

学術論文

埋め込み磁石型同期電動機の磁石の一部が故障したときの特性解析と診断

Characteristic Analysis and Failure Diagnosis of Interior Permanent Magnet Motor with Demagnetized Magnet

石川 赴夫^{*1}(正員), 関 優太郎^{*1}, 松波 道夫^{*1}, 栗田 伸幸^{*1}(正員)

Takeo ISHIKAWA (Mem.), Yutaro SEKI, Michio MATSUNAMI, Nobuyuki KURITA (Mem.)

Since a high driving reliability is required to interior permanent magnet synchronous motors, the detection of failure of the demagnetization of permanent magnets is becoming important. This paper clarifies the characteristics of the motor with demagnetized permanent magnets. It also shows that the Fourier analysis and the Wavelet analysis of the amplitude of two-phase current are useful to show the difference of the magnetization of permanent magnets, and thus they can be used as the failure diagnosis method of the demagnetization of permanent magnets.

Keywords: Brushless DC motor, demagnetization, finite element, failure diagnosis, Wavelet analysis.

1 まえがき

回転子の内部に永久磁石を持つ埋め込み磁石型同期電動機は、エアコンなどの家電製品、ハイブリッド車の動力用モータを始めとする動力源として広くかつ大量に用いられている。また、その運転もインバータによる可変速駆動が行われ、精密な制御を必要としている。そのため、埋め込み磁石型同期電動機には高い信頼性が求められると共に故障や異常の予知が重要になってきている。200HP 以上のモータの故障や異常に関する 1982 年の報告では、ベアリングに関する故障が 41%, そして固定子, 回転子, その他がそれぞれ 37%, 10%, 12%となっていた[1]。その後普及した埋め込み磁石型同期電動機は高性能な希土類磁石を用いており、磁石には残留磁束密度, 保持力, 最大エネルギー積が大きいことが求められると同時に、残留磁束密度や保持力の温度係数が小さいことも望まれる。しかしながら、特にハイブリッド車ではモータがかなりの高温になるため、磁石の磁気的な劣化も起こり得ると考えられる。これに関しては、[2]で高性能永久磁石の磁気的安定性や経時変化などの資料がまとめられている。また、永久磁石材料は機器に組み込まれた後に着磁されることも多く、必ずしも磁石全体が完全着磁の状態になっているとは限らない。これに関しては、[3]で永久磁石の着磁特性の実験検討が詳細に行なわれている。

従って、埋め込み磁石型同期電動機において、組み

立て時の磁化の不均一によって磁石の一部が完全に磁化されない可能性や、ハイブリッド車などにおいては温度および加速時の大電流によって磁石の一部が減磁する可能性があるため、磁石の一部が故障したときの電動機特性について明らかなことは重要である。また、大きな故障が起こる前に、電圧や電流など容易に測定できる物理量を用いて磁石の一部の劣化を診断することも重要である。そのために、有限要素解析とウェーブレット解析を用いた永久磁石型同期電動機の故障診断が報告されている[4]。しかし、この文献は固定子巻線短絡時を扱ったものであり、永久磁石の劣化は扱っていない。また、固定子電流スペクトルを用いて、ブラシレス DC モータの静的および動的な偏心、誤整列、負荷トルク変動および磁石の減磁を評価する方法が検討されている[5]。しかし、この文献では有限要素解析などを用いた詳しい検討は行なわれていない。

本論文では、4 極の埋め込み磁石型同期電動機の磁石の一部が減磁あるいは不完全着磁を模擬するために磁石の 1 つの厚みを-10%, -20%とした試験機を作成し、有限要素解析よりその特性を明らかにする。また、故障診断のためにいくつかの物理量を同時に測定するシステムを開発し、それを用いて測定した諸量をフーリエ解析およびウェーブレット解析することによって故障診断する方法を検討する。

2 磁石の一部が不良な回転子の特性解析

2.1 回転子構造

実験に使用した 1.5kW, 3000min⁻¹ 埋め込み磁石型同

連絡先: 石川 赴夫, 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, 群馬大学大学院工学研究科電気電子工学専攻,
e-mail: ishi@el.gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学

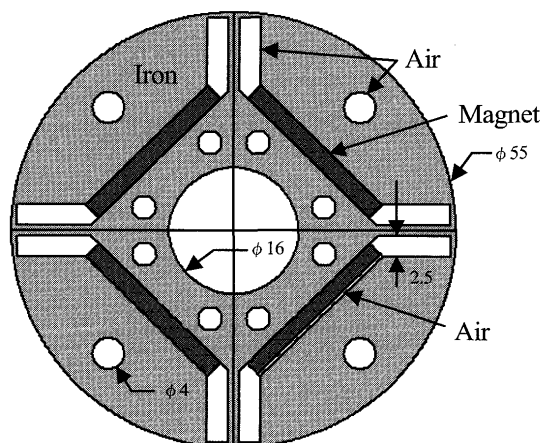


Fig. 1 Rotor configuration.

期電動機の回転子を Fig.1 に示す。回転子は、その内部に軸と平行に永久磁石を埋め込んだ4極機の1層埋め込み磁石型構造をしている。そして、Fig.1の右下にある磁石の厚みを-10%、-20%とすることによって等価的に磁石が劣化した試験機としている。解析は、Fortranを用いて作成した二次元有限要素解析プログラムを用い、磁石の厚みが異なる場合は対称性がないため、全領域を解析対象としている。

2.2 トルク，誘導起電力

Fig.2 に計算した電流位相角と平均トルクの関係を示す。文献[6]に示された結果と同様に、定格電流時の最適な電流位相角は30度、電流が定格の1/2の時の最適な電流位相角は20度となっている。これは磁石の厚みが-10%、-20%の時も同じである。

Fig.3 に u 相の磁束鎖交数を示す。なお、Healthy は健全機、-20%は4つの磁石の内1つの厚みが-20%の場合を示しており、-10%の場合はその中間の特性になるので省略してある。電流が0Aで磁石がu相の下に来ている時すなわち回転子の回転角1.83radで、磁束鎖交数が最大となる。電流が定格の5.6Aで電流位相角が最適な30度の場合、回転子の回転角度がより小さい位置で磁束鎖交数が最大となる。健全機と-20%の場合の比較をすると、0Aの時磁束鎖交数の最大値は0.232から0.227に減少している。5.6Aの時、最大値はあまり変わらず、磁石がu相の下に来る1.83rad付近で減少していることが分かる。Table 1 にその基本波成分について、-10%も含めてまとめる。電流が0Aのとき、磁束鎖交数の減少割合は磁石体積の減少割合と良く一致していることが分かる。また、5.6Aのとき磁束鎖交数の減少は、0Aの時と比べて小さいことが分かる。

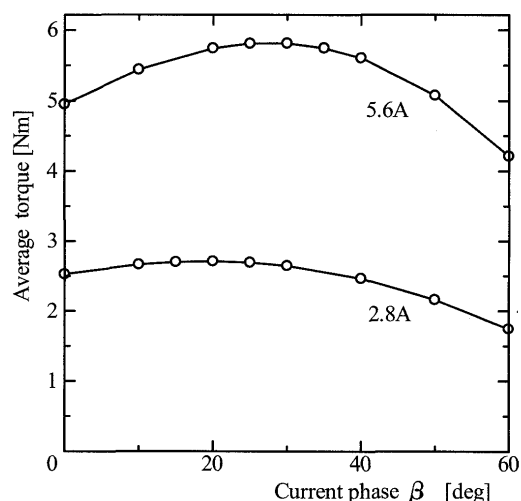


Fig. 2 Relationship between the average torque and the current phase angle.

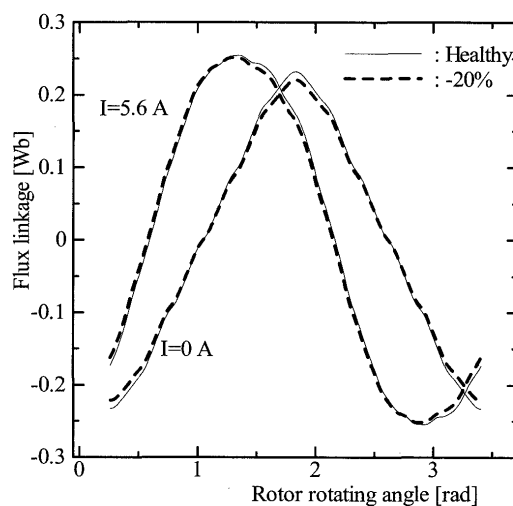


Fig. 3 Flux linkage.

Table 1. Comparison healthy and demagnetized motors

	Healthy	-10%	-20%
Vpm	1	0.975	0.950
Ψ (0A)	1	0.976	0.951
Ψ (5.6A, $\beta=30$)	1	0.994	0.986
Emf (0A)	1	0.976	0.951
Emf (5.6A, $\beta=30$)	1	0.995	0.987
Average torque	1	0.986	0.969

Vpm: Volume of permanent magnet, Ψ : flux linkage.

これは、Fig.3で示したように、減少する位置が最大値を示す位置でないためである。

Fig.4に、誘導起電力を示す。誘導起電力の波形も文献[6]の結果とほぼ一致している。健全機と-20%の場合を比較すると、Table 1よりその減少割合は磁石体積の減少割合と同じであることが分かる。

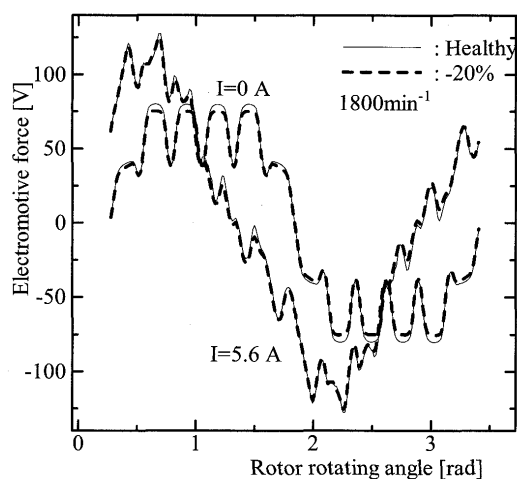


Fig. 4 Electromotive force.

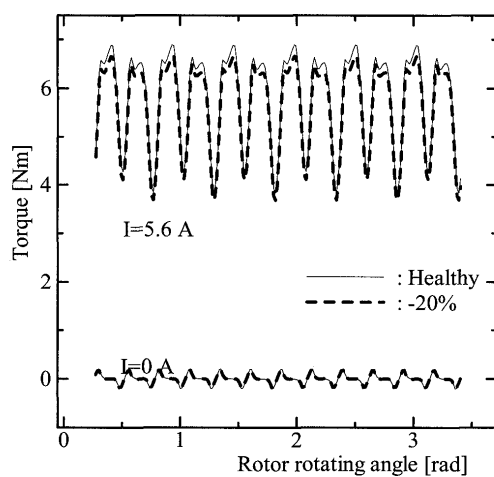
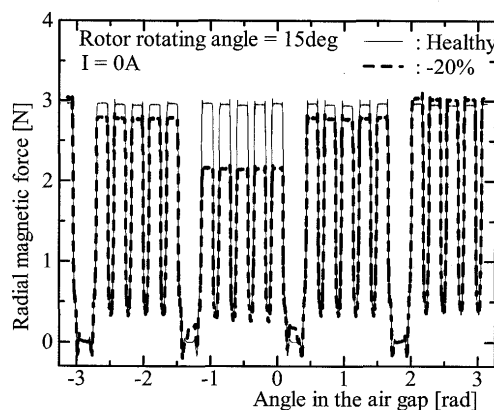
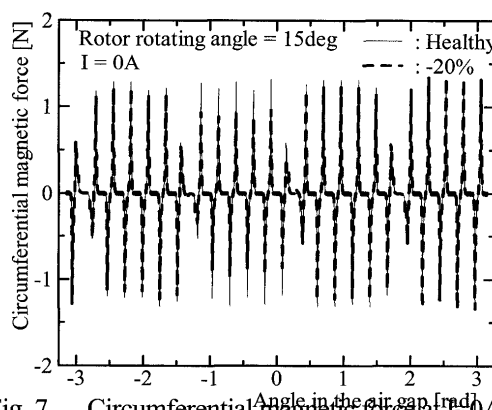
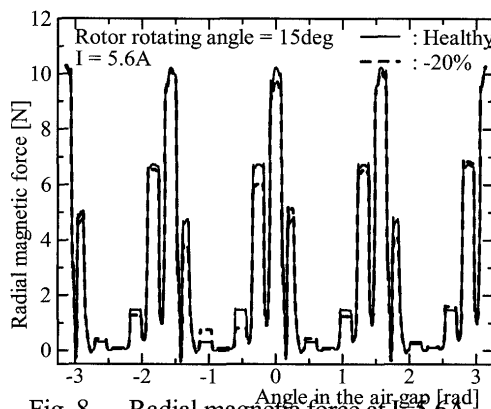
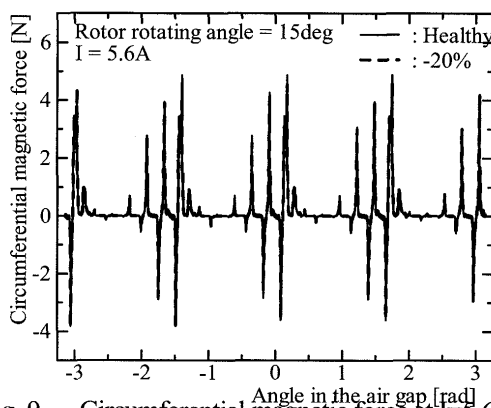


Fig. 5 Torque waveform.

Fig.5 にトルク波形を示す。健全機と-20%の場合の比較については、Table 1 よりその減少割合は-10%の場合 0.986, -20%の場合 0.969 となっており、磁石体積の減少割合より小さいことが分かる。なお、平均トルクが減少するという事は、埋め込み磁石型同期電動機を正弦波電流駆動のブラシレス DC モータとして運転した場合、制御系においてはトルク定数の減少とみなすことができる。

Fig.6 から 9 に、固定子の内側に働く電磁力を示す。Fig.6 より、健全機では全ての固定子歯に働く半径方向の電磁力は等しいが、-20%の場合、厚みが-20%の磁石の存在する位置-1 から 0rad 付近では大きな減少がみられる。逆に、2 から 3rad 付近ではわずかに増加していることが分かる。Fig.7 に示す周方向の電磁力は、Fig.6 と異なりとがった形をしている。なお、この波形の合計に半径を乗じた値が、回転子の回転角が 15 度の時のトルクに相当する。周方向の電磁力についても、半径

Fig. 6 Radial magnetic force at $I=0A$.Fig. 7 Circumferential magnetic force at $I=0A$.Fig. 8 Radial magnetic force at $I=5.6A$.Fig. 9 Circumferential magnetic force at $I=5.6A$.

方向の電磁力と同様-20%の磁石が存在する位置で大きな減少がみられる。Fig.8, 9 は、定格電流 5.6A で位相が 30 度のときの電磁力である。電磁力は歯の中で回転方向側に偏っていることが分かる。-20%の場合、-0%の磁石が存在する位置で減少がみられる。その減少幅は Fig.6 とほぼ等しい 0.1MPa 弱である。Fig.9 の周方向の電磁力についても、半径方向の電磁力と同様-20%の磁石が存在する位置で減少がみられる。

3 故障診断

3.1 故障診断検出装置

故障診断を行うための実験システムを Fig.10 に示す。実験装置は整流回路、インバータ、エンコーダ付きの埋め込み磁石型同期電動機、トルクメータ、ヒステリシスブレーキおよび DPS ボード DS1104 で構成されている。DS1104 で電流マイナーループを持つ速度制御をベクトル制御で行なっている。検出する物理量は、インバータの入力電圧 V_{dc} 、入力電流 I_{dc} 、モータの入力電圧 V_{uv} 、 V_{vw} 、電流 I_u 、 I_v 、トルク T_e 、回転速度 ω_m である。LabVIEW でこれらを同時に検出するシステムを自作し、フーリエ解析やウェーブレット解析を行う。

3.2 コギングトルク特性

Fig.11 にコギングトルク特性を示す。ただし、実験結果および解析結果は、健全機のそれぞれのコギングトルクの値を基準として相対値で示してある。図より、実験結果と解析結果はほぼ一致しているといえる。また、磁石の幅が-10%、-20%となると、体積比 0.975、0.95 より大きな減少であることが分かる。コギングトルク特性は、モータをインバータや制御系と組み合わせて運転する必要がないため、モータ単体を用いた故障診断の一方法として用いることができると考えられる。

3.3 フーリエ解析

Fig.10 のシステムを用いることによって、各物理量の定常特性および過渡特性を測定した。その一例として、速度ステップ指令時のインバータの入力電圧 V_{dc} 、入力電流 I_{dc} 、モータの入力電圧 V_{uv} 、電流 I_u 、トルク T_e 、回転速度 ω_m を Fig.12 に示す。0.02 秒の時点でステップ指令が入ると、電流が流れトルクが発生し、加速して指令速度に達している。また直流部のコンデンサの値は有限であるため加速時にインバータの直流電圧はわずかに小さくなっている。ここでは各物理量に

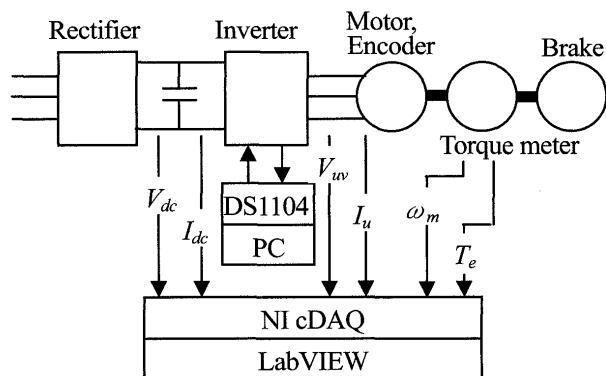


Fig. 10 Experimental setup.

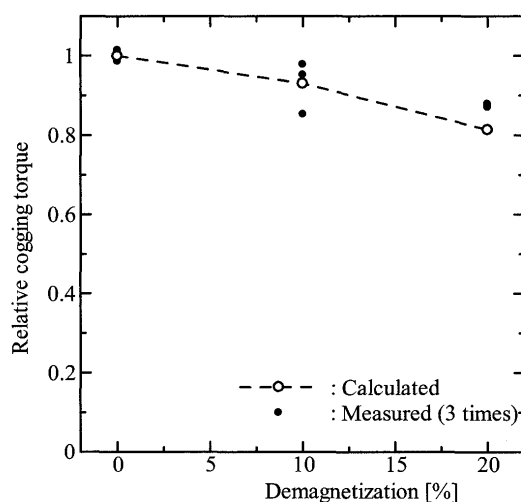


Fig. 11 Comparison of cogging torque

加えて、次式で表される α β 軸の 2 相電流の振幅 I_{amp} も用いることにする。

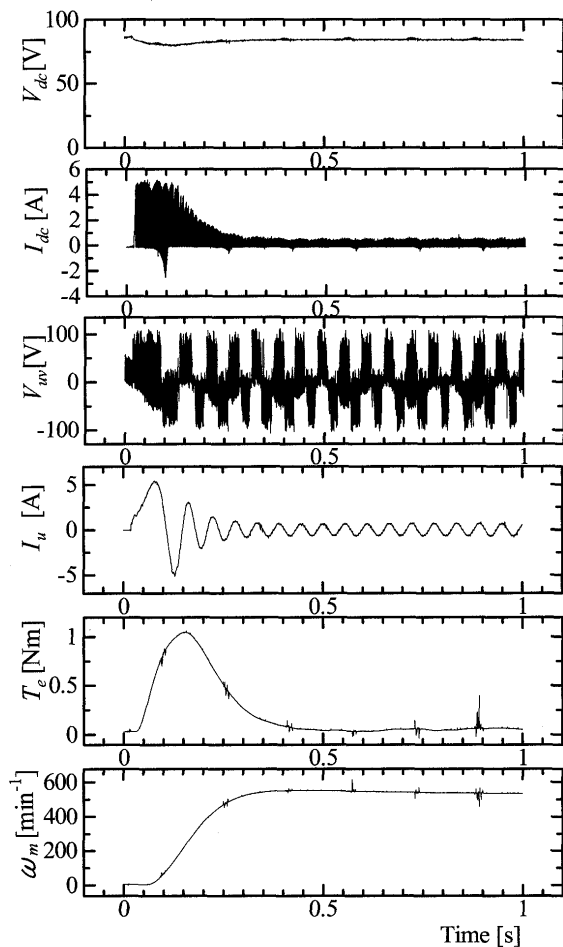
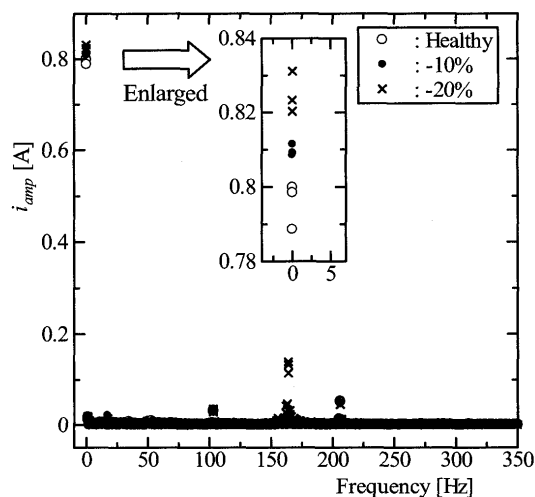
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_{amp} = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (2)$$

各物理量の中で、2 相電流の振幅 I_{amp} のフーリエ解析結果に特徴が現れたので、Fig.13 にその結果を示す。 I_{amp} の直流成分を拡大すると、健全機、-10%、-20%の順で大きくなっており、実験のばらつきを考慮しても判別可能であるといえる。

ここで、この結果について考察する。Fig.5 および Table1 で、-10%、-20%の場合、磁石の体積の減少幅より小さい値であるが、平均トルクも減少しトルク定数 K_t が小さくなることを示した。円筒型同期電動機あるいは、ベクトル制御で d 軸電流を 0 と制御したとき、

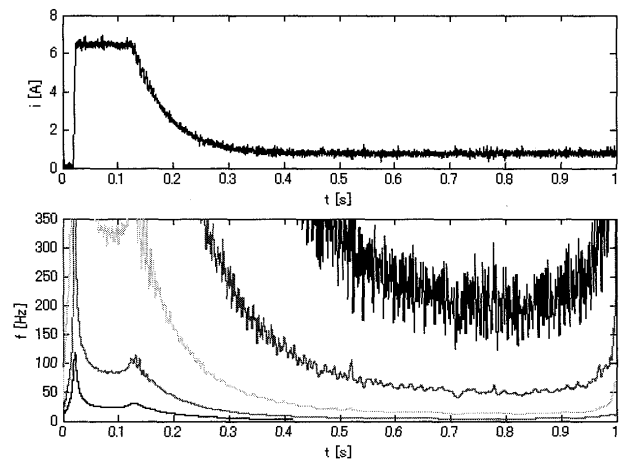
平

Fig. 12 Step responses of V_{dc} , I_{dc} , V_{uv} , I_u , T_e , ω_m .Fig. 13 Fourier analysis of the amplitude of 2-phase current I_{amp} .

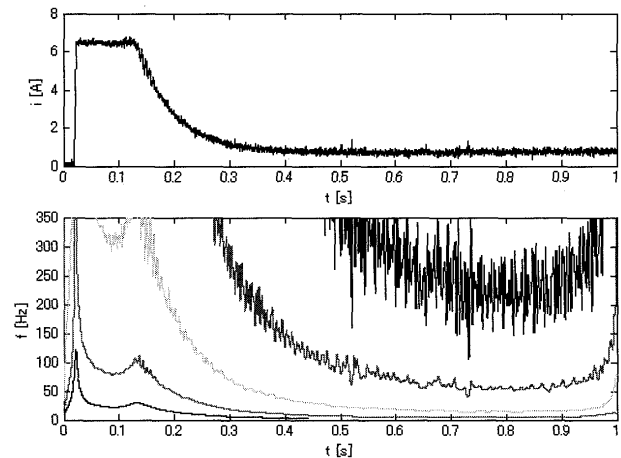
均トルクは次式で表される。

$$T_e = K_t I_q = K_t I_{amp} \quad (3)$$

従って、発生トルクが負荷トルクと釣り合って一定値



(a) Healthy motor.



(b) 20% demagnetized motor.

Fig. 14 Wavelet analysis. Upper figures of (a) and (b) show the waveform of I_{amp} and lower figures show the contour of absolute value of I_{amp} .

となっている場合、2相電流の振幅 I_{amp} の直流成分は磁石の幅が小さく、従って K_t が小さくなるほど大きな値となることが分かる。

3.4 ウェーブレット解析

Fig.14 に、Fig.12 と同じ実験条件における2相電流の振幅 I_{amp} の応答およびそのウェーブレット解析を示す。健全機と-20%の場合、電流応答波形にはまったくといっていいほど違いが見られない。それに対して、Morlet 関数で波の数を1とした場合のウェーブレット解析にわずかな違いが見られる。しかし、数回の実験を行い、その結果を等高線図から判別することは困難であるので、本論文では波の数を10点、周波数を8点、時刻を20点選び、全ての物理量について健全機、

-10%, -20%の場合が判別できるかを検討した。その結果、フーリエ解析の時と同様に 2 相電流の振幅 I_{amp}

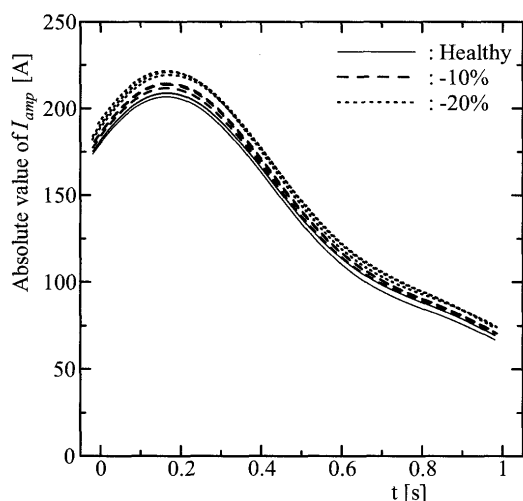


Fig. 15 Wavelet analysis when the number of waves is one and the frequency is 1.008Hz.

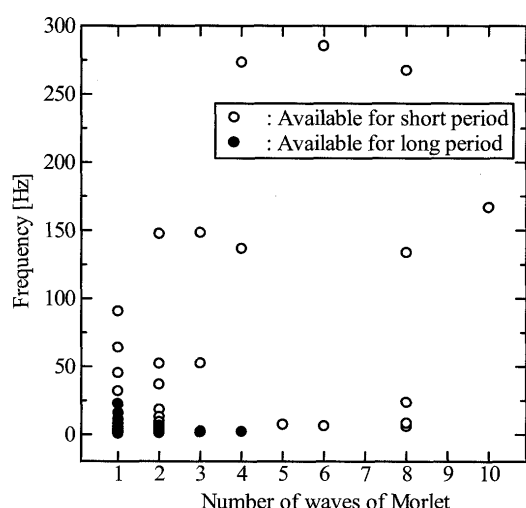


Fig. 16 Region that can detect whether healthy motor, -10% or -20% demagnetized motor.

が有効であった。Fig.15 に I_{amp} について、波の数 1, 周波数約 1Hz 時のウェーブレット解析結果を示す。図より、その違いはあまり大きくないが、健全機, -10%, -20%の場合を判別できることが分かる。Fig.16 に I_{amp} を用いて健全機, -10%, -20%の場合を判別できる周波数および波の数の領域を示す。Fig.14 の実験時間 1 秒に対して、その 1/3 程度の時間において判別可能な領域○はかなり広いことが分かる。また、ほぼ全時間において判別可能な領域●は波の数が小さく、周波数も小さい領域であることが分かる。

4 まとめ

埋め込み磁石型同期電動機の磁石の一部が不完全着磁あるいは減磁された場合を磁石の厚みを変えることによって近似し、電動機の定常特性を明らかにした。実験においても、コギングトルク特性に違いが現れ、モータ単体での診断に利用できることを明らかにした。また、定常運転時は 2 相電流の振幅のフーリエ解析、過渡時は 2 相電流の振幅のウェーブレット解析を用いることによって違いが現れ、故障診断に利用できることが分かった。

(2010 年 10 月 18 日受付, 2011 年 2 月 21 日再受付)

参考文献

- [1] Motor Reliability Working Group, Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I, *IEEE Trans. Industrial Applications*, Vol.1A-21, No.4, pp.865-872, 1985.
- [2] 高性能永久磁石材料の特性並びに応用調査専門委員会, 高性能永久磁石材料の特性, 安定性と応用—希土類磁石のデータ資料室—, 電気学会技術報告第 729 号, 1999.
- [3] 先端磁石材料の着磁特性並びに応用調査専門委員会, 先端磁石材料の着磁特性並びに応用, 電気学会技術報告第 859 号, 2001.
- [4] O. A. Mohammed, Z. Liu, S. Liu, N. Y. Abed, Internal Short Circuit Fault Diagnosis for PM Machines Using FE-Based Phase Variable Model and Wavelets Analysis, *IEEE Trans Magnetics*, Vol.43, No.4, pp.1729-1732, 2007.
- [5] S. Rajagopalan, R. W. Le, T. G. Habetler, R. G. Harley, Diagnosis of Potential Rotor Faults in Brushless DC Machines, *IEE Conf Publ.*, Vol.498, No.2, pp.668-673, 2004.
- [6] 回転機のバーチャルエンジニアリングの電磁界解析技術調査専門委員会, 回転機のバーチャルエンジニアリングの電磁界解析技術, 電気学会技術報告第 776 号, pp.43-54, 2000.