

Q&A 2024-0300

系統解析の重要性（を考える）

旭化成（株）生産技術本部 加戸 良英（かど よしひで）

1. はじめに

この度は、電力系統解析（Power system analysis）について自身の考え、経験等を紹介する機会を与えていただきました。会社生活では様々な化学プラントの建設や諸設備の技術検討、また保全業務や自家発電設備の運転等も担当させていただきましたが、特に心に残った事例をご紹介します、合わせて自身の想い等もお伝えしたいと思います。

2. なぜ系統解析が必要か

この問いに対し、次の前置きをした上で私の考えを整理しておきます。1960年頃から1970年代初頭までの国内の建設ラッシュ時期、化学工学系の技術者達は、計算尺片手に、今振り返ってもかなり高度な技術検討に取り組んでいました。当時の検討資料を掘り返して細部を眺めると驚くことが多いです。さて、私が入社した頃から、手回し計算機に換わって電卓が登場し、その後1980年代になってオフィスにif800パーソナルコンピュータが並ぶ時代がやってきました。

電力系統解析の入門書として知られているIEEE Std 399⁽¹⁾には、今日のデジタルコンピュータの普及を背景に、電力系統解析の目的について次の記述があります（抜粋）。

- ① 電力システムの計画、設計、運用には、既存および提案されているシステムの性能、信頼性、安全性、経済性を評価するための工学的検討が必要である。
- ② そして、システムの運用開始前にシステム内の潜在的な欠陥を回避できること。既存システムにおいては、機器の故障や誤動作の原因を特定し、システムのパフォーマンスを向上させるための是正措置を決定するのに役立つこと。
- ③ 現代の産業用電力システムは複雑であるため、手計算による検討は困難で、退屈で、時間がかかる。電力に関連する計算タスクシステム検討は、デジタルコンピュータプログラムの使用によって大幅に簡素化される。

この内容を踏まえ、問いに対する私の回答は下記となります。

1) 数十メガワット規模以上の大電力を消費するOil & Gas, 化学, 鉄鋼, 金属, セメント, 紙パ, 他のプラント建設においては、前述IEEE Std 399の①, ②の目的から、建設担当者としての責任を果たすため、系統解析を駆使する必要があることがある。また、既存生産設備で発生したトラブルの原因究明、対策立案の手段として系統解析が役立つことがある。

2) 大容量パワーエレクトロニクス機器や大規模再エネ発電設備が存在する系統構成、さらに、系統規模が大きく長距離ケーブル電路（地中・水中電路）等も存在する条件下では、設計業務において系統解析が不可欠となる場合が多い。

3) 海外における建設の場合は、地域TSO（Transmission System Operator：送電系統運用者）、他の要求により、国や地域におけるGrid Code, RfG（Requirements for Generators）、等の技術的要件を満たすことを検証するため、系統解析を行いその結果を当該機関に提示しなければならない場合がある。

上記3)は、例えばAEMO（Australian Energy Market Operator）のPower System Model Guidelines等が知られており、ここでは検討過程におけるRMS（実効値）とEMT（瞬時値）解析の条件、系統モデル構築手順等が示されています。再エネやパワエレ機器が存在する場合は、EMT解析が多く要求されることとなります。

3. 私の失敗談と成功談

引き続き、私が経験した興味深い事例をご紹介します。これを踏まえ、当コミュニティの主催者である亀田様の問いかけである次の事項について、末尾4項に記載します。

- ① 系統解析についての心構え
- ② 系統解析に必要なデータ

表1 経験した失敗例と成功例

	分類	技術課題	経験したこと（概要）
1-1	失敗例	系統に瞬時電圧低下（瞬低）が発生した際の回転機（誘導電動機）	(1) 海外の化学プラント建設にて、瞬低発生時の誘導電動機群の再始動／再加速の解析（Group Motor Starting/ Re-acceleration study）を海外コントラクターに任せたと、明らかに誤った検討結果が提示されたので、結局自分達で検討し直すことになった。
1-2		群の再始動／再加速に関する検討について	(2) 同じく、化学プラント建設で、瞬低発生時の誘導電動機群の順次再始動／再加速を検討したが、負荷機械設備の課題を見過ごしていたため、後に機械側の対策を追加施工することになった。
2-1	成功例	大型回転機軸系（Train）のねじり振動問題から、誘導電動機直入れ	(1) 誘導電動機で直入れ始動するターボ圧縮機について、電動機の老朽化更新を検討するにあたり、直入れ始動時に誘導電動機が発生する過渡トルク（振動的）が軸系にダメージを与える恐れがあることを圧縮機メーカーから指摘され、電気側で対策を行った。
2-2		始動時の過渡トルクと可変速ドライブ（VFD）のトルクリップル（脈動）問題	(2) 既存のガスタービン駆動ターボ圧縮機を電動機（定格 8,400kW の VFD）駆動に転換する計画に対し、圧縮機メーカーから、VFD が発生するトルクリップルによって、軸系にダメージが生じる可能性があることを指摘され、現象の理解とともに対策立案を行った。

3.1. 失敗例(表1の1-1と1-2)について

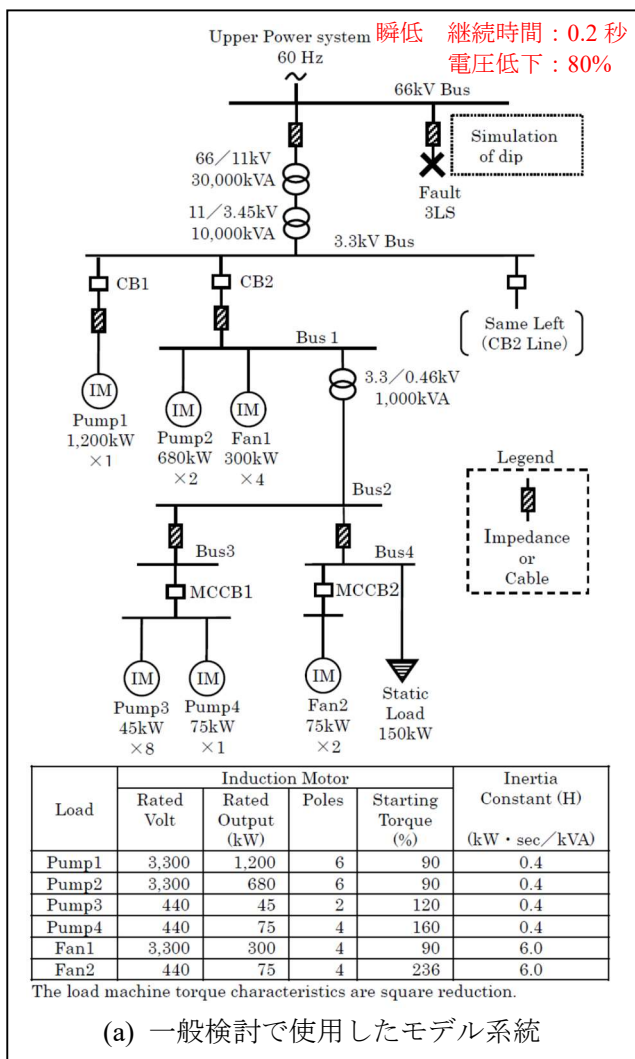
3.1.1. 瞬低発生時の回転機(電動機)群の再始動／再加速について

大規模化学プラントでは、上位系統への落雷等によって瞬時電圧低下（瞬低、Voltage dip/sag）が発生した際に、一旦電源から脱落（電磁接触器が OFF）し、または減速した電動機群を再始動／再加速する手段として、電動機群を幾つかのグループに分割し、グループ毎に順次再始動／再加速させる方法を取ることがあります。一斉に再始動／再加速させる方法では、系統末端の電圧が過剰に低下して電動機の加速渋滞が発生し、または電源供給フィーダの過電流保護が動作する等の障害が発生する可能性があるためです。このことは、Oil & Gas・石化業界では有名な設計・施工標準である Shell 社の Design and Engineering Practices (Shell DEP) にも記載されています。皆様もご確認ください。

図1にETAPによる解析事例を掲載します。これは、モデルシステムを使用し、系統に瞬低が発生した際の誘導電動機群の再始動／再加速について、全機一斉とグループ別ケースを比較するために実施した例題です。66kV 系統に継続時間が 0.2 秒で電圧低下が 80%（残留 20%）の瞬低が発生した条件で解析を行っています。

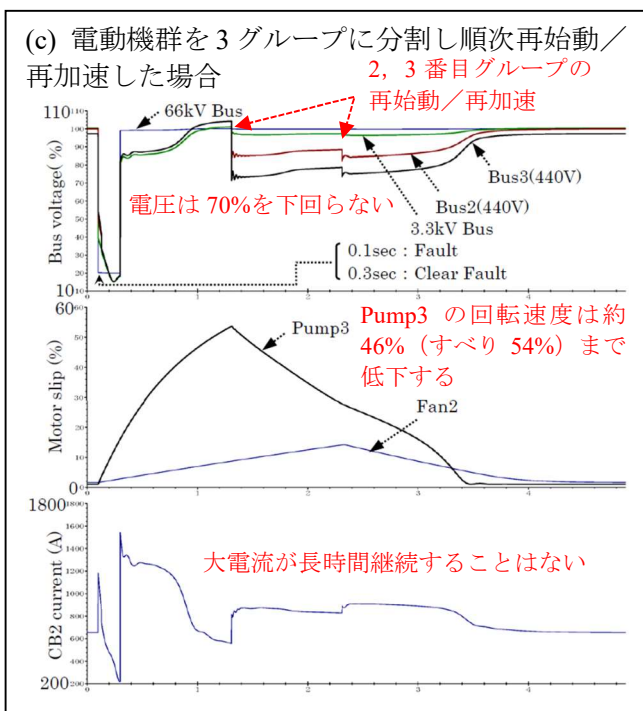
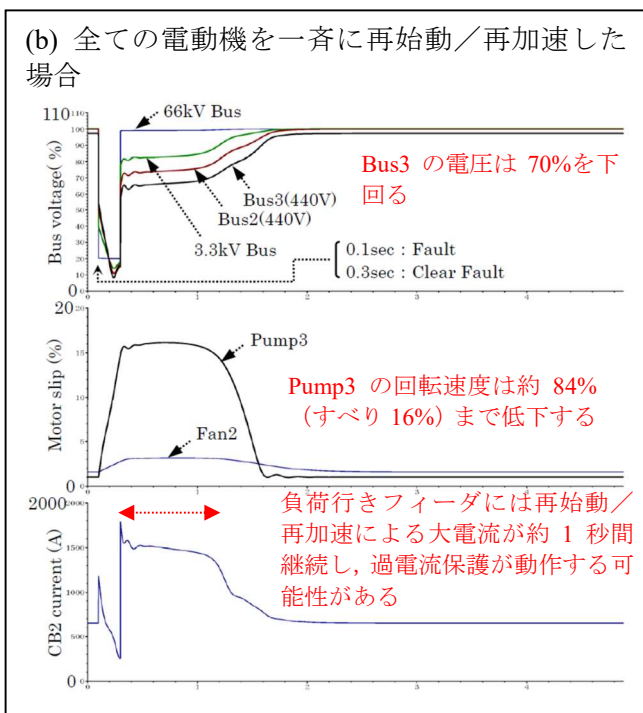
3.1.2. 表1の1-1事例について(失敗事例)

表1事例1-1で経験したことをご紹介します。海外（アジア地区）のプラント建設で系統解析を担当したのは、一応、世界的に名の通ったエンジニアリング会社（および下請けのコンサル）でしたが、下記のような状況でした。



【注】(c)の3つのグループの順次再始動/再加速は、電圧回復から1秒毎の時間をおいている。

図 1 瞬低発生時の電動機群の再始動/再加速検討事例 (モデル系統による一般検討)



1) 当エンジ会社は電動機群を6つのグループに分割し、順次再始動/再加速する方法を採用していました。しかし、各グループの再始動/再加速のタイミングは瞬低の電圧回復からかなり時間が経過して行われる結果となっており、6番目のグループは20秒経過後となっていました。10~20秒間もプラント補機が減速、または停止している状態が存在すると、連続系プロセスで構築されたプラントの運転継続は不可能です。温度、圧力、流量、燃焼炉等のプロセス制御が乱れ、超高圧・高温の反応系を抱える当化学プラントはインターロックが作動しプラントは停止に至ります。

2) 我々が ETAP に入力された諸定数を確認した結果、このような検討結果を招いた原因は下記等であることが分かりました。

(1) 誘導電動機と負荷の単位慣性定数 (H : Inertia constant) は明らかに誤った数値が入力されていました。また、負荷の速度-トルク特性も現実にはあり得ない値でした。

(2) 加えて、一般負荷モデルも適切な値が入力されていませんでした、電圧変化に対する有効電力特性 $P_0(V/V_0)^a$ の a の値等です。負荷モデル (Lumped load model) や他の機器の数学モデルに対する工学的意味が理解されていなかったと想像します。

よって、提示された電動機の加速時間は誤りであることが分かりました。対策として、我々が自ら ETAP で再検討を行いました。

3.1.3. 表 1 の 1-2 事例について(失敗事例)

同じく、他の大規模化学プラント建設においても、瞬低発生時の電動機群の再始動/再加速に関する検討を行いました。その過程におけるプラント安全性評価で指摘された点は下記のとおりです。

- ① 大型回転機の潤滑油ポンプは、短時間の停止または回転数の低下があると、機械本体は潤滑不良となって破損するリスクがあること。大型回転機の軸に直結されたタイプの油ポンプも詳細検討が必要である。
- ② 3.1.2 と同じく、化学プラント内のポンプ、ファン、押出機等、回転機の回転数が低下すると、一時的にプロセス制御が乱れプラントのインターロックが作動する可能性があること。

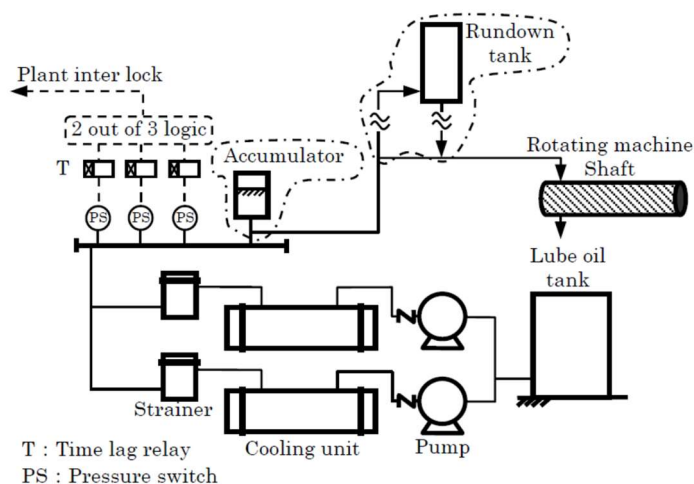


図 2 瞬低対策の一環としてプラント設備に追加したものの

また、評価会議では、大型発電用ボイラの燃料油噴燃ポンプ (Fuel injection pump) について、瞬低発生時に電動機は再始動/再加速したものの、燃料油圧力低下インターロックが作動しタービン・発電機を含む発電設備全体が停止した実事例も紹介されました。当時、圧力低下検出用の圧力スイッチには 1 秒のタイマが挿入されていましたが、これが 2 秒に変更されています。これを踏まえ、図 2 に示す設備の追加対策を講じることになりました。

- 1) 潤滑油ポンプの吐出側にアキュムレータを設ける。
- 2) または、大型回転機の場合はランダウンタンクを設ける。ランダウンタンクはブラックアウト対策としても有効です。
- 3) 潤滑油の圧力低下を検出する圧力スイッチには適切な時限のタイマ（時限リレー）を設け、インターロックで装置が停止する事態を回避すること。
- 4) 他、プロセスの流量・圧力等のインターロック検出端にも同様に適切な時限のタイマを設ける。

5) 上記 3), 4)と合わせ、制御システム側ではプロセスの安定運転維持について検討を行う。

以上、大型化学プラントの瞬低対策は、電気設備の対応だけで実現できるものではありません。機械設備や計装・制御システムに対する検討視点が不可欠です。

3.2. 成功例(表 1 の 2-1 と 2-2)について

大型回転機の軸系 (Machine trains) におけるねじり振動 (Torsional vibration) 問題です。最近、当コミュニティでもこの課題が取り上げられていますので、以下、基本事項から少し詳しく記載します。

3.2.1. ねじり振動 (Torsional vibration) 問題の基礎について

回転機軸系のねじりバネは図 3 で説明されます。また、最も基本的な 2 質点 (慣性) 系の回転軸モデルは図 4 のように表現されます。 J_1, J_2 : 回転体の慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$], k_t : 伝達軸のねじりバネ定数 [$\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$], J_1 を電動機等駆動機側ロータの慣性モーメント, J_2 は負荷機械ロータの慣性モーメントと考えてください。 k_t は、一般的に駆動機と非駆動機間を繋ぐシャフトとカップリングを合わせた定数となります。

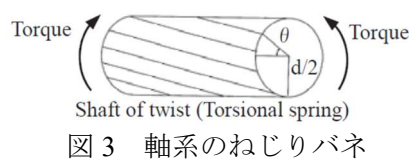


図 3 軸系のねじりバネ

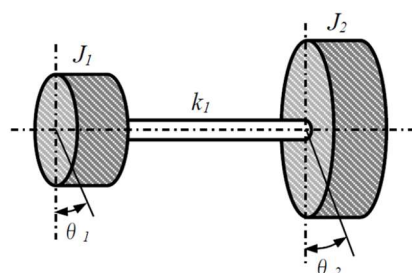


図 4 2 質点系 (2 自由度系) モデル

後の説明のため、2 質点系の運動方程式から少し詳しく考察します。なお、ここでは k_t のダンピング定数 (D) は無視しています。

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = k_t (\theta_2 - \theta_1), \quad J_2 \ddot{\theta}_2 = -k_t (\theta_2 - \theta_1) \quad (1)$$

(1) 式から導かれる固有方程式は

$$\Delta(\omega) = \begin{vmatrix} k_t - J_1 \omega^2 & -k_t \\ -k_t & k_t - J_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

となって、特性方程式は次のようになります。

$$J_1 J_2 \omega^4 - k_t (J_1 + J_2) \omega^2 = 0 \quad (3)$$

これより、次の二つの固有振動数 (TNF: Torsional Natural Frequency) が求められます。

$$\omega_{n0} = 0, \quad \omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_t (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} \quad (4)$$

実務で必要となるのは ω_{n1} の方です。

一方、ターボ圧縮機やガスタービン発電設備は図 5, 6 のように多質点系として表現されます。

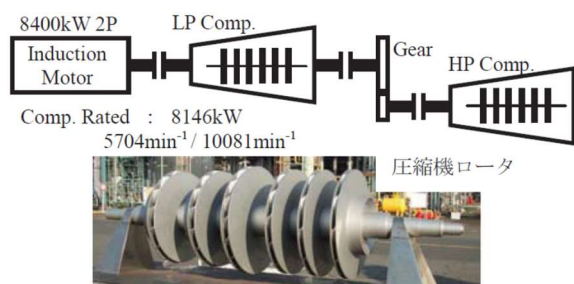


図5 大型ターボ圧縮機のロータ構成例

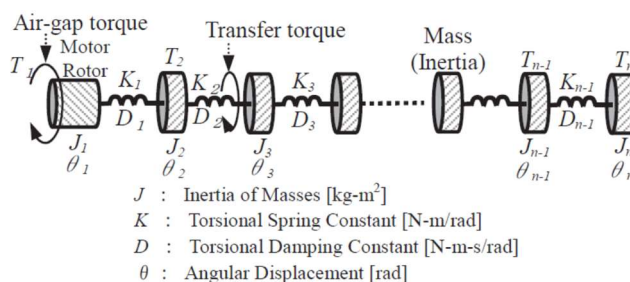


図6 軸系 Train の多質点（慣性）モデル

このような多質点系モデルの運動方程式は(5)式ようになります。

$$\left. \begin{aligned}
 J_1 \ddot{\theta}_1 + D_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + K_1(\theta_1 - \theta_2) &= T_1 \\
 J_2 \ddot{\theta}_2 + D_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + D_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) \\
 + K_1(\theta_2 - \theta_1) + K_2(\theta_2 - \theta_3) &= T_2 \\
 \vdots \\
 J_i \ddot{\theta}_i + D_{i-1}(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1}) + D_i(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i+1}) \\
 + K_{i-1}(\theta_i - \theta_{i-1}) + K_i(\theta_i - \theta_{i+1}) &= T_i \\
 \vdots \\
 J_n \ddot{\theta}_n + D_{n-1}(\dot{\theta}_n - \dot{\theta}_{n-1}) + K_n(\theta_n - \theta_{n-1}) &= T_n
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(5)式から、固有振動数や共振（加振周波数と固有振動数の一致）時の応答倍率を求めるにあたり、複素固有値問題を解く方法、または、周波数応答法を思いつきますが、我々は後者から次のようにして解を得る方法を試みました。機械系／電気系のアナログから、【ねじりバネ ⇒ インダクタンス】、【回転慣性 ⇒ キャパシタンス】、【ねじりダンピング ⇒ 抵抗】、【トルク ⇒ 電流】に相当することから、電気回路で模擬する方法です。図7は3質点系の例ですが、各部の電流値より、軸に伝達するトルクの振動状況を求めることができます。

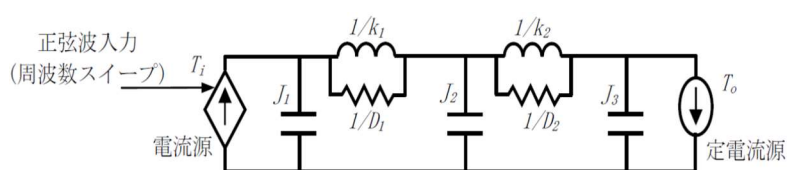


図7 軸ねじり周波数応答解析に用いる回路（3質点系の場合）

図8に、図5ターボ圧縮機の軸ねじり周波数応答の検討結果を掲載します。図8、5から次のことが分かります。

- ① 軸系のねじり固有振動数（共振点）は、1次が22.7Hz、2次が31.0Hzに存在する。
- ② 応答倍率は誘導電動機とLP圧縮機間の継手にて、1次が34.5倍、2次が5.0倍である。

このように、ターボ圧縮機やガスタービン発電設備等の高速回転するターボ機械は、概ね10から80Hzの間に1次および2次の固有振動数が存在するといわれています。ここで、仮に当ターボ圧縮機に22.7Hzの加振力（原動機側のトルクリップル）が3%作用した場合、電動機とLP圧縮機間の継手部には定格トルクに相当する脈動ねじり応力が作用することがわかります。繰り返しますが、加振周波数と固有振動数の接近は重大な問題に結びつく可能性があります。

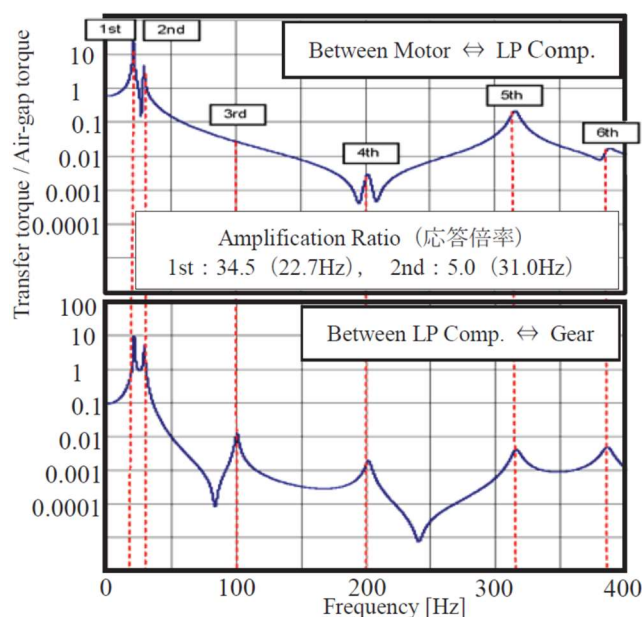


図 8 大型ターボ圧縮機 (図 5) の軸ねじれ周波数応答

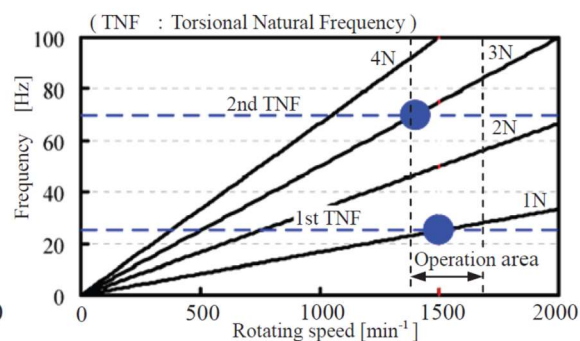


図 9 キャンベル線図の例

図 5 のターボ圧縮機は VFD で可変速運転を行います，ねじり固有振動数に関連する重要な事項としてキャンベル線図を紹介しておきます。図 9 を参照ください。大型回転機の変速運転を行う場合は，常用回転範囲に軸系のねじり固有振動数が接近しないよう，設計面，運用面で配慮すべきで，これを表すものがキャンベル線図です。図 9 は 1N と 3N (3 倍回転数) が運転領域 (1,400~1,700 min^{-1}) に入ってしまった悪い例です。

3.2.2. 表 1 の 2-1 事例について(成功事例)

誘導電動機を直入れ始動する際には，電源印加とともに電動機の空隙 (Air gap) に振動的な過渡トルクが発生します⁽²⁾。この様子を図 10 に示しますが，トルクの振動は電源周波数に等しいとされています。

表 1 に記載のように，我々は電動機の老朽化更新を計画したのですが，更新によって電動機の体格が変わり，軸系の固有振動数が更新前後で変化し電源周波数 (60Hz) に接近する可能性がある。これが圧縮機メーカーの指摘事項です。過去の事例からもカップリング破損等が散見されると釘を刺され，我々は下記対応を取りました。

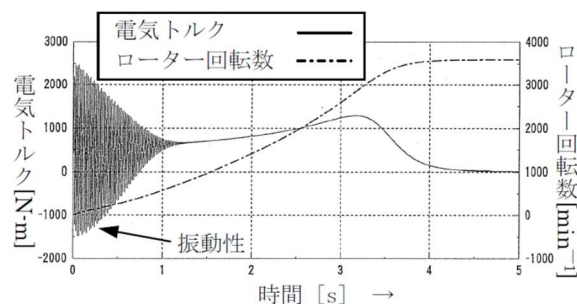


図 10 誘導電動機を直入れ始動する際の過渡トルクの状況 (解析例)

- 1) 誘導電動機の始動は、図 11 のようにリアクトルと抵抗器を介する方法を採用しました。抵抗分が存在すると過渡トルクのピークが減少することを解析で確認しています。
- 2) 図 12 は、更新後の電動機出力軸における過渡トルク実測結果です。十分減衰していることが確認できました。

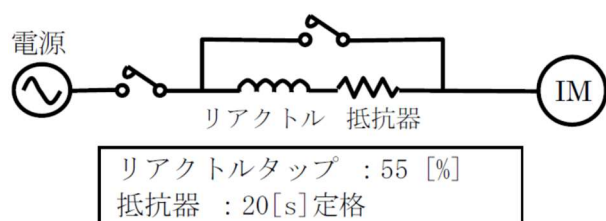


図 11 採用した誘導電動機の始動方式

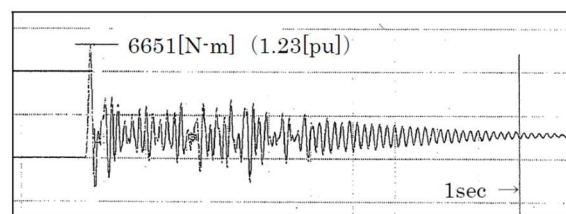


図 12 誘導電動機更新後の伝達トルク実測値

3.2.3. 表 1 の 2-2 事例について(成功事例)

図 5 (図 8) の大型ターボ圧縮機をガスタービン駆動から VFD (インバータ駆動誘導電動機) 駆動に転換する計画が浮上した際に、圧縮機メーカーから、図 8 に示す固有振動数と VFD が発生するトルクリップル (脈動の加振源) が接近すると、カップリング、シャフト、ギヤ (増速機) 等が破損するリスクがあるとして、弊社の計画に対しメーカー補償はできないと通告されました。また、各国で同様のトラブルが発生している事実も確認しました。

電動機に供給する電源に高調波成分が重畳し、または不平衡である場合は電動機の空隙トルクには何らかのリップル分が重畳します。自励式変換器の場合は、PWM 方式により側帯波による次数間高調波によって低い帯域にトルクリップルが発生する可能性があることがわかりました。圧縮機メーカーはこのことを心配しているだと認識し、VFD が発生するトルクリップルを調査し解析で確認しました。

非同期式 PWM (キャリア周波数は基本波に対し整数倍の関係が維持されない) で生じる側帯波の周波数成分 f_{as} は、基本波 f_b 、キャリア f_c として(6)式となります。

$$f_{as} = |n \cdot f_c \pm k \cdot f_b| \quad (n, k \text{ は整数}) \quad (6)$$

また、誘導電動機に供給する電源の基本波周波数 f_b に $F(n)$ の高調波成分が重畳した場合、空隙トルクの脈動周波数成分 $f_p(n)$ 、 $f_{pn}(n)$ を(7)、(8)式に示します。

重畳する高調波成分が三相平衡である場合

$$f_p(n) = |f_b - F(n)| \quad (7)$$

重畳する高調波成分が三相不平衡である場合

$$f_{pn}(n) = |f_b \pm F(n)| \quad (8)$$

以下、一般的な検討例を紹介します。キャリア周波数 530Hz (大形機であるため周波数は低い)、変調波 57Hz の場合に、非同期式 3 レベル PWM 変調を行った場合の電圧波形、並びにその波形と電動機空隙トルクの FFT 解析結果を図 13, 14 に示します。図 14 下図のように、低い帯域にリップル成分が表れることは避けなければなりません。このような結果を得て VFD メーカー側と協議しました。

以上、本件について対策の概要を記載します。

- 1) VFD の PWM 方式は同期式を採用し、さらに任意の高調波成分を除去できる変調方式⁽³⁾を採用した。これにより、VFD のトルクリップル成分は軸系のねじり固有振動数に接近しないこと、ピーク値も十分小さく設計可能であることを確信しました。
- 2) ガスタービンから VFD 駆動に転換した後の試運転では、カップリング部の伝達トルクを測定し、トルクリップルが計画の範囲であることを確認しました。

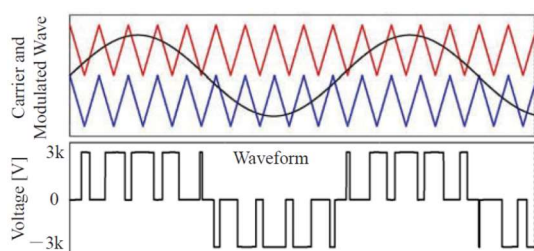


図 13 3 レベル PWM (非同期) と電圧波形

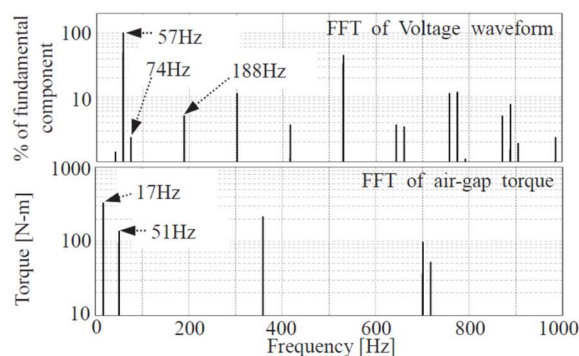


図 14 電圧波形と空隙トルクの FFT 解析結果

4. 系統解析に対する私の思い

以上の報告を踏まえ私の思いを記載させていただきます。

- 1) 系統解析ソフトは便利なツールではありますが、中身の理解が不十分であれば大きな誤りを招く原因になります。・・・化学工学分野等で活用されるツールである ASPEN の登場を思い出すのですが、冒頭で述べた、計算尺と図表を駆使してきた昔の化学工学系技術者達が、当時の若い技術者の業務態度を嘆いていました。生半可な理解のまま ASPEN に頼り、時に、あり得ない検討結果を持って来る・・・と。
- 2) 他人が行った系統解析は、計算ツールに入力された内容を確認し、その内容が妥当であることを確認すべきです。直ちに信用しないこと。
- 3) 自身で解析を行う場合、ツールに入力する値、選択すべき諸条件は、全てその工学的意味を理解しておくこと。分からない項目があれば調査すること。(機器定数の調査、系統構成や運用方法の検討・仮定等は、解析ツールへの入力操作より何倍も時間を要することが一般的です。)
- 4) 系統解析で導かれた解は、自身の計算(手計算結果)と比較し妥当性を確かめること。
- 5) 大容量パワエレ機器や大規模再エネ発電設備の導入が進みつつあります。我々は、これらをより精密に取り扱うことができる瞬時値 (EMT) 解析ツールに目を向けるべきです。

【参考文献】

- (1) IEEE Std 399 “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis” (IEEE Brown Book)
- (2) 電気学会技術報告第 891 号「誘導機の過渡現象解析技術」第 6 章
- (3) パワーエレクトロニクス回路 (OHM 社 ISBN4-274-03545-X C3054) 第 5 章 2 項