

サイリスタモータの軸継手によるトルク脈動の低減

Reduction of Torque Pulsation by Shaft Coupling on Driving Shaft of Thyristor Motor

電流形サイリスタモータの電気トルクは、のこぎり歯状に脈動する。この脈動トルクは、駆動軸にねじりトルクとして作用するので、駆動軸系のねじり固有振動数と共振しないよう注意することが重要である。この場合、駆動軸と従動軸とを連結する軸継手の選定を適切に行なうことも、振動抑制上極めて大切な要素となる。

この論文では、脈動トルクを伴うサイリスタモータ駆動軸の軸伝達トルクについて述べるとともに、通常広く用いられているリジッド継手、歯車継手、更に高弾性ゴム継手について、その特長、実機の振動解析、工場内模擬試験、納入現地での実負荷試験結果を紹介し、継手の振動特性を考慮した駆動システムの信頼性確保について述べる。

小井戸正之* *Koido Masayuki*
 宮田俊夫* *Miyata Toshio*
 奥山俊昭** *Okuyama Toshiaki*
 奈良安晃*** *Nara Yasuaki*

1 緒言

近年、省エネルギー・メンテナンスフリーの要求にマッチした一般産業用可変速駆動システムとして、サイリスタモータの応用が活発となってきている¹⁾。しかし、サイリスタモータの発生するトルクは、原理的に脈動を生じ²⁾、その周波数が回転速度に比例して変化するため、特にファン、ブロワなどの重慣性負荷を駆動する系では、軸系のねじり固有振動数との共振の可能性が大きく、共振現象を避けるための検討が設計上の大きな課題である。

このため、従来主として据付、保守上の観点から選定されてきた軸継手に関しても、駆動軸の信頼性を左右する重要な要素として慎重に検討する必要性が生じている。

脈動トルクが発生するサイリスタモータに、軸継手としてリジッド継手、歯車継手及び最近使用され始めた高弾性ゴム継手を用いた場合の伝達トルクの挙動について解析と試験により検討し、各々の軸継手の特長を明らかにした。

次に、これらの検討結果と脈動トルクに対して示す軸継手の特性について述べる。

2 サイリスタモータの発生する脈動トルク

ファン、ブロワなどの駆動用サイリスタモータは、一般に電流形サイリスタ変換器が用いられ、商用交流電力から可変周波の交流電力に変換し、これによりサイリスタモータの可変速運転を行なう。この電源方式には、コンバータ・インバータを用いる直流方式とサイクロコンバータを用いる交流方式があり、両者の間には始動初期の転流方式に相違があり、脈動トルクの様態にも差を生ずるが、定常運転状態では、両者とも瞬時的にはサイリスタモータの二相に通流してトルクを発生させ、回転子の位置を検出して、通流相を変えながら回転を持続させていることに変わりはない。したがって、この転流現象のために例えば、三相ブリッジ形サイリスタ変換器を用いれば電気トルクが電源周波数の6倍で、のこぎり波状に脈動して発生する。これは、サイリスタモータの原理上避けられないものである²⁾

始動時及び定常運転時の典型的なトルク脈動の様相を、模式的に図1(a)、(b)に示した。

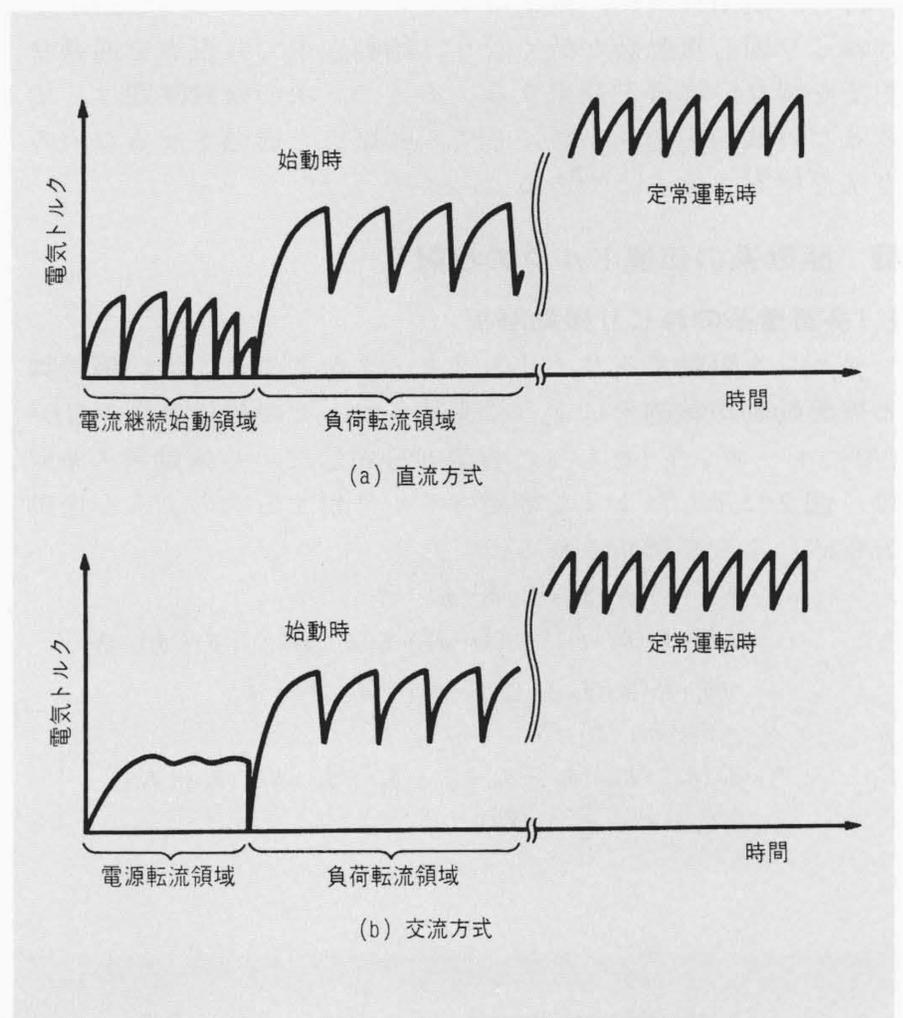


図1 電流形サイリスタモータの電気トルクの様相モデル図
 直流方式、交流方式とも電気トルクはのこぎり波状に脈動する。負荷転流領域は、電流制限を行なって加速している。

3 トルク脈動に伴う駆動軸系の検討課題

サイリスタモータでは電気脈動トルクが発生するために、従来の商用電源による定周波・定電圧電源によって駆動される電動機の駆動軸系よりも、更に詳細な軸振動の検討が要請される。

その一つは、始動時に低い周波数から連続的に電源周波数が増加するため、この間に駆動系とねじり共振を生じないよ

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所土浦工場

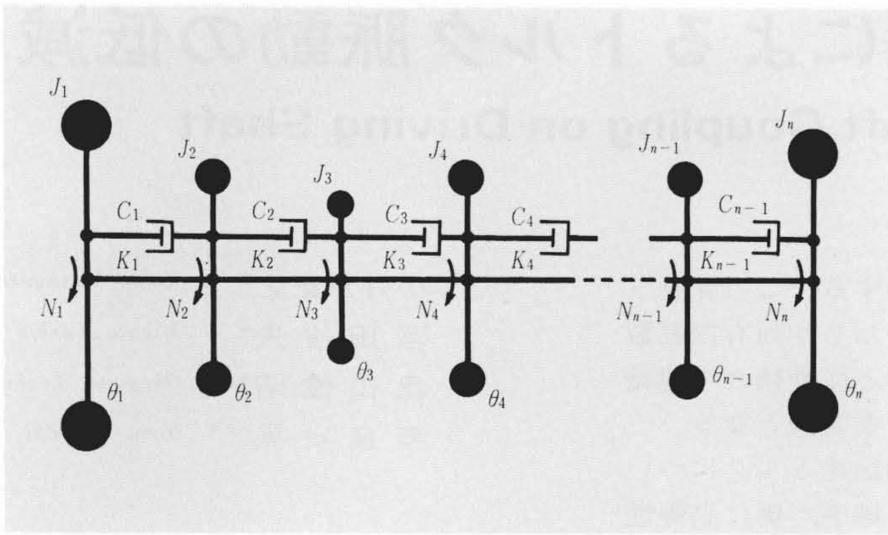


図2 ねじり振動の検討モデル 軸系に多数の集中質量が分布している場合のねじり振動の検討モデルを示す。

うに検討すること、また、速度制御範囲内の周波数の変化に対しても共振現象が発生しないように設計することが望ましい。

特に、重慣性負荷、例えばファン、ブロワなどの駆動系ではねじり固有振動数が低くなり、始動途中で共振点を通過せざるを得ない場合が発生する。そこで、次の検討課題は、できるだけ共振応力を小さくして、共振点を通過させるための方法を検討することである。

4 駆動系の伝達トルクの検討

4.1 多質量系のねじり振動解析

ファンを駆動するサイリスタモータなどのように、駆動軸と被駆動軸が軸継手によって連結され、その軸に多数のGD² (慣性モーメント)をもった質量が分布している振動系の挙動は、図2に示したような等価モデルに対する次のような振動方程式によって解析される。

$$\begin{cases}
 J_1 \ddot{\theta}_1 + K_1(\theta_1 - \theta_2) + C_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = N_1 \\
 J_2 \ddot{\theta}_2 + K_2(\theta_2 - \theta_3) + C_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) - K_1(\theta_1 - \theta_2) - C_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = N_2 \\
 \vdots \\
 J_i \ddot{\theta}_i + K_i(\theta_i - \theta_{i+1}) + C_i(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i+1}) - K_{i-1}(\theta_{i-1} - \theta_i) - C_{i-1}(\dot{\theta}_{i-1} - \dot{\theta}_i) = N_i \\
 \vdots \\
 J_{n-1} \ddot{\theta}_{n-1} + K_{n-1}(\theta_{n-1} - \theta_n) + C_{n-1}(\dot{\theta}_{n-1} - \dot{\theta}_n) - K_{n-2}(\theta_{n-2} - \theta_{n-1}) - C_{n-2}(\dot{\theta}_{n-2} - \dot{\theta}_{n-1}) = N_{n-1} \\
 J_n \ddot{\theta}_n - K_{n-1}(\theta_{n-1} - \theta_n) - C_{n-1}(\dot{\theta}_{n-1} - \dot{\theta}_n) = N_n
 \end{cases} \dots(1)$$

$$\begin{aligned}
 J_n \ddot{\theta}_n & - K_{n-1}(\theta_{n-1} - \theta_n) - C_{n-1}(\dot{\theta}_{n-1} - \dot{\theta}_n) = N_n \\
 T_i & = K_i(\theta_i - \theta_{i+1}) + C_i(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i+1}) \quad (i=1 \sim n) \dots(2)
 \end{aligned}$$

- ここに J_i : 集中質量極慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$)
- C_i : 減衰定数 ($\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{s}$)
- K_i : ねじりばね定数 ($\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{rad}^2$)
- θ_i : 極慣性モーメントのねじれ角 (rad)
- N_i : 印加トルク ($\text{kg} \cdot \text{cm}$)
- T_i : 伝達トルク ($\text{kg} \cdot \text{cm}$)

N_i は、各質量に対するねじり加振力を意味しており、図1(a), (b)に示したサイリスタモータの電気トルクを代入する。上式を用いた解析で、加振力の周波数を連続的に変化させれば共振応答が求められ、固有振動数も知ることができる。また、始動時の電気トルクの波形を入力して、始動初期の過渡応答を求める。これらの計算はプログラムを作成し、電子計算機を用いて行なっている。

さて、(1)式からも分かるように、軸のトルク応答を決めるのは、ねじりばね定数と減衰定数である。これらは、軸のねじり剛性によってほぼ決定されるが、軸間に挿入される軸継手は種類によりこのねじり剛性に大きな差があるので、得られるトルク応答も様相が違ってくる。

4.2 軸継手の種類による伝達トルクの特長

通常、広く用いられている継手としてリジッド継手、歯車継手及び高弾性ゴム継手³⁾を取り上げ、そのトルク伝達上の特性を検討した。これらの軸継手の構造を図3に示す。

リジッド継手は軸に焼きばめされたフランジをボルトにより剛に締結してトルク伝達するもので、伝達トルクは(2)式によって表わされる。歯車継手は、軸心のずれを許容できるため広く用いられている。この継手の特徴は、(2)式で表わされる伝達トルクに歯車のバックラッシの効果を考慮する必要があることである。すなわち、歯車が互いに接触している場合はリジッド継手と見なせるが、歯車が互いに接触していないときはトルクは伝達されない。また、トルクをいったん伝え始めると次に接触がなくなるまで剛体継手と見なせることによって、その挙動を検討することができる。

最近、サイリスタモータ駆動系に使用され始めた高弾性ゴム継手の構造を図3(c)に示す³⁾。この継手は、特殊なゴムの樹脂を重ねてタイヤ状にし、これによりトルクを伝達する機構

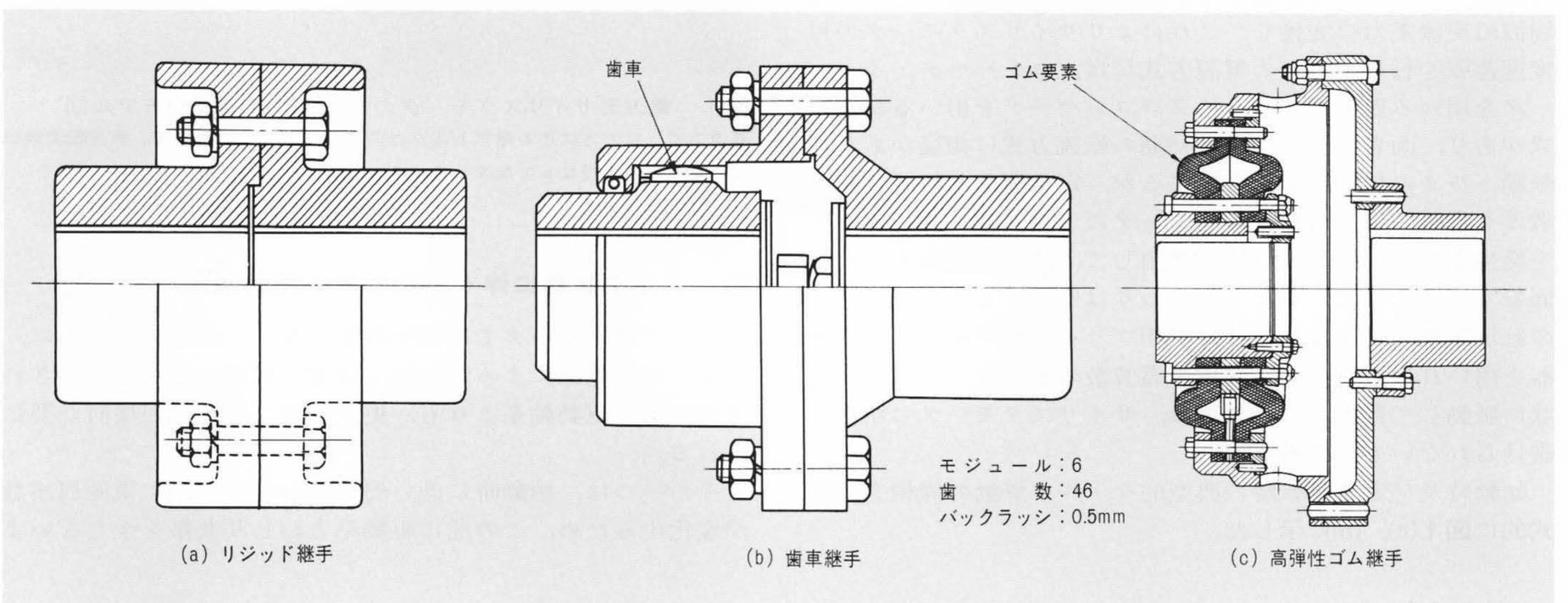


図3 軸継手の種類と構造 通常、ファン、ブロワ軸と電動機軸との締結に用いられている代表的な軸継手を示す。

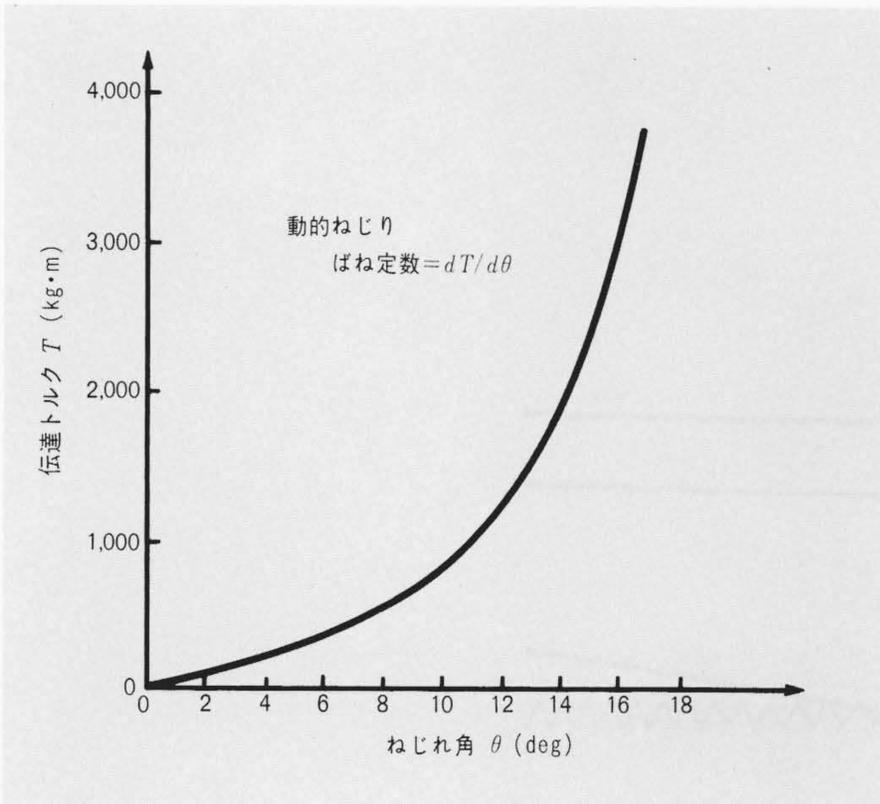


図4 高弾性ゴム継手のトルク伝達特性 継手のねじれ角と伝達トルクが非線形に変化し、ねじりばね定数も伝達トルクによって変化する特性をもっている。

をもつもので、トルクとねじり角の関係が図4に示すように非線形となり、入力トルクの変動を減衰させて出力する特長をもっている。すなわち、継手のねじりばね定数が継手を伝達するトルクによって逐次変化する。このため、(1)式による振動の解析には、継手を伝達する瞬時トルクと、ねじりばね定数との関係が図4に示す関係になるように、繰返し計算が必要である。

4.3 ねじり固有振動数と共振応答

リジッド継手又は歯車継手を使用した駆動軸系の、ねじり固有振動数を求めるため、加振力の周波数を連続的に変えた場合のシミュレーションを行ない、得られた結果を図5に示す。リジッド継手では、ねじり共振時に明確な振幅の増大現象が見られる。歯車継手では、バックラッシの影響により、歯の片当たり現象が発生し前者に比べてねじり固有振動数の低下が見られる。次にトンネルファン用705kWサイリスタモータによる高弾性継手を用いた軸の始動時軸トルクのシミュレーション結果を図6に示す。これは、既に述べたようにねじりばね定数が逐次変化するため、明確な共振応答は現われず、その過渡応答から見ても振動周波数は非常に低周波となっており、ゴム継手としての特徴が顕著である。

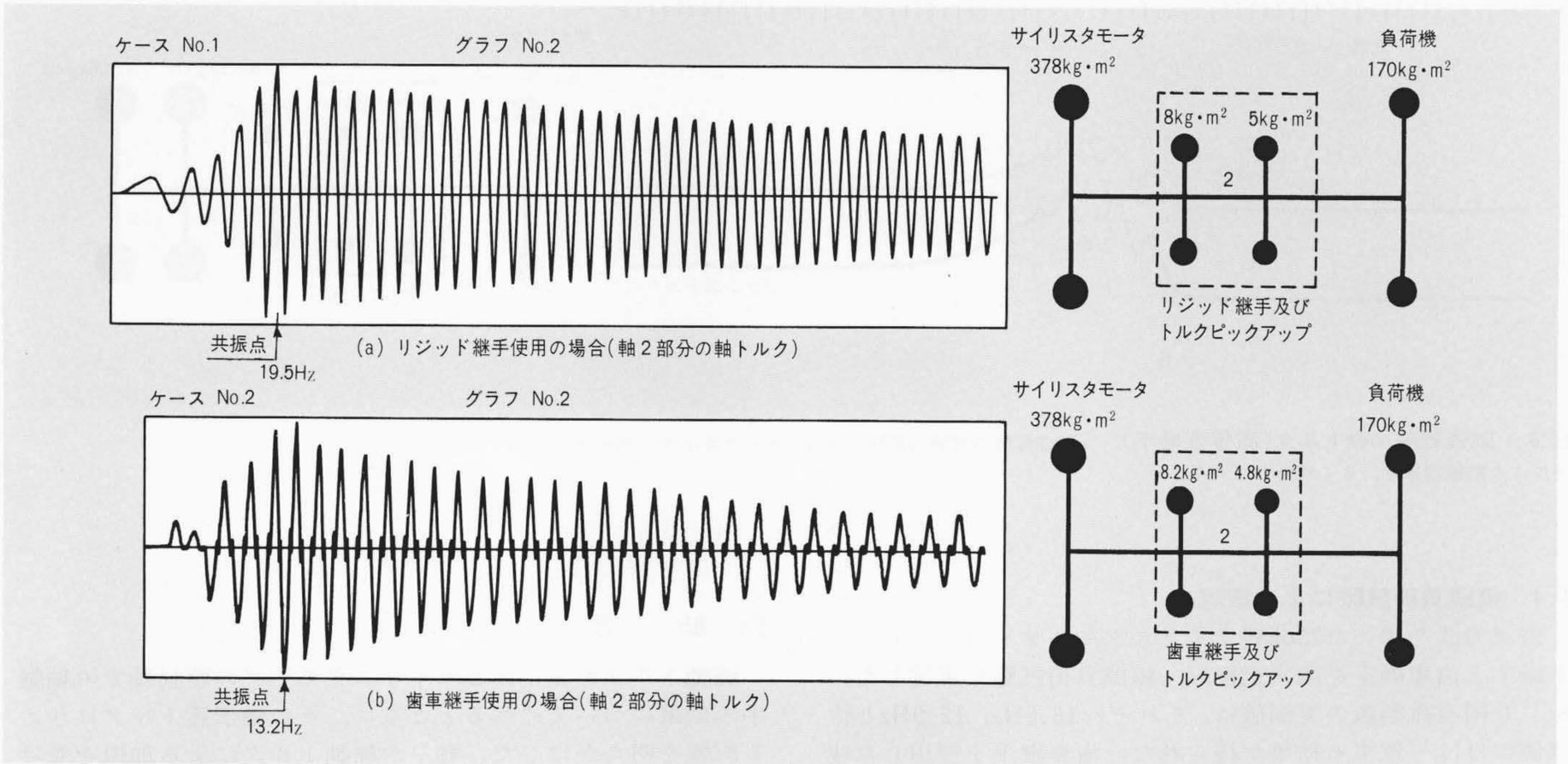


図5 始動時の共振応答のシミュレーション結果 57.5Hz/sの割合で周波数を変えて、両振り加振した場合のリジッド継手の共振応答を示す。

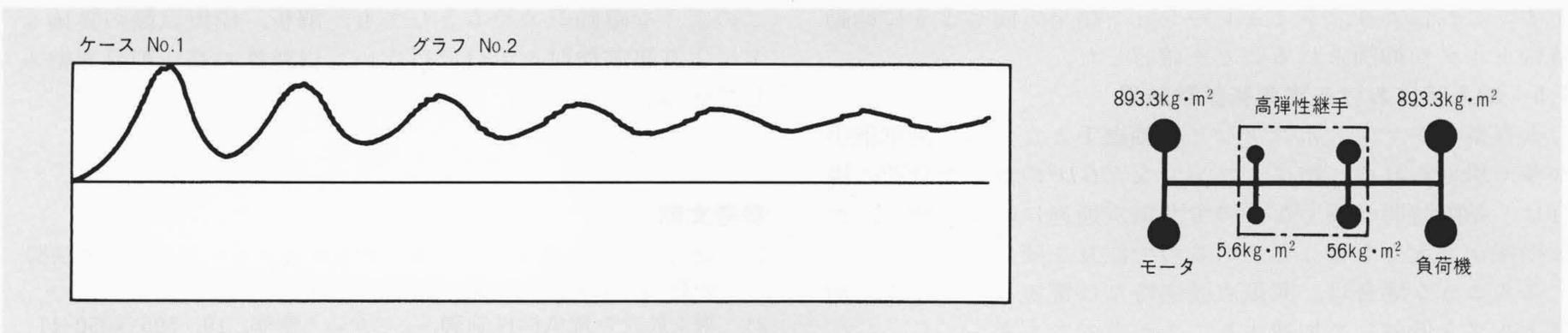


図6 高弾性ゴム継手を用いた始動時軸トルクのシミュレーション例 ランプ状の加振トルクによる、始動時の軸伝達トルクを示す。

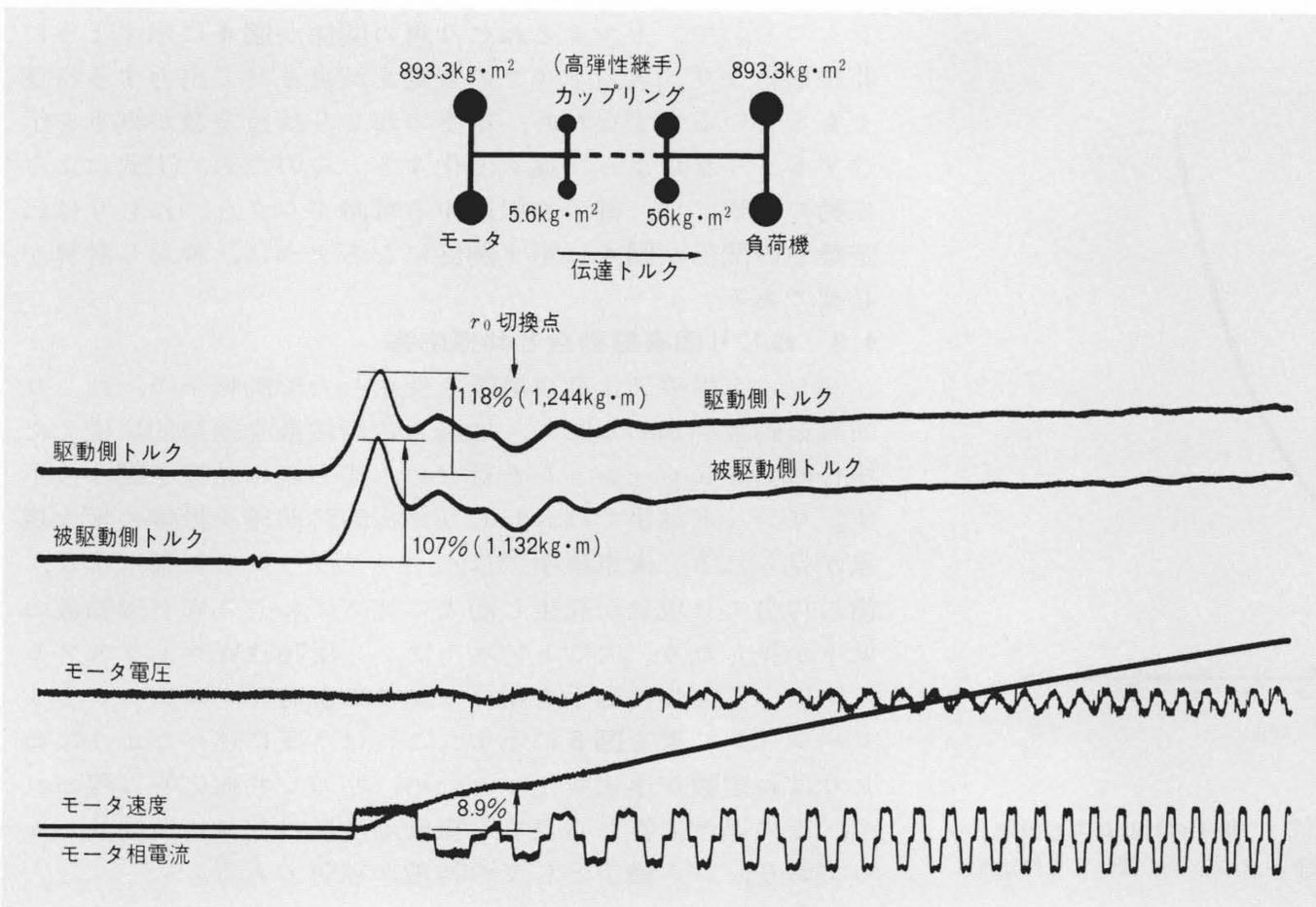


図7 サイリスタモータの始動特性(高弾性ゴム継手) 模擬負荷試験で、高弾性ゴム継手を用いた場合の始動時モータ軸トルクを示す。

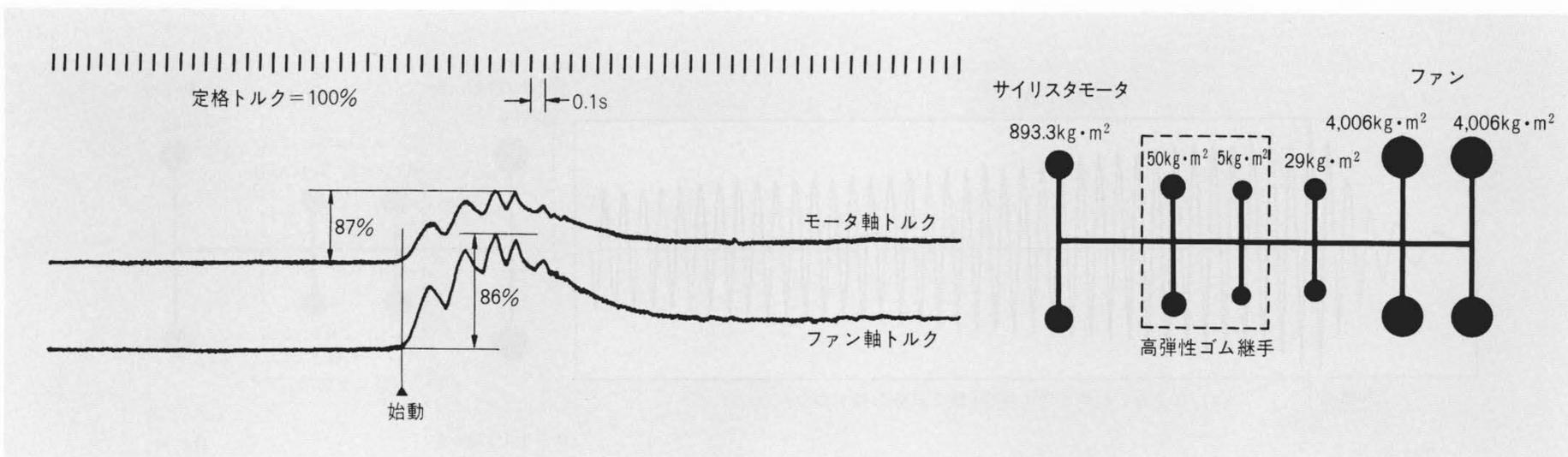


図8 試運転時の軸トルク(高弾性継手) 試運転時の実負荷試験による軸トルクを示す。高弾性ゴム継手による制振効果が、よく現われている。

4.4 模擬負荷試験による確認

直流方式を用いた750kWサイリスタモータを用い、リジッド継手と歯車継手を順次交換し、模擬負荷試験を実施した。ねじり固有振動数の実測値は、それぞれ18.9Hz、12.9Hzと計算値にはほぼ一致する結果が得られた。歯車継手を使用した場合は、共振点通過時に歯の片当たり現象が発生し、その状態でのねじり固有振動数が12.9Hzであることが確認された。前項で述べた高弾性ゴム継手を用いた場合の実測結果を図7に示す。これにより、シミュレーション結果と同じように始動時軸トルクが抑制されることを確認した。

4.5 納入時における実負荷試験結果

大容量のファン、ポンプなどの軸継手としては、歯車継手が多く用いられる。特に、ファンなどGD²の大きな負荷の場合は、始動時間が長くなるので共振点通過に時間を要し、共振振幅が過大となることがあるので注意を要する。

このような場合は、共振点通過時だけ電流を絞り込み、加振トルクを低減して加速することが有効である。

高弾性継手を用いたトンネルファン駆動用705kWサイリスタモータの実機での始動時の伝達トルク特性を図8に示す。

5 結 言

脈動トルクを発生するサイリスタモータの駆動軸での軸継手の効果について述べるとともに、その軸伝達トルクに与える影響を明らかにした。軸系が脈動トルクによる加振を受けても、あらかじめ、振動挙動を十分検討してその特性を把握することにより、信頼度の高い駆動システムとすることが可能である。日立製作所では、各機器単体はもちろんのこと、このような駆動システムとしても、解析、模擬試験の実施などにより事前検討を十分に行ない、信頼性の高い製品を納入している。

参考文献

- 1) 立川、ほか3名：パワーエレクトロニクスによるモータ制御の動向、日立評論、55、617～622(昭48-6)
- 2) 堀：最近の電気機械制御、システムと制御、19、596(昭50-11)
- 3) VULKAN：HIGHLY FLEXIBLE COUPLINGS, No.1115(1972)