

攪拌機のインバータ駆動とその問題点

Inverter Applied to Agitator Drive and Its Problem

(化)技術部 製品開発課
岡本 幸道
Yukimichi Okamoto

Recently, it is increasing to apply an inverter to an agitator drive instead of a mechanical speed variator. With this application, some problems which have not been experienced in the case of mechanical speed variators are occurring. For example, unusual gear clashing happens in a reducer box. This is mainly caused by the fluctuation of motor shaft speed at a certain frequency range of inverter out put.

In this paper, some characteristics and the problems of general purpose inverters applied to agitator drives, are discussed from the view point of a fabricant engineer of agitators.

まえがき

近年、攪拌機の変速駆動にインバータの利用が増加しつつある。従来の主流である機械式変速機との特長比較を行うと、インバータでの保守と管理が容易である、変速範囲が広い、動力効率が良いという長所に対し、機械式変速機ではトルク特性の自由度が高い、機械としての完成度と信頼性が高いという長所がある。経済性という点でも現在のところ両者ほぼ互格であり、攪拌機を前提とする場合、代替性の高い関係にある。

このような関係から、当社でも年間10台を越えるインバータ駆動の実績に至っているが、それに伴い固有の問題を生じている。具体的には減速機からの異音発生や駆動装置の振動となって出現する。そして、その原因が、インバータのカタログや技術資料に説明されている機械系との共振ではなく、汎用インバータと電動機の電気回路系が持つ固有の問題に帰結する場合が多い。

当社の実績からすると、インバータ駆動で上記の問題が発生する頻度は、インバータ駆動にとって致命的である程に多くはないが、駆動系のトラブル発生頻度としては見過ごし難い頻度になっている。

以上、インバータ駆動の問題を強調したが、このことが攪拌機への適用を否定するものではない。むしろ、機械式変速機では得られない長所を評価すれば、近い将来、変速機駆動の主流になる可能性を持っている。

現在、インバータに関する資料は電気メーカの出されたものが主である。それらには、先に紹介した問題に関する説明はほとんど見つけられない。本稿では攪拌機メーカの立場からインバータ駆動の特性と問題を説明する。

1. 汎用インバータ

本章では汎用インバータの構成と特性について簡単に説明する。その詳細についてはメーカの技術資料を参照されたい。

1.1 構成と原理

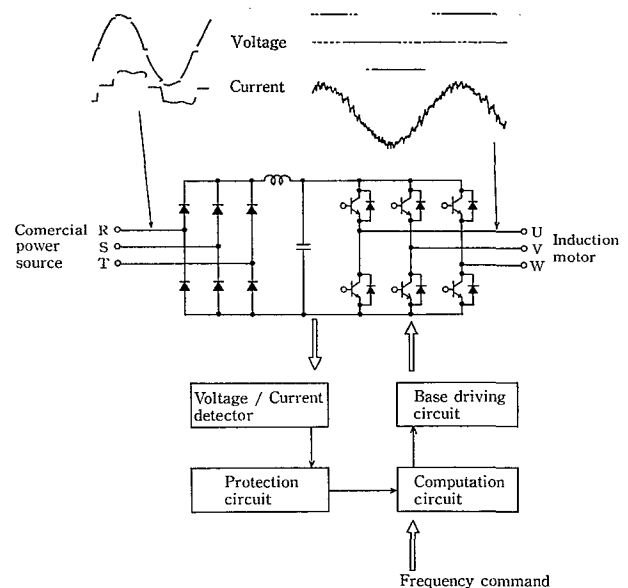
インバータには各種の方式があるが、通常利用される汎用トランジスタ・インバータについては、各メーカとも同一の方式の製品を市販している。すなわち、電圧形、電圧制御、正弦波変調PWM方式の採用が最近の主流になっている。

その主回路と制御系の構成を第1図に示す。主回路の基本原理は、ダイオードとコンデンサで商用3相交流から直

流定電圧源を形成し（電圧形）、パワートランジスタでのスイッチングにより所定の周波数の3相交流を出力する方式から成っている。そして、出力電圧の実効値と周波数を制御するスイッチング信号が制御系の演算回路から駆動回路を介してパワートランジスタのベースに供給される（電圧制御）。

正弦波変調PWM方式の制御では、出力電圧の1基本波を数多くのパルスによって形成し、個々のパルス幅を正弦波状に変化させ、さらに出力電圧の実効値（パルス幅の平均値）が、出力周波数によってあらかじめ決められた値となるよう、スイッチングのタイミングを演算回路で決定している。その結果、第1図に見られるように、出力線間電圧は3レベルのいずれかとなり、また出力電流波形は正弦波に近い基本波とスイッチングによって生じる高調波との合成波になる。

制御系には、上記のスイッチングを制御する回路の他に保護回路があり、インバータ回路と電動機の保護のため、



第1図 汎用トランジスタ・インバータの主回路と制御系

Fig. 1 Main circuit and controller of general purpose transistor inverter

電流、過負荷、瞬時停電などを監視し、異常があれば運転を停止する機能を持つ。

2 特性

1) V/F パターン

上記の通りインバータは出力周波数に応じて出力電圧の効値を制御する。この時の電圧と周波数の関係を V/F パターンと呼ぶ。

V/F パターンは各周波数での電動機のトルク特性、力率および効率を決める因子となる。V/F パターン決定の物理的な意味は、想定した定常負荷トルクと出力周波数(回転数)の関係に対して、周波数によらず電動機の磁束定格値に保つよう印加電圧を調整し、弱励磁によるトルク不足や強励磁による過電流を防止する点にある。

市販のインバータには数種のパターンが組み込まれ、負荷特性に応じて選択できるようになっている。基本的には定トルク用パターンと 2 乗低減トルク用パターンの 2 種があり、さらに低周波数での起動トルクに応じて細かく分類されている。要は、負荷の特性に応じたパターンを選択すれば動力上のロスが少ないということになる。

1) トルク特性

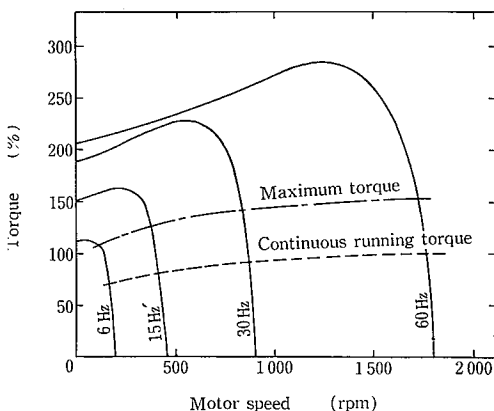
インバータ駆動の電動機は許容出力トルクを電動機の温上昇によって制限される。インバータ駆動時には高調波のため熱損失が増し、加えて、低速域ではファンによる冷能力が低下するため、この制限は低周波数になるに伴い厳しくなる。したがって、通常は 20~30 Hz 以下での連続許容トルクを定格トルクの 50~90% に制限する。敢えて高トルク負荷を要求する場合は、専用機を使うか、電動機の容量を上げることになる。

短時間の最大許容トルクについては、昇温のみでなく、インバータ回路の過電流耐量についても制限される。この場合は普通インバータ定格電流の 150% になる。仮に、インバータ定格電流が電動機定格電流の 1.1 倍とすれば、最大許容トルクは連続許容トルクの約 1.5 倍となる。

第 2 図にインバータ駆動時の各周波数でのトルク曲線、連続許容トルク、最大許容トルクの一例を示す。

1) 加減速特性

第 2 図の例から理解されるように、インバータ駆動では



第 2 図 インバータ駆動時の 4 極電動機のトルク曲線例
Fig. 2 Example of torque curve for a 4-pole induction motor connected to inverter

いきなり高い周波数で起動すれば過電流が生じ保護回路が作動して電流が遮断される。そこで制御回路は、起動時の周波数設定がいかなる値であれ、最低周波数で起動し一定の加速度で増速して設定値に至るようにスイッチングを行う指令を出す。

変速時の応答性という観点からは、この加速度の大きいことが望ましい。一方、加速度の増大は機械系慣性エネルギーの増加速度に対応する加速トルクの増大を生じる。したがって、この加速トルクと定常負荷トルクの和が前項の最大許容トルクを越えない範囲で加速度を設定する必要がある。市販のインバータでは加減速時間の設定によりこの加速度を調整できるようになっている。加減速時間の選択は 1~100 sec 程度の範囲で可能であり、また、加速時の電動機トルクは次式で推定される。

$$T_{Mac} = T_{ac} + T_L$$

$$T_{ac} = (GD_M^2 + GD_L^2)(N_2 - N_1) / 375 t_{ac}$$

$$T_{Mac} : \text{加速時の電動機出力トルク [kgf}\cdot\text{m]}$$

$$T_{ac} : \text{加速トルク [kgf}\cdot\text{m]}$$

$$T_L : \text{定常負荷トルク [kgf}\cdot\text{m]}$$

$$GD_M^2 : \text{電動機 } GD^2 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$$

$$GD_L^2 : \text{負荷側 } GD^2 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$$

$$N_1 : \text{加速前の回転数 [rpm]}$$

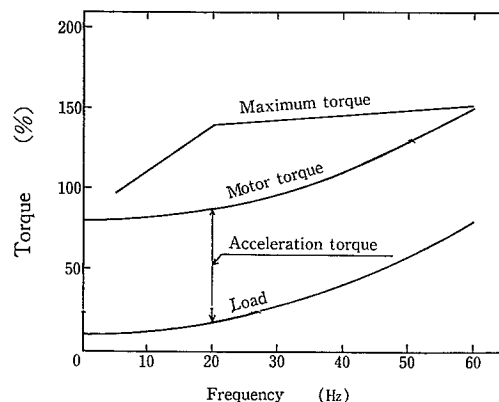
$$N_2 : \text{加速後の回転数 [rpm]}$$

$$t_{ac} : \text{加速時間 [sec]}$$

第 3 図に、2 乗低減トルク負荷での加速時の電動機トルクと出力周波数の関係を示す。この図では、過電流とならない最小の加速時間を選択していることになる。

4) 騒音と振動

インバータ駆動の電動機では商用電源駆動に比べ騒音と振動が増大する。正弦波変調 PWM 方式の場合、これらの原因となる低次の高調波が他の方式に比べ少ないとされているが、商用電源での駆動に対し騒音で 5~10 dB、振動の全振幅で 10~20% 程度の増大はあると考えた方がよい。騒音に関しては、1~3 kHz のスイッチング周波数に対応する電磁音が強まる。また振動に関しては、電動機との組み合わせにより出力周波数の低い領域で全振幅が他の周波数域の 2~3 倍となることもある。



第 3 図 許容最小加速時間に設定した時の電動機発生トルク
Fig. 3 Motor torque during the acceleration with the minimum permissible acceleration time

2. 攪拌機の負荷と駆動系

本章ではインバータを採用する場合の留意点を攪拌機側から見て説明する。

2.1 攪拌機の負荷特性

攪拌機用の電動機は1~100 kWの範囲が主であり、汎用トランジスタ・インバータの容量域とほぼ重なる。電動機の定格容量を100%とすると、概略70%が流体を攪拌するための最大負荷、15%が軸封および伝動装置の損失、残り15%が余裕と考えてよい。無論、この比率は各条件によってかなり異なるが、流体を攪拌するための定常動力（以下攪拌動力と略）が主体となる負荷であることに違いはない。

攪拌動力 P と攪拌機の回転数 N の関係は、攪拌される流体の流動性によって次の三つの典型に分類される。

(1) 低粘度液：水溶液、有機溶液

$$P \propto \rho_l N^3, T \propto \rho_l N^2 \quad (\rho_l: \text{液密度})$$

(2) 高粘度液：高分子化合物の熔融体、その溶液

$$P \propto \mu N^2, T \propto \mu N \quad (\mu: \text{液粘度})$$

(3) 塑性流体：粉粒体

$$P \propto \rho_b \mu_i N, T \propto \rho_b \mu_i \quad (\rho_b: \text{嵩密度}) \\ (\mu_i: \text{摩擦係数})$$

これらの典型の中間的な流動性を示す液体も存在する。

攪拌機の用途で最も多いのは低粘度液攪拌である。この場合の負荷特性の考え方はポンプと同じで、2乗低減トルク型の負荷となる。汎用インバータで駆動する電動機の出力特性を考慮すると、インバータにとってはこの形式の負荷が最も容易である。

高粘度液では、攪拌機自体が回転粘度計になり、そのトルクは回転数と粘度に比例する。実際の操作としては、回転数と同時に粘度も変わることが多いので、攪拌機の設計条件は定トルクか定動力での変速となる。しかし、インバータ駆動の最低周波数まで定トルク特性を要求することは電動機の枠番の増大とインバータ容量の増大につながるのので経済的ではない。定トルク特性の下限周波数を操作上必要な範囲にとどめることが望ましい。つまり、低速時の粘度、回転数、トルクの要求仕様を明確にしてインバータに過剰な要求を行わないことを留意する必要がある。

最後の塑性流体の場合、攪拌トルクは回転数に依存しない。そして、起動時を考慮すれば、この場合にこそ最低周波数でも一定のトルクが必要になる。塑性流体の代表的な例として粉粒体をあげたが、粉粒体の攪拌トルクは粒子の充填状態や含液率の分布によっても変動し、静置後の起動トルクが定常トルクより相当に大きくなる場合もある。したがって、この種の攪拌機にインバータを採用する際には、起動トルクに対して十分な余裕を見込む必要が生じる。インバータ駆動時の最大許容トルクは起動する瞬間の最低周波数において最も小さい。容量選定を誤れば起動不可能の事態に至ることになる。

なお、先に説明した通り、電動機出力は上記の攪拌動力と軸封部、伝動装置部の摺動ロスとの和になる。軸封部と伝動装置部の摺動ロスは概略定トルク性の負荷と考えてよい。ただし、時間をかけて起動する際には潤滑状態の関係上、定常時の2倍程度のロスがあると考えた方がよい。

次に加減速時のトルクについて説明する。一般に攪拌機

は変速時の速い応答を必要とする特別な理由は無い。また、攪拌翼の回転数は10~150 rpm程度であり、電動機に対して減速比が大きいため、攪拌機の GD^2 も電動機の GD^2 より小さい。したがって、特に加減速トルクや加減速時間が問題になることは無いと考えてよい。ただし次の場合に関しては攪拌液の慣性の影響が出るので留意する必要がある。

低粘度液攪拌で、邪魔板を少なくし大きな径の攪拌翼を比較的高い回転数で用いることがある。この種の攪拌では、加速時の攪拌トルクが同回転数での定常攪拌トルクに比べかなり大きな値となる。これは、攪拌トルクが翼と液の相対速度の2乗に比例すること、加速時には液の速度上昇に遅れがあるために翼と液の相対速度が定常時に比べ大きいことによる。このような状況での電動機出力変化を正しく求めるには電算機でのシミュレーションが必要になる。しかしながら、単にインバータの選定をチェックするには、液の GD^2 を機械系の GD^2 に加えるか、あるいは、液が静止している場合の攪拌トルク——完全邪魔板条件下の攪拌トルクにほぼ等しい——を定常負荷と考えて計算を行えばよい。

2.2 攪拌機の駆動系

攪拌機の駆動系にインバータを適用する場合、機械仕様上の留意点は次の2点である。

攪拌機は化学プロセスの装置として防爆エリアに設置されることが多い。そして防爆の認定は電動機とインバータの組み合わせに対して行われる。インバータ自体は非防爆エリアに置かれるが、電動機の防爆認定がインバータとの組み合わせに対して行われるのであり、後日、インバータを変更するには再度の認定が必要になる。つまり、インバータ駆動で不都合があったとしても安易にインバータの一部を変更するわけにはいかない。

攪拌機の駆動系には必ず減速機が組み込まれる。遊星ギア、ヘリカル・ギア、ベベル・ギア、ウォーム・ギアなどの歯車減速機が多く、その潤滑のため連続使用回転数域が定められている。インバータ駆動で広い変速範囲が必要な場合は、減速機の使用回転数域を確認する必要がある。

また、市販の減速機は滑らかな回転が入力されることを前提としてある程度のバック・ラッシュを設けている。インバータ駆動で電動機側の回転にふらつきがあると異音を発生することがある。この点に関しては次章で説明する。

3. インバータ駆動の問題

本章では当社が経験したインバータ駆動の問題点について説明する。

3.1 問題事例

当社が過去5年間に経験した問題は下記の4種である。

- (1) 減速機の異音発生 (4件)
- (2) 駆動系の異常振動および振動増大 (2件)
- (3) 再起動不能 (1件)
- (4) インバータの回路破損 (1件)

上記のうち(3)項は、前章で説明した粉粒体の攪拌トルク特性に関連している。(4)項は電源電圧の異常陥没によって生じたためとされているが、回路設計上の保護対策の問題も含まれるようである。残りの(1)(2)項がまえがきでふれた

問題にあたる。(1)(2)項の問題は主要なインバータ・メーカを含む4社の汎用製品について発生しており、市販の汎用インバータが共通して持つ問題と考えられる。

(1) 項の問題の特長は、変速域の中の数箇所の回転数に設定した時に限り減速機から歯の衝突音が発生し、同時に電動機電流が定格値の数十%の振幅で振動する点にある。

(2) 項の問題の特長は、変速域の上限(実例ではいずれも60 Hz)近くになると伝動装置の振動が急激に増大する点と、やはり、電動機電流の変動が激しくなる点にある。この場合、商用電源での直接駆動に切り替えると振動が正常レベルに戻り電流も安定する。

これらの事例で電動機電流はインバータ出力側で測定されている。また、数Hzの応答速度を持つ電流計であれば、減速機音や振動と同期した電流変動があることを確認できる。

1.2 減速機の異音

前節であげた問題のうち発生頻度の高い減速機の異音発生について説明する。

1.2.1 原因

直接の原因は、インバータの特定の出力周波数において電動機の回転が数Hzの大きなふらつきを生じるためである。この時、減速機のバック・ラッシュの存在によりギアが衝突して音が発生する。この問題の当初は振り振動を疑ったが、機械系の振り固有振動数を変更しても異音発生時の回転数に変化が無いこと、減速機を切り離れた電動機のインバータ駆動でも同様の回転のふらつきが確認できることから、この問題をインバータに固有の問題と判断するに至っている。この事実は、インバータ駆動による電動機性能試験の際に出力軸の回転速度検出を行えば確認できる。同時に電動機電流をオシロ・スコープか高速レコーダで検出すれば、回転速度に低周期の変動がある時には必ず電流波形に大きな歪みが現れる。

電動機の発生トルク、電流、すべり速度(周波数の同期速度と実回転速度との差)は、いずれかを決定すれば他は自動的に決まるという関係にある。したがって、所定の負荷を与えれば、電流とすべり速度は発生トルクが負荷トルクに均り合う状態で安定するはずである。ところが、インバータ駆動時には、この安定系が特定の出力周波数、発生トルク範囲で数Hzの大きな脈動をとまなり不安定な系に変わることがある。

この現象については、現在、次の2通りの説明がなされている。

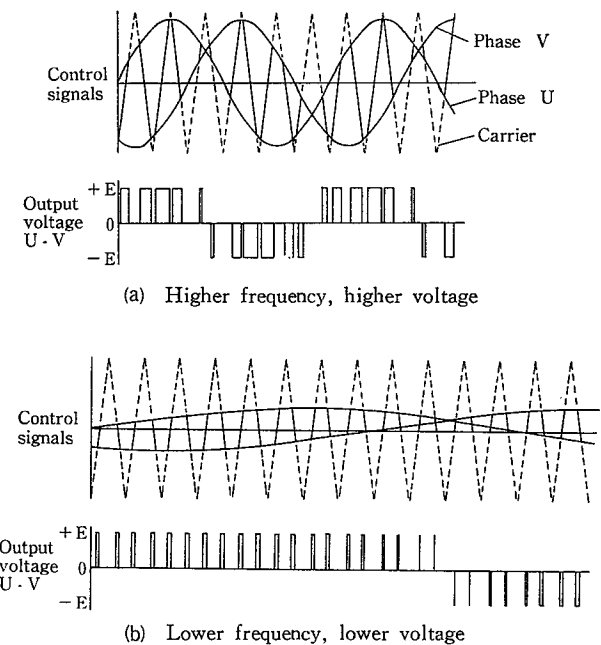
) 第1章で説明した通り、インバータはV/Fパターンの制御を行う。低い出力周波数では出力電圧の実効値を小さくおさえる。インバータは定電圧源を持つのみであるから、この制御は電圧印加時間を変えるスイッチングの時間差によって実現される。正弦波PWM制御時のこの様子を表した図が第4図である。低周波数域では、各電圧パルスの印加時間が短い上に、その印加時間を出力基本波1周期の間に正弦波状に変化させるとすれば、極めて短時間のスイッチング時間差を制御する必要が生じる。

一方、第1図の回路から理解されるように、同じ相の正負2組のスイッチが同時に接続されれば短絡すること

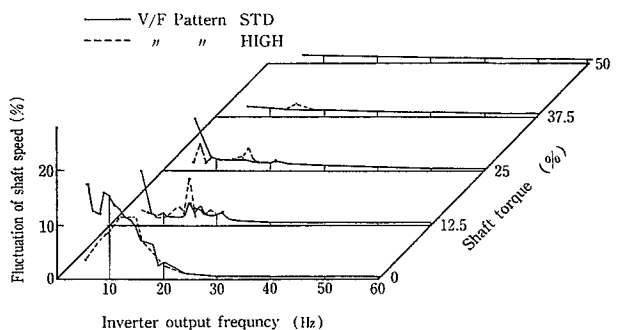
になる。これを防止するためのスイッチング時間差が不可欠になる。その時間差はパワートランジスタの応答性に安全時間を見込んで決定される。したがって、この短絡防止時間よりも短い時間での制御は不可能になる。

この結果、低周波数域では正弦波PWMの制御に対する誤差が増大することになり、電流波形の歪み、電動機の発生トルクと回転のふらつきが生じ易くなる。

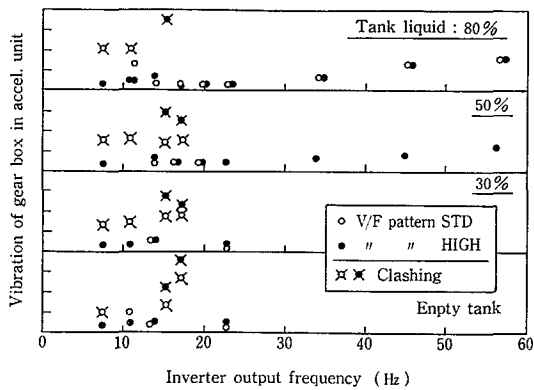
2) 通常、電気回路の応答は機械系に比べて極めて速いが、インバータと電動機の組み合わせでは、電動機の発生トルクと回転という力学系と同レベルの周期で電気回路系が不安定になることがある。インバータがスイッチング回路を含むために、その不安定性を定量的に扱うことは難しいが、一説によればインバータ電源と電動機との電力の授受に固有の周期性が生じるためといわれている。この電力の授受が具体的には電流となって現れるので、インバータの電流波形が基本波と上記の固有周期の波との重ね合せとなり、後者が発生トルクと回転のふらつきを引き起こすことになる。



第4図 正弦波PWMとその出力電圧
Fig. 4 Sinusoidal wave PWM and its output voltage



第5図 電動機出力軸の回転速度変動とインバータ出力周波数
Fig. 5 Relative-fluctuation of motor shaft speed, and output frequency of inverter



第6図 攪拌機の減速機振動と歯鳴り (第5図のインバータと電動機を使用)

Fig. 6 Vibration and gear clashing of a reducer on a agitated reactor (with the inverter and motor shown in Fig. 5)

3. 2. 2 現象例

電動機出力軸の回転速度変動の測定結果を第5図に示す。低周波数域で負荷トルクが小さい時に回転のふらつきが増加する傾向にある。先に説明した短絡防止時間が原因であれば、出力電圧の実効値を高める、すなわち、V/F比を高く設定することで回転のふらつきが改善されるはずである。同図の点線がその結果であり、確かに10 Hz以下では回転のふらつきが減少しているが、15 Hz前後では逆に増加している。この15 Hz前後については、先の第2項で説明した回路の不安定性によるものと考えられる。

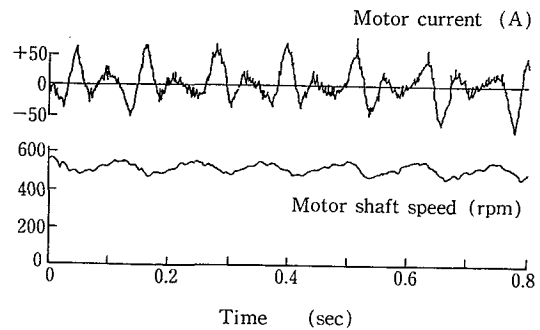
第6図は、第5図の電動機とインバータで攪拌機を駆動した時の減速機の振動の大きさと異音の有無を示した結果である。攪拌槽の仕込液は水であり、80%仕込から空までの各段階について測定結果を示している。負荷トルクの特徴は、ほぼ2乗低減トルク型と考えてよく、20 Hz以下ではいずれの液量でも10%前後の負荷トルクとなっている。第5図と第6図の比較より、この攪拌機の減速機は電動機の回転速度変動が5%程度に達すれば異音を発生すると考えられる。V/F比を高めることにより11 Hz以下での異音発生は防止できたが、15 Hz前後で発生する異音のレベルは上昇する結果となった。

第7図は、他の攪拌機のケースで、減速機から異音が発生した17.3 Hzでの電流波形と回転速度の記録を、正常に稼働している17.5 Hzでの記録と比較したものである。電流波形の歪み、回転のふらつきの差異が明瞭に表れている。

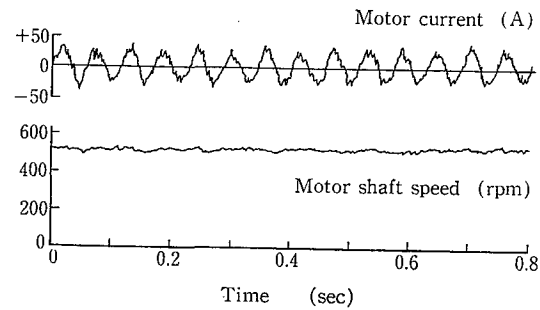
なお、減速機の形式について補足すれば、現在まで、ウォーム・ギア、ペベル・ギア、遊星ギアでの異音発生を経験している。ギアによって異音の出易さに差異があるようだが、定量的な確認はされていない。

3. 2. 3 対策

上記の問題への抜本的な対策はインバータの改良である。しかしながら、インバータ・メーカーへのヒアリングによれば、汎用インバータに多少手を加えることで改善できる種類の問題ではないようである。暫定的な対策としては



(a) Gear clashing at 17.3 Hz



(b) Normal running at 17.5 Hz

第7図 他の攪拌機での電動機電流波形と軸回転速度の記録例
Fig. 7 Examples of motor current and shaft speed records taken with another agitator.

下記の方法が考えられる。

1) インバータ側の対策

汎用インバータのオプションとして周波数ジャンプ機能を持つ機種が市販され始めている。この機能は機械系との共振を避ける目的で導入されているが、減速機の異音防止にも有効と考えられる。

ベクトル制御方式、あるいはこれに類似のフィードバック制御を行う方式のインバータを採用すれば電流波形の歪みは改善される。ただし、この種のインバータは高速高精度の制御を必要とする高級用途に対して開発された機種である。

2) 攪拌機側の対策

電動機と減速機の間にはゴム・カップリングやタイヤ・カップリングなど弾力性の高い継手を介在させることで異音を低減できる場合が多い。また、流体継手や粉体継手は、より有効な対策と考えられる。

むすび

近年、攪拌機の変速駆動系として汎用インバータを利用する例が増えている。それに伴い、従来の機械式変速機には見られない回転ムラに起因する問題が生じている。

現在の汎用インバータでこの種の問題を根本的に解決するには難しい面もあるが、近年のインバータの技術開発には目覚ましいものがあり、各種の改善が図られているので近い将来、本稿で説明した問題がインバータ側で解決されるものと考えている。