

XTAP 例題集		番 号	MAC-03-A
例題名	誘導電動機的全電圧起動シミュレーション		
分 野	回転機，発電機，負荷，電力系統応用		
文 献	<p>[1] R. Yonezawa, "A phase-domain synchronous machine modeling technique by using magnetic circuit representation of armature and rotor windings," Electric Power Systems Research, vol 219, June 2023.</p> <p>[2] 米澤，川崎，「固定子および回転子巻線の磁気回路表現による誘導機の相領域モデルの提案」，電気学会論文誌 B, vol. 143, no. 12, pp. 1-9, 2023.</p> <p>[3] Paul Krause, Oleg Wasynczuk, Scott Sudhoff, and Steven Pekarek, Analysis of electric machinery and drive systems, 3rd edition, Picattaway, NJ, IEEE Press, 2012.</p> <p>[4] 誘導機の過渡現象シミュレーション技術調査専門委員会：「誘導機の過渡現象解析技術」，電気学会技術報告第 891 号, 2002.</p> <p>[5] 高橋理音，田村淳二，多田泰之，栗田篤：「誘導発電機の瞬時値相座標モデルの導出」，電学論 B, vol. 119, no. 12, pp. 1470-1476, 1999.</p>		
概 要	<p>本例題は，誘導電動機を全電圧起動（停止状態から系統電圧を充電）した場合のシミュレーションである。充電後は，負荷を与えると同時に，系統電圧を変化させた場合の過渡状態もシミュレーションしている。停止から定常状態，事故時の状態をシミュレーションすることで，誘導機の過渡的な特性を確認することができる。特に誘導機は始動時に定格電流よりも大きな突入電流が流れることが知られているが，その大きさを確認することができる。</p> <p>誘導電動機のモデルには文献 [2] で開発された相領域モデルを用いる。同モデルは誘導機の基本式を，文献 [1] で開発された磁気回路表現により模擬している。誘導機の回路方程式と外部系統の回路方程式は連立されるため（ただし誘導機の運動方程式は 1 計算時間刻みの遅れが生じる），計算精度や数値安定性に優れている。</p> <p>誘導機相領域モデルの詳しい説明は文献 [2] を，誘導機の基本原理については文献 [3], [4] を参照されたい。</p>		

## 解析回路・解析条件

図 1 に、本例題で解析を行う誘導機およびその外部系統の回路図を示す。系統周波数は 50 Hz である。誘導機および系統条件は文献 [5] で示されている回路を利用している。ここでは誘導電動機を無負荷で全電圧起動させる。全電圧起動とは、誘導電動機が停止している状態において、三相の端子に定格電圧を印加（系統に接続）することにより誘導機を起動させる起動方法のことである。停止状態から定格回転数に至るまでの幅広い回転数領域における誘導機の挙動（過渡現象）を確認することができるとして、誘導機モデルの動作検証によく用いられている。

図 1 の回路において、遮断器 SW1 を時刻 0.1 s で投入することで、誘導機に系統電圧を印加し、起動させる。また、誘導機が定常状態に至った後、誘導機にステップ状の負荷（トルク）を与える。最後に、一定トルクで運転している状態において、遮断器 SW2 を時刻 5 s で投入するとともに、系統の地絡事故を想定してさらに遮断器 SW3 を時刻 5.5 s で投入し、誘導機の端子電圧を変動させる。これら三種類の変化（①無負荷時電圧印加、②トルク印加、③端子電圧低下）における誘導機の一連の挙動を確認する。計算時間刻みは 100  $\mu$ s とし、計算終了時刻は 8 s とする。

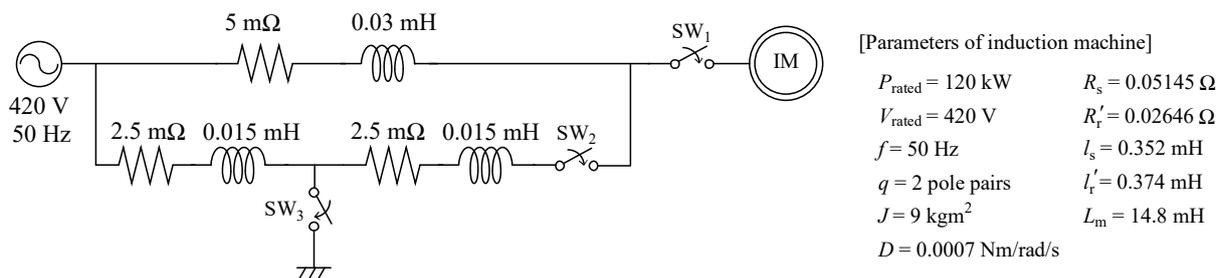


図 1 解析回路

図 2 に、図 1 の回路を XTAP 上に再現した回路図を示す。系統は三相一括配線で作成され、三相端子から单相を引き出し、遮断器を介して誘導機モデルの固定子巻線側端子（sa, sb, sc）に接続している。またこの計算では、誘導機をかご形誘導電動機と仮定し、回転子側の端子は短絡している（浮いた回路とならないよう、回転子側端子は接地している）。

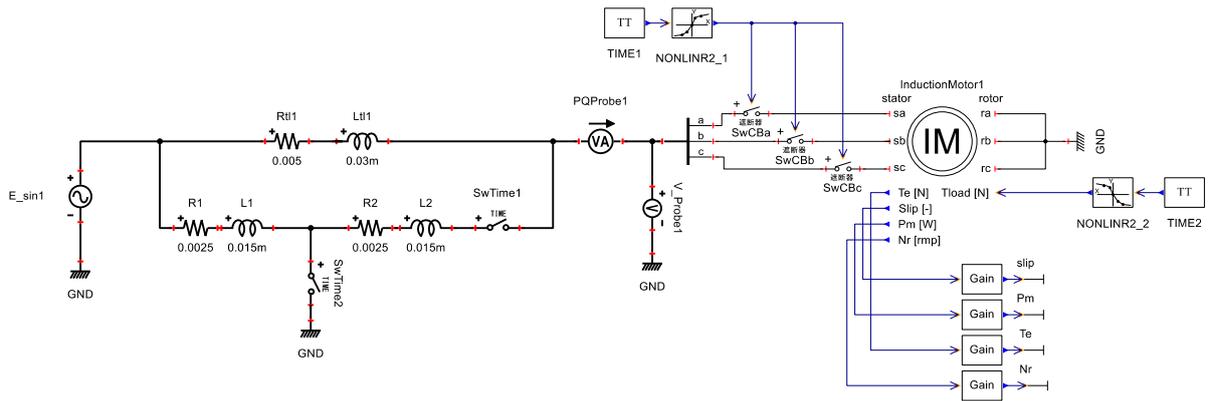


図2 XTAP上に模擬した解析回路

図3に誘導機モデルの内部構成を示す。外部システムに接続される端子は、固定子巻線および回転子巻線の各相の端子3つずつ（全部で6つ）となる。それぞれの巻線には巻線抵抗と漏れインダクタンスが接続されている。

各巻線に鎖交する磁束の計算は、文献[1]で提案された回路方程式の磁気回路表現を利用している。なお、文献[2]ではこれをさらに発展させて回転磁界を $\alpha$ 軸と $\beta$ 軸の2軸により表現した効率的な回路としているが、本質的に同じ回路となる（解析結果も等しくなる）。

回転子の速度や位置（角度）、電磁トルクの計算は制御系により行っている。このため、回路方程式と運動方程式は厳密には連立して解かれることはなく、1計算時間ステップの遅れが生じる。ただし回路の電圧や電流の変化に比べて回転子の位相の変化は緩やかであるため、大きな問題とはならない。

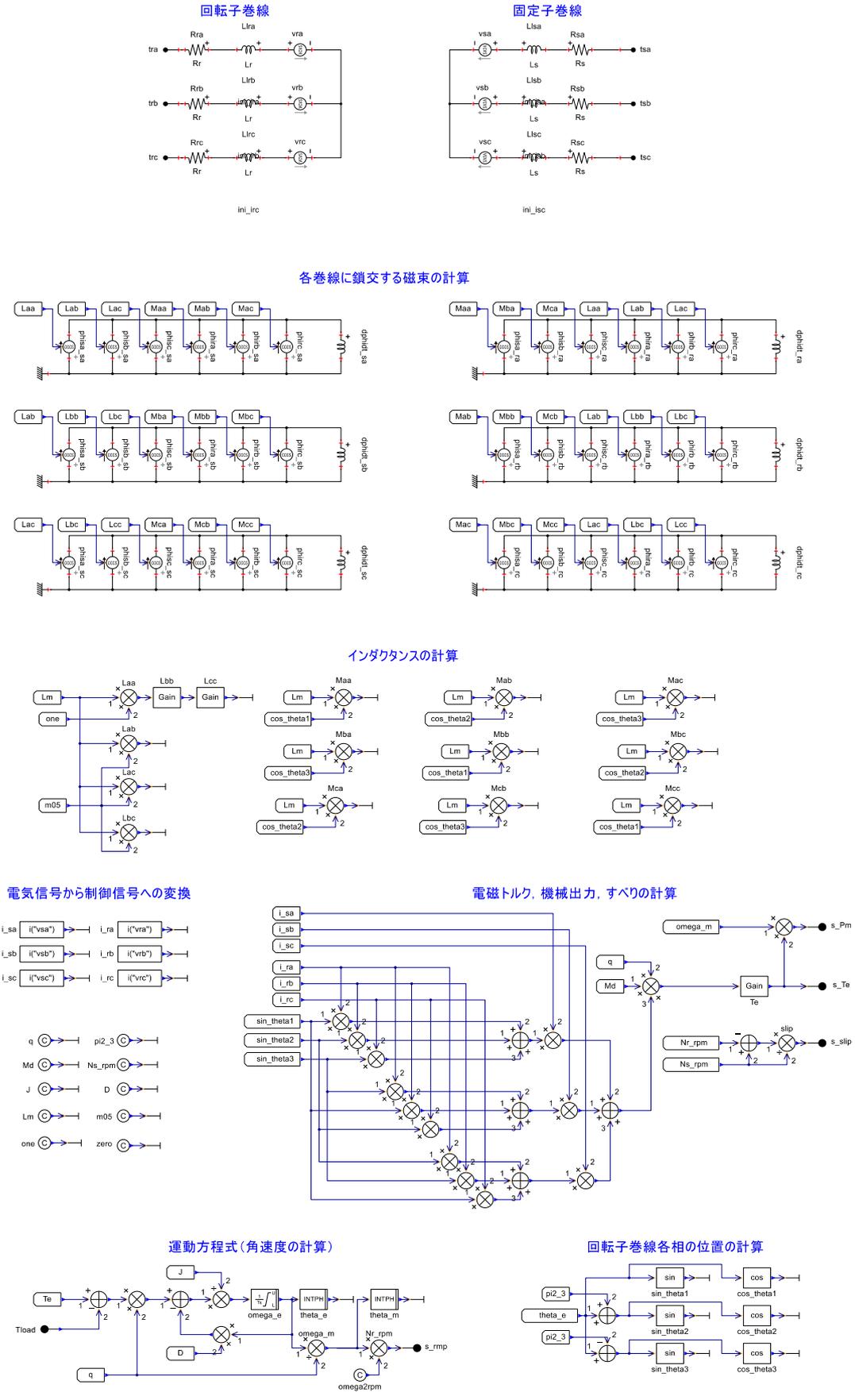


図3 誘導機モデルの内部構成

## 解析結果

### (1) 0～2.5 s：電圧印加～定常状態

図4に、誘導機の電磁トルク、回転数（角速度を rpm の単位に換算したもの）、固定子巻線（a相）の電流、回転子巻線（a相）の電流それぞれについて、0～2.5 sの解析結果を示す。なお電流は回転機に流れ込む向きを正、電磁トルクは外部へ出力する向きを正としている。充電直後は回転子が停止しているため、誘導機のインピーダンスは固定子および回転子巻線の巻線抵抗および漏れインダクタンスのみが見えるため、固定子巻線には大きな電流が流れる。また電磁トルクは電源周波数と同じ周波数の振動成分を含む過渡的な変化をする。またこの例では、回転数はわずかに同期速度を上回ってから、最終的に同期速度に収束しているが、これら過渡特性については誘導機のパラメータによって異なってくる。特に、小型機と大型機では巻線抵抗と漏れインダクタンスの比率が異なってくるため、過渡的な変化も異なってくる。

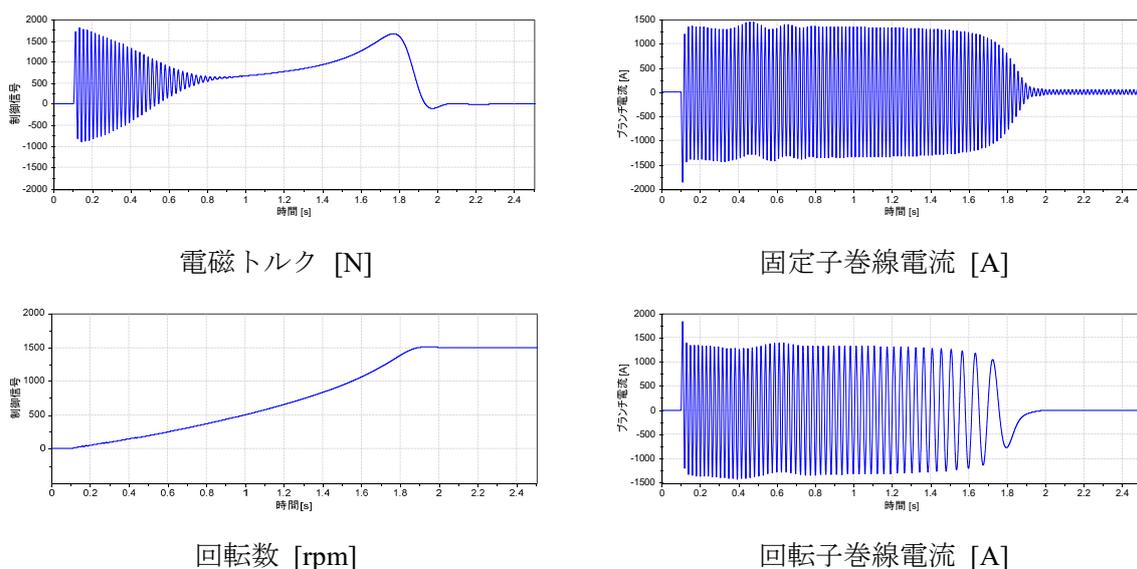


図4 解析結果：0～2.5 s：電圧印加～定常状態

### (2) 2～5 s：定常状態（無負荷）～負荷のせ

次に、定常状態から誘導電動機に負荷トルクを与えた時間帯（2～5 s）について、先ほどと同じ信号の波形を図5に示す。なお、トルクは3 s時点で400 Nm、4 s時点で800 Nmをそれぞれステップ状に与えている（4 s以降は800 Nmを継続）。トルクを与えた後は回転数の低下とともにトルクが増加し、負荷トルクと電磁トルクが釣り合う回転数で収束する。また、回転子の巻線電流は電磁トルクに応じてその振幅が大きくなる。

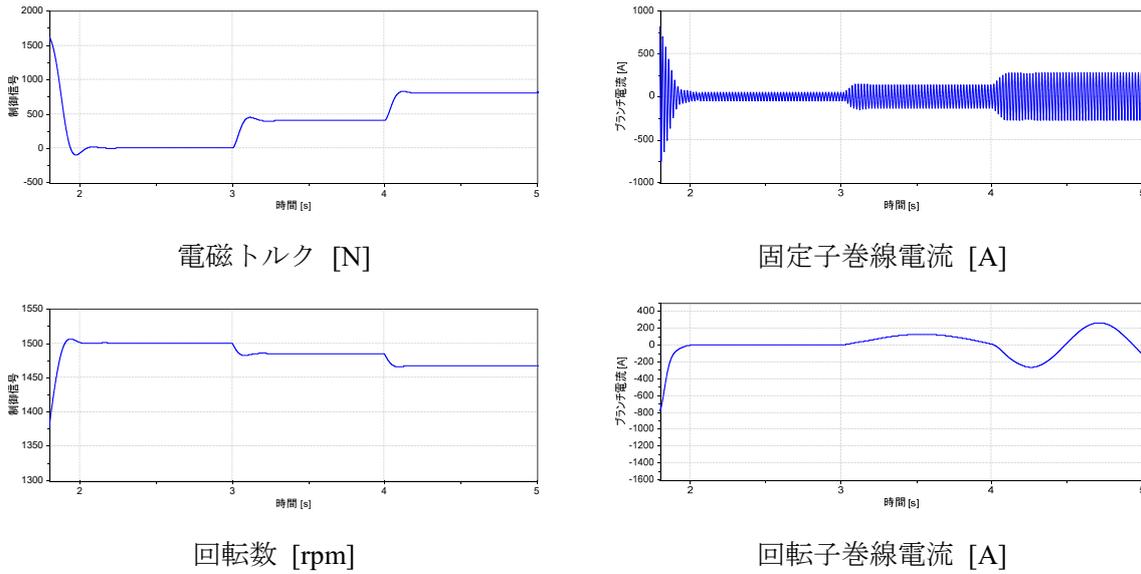


図5 解析結果：2～5 s：定常状態（無負荷）～負荷のせ

(3) 5～8 s：定常状態（定格負荷）～電圧低下

最後に、誘導機の端子電圧を変化させた時間帯（5～8 s）について、先ほどと同じ信号の波形を Fig. 11 に示す。5 s 時点での電圧変動では電磁トルクや回転数に大きな変化はないが、5.5 s 時点の電圧変化（端子電圧は 1/3 程度に低下）では誘導機は負荷トルクに相当する電磁トルクを出力することができなくなり、回転数は徐々に低下し、ストールする。なおこのシミュレーションでは、負荷トルクを与え続けているため、回転数は負の値（逆回転）となるところまでシミュレーションがされている。

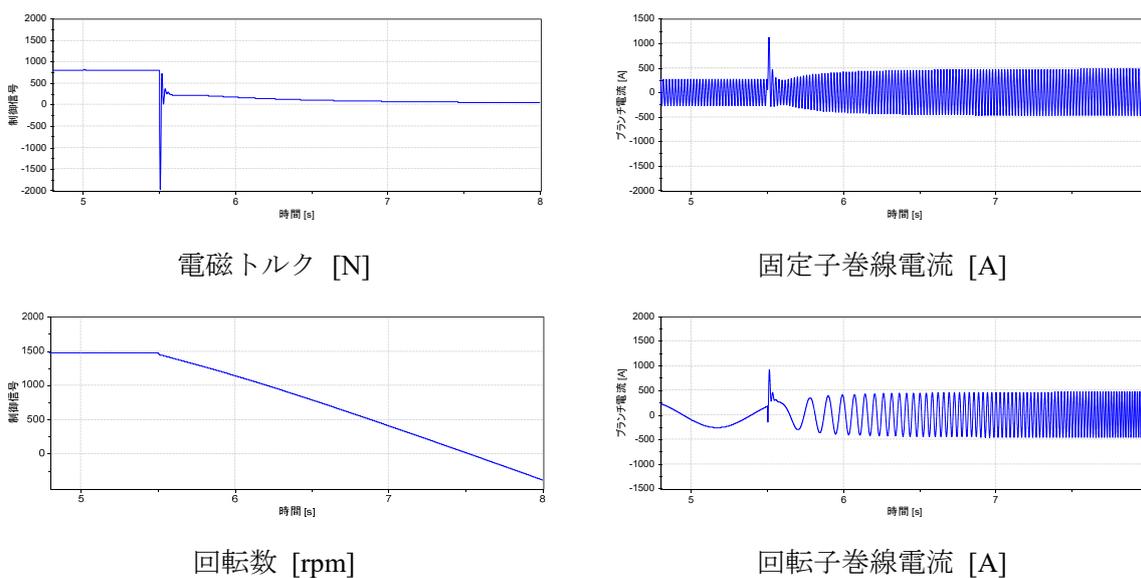


図6 解析結果：5～8 s：定常状態（定格負荷）～電圧低下

## 更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2023/10/02	1.0	初版作成（XTAP Version 3.5 用）

