

誘導電動機の 2sf ビート現象

秋 山 勇 治*

Induction Motor 2sf Beat Phenomena

Yuji AKIYAMA

Abstract

The abnormal phenomena of induction motors by the rotor eccentricity, we can find sometimes (2sf) beat phenomena as vibration and noise. From the study to determine the cause of the magnetic noise increase due to rotor eccentricity, it was found that the main cause is the unbalanced magnetic pull based on the rotor eccentricity permeance wave, it sometimes produces a beat phenomena with the first farmonic of slip frequency (2sf).

These phenomena are mainly found not only due to rotor eccentricity, also, the magnetic, electric and mechanical rotor asymmetry also cause a similar phenomena. But these (2sf) beat phenomena are mainly occur in dynamic eccentricity and mixed eccentricity which was found by my study.

1. ま え が き

誘導電動機の振動、騒音の中にスベリ周波数の2倍の周波数のビート性の強い振動や騒音を発生する場合がある。この様なビート性の異音は特に耳ざわりで問題視されやすい。また 2sf 振動も結構大きく極端な場合はベアリングに損傷を与えかねないこともある。この 2sf 振動現象に関しては未だ十分な説明及び理論的な究明は成されていないが、論文として最初に発表した人は多分 E.W. Summers (AIEE, 1955) と思う。

この現象には大別して二つ有り、小形(中形)の全閉溝機で発生する場合と、中～大容量機である程度運転時間が経過してから発生する場合及び LNG、液体窒素など低温液体中で運転する場合などに発生する事を経験している。

筆者はこの 2sf 振動現象に関し比較的多くの経験及びデータを有するので、ここに再度これらの事例を示し 2sf 振動の発生原因を検討してみようと思う。

この現象は単に悪い意味のみでなく、逆にこの 2sf 現象の存在をチェックする事により、回転子の出来具

合、問題点を判断する事も可能である。

2. 偏心と 2sf ビート現象

E.W. Summers の論文でも 2sf Hz のビート現象を回転子の偏心現象としてとらえている。その場合特に 2 極機として現象を説明している。我々の経験では回転子の偏心に関係した現象である事は認めるが、それ程単純ではなく単に偏心回転子のすべてに 2sf ビート現象が発生するかというと、そうともかぎらない。

図 1 に秋山の示した回転子の四つの代表的な偏心形態を図示している。この中で (B) 動態偏心と (D) 混合偏心の二態についてのみ 2sf 現象は現われる場合を経験

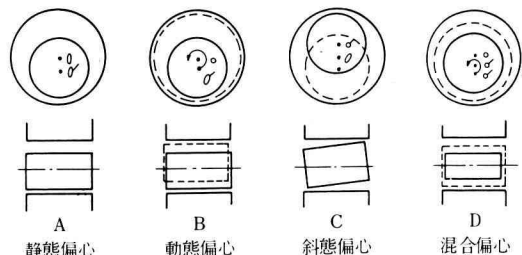


図 1. 偏心形態の分類

している。(A) 静態偏心, (C) 斜態偏心では $2sf$ ビート現象は発生しないか発生しにくい事を実験的に経験している。

以下 $2sf$ ビート現象の事例につき示してみよう。

2.1 偏心に起因する振動および磁気音

回転子の偏心により機体の振動および磁気音が増大することが知られている。本論文ではこの現象を「偏心磁気音」と呼んでいるが、その原因および定量的解析手法に至ってはほとんど研究されていないのが実情である。

偏心には各種の形態があり、これら偏心形態により振動、騒音に与える影響は異なる。振動に関係する要因としては (A) アンバランスウェイト (振れ回り振動), (B) 付加磁界、逆相分磁界による振動およびトルク脈動, (C) 偏心パーミアンス差による $2sf$ ビートが考えられる。磁気音に関係する要因としては (D) 付加磁界による不平衡磁気吸引力 (UMP), (E) 偏心方向の高調波漏れ磁束の増大による不平衡磁気吸引力, (F) 付加磁界と他のギャップ調波の合成による低次の分布力, (G) ギャップ面のいびつに起因する付加磁界等が考えられる。

これらのほとんどが回転子に作用する UMP である。

従来の磁気音理論の主体はスロットコンビネーションに起因する分布力または多角形振動力によるコアの振動であった。

しかし、2 次以上の振動モードでは振幅値は高々 $0.5 \sim 1.0$ ミクロンのオーダーであり、磁気音の主要因ではあるがここで言う機体振動の原因ではない。

これに対し偏心付加磁界により生ずる不平衡磁気吸引力 (Unbalanced magnetic pull) UMP は振動モード $M=1$ と呼ばれる 1 次の不平衡磁気吸引力で、直接回転子に作用し、強制力として比較的剛性の弱いシャフト系を振動させる。

これがシャフトまたは構造物の固有振動数に接近すると激しい振動を生ずる。この場合振幅値が $20 \sim 50$ ミクロンにもおよぶ場合があり、極端な場合には振動のためアンカボルトが破断される場合があるとの報告もある。

この種の振動は単に電磁力のみではなく機械系の共振現象が関係し、特に偏心に起因する振動、磁気音の増大現象には UMP によるシャフト系の共振現象が関係している場合が多い。

2.2 偏心による $2sf$ ビート現象

偏心回転子の中でも特に動態偏心 (Dynamic Eccentricity) および混合偏心 (Mixed Eccentricity) の場合はすべり周波数の 2 倍 ($2sf$) で振動および騒音がビートを打つ場合がある。

この他回転子導体が一部破断している場合 (これをバー切れと呼ぶ) とか、全閉スロット回転子のチップ厚の不均一による磁気的非対称性などによってもこの $2sf$ ビート現象を生ずる場合がある。

これらを総合すると「 $2sf$ ビート現象はギャップ面または回転子における機械的、磁気的および電気的非対称性に起因する」ということができよう。

ここで機械的とは偏心によるギャップの非対称性、磁気的とは鉄板厚、透磁率、チップ厚の非対称性、電気的とは回転子のバー切れ、エンドリング破断と考えてよい。これらの各要因は回転子に対し UMP として作用し、その大きさが以下の理由により $2sf$ なる周波数で変化するためである。

3. $2sf$ ビート現象発生 の原理

ギャップ面および回転子における「機械的、磁気的および電気的非対称性」が存在する場合、回転子には UMP が作用する。(反作用により固定子にも UMP を生ずる)。

これら非対称性要因は磁気的に考えるといずれもギャップパーミアンスの非対称性即ち偏心回転子と等価であると見なすことができる。よって主磁束分布の最大値と偏心方向が一致すれば UMP は最大となり、逆に主磁束分布の最少点 (N, S 極の中間) と偏心方向

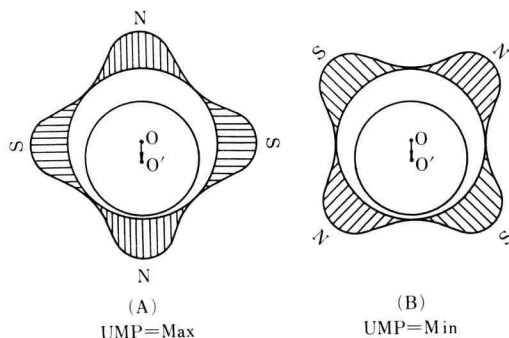


図2. 4極機に対する $2sf$ ビート現象説明図

が一致する場合 UMP は最少となる。よって回転子に作用する UMP は、これら最大値と最小値の間を正弦波状に連続的に変化することになる。これらの関係を図 2 にモデル化して示す。

すべり周波 1 サイクル間の UMP 変化を検討してみよう。図 2 は 4 極機を例に示したものであるが、斜線をほどこした N.S の主磁束分布は同期速度 W_0 で回転している。静態偏心 (Static Eccentricity) につき考えると、偏心方向は一定であるから回転子に作用する UMP は回転磁界と偏心方向の相対速度、即ち、電源周波数 f_0 の 2 倍の周波数で変化することになる。(1 サイクル N, S 2 回磁束密度の最大点を通過するので 2 倍となる)。

この現象をギャップ磁界の合成として説明することもできる。即ち、上記各種非対称要因により逆相回転磁界が回転子内に発生し、これが回転子に対し $(1-2s)f$ (Hz) で回転するため、 f (Hz) の正相回転磁界を干渉し $2sf$ (Hz) のビートを生ずるという説明もできる。

3.1 実例 (2P-150 kW IM, 16P-480 kW IM)

2sf ビート現象の発生理由を前節 3 に述べたが、起振源は、ギャップ面または回転子の機械的、磁気的および電気的非対称性 (不平衡性) に起因する。これが強力な振動力となるためには機械系との共振現象を必要とすることを前述べた。

ここで 2sf ビート現象のキャリア波は通常電源周波

数の 2 倍の $2f$ であるから、この周波数に近い固有振動数を有する構造物として軸系をあげることができる。その値は小容量機で 300~800 Hz、中容量機で 50~300 Hz、大容量機では 10~50 Hz 程度であり、特に軸系が細く軸受間隔の長い高速中容量機および巻線形電動機において共振の可能性が大きい。

(注) 小容量機ではスロットコンビネーションに起因する起振周波数がキャリア波となりシャフト系と共振し、磁気音を生ずる場合が多いので注意を要する。

ここに実例として 2 極 150 kW かご形誘導電動機および 16 極 480 kW 誘導電動機の偏心に起因する 2sf ビート現象の実例を示す。

図 3 は 2 極 150 kW IM の負荷時機体振動オシログラム波形である。このようにキャリア波が 2sf 周波数のビートを打つことにより超低周波の音も聞き取ることができる。

2 極 150 kW IM の場合、負荷を変えると軽負荷ではビート周期が遅く、負荷を増すにつれビート周期が早くなる。

このようにビート周波数とすべりの関係は丁度 $2sf$: Hz の関係であることを確認した、表 1。(ただし、この電動機は無負荷時何ら異常なく 2sf ビート現象も見られなかった、シャフト固有振動数は 80 Hz、電源周波数 50 Hz)。

クレーンモータのように巻線形で軸受間隔の長い機種にも電源周波数の 2 倍をキャリア波とする 2sf ビー

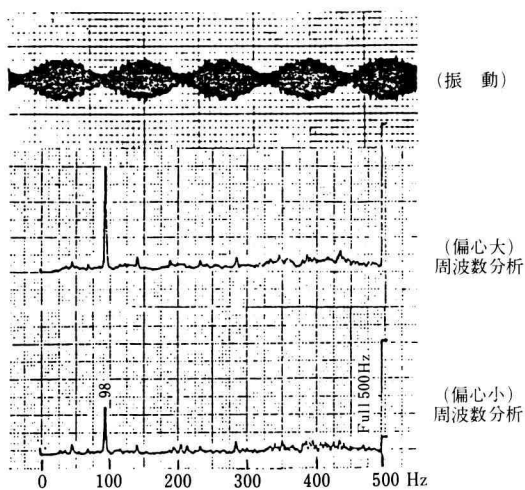


図 3. 2P-150KW, 2Sf ビート現象

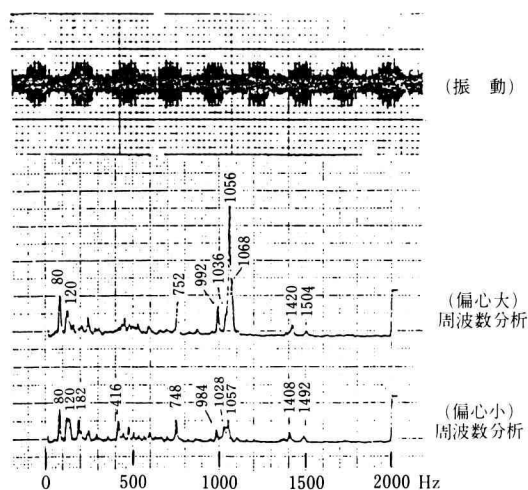


図 4. 16P-480KW, 2Sf ビート現象



図5. 2P-150KW 騒音ビート

ト振動を生ずる場合が多い。一例として、6極 75 kW クレーンモータの場合、無負荷運転時きわめて周期のながい (5~7 秒) ビート振動を生じた。

この電動機は定格すべり約 2% であるから当然無負荷時すべりは $S_0 \cong 0.1\%$ 程度あり、ビート周期からの逆算値は $0.12 \sim 0.17\%$ すべりと良い一致を示す。

以上 2P-150 kW, 6P-75 kW IM の共通点はともに軸受間隔が長く軸細であり、軸系の一次固有振動数がいずれもキャリア波 (2f) の 70~80% 程度であったこと、および軸剛性が低く強制振動の可能性が存在したことである。

図3は2極 150 kW, ($N_1=42, N_2=34$) かご形誘導電動機の場合であり、動態偏心のため 98 (100) Hz のキャリア波が 2sf でビートしている。(上段, 下段)。回転子の偏心修正後はこのビート現象がなくなり, 98 (100) Hz 成分が大幅に減少している (下段)。100 Hz キャリア波がビートを生ずる理由は主磁束波が $M=2$

のモードをなすため, $M^1=2 \pm 1=1, 3$ と 1 次の不平衡磁気吸引力を生ずるためと考えている。図4は16極 480 kW ($N_1=144, N_2=102$) 循環水ポンプ用立て形電動機である。偏心のため同様に 2sf ビート現象を生じている (上段, 周波数分析, 中段)。回転子の偏心を修正後はビート現象がなくなり, 1,056 Hz の脈動成分はきわめて少なくなっている (下段)。この場合のキャリ

表1. 2P-150 kW I/M 負荷電流に対するすべりおよび 2Sf ビートの関係

負荷電流 (A)	ビート回数/分	すべり回転数/分
25	32	16~17
28	36	18~19
30	42	21~22

(注) すべり回転数はストロボスコープによる目視、負荷変動があるため数値はばらつきは有る。

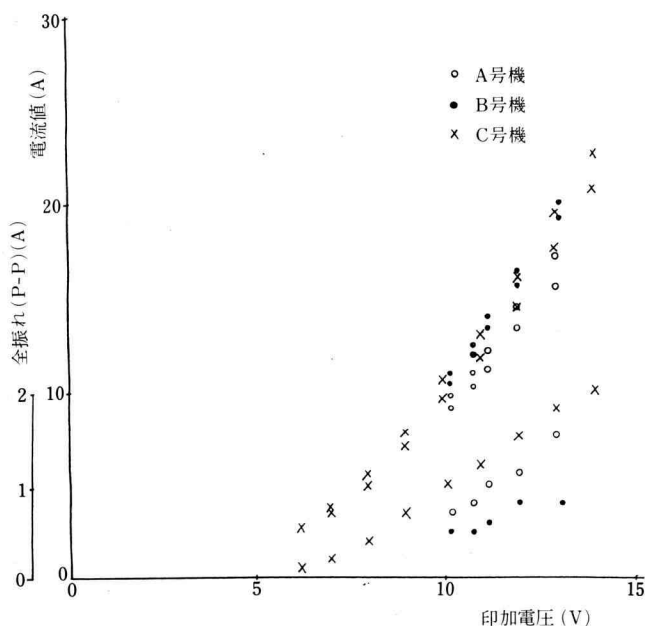


図6. Single Phase Test 結果

ア波 1,056 Hz はスロット組合せに起因する周波数である。

4. 冷凍機モータでの 2sf 電流ビート現象の例

一般に冷凍機モータはハーメチック構造であり、液中につかっているので 2sf の振動や騒音を感じる事はないが、逆に外部からこれらの異常現象・騒音を感じられない故に事故防止対策も困難であると言えよう。本例は 100 kW を超える LNG ポンプ用の超低温ポンプ用の例である。フロン液冷凍機でも経験しているこれらのモータは完全に液中で使用されており、モータの近くには近付けないので通常は判らない現象であるが、たまたま軽負荷時の運転電流が低周波で振動していたので気付いたという例である。

このように 2sf ビート現象に共通して言える事は、軽負荷時にライン電流が 2sf のビートを打つという事

である。この電流脈動も負荷の増加とともに均一化され目立たなくなってゆく。

図 6 はかご形回転子のバー切れ検出法の一つで、米国で開発された方法である。三相誘導電動機の三線中 2 線間に低電圧の単相交流を印加し、拘束に近い状態で回転子をゆっくり手で回した時の線電流の脈動の様子をプロットしたものである。(最大値と最小値をプロット) これは一種のポジショントルク測定に似た方法であり、バー切断による二次回路の結合係数のアンバランスの様子をチェック・測定する方法であり、回転子の回転角度を変える(ポジションの変化)事による電流の変化(脈動振幅)が大きい場合、バー切れ現象が発生しているというバー切れの間接チェック法である。

今回、この Single Phase Test を行った結果、図 6 に示すような大きな電流の振れが見られた。しかし、回転子単体チェックの結果ではバー切れは発生していな

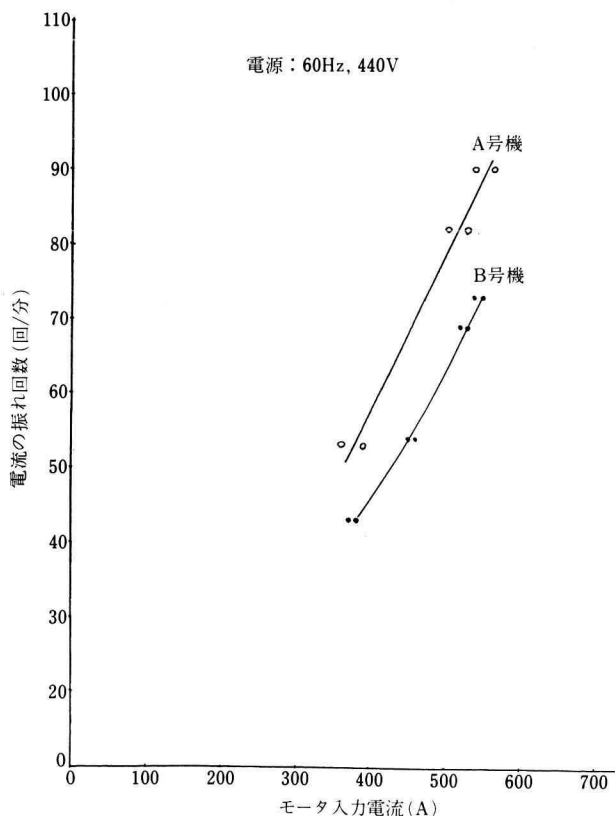


図 7. 負荷電流と電流ビート回数

かった。当然のことながら良品の回転子ではこのような現象「電流振れ現象」は見られず、結局回転子に付随する現象であることが判明している。

図7はこれら電流振れを生ずる回転子を組込んだモータの印加電圧一定条件のもとでの、負荷電流（電流値）と1分間当りの電流脈動回数の関係をグラフ化したものである。このグラフより電流ビートが2sfビートである事が証明される。

5. 共振現象

小容量機では全閉溝回転子に多く発生する。その他スキュー合せのため全閉スロットのチップ部を1カ所または2カ所半閉溝とした物にも多少出ている。この場合運転時間との相関性はあまり見られない。負荷が増大しビートの周期が短くなるとこの2sfビート現象は目立たなくなる。逆に軽負荷時の方が大きい。

中～大容量（細形機）では運転の初期にはあまり見られないが、ある程度時間が経過してから発生する場合が多い。軽負荷時に大きく負荷が重くなると目立たなくなる点は小形機と同じである。両者とも騒音のキャリア波は $2f_0$ 又はスロットリップル周波数である。また振動は $2f_0$ Hzが多い。

6. 結 論

この2sf₀ビート現象は回転子の機械的、磁氣的、電氣的非対称性により発生する可能性を有する。ただし非対象の形態としては(B)の動態偏心、つまり振れ回り形の場合に発生するようである。

この様に大きな2sfビート現象はきわめてまれな現象であり、モーターメーカーで永年仕事をした人でも、その間に数回程度しか経験できない現象である。しかし筆者は幸にもモータの異常現象を永年研究してきた関係で、10回近く2sfビート現象を処理してきた（ただし、最近の全閉溝小形モータでは小さな2sfビート現象を経験する事が多くなった）。

これら大きな2sfビート現象を発生したモータは概して、①ロータが細長い形状であった事、②運転時間の経過とともにビートは大きくなってゆく事、③停止時と運転時のロータの温度差が大きい事、などが共通した特徴であったようである。最近ではこの現象はシャフト部材の残留応力変形による、動態変心現象であるという確信を強めている。

参 考 文 献

- 1) E.W. Summers, (AIEE, 1955)
- 2) 秋山他, 平成2年度電気学会全国大会 688