流兆候解析等がある [2]. 振動解析, 温度解析は振動・温度データから診断するため, 振動・温度センサーをモーター関連設備に新たに付けけるための導入・保守コストを必要とする [3]. 電流兆候解析は, エアギャップの変化, 回転子の抵抗値の変化等が空間

磁束線を通じて電流に影響を与えるという理論に基づいたもので、回転子の故障、静的/動的偏心の他、回転子バーの故障、軸受の故障等も検知できる [4]。個々のモーター関連設備にセンサーを設置する必要なく、電気室にある制御盤内に設置された電流センサーによるセンシングデータをもとに遠隔で分析を行えるため、この手法が故障検知の主流になりつつある。

しかし信号処理のための周波数解析の計算量が多いため、故障検知のオンライン化及び劣化に応じたモーター制御が困難という課題がある。文献 [5] は、ブラシレス DC モーターの電流兆候解析による故障検知を行っている。しかし、これらの手法は周波数解析の計算量が多いためオフラインでの実装であり、PWM 信号の duty 比を変更した故障検知は行っていない。また、文献 [6] は、電流兆候解析の高速化のためモーターの電流信号をハードウェアに送信しているが、オンライン故障検知を実装するまでには至っていない。

そこで、本稿では電流兆候解析に基づく DC モーターのオンライン故障検知を試みる。電流兆候解析の手法として、モーターに流れる電流の低周波数帯の高調波成分が、故障したモーターの場合に増加することを利用して故障を検知する。実装はプログラマブル SoC で行い、計算量の多い周波数解析をハードウェア実装し、他の計算量の少ない処理をソフトウェア実装する。

提案手法に基づき実験を行なった結果、PWM 信号の duty 比を変更しても故障検知が可能で、周波数解析を高速化することによりオンライン故障検知が可能になった。

2. DC モーターの故障検知

モーターは、AC (Alternating Current) モーターと DC (Direct Current) モーターに大別することができる。さらに DC モーターには、ブラシ付き DC モーターとブラシレス DC モーターがあるが、本稿ではブラシ付き DC モーターを対象とする。

2.1 モーターの構造と故障

ブラシ付き DC モーターの構造を図 1 に示す [7]。整流子はコイルに流れる電流の向きを切り替え、回転子は磁極の向きを逆転させることにより右回転する。軸とともに回転する整流子にはブラシから電力が供給されている。整流子がブラシと当たって給電し、整流子とブラシが回転により触れる箇所が変更することにより電流の向きが変わる。コイルは磁界の中に置かれ、流れる電流によりコイルが片方の磁極に反発し、同時に反対側が別の磁極に引かれることにより回転する。

モーターの主な故障は下記の 4 つに分類できる [2]。

(1) 軸受の故障

軸受の故障は、雑音、振動の増大を引き起こす。モーターの故障の 40-50% を占める。

(2) 固定子、電機子の故障

固定子、電機子の故障は絶縁故障を引き起こす。モーターの故障の 30-40% を占める。

(3) 回転子の故障

回転子の故障は平均トルクの減少及び、ホットスポットの生成を引き起こす。モーターの故障の 5-10% を占める。

(4) 静的/動的な偏心

偏心は固定子と回転子間の摩擦の原因となり、固定子、回転子の故障を引き起こす。

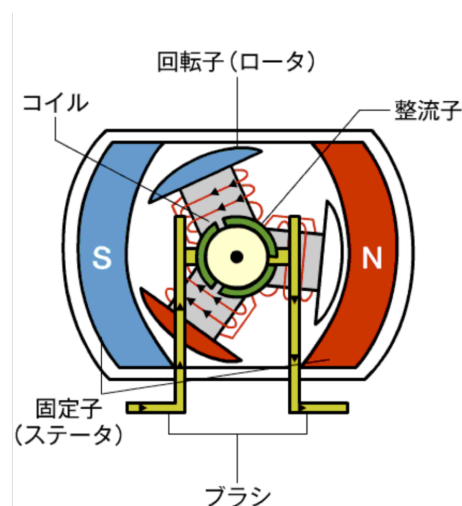


図 1: DC モーターの構造 [7]

2.2 PWM 信号

電圧を上下させてモーターの速度を変える従来の方式では、電圧の強さを変えるための回路が必要となる上、電圧の上昇/下降により発熱するためエネルギー効率が悪い。この課題を解決するために、最近ではパルス幅の duty 比を変更することによりモーターを制御する PWM (Pulse Width Modulation) 信号が用いられる。

図 2 は、PWM 信号の例である。上から duty 比が 25%、50%、75% の信号である。周期の high の割合を duty 比という。この比率を変えることにより、モーターに供給する実効電圧を変え、モーターの回転数を制御する。

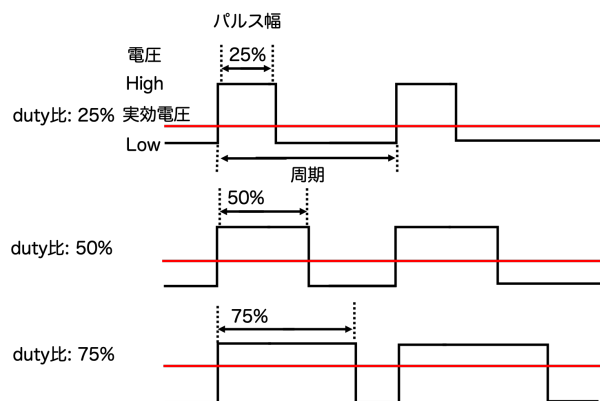


図 2: PWM 信号

2.3 故障検知の手法

故障検知手法には下記のような方法がある [2]。

(1) 電磁場解析

固定子、回転子間の電磁場を解析することにより故障検知を行う。

(2) 温度解析

モーターの駆動時のコイルの温度変化を解析することにより故障検知を行う。

(3) 振動解析

モーター振動を解析し、抽出した特徴に基づいて故障検知を行う。

(4) 音響解析

駆動時の異常音や突発的に発生する異音から故障検知を行う。

(5) 電流兆候解析

駆動時の電流信号の変化から故障検知を行う。

この中で故障検知において、コスト、精度の両面から近年注目されているのが電流兆候解析である。電流兆候解析は、固定子と回転子のエアギャップの変化、回転子の抵抗値の変化などが空間磁束線に影響を与え、逆起電力を通して固定子に流れる電流に反映されるという理論に基づいたものである [4]。また、電気室にある制御盤内に設置された電流センサーによるセンシングデータをもとに遠隔で分析を行えるため、初期コストが低い特徴という長所がある。回転子、固定子、静的/動的偏心等の故障等の故障を検知することができる。また、検出信号に信号処理を施すことにより、回転子バーの故障、軸受の故障等も検知できる。AC モーター、サーボモーター、ブラシレス DC モーター等広い範囲に適用され効果をあげている。

しかし DC モータでは、PWM 信号の duty 比の変化を考慮した故障検知は行われていない。また、信号処理で周波数解析の処理に時間がかかるためオンライン故障検知が困難という課題がある。

文献 [6] では、電流兆候解析に基づいてブラシレス DC モーターのオフライン故障検知を行っている。対象とする故障は歯車の歯こぼれで、歯が 1 つ欠けた故障 (G1) 及び、歯が 2 つ欠けた故障 (G2) を対象にしている。低周波数帯 (0-50Hz) の最大高周波数成分を取得する実験を行った結果を表 1 に示す。“Amplitude” は最大周波数成分、“Frequency” は最大周波数成分の周波数、“% Change In Amplitude” は正常なモーターの最大周波数成分に対して故障したモーターの最大周波数成分の増加割合である。“Health” は正常なモーター、“G1 fault” は G1 のモーター、“G2 fault” は G2 のモーターである。故障したモーターは正常なものとは比べ最大周波数成分が高いことから、これを利用して故障検知ができる。

しかし、この研究では duty 比を変化させた故障検知及びオンライン故障検知は行っていない。

表 1: 周波数解析結果 [6]

Peak	Health	G1 fault	G2 fault
Amplitude	28.50	33.47	86.18
Frequency (Hz)	16.97	16.97	16.97
% change in amplitude	0	+17.44	+202.38

3. 予備実験

3.1 実験の概要

電流兆候解析によりブラシ付き DC モーターの故障検知を行うため、故障したブラシ付き DC モーターの周波数成分の特徴を調べる予備実験を行った。文献 [6] のブラシレス DC モーターの故障検知では、モーターが故障した場合に低周波数帯の最高周波数成分に影響が現れたが、ブラシ付き DC モーターの場合にどのような変化が生じるかも調べた。また、ブラシ付き DC モーターの PWM 信号の duty 比による最高周波数成分の変化についても調べた。

周波数成分の取得は図 3 の構成で行った。矢印の向きは電流の向きである。実験に用いた DC モーターは小型直流モーターのマブチモーター RS-380PH である。DC モーターを制御す

るためにモーターコントローラーボードである MXA033 を用いた。電流信号の解析に利用するスペクトラムアナライザには Analog Discovery2 を用いた。

DC モーターには正常なモーターを 1 個、故障したモーターを 1 個を用いた。故障した DC モーターには、あらかじめ過電流・過電圧で一定時間駆動させることにより故障させたものを用いた。周波数成分のサンプル数は 512 点、DC モーターの duty 比は 50%、周波数帯は 0-500Hz のデータを取得した。

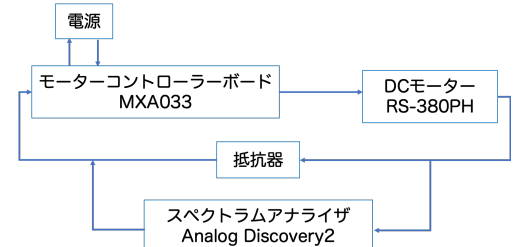
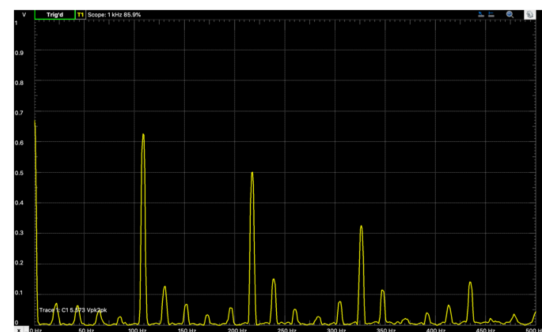


図 3: 周波数成分の取得

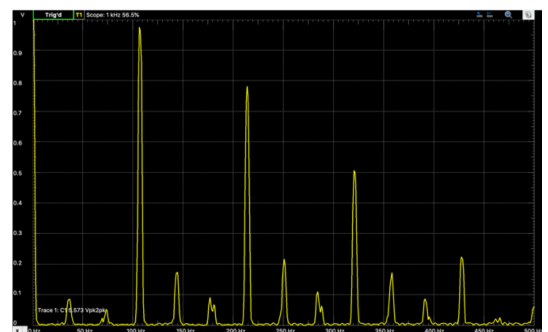
3.2 ブラシ付き DC モーターの周波数成分

図 4 は取得した周波数成分をパワースペクトルにしたものである。(a) が正常なモーター、(b) が故障したモーターのものである。縦軸はパワーで単位は V、横軸は周波数で単位は Hz である。正常なモーター、故障したモーターともに最大周波数成分は約 100Hz に位置していて、正常なモーターの最大周波数成分が約 0.65V で、故障したモーターの最大周波数成分は約 0.98V であった。

この実験により、ブラシ付き DC モーターでも文献 [6] と同様に故障により低周波数帯の最大周波数成分が増加することが確認できた。したがって、正常なモーターと故障したモーターは低周波数帯の最高周波数成分の大きさにより判別できると考えられる。



(a) 正常時



(b) 故障時

図 4: ブラシ付き DC モーターのパワースペクトル

次に PWM 信号を変化をさせることにより、低周波数帯の最大周波数成分にどのような影響を与えるかを調べた。

DC モーターを正常なモーター 10 個、故障したモーター 5 個の合計 15 個について、PWM 信号の duty 比が 25%、50%、75% の場合の最高周波数成分を調べた。正常なモーターは各モーターと各 duty 比に対して最大周波数成分を 5 回取得し、故障したモーターは最大周波数成分を 10 回取得した。すなわち、正常なモーター及び故障したモーターの最大周波数成分を 50 個取得した。

取得した duty 比ごとの最大周波数成分を図 5、図 6 に示す。

図 5 は離散確率分布図で、横軸が最大周波数成分での単位は dbV、縦軸は確率での単位は % である。オレンジが正常なモーターの最大周波数成分、青が故障したモーターの最大周波数成分である。duty 比は図の上から 25%、50%、75% である。正常なモーターの最大周波数成分は、故障したモーターの最大周波数成分と比べ低い値を示している。例えば duty 比が 50% の時、正常なモーターの最大周波数成分は約 -6.0dbV から -7.8dbV の間に集中しているのに対し、故障したモーター最大周波数成分は約 -0.5dbV から -5.0dbV に集中していた。

故障したモーターの最大周波数成分が正常なものとは比べ大きい関係は、duty 比が 25%、50%、75% のとき全てで成り立っている。そのため、duty 比が変化しても低周波数帯の最高周波数成分を調べることにより故障を検出できると考えられる。

また、図 5 から duty 比が小さいほど、正常時及び、故障時ともに最高周波数成分が増加することがわかった。

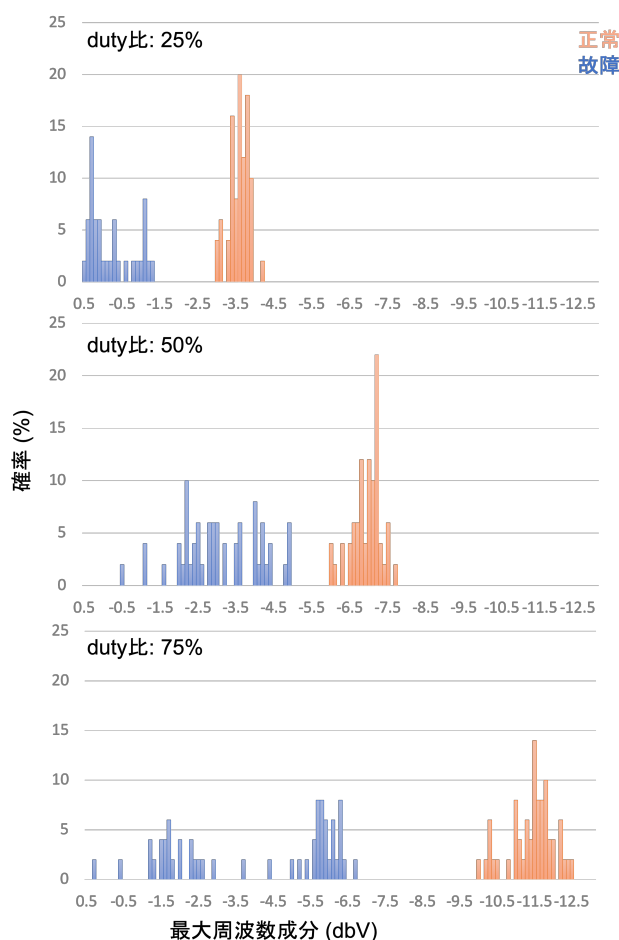


図 5: 最大周波数成分の離散確率分布図

図 6 は箱ひげ図で、縦軸は最大周波数成分で単位は dbV である。オレンジが正常なモーターの最大周波数成分、青が故障したモーターの最大周波数成分である。duty 比は図の上から 25%、50%、75% である。duty 比の増加に対し故障したモーターの最大周波数成分の四分位範囲が大きくなっている。

これより、duty 比が大きいほど、故障の影響が大きくなることがわかった。

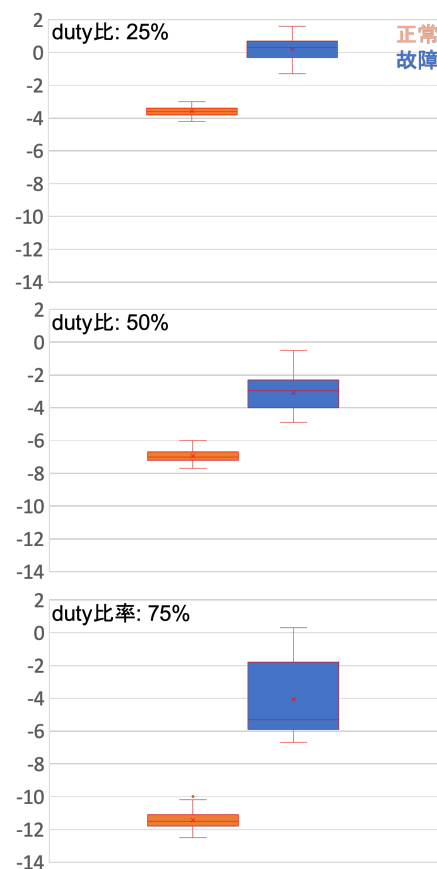


図 6: 最大周波数成分の箱ひげ図

4. プログラマブル SoC によるオンライン故障検知

4.1 オンライン故障検知の方式

本稿では電流兆候解析に基づく DC モーターのオンライン故障検知を行う。

故障検知は、故障したモーターではモーターに流れる電流の低周波数帯の高調波成分が増加することを利用して行う。フーリエ変換のハードウェア実装は高速化な固定小数点高速フーリエ変換 (固定小数点 FFT) を用いる。PWM 信号が変更する故障検知では、duty 比と最高周波数成分の関係を利用して故障を検知する。

フーリエ変換の処理はハードウェア化するが、他の計算量の少ない処理であるデータ取得、データの前処理、スペクトラム解析をソフトウェアで行う。まず、ソフトウェアでモーターから電流信号を取得し、ハードウェアで効率的に計算させるためにデータの固定小数点化を行う。次に、ハードウェアで固定小数点 FFT を行う。最後に、得られた周波数からスペクトル解析を行うことにより故障検知を行う。

4.2 実装

前節の手法に基づく DC モーターのオンライン故障検知システムを ZYBO Zynq-7000 Development Board を用いて実装した。PS-PL 間との通信を実現のために Xilinx を用いた。

システムの構成を図 7 に示す。駆動しているモーターから取得した電流信号に前処理を行い、デバイスドライバを通して PL 部にデータを送る。データの送信が終わり次第、PS 部から PL 部にデータの送信終了信号をデバイスドライバを通して送り、PL 部分で 512 点の固定小数点 FFT を行う。その後、PS 部から PL 部のデータを取得しスペクトル解析を行うことによってモーターの劣化及び故障を検出する。

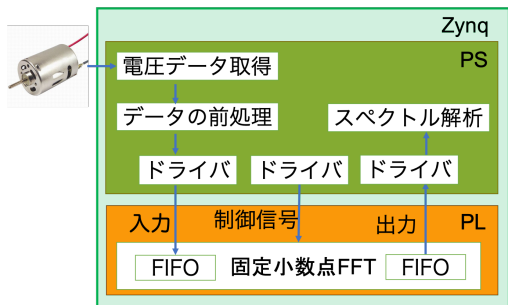


図 7: プログラマブル SoC による実装

モーターからの電流信号は、Analog Discovery2 を用いて取得した。Analog Discovery2 は専用ソフトである Waveforms を用いて JavaScript で制御を行うことができる。Analog Discovery2 のオシロスコープは 12Mbps を超える速度でデータを取得できる。Waveforms でオシロスコープのサンプリング時間を 500ms、サンプリング数を 512 点に設定した。

計算速度と消費電力の観点から、取得した電圧データは固定小数点化した。具体的には、浮動小数点データを 100 倍して小数点以下を切り捨てた。この処理は PS 部で行った。

Xilinx では PS 部と PL 部の通信を高速に行うためのデバイスドライバが提供されている。書き込み用のドライバドライバである xillybus_write_32 を用いて PL 部にデータの書き込みを行った。また、読み込み用のドライバドライバである xillybus_read_32 を用いて PL 部のデータの読み込みを行った。

FFT は 512 点の固定小数点高速フーリエ変換を実装した。PS 部と PL 部でデータの読み書きを行うため、PL 部に入力の FIFO と出力の FIFO の合計 2 個の FIFO を設置した。また、PL 部の制御のためにデバイスドライバを作成した。

FFT のハードウェア実装はハードウェア設計言語 VHDL を用いて行った。FFT は下記のような流れで行われる。まず、PS 部から固定小数点の電圧データを PL 部に書き込む。書き込み終了後、PS 部からデバイスドライバを通して計算開始の制御信号を送信する。制御信号を受け取ったら FFT の処理を始め、計算結果を出力用 FIFO にデータを格納する。

この動作は 4,656 cycle 処理でき、動作周波数を 100MHz とすると $46.5 \mu s$ で実行できる。

PWM 信号のスイッチング周波数には 1–5kHz が用いられることが多く、その周期は 200–1,000 μs であるため、これは十分にオンライン故障検知可能な範囲である。LUT 数は 17,600 であり、PL 部に収容可能な規模である。

スペクトル解析では、PL 部受け取った周波数スペクトルを

二乗しパワースペクトルに変換する。その後、パワースペクトルの値のうちもっとも大きい値、すなわち最大周波数成分を求める。また、元の電圧信号から duty 比を求める。これは電圧信号 512 点のうち、0.01V より大きい値の割合を計算することにより求める。この二つの特徴量、最大周波数と duty 比からモーターの劣化及び故障を検出の行なった。

5. 実験結果

5.1 負荷を与えていないモーター

本実装で正常なモーター 1 個と故障したモーター 1 個それぞれでデータを 100 個取得した。duty 比変更時でも故障検知できるか確かめるために、それぞれのデータの取得間隔を 1 秒とし duty 比を変更させながらデータを取得した。

取得したデータを表したものが図 8 である。縦軸が最大周波数で単位は V^2 、横軸は duty 比で単位は % である。オレンジの点が正常なモーターから取得したデータ、青の点が故障したデータである。また正常なモーター、故障したモーターのデータを最小二乗法により線形予測したものがオレンジの直線、青の直線である。

故障したモーターの最大周波数成分は、正常なものとは比べ、任意の duty 比においてほとんどのデータが大きなものとなっている。また、線形予測の直線により、両方のモーター共に duty 比の増加に伴い最大周波数成分が小さくなった。

これらの結果から、故障したモーターの線形予測を下回っていったら正常、上回っていたら故障とすることにより故障検知を行うことができる。

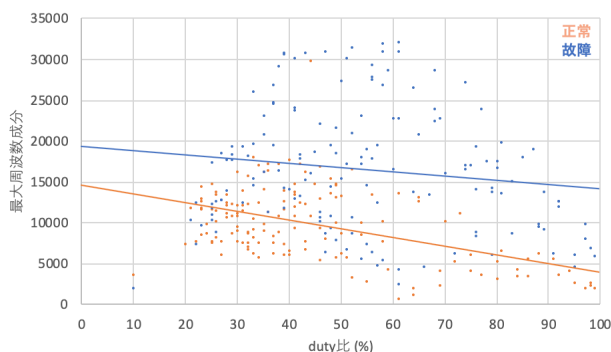


図 8: 負荷を与えていないモーターの実験結果

5.2 負荷を与えたモーター

負荷を与えた状態で正常なモーターと故障したモーターそれぞれでデータを 100 個取得した。モーターに一定の負荷を与えるため、計測用モーターとは別のモーターを負荷用モーターを準備した。計策用モーターと負荷用モーターのシャフト同士を接着し、負荷用モーターを計測用モーターに対して逆回転させることにより一定の負荷を与えた。

負荷を与えた状態で計測を行い取得した結果を図 9 に示す。

正常なモーターは負荷ありの場合と負荷なしの場合で大きな変化が見られないのに対し、故障したモーターは大きな変化があった。故障したモーターは負荷を与えることにより最大周波数成分が低くなった。その結果、本手法で故障検知を行う場合、正常なモーターと故障したモーターともに正常なモーターと判断される。故障したモーターの最大周波数成分が減少した理由

は、故障が原因で発生するトルクが減少し、外部からの負荷が弱いめだと考える。

これらの結果から、モーターに負荷を与えた状態では故障を検出することができない。

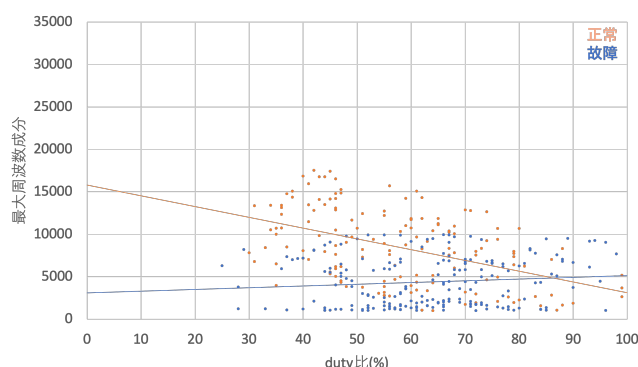


図 9: 負荷を与えたモーターの実験結果

6. む す び

本稿では、電流兆候解析に基づく DC モーターのオンライン故障検知の一手法を提案した。故障したモーターの場合にはモーターに流れる電流の低周波数帯の高調波成分が増加することを利用して故障の検知を行った。実装はプログラマブル SoC で行い、計算量の多い周波数解析をハードウェア実装し、他の計算量の少ない処理をソフトウェア実装した。提案手法に基づき実験を行った結果、PWM 信号の duty 比を変更しても故障検知が可能で、周波数解析を高速化することによりオンライン故障検知が可能になった。

本手法では、一定時間過電圧・過電流で駆動させたモーターを故障したモーターと定義して故障検知できることを確認したが、他の故障も検知できる可能性がある。

今後の課題は、負荷を与えたモーターでの故障検知、及び劣化を抑制するようなモーター制御が挙げられる。

謝 辞

本研究に際し、多くの方々から御助言、御助力を賜りました。ここに感謝の意を表します。本研究に関して有益な御助言を頂いた立命館大学の富山宏之教授、元立命館大学の中谷嵩之氏に感謝いたします。また、本研究に関してご協力、ご討議頂いた関西学院大学石浦研究室の諸氏に感謝いたします。

文 献

- [1] 田邨優人, 高井勇志, 加藤丈和, 松山隆司: “電流波形パターン解析に基づく電気機器の異常検出・劣化診断,” 信学技報, ASN2013-115, pp. 135–140 (Nov. 2013).
- [2] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li: “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical Motors-A review,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729 (Dec. 2005).
- [3] 山本豊樹, 和田和実, 鹿子慎太郎, 樋口暁: 製鉄設備における診断技術の現状と今後 (online), <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nssmc/pdf/402-02.pdf> (accessed 2020-01-08).
- [4] 豊田利夫: 電流兆候解析 MCSA による電動機駆動回転機の診断技術 (online), https://www.takada.co.jp/~takada-co-jp/giho/pdf/gihou20/kikou_1.pdf (accessed 2019-08-27).
- [5] G. Sreedhar Babu, A. Lingamurthy, and A. Seshadri Sekhar:

“Condition monitoring of brushless DC motor-based electromechanical linear actuators using motor current signature analysis,” *International Journal of Condition Monitoring*, vol. 1, no. 1, pp. 20–32 (June 2011).

- [6] S. Sarkar, P. Kumar Hembram, P. Purkait, and S. Das: “Acquisition and pre-processing of three phase induction motor stator current signal for fault diagnosis using FPGA, NI Compact-RIO Real Time Controller,” in *Proc. UPCON 2016*, pp. 110–114 (Dec. 2016).
- [7] Renesas Electronics Corporation: BLDC モーターとは? (online), <https://www.renesas.com/jp/ja/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html> (accessed 2020-01-15).
- [8] 大西 裕二: “プロセッサ搭載 FPGA による新しいデータ取得システムの開発,” 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文 (Feb. 2019).