

# かご形誘導機起動時の過渡現象 シミュレーション

佐々木 一人\*・松坂知行\*\*

## Transient Current Simulation of Squirrel-cage Induction Machines

Kazuhiro SASAKI\* and Tomoyuki MATSUZAKA\*\*

### Abstract

Squirrel-cage induction machines are widely used as motors because of their robustness and cost effectiveness. They are also utilized as wind generators because of capability of asynchronous operation with power grid. However, the induction machines have the disadvantageous point that the transient current amounts to several times as large as rated value when they are injected to the power system, and causes the voltage variation of the power system.

Hence, the authors investigated the evaluation method of machine transient current through simulation. We derived the nonlinear state equations to denote machine dynamics by means of d-q axis notation. Then we simulated the machine transient currents, changing the phase angle of source voltage.

A special dedicated simulation language developed by one of the authors was used for simulation. The simulation results agreed well with the experimental results.

### 1. ま え が き

最近誘導発電機が風力発電機として多く使用されるようになった。この誘導発電機は系統並列時に定格の6~7倍にも及ぶ励磁突入電流が流れ電力系統の電圧変動をもたらす<sup>8),11)</sup>という欠点を持っているが、構造が簡単で堅牢である上廉価でもあり、かつ系統並列時に位相調整の必要がないなどの多くの利点を持っている。

周知のように、風力発電機は大きく変動する動力源で駆動されるので、発電機は必然的に変動する回転のもとで運転されることになる。従って、発電機は電氣的な過渡現象を連続的に受けた状態で運転されていると考えられる。

このため、誘導発電機を用いて風力発電を行なう場合、誘導発電機の定常特性だけでなく動特性の把握とその特性解析が必要である。

これまで誘導電動機の過渡現象に関する研究報告がいくつかなされている<sup>1)-4)</sup>が、これらの殆どはシミュレーションによりまたは解析的に誘導電動機の起動時、運転中電源切換え時、電源電圧動揺時などの、主として過渡トルクや回転速度を扱ったもので、本稿で論じているような過渡電流そのものを主として論じたものではない。たとえば文献(5)は誘導電動機のトルク-速度特性の、また文献(6)は誘導発電機の電力特性の、実用範囲における平衡動作点の近傍において線形近似をし解析を行なったもので、それぞれ主としてトルク、回転速度および出力電力について論じている。

ところで、一般的に電気機械系の動特性を解析するには非線形項を含むシステム全体の連立

平成4年12月15日受理

\* 電気工学科助教授

\*\* 情報システム工学研究所教授

微分方程式を解く必要がある。しかし、このような場合解析的に解くことは極めて困難である。このため、動特性を解析的に求めるのに文献(5)、(6)などのように線形化を行なう手法がしばしば用いられる。しかし、線形化による方法は動作点付近の特性把握などには有効な手段であるが、風力発電機などのように風力エネルギーの変動により動作点が常に動いているような場合には動特性全域についての適用は面倒で、動特性の全体像を把握するのも難しい。

そこでコンピュータを利用した数値シミュレーションが最も有力な一手段であると考えられる。

筆者等はこれまで風力発電システム解析の一環として、誘導機や発電システムなどのシミュレーションによる動特性の解析を進めてきた。<sup>7)~11)</sup>

その方法は動特性を表す微分方程式を筆者の一人が開発した連続系シミュレーション言語「DECS」<sup>12)</sup>で直接解く方法である。この言語を用いればアナログコンピュータ等で使用されている積分器、加算器、乗算器などの演算要素に対応させてプログラムする必要がなく、微分方程式をそのまま記述するだけでよい。

本論文では、誘導機の  $d-q$  変換法に基づいて得られる動特性を表わす状態方程式を利用してシミュレーションにより動物性を解析する方法を述べると共に、誘導機を電動機および発電機として起動した場合の過渡現象について、シミュレーションと実験を行なった結果を報告する。

誘導機起動時の過渡電流については、本稿で述べたシミュレーションによる結果とがよく一致した結果が得られた。また、発電機の過渡電流は文献(13)とほぼ一致した。これにより本法の妥当性が立証されたものと考えられる。そして本法は風力発電システムのみならずその他のシステムの動特性解析にも拡張し応用できるものと考えられる。

## 2. 誘導機の動特性

従来、電気機器の過渡現象の解析には多くの場合、 $d-q$  変換法や瞬時値対称座標法などが利用されている。本研究においても  $d-q$  変換法を採用した。本章では、 $d-q$  変換法によって得られる誘導機の動特性を表わす電圧-電流方程式および状態方程式について述べる。

### 2.1 誘導機の電圧-電流方程式

まず図1に示す3相誘導機の電圧、電流方程式について述べる。同図において誘導機は対称3相かご形誘導機であるとする。すなわち、図示のように固定子巻線  $A_1, B_1, C_1$  および回転子巻線  $A_2, B_2, C_2$  が対称で、それぞれ各巻線間の空間的角度が  $120^\circ$  になっているものとする。また、エアギャップが一様であるとする。

以上のかご形誘導機の動特性は、固定子を基準軸に選び  $d-q$  変換することにより次のような微分方程式で表わすことができる<sup>14)</sup>。

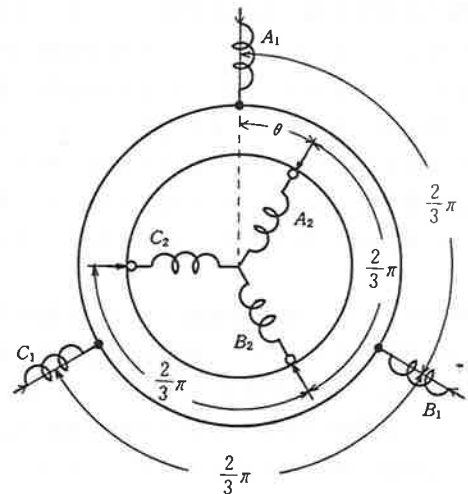


図1 3相対称誘導機

Fig.1. A 3-phase symmetrical induction machine.

$$\begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + sL_{11} & 0 & sM \\ 0 & R_1 + sL_{11} & 0 \\ sM & \omega M & R_2 + sL_{22} \\ -\omega M & sM & -\omega L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$i_{1d}, i_{1q}$ : 固定子の d, q 軸電流

$i_{2d}, i_{2q}$ : 回転子の d, q 軸電流

$v_{1d}, v_{1q}$ : 固定子の d, q 軸電圧

$v_{2d}, v_{2q}$ : 回転子の d, q 軸電圧

$R_1, R_2$ : 固定子, 回転子抵抗

$L_{11}, L_{22}$ : 固定子, 回転子インダクタンス

$$L_{11} = L_1 + l_1 - M,$$

$$L_{22} = L_2 + l_2 - M_2$$

$L_1, L_2$ : 固定子, 回転子 1 相分自己インダクタンス

$l_1, l_2$ : 固定子, 回転子 1 相分漏れインダクタンス

$M_1, M_2$ : 固定子, 回転子各相互インダクタンス

$M = 3/2 M_{12}$ : 固定子-回転子間の相互インダクタンス

$M_{12}$ : 固定子-回転子間 1 相分最大相互インダクタンス

$s = d/dt$ : 微分演算子,  $\omega = \gamma \omega_m$

$\gamma$ : 極対数

$\omega_m = d\theta/dt$ : 回転子の回転角速度

$\theta$ : 巻線  $A_1$  に対する回転子の回転角

また, 誘導機のトルク  $T$ , 出力  $P$  および運動方程式はそれぞれ (2) ~ (5) 式のように表わされる。

$$T = M(i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) \quad (2)$$

$$P = \omega_m T \quad (3)$$

$$J\omega_m = T - T_L \quad (\text{電動機の場合}) \quad (4)$$

$$J\omega_m = T_d - T \quad (\text{発電機の場合}) \quad (5)$$

ここに,  $J$  は回転部分の慣性モーメント,  $T_L$  は電動機負荷トルク,  $T_d$  は発電機駆動トルクである。

なお, 誘導機の起動時の過渡現象は連立微分方程式 (1), (2) 式および (4) 式または (5) 式を解くことにより求められるが, これらの式の中に (2) 式のトルクおよび回転子回転角速度が含まれるため非線形連立微分方程式となるので, 結局非線形連立微分方程式を解く問題に帰される。

## 2.2 誘導機の状態方程式

ここでは, 前述の d-q 変換法により得られた誘導機の動特性を表わす電圧-電流方程式から状態方程式を導き出し, 過渡現象のシミュレーションに直接利用できるような形式にする。

上記 (1) 式の電圧-電流方程式は (6) 式のように変形でき, これより状態方程式 (7) 式を導くことができる。よってシステムの動特性解析用連続系シミュレーション言語「DECS」<sup>[2]</sup> を利用すれば, 下記 (6), (2) および (4) 式または (5) 式の状態方程式で表わされた連立微分方程式をそのままの形でプログラムに記述でき, シミュレーションを簡単に行うことができる。

$$\begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & M & 0 \\ 0 & L_{11} & 0 & M \\ M & 0 & L_{22} & 0 \\ 0 & M & 0 & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_{22} \\ -M & 0 & -L_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$si = Ai + \omega Bi + CV \quad (7)$$

ここに  $i, V, A, B$  および  $C$  はマトリックスで

次の通りである。

$$\begin{aligned}
 i &= \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 A &= \begin{bmatrix} -R_1 L_{22} & 0 & R_2 M & 0 \\ 0 & -R_1 L_{22} & 0 & R_2 M \\ R_1 M & 0 & -R_2 L_{11} & 0 \\ 0 & R_1 M & 0 & -R_2 L_{11} \end{bmatrix} / \Delta \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & M_2 & 0 & M L_{22} \\ -M^2 & 0 & -M L_{22} & 0 \\ 0 & -M L_{11} & 0 & -L_{11} L_{22} \\ M L_{11} & 0 & L_{11} L_{22} & 0 \end{bmatrix} / \Delta \\
 C &= \begin{bmatrix} L_{22} & 0 & -M & 0 \\ 0 & L_{22} & 0 & -M \\ -M & 0 & L_{11} & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_{11} \end{bmatrix} / \Delta \\
 \Delta &= L_{11} L_{22} - M^2
 \end{aligned}$$

### 3. 誘導機起動時の過渡現象シミュレーションと実験方法

本章では、かご形誘導機を電動機として起動した場合と発電機として起動した場合の起動時過渡現象のシミュレーション法および実験方法について述べる。

#### 3.1 電動機として直入れ起動した場合

ここでは、かご形電動機を無負荷で直入れ起動した場合について、発生トルクがすべて回転部分の加速に費されるものとの条件のもとに過渡電流等のシミュレーションを行なった。

まず、前述のかご形誘導機の動特性を表わす状態方程式に初期条件等の諸条件を加えて「DECS」で作動するプログラムを作成した。

次に、起動時における印加電源電圧の投入位相による過渡電流の変化を調べるため誘導電動機起動時の印加電源電圧の位相が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ および $225^\circ$ の場合についてシミュ

レーションを行なった。

また、誘導電動機を無負荷で直入れ起動したときの過渡電流等の測定実験を行なった。その際、シミュレーションのときと同様に、印加電源電圧の位相を $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ および $225^\circ$ の場合について実験を行なった。

#### 3.2 発電機として系統並列起動した場合

ここでは、かご形誘導機を発電機として起動した場合について、過渡現象のシミュレーションと実験を次により行なった。

まず、電動機のとときと同様に誘導機の動特性状態方程式に諸条件を加えてプログラムを作成し、誘導発電機として一定回転数で運転し系統並列したときの過渡電流等のシミュレーションを行なった。その際、電動機の場合と同様、印加系統電圧の位相が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ および $225^\circ$ の場合について行なった。

また、実験はかご形誘導発電機を直流電動機で駆動し、これが同期速度一定になったときに電力系統に投入して、シミュレーションのときと同様に、系統電圧の位相が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $225^\circ$ の場合について行なった。

#### 3.3 供試誘導機の定格および諸定数

本研究で、シミュレーションおよび実験に使用した三相かご形誘導機の定格および諸定数は次に示す通りである。

##### (1) 誘導機の定格

電圧：200(V)，電流：6.3(A)，出力：1.5(kW)

相数：三相，周波数：50(Hz)，極数：4極

##### (2) 諸定数

$R_1=1.358(\Omega)$ ， $R_2=1.358(\Omega)$

$M=0.11711(\text{H})$ ， $L_{11}=L_{22}=0.1214(\text{H})$

$J=0.0024(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ .....電動機とした場合

$J=0.0201(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ .....発電機とした場合

#### 4. シミュレーションおよび実験の結果

以下に、かご形誘導機を電動機として起動した場合および多電機として起動した場合の起動時過渡電流等のシミュレーション結果と実験結果について述べる。

##### 4.1 電動機として直入れ起動した場合

図2(a)～(f)に誘導機を電動機として直入れ起動した場合の過渡電流のシミュレーション結果と実験結果を示す。

同図(a)は印加電源電圧の位相が $0^\circ$ のときの過渡電流と印加電源電圧を示したものである。また、同図(b)～(f)は同図(a)と同様印加電源電圧の位相がそれぞれ $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ および $225^\circ$ のときの過渡電流と印加電源電圧を示したものである。

同図(a)の印加電圧の位相が $0^\circ$ のときは、過渡電流の最大値が正の第1波に現れておりその実験値は $46.8\text{ A}$ で定格電流 $6.3\text{ A}$ の $7.43$ 倍にもなっている。同図(b)の電圧の位相が $45^\circ$ のときは正の第2波に最大値が現れておりその値は $0^\circ$ のときより小さくなっている。同図(c)～(f)の電圧の位相が $90^\circ \sim 225^\circ$ の場合は、正波から転じて負の第1波に過渡電流の最大値が現れており、 $180^\circ$ のときに最も大きくその実験値は $46.5\text{ A}$ で、定格電流の $7.38$ 倍になっている。

以上図示のように、いずれの場合も過渡電流のシミュレーション結果と実験結果がよく一致していることがわかる。また、過渡電流は緩やかな減衰振動をしながら、約 $0.1$ 秒足らずの間に定常状態に入り、以後は安定した定常状態を保っていることがわかる。なお以上の図より過渡電流の最大値は、正波または負波の第1波あるいは第2波のいずれかに現れ、印加電源電圧位相が $0^\circ$ および $180^\circ$ のときに最大となり、その大きさは定格電流の約 $7.4$ 倍にもなっていることがわかる。更に、位相が $90^\circ$ のときに最も小さい最大値となり、定格電流の約 $6.8$ 倍になっていることも知れる。

##### 4.2 発電機として系統並列起動した場合

図3(a)～(f)に誘導機を発電機として系統並列起動した場合の過渡電流のシミュレーション結果と実験結果を示す。

図3(a)は誘導発電機の系統並列時における系統電圧の位相が $0^\circ$ のときの過渡電流と系統電圧を示したものである。また同図(b)～(f)は同図(a)と同様、系統並列時における系統電圧位相がそれぞれ $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ および $225^\circ$ のときの過渡電流と系統電圧を示したものである。

同図(a)の系統電圧の位相が $0^\circ$ のときは、過渡電流の最大値が正の第1波に現れておりその実験値は $48.2\text{ A}$ で定格電流の $7.65$ 倍になっている。これは電動機の場合よりやや大きい。同図(b)の系統電圧の位相が $45^\circ$ のときは、 $0^\circ$ のとき同様正の第1波に最大値が現れておりその値は $0^\circ$ のときより小さくなっている。その最大値は電動機の場合とは異なった現れ方をしている。同図(c)～(f)の系統電圧の位相が $70^\circ \sim 225^\circ$ の場合は、正波から転じて負の第1波に過渡電流の最大値が現れている。そして、位相が $180^\circ$ のときに最も大きくその実験値は $46.5\text{ A}$ で、 $0^\circ$ のときよりやや小さいが定格電流の $7.38$ 倍になっている。

以上図示のように、いずれの場合においてもシミュレーション結果と実験結果がほぼ一致していることがわかる。また、過渡電流は電動機の場合とは異なり、急激な減衰の振動をしながら、約 $0.09$ 秒足らずで定常状態に入り、以後は安定状態になっていることがわかる。この過渡期間は電動機の場合のそれより短くなっている。なお、以上の図より過渡電流の最大値は電動機の場合とは異なり正波または負波の第1波のみに現れ、系統電圧位相が $0^\circ$ および $180^\circ$ のときに最大となりその大きさは定格電流の約 $7.5$ 倍前後にもなっていることがわかる。更に、電圧位相が $90^\circ$ のときに最も小さい最大値となり、定格電流の約 $5.4$ 倍になっていることも知

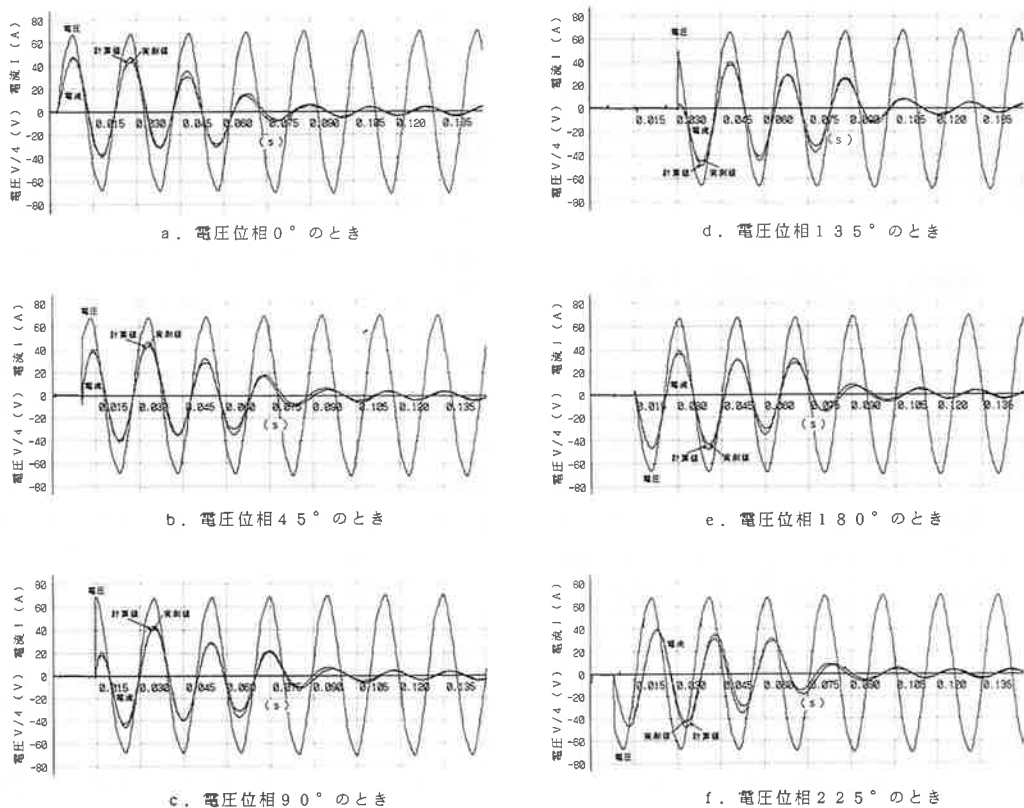


図2 誘導電動機起動時の過渡電流

Fig. 2. Transient currents of an induction motor.

ることができる。この値は電動機の場合のそれより小さくなっている。

発電機として系統並起動した本実験の結果は、系統電圧の位相と過渡電流の関係について文献(13)と同様の結果となった。

## 5. 結 論

本論文においては、誘導機の動特性を解析するにあたり、d-q変換法を用いて得られる状態方程式を利用してシミュレーションにより評価する方法を提案すると共に、実際この方法により誘導機を電動機として直入れ起動した場合と、発電機として系統並列起動した場合について、過渡電流などのシミュレーションを行なった結果と実験した結果を比較して述べた。

これより、シミュレーション結果と実験結果とはよく一致していることが明白である。

また、電動機として直入れ起動した場合および発電機として系統並列起動した場合に、電源あるいは系統の電圧位相が $0^\circ$ または $180^\circ$ のとき最も大きい過渡電流の最大値が現れ、電動機とした場合は定格電流の約7.4倍に、発電機とした場合は定格電流の約7.6倍にもなった。そして、電動機いずれの場合も電圧位相が $90^\circ$ のとき最も小さい過渡電流の最大値が現れた。これより、過渡電流の最大値と電圧の位相と相関関係のあることが知れる。

各電圧位相に対する過渡電流の最大値は、電動機とした場合は正あるいは負の第1波または第2波に、発電機とした場合は正または負の第1波に現れた。また、これら過渡電流の過渡期間

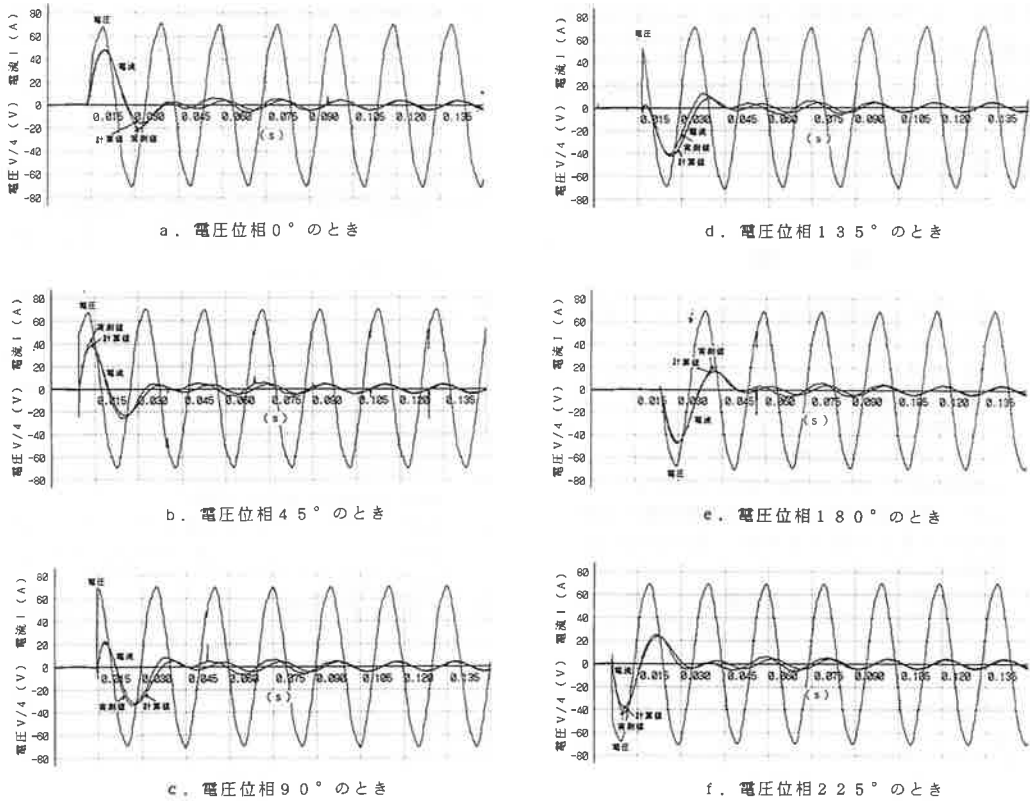


図3 誘導発電機起動時の過渡電流

Fig. 3. Transient currents of an induction generator.

は電動機とした場合は約0.1秒、発電機とした場合は約0.09秒以下となった。そして、電動機の場合は緩やかな減衰をし、発電機の場合は急速に減衰をしながら定常状態に移行し過渡期間は電動機の方が発電機より長くなっている。

なお、発電機として系統並列起動した場合の系統電圧の位相と過渡電流の関係について、文献(13)の場合と同様の結果を得た。また、誘導機の負荷時の過渡現象についても同様の結果を得ていることをここに追記しておく。

ところで、発電機とした場合過渡電流の計算値と実験値との間に局部的に不一致のところが認められるが、これは実験値の方に電圧変動、回転変動、系統のインピーダンスなどの影響が現れたためと考えられる。しかし、本法のシミュレーションによりかご形誘導機の動特性の一端

を明らかにすることができた。以上より、本論文に提唱する誘導機の動特性をシミュレーションにより評価する本法の妥当性と有用性が示されたと考える。

なおまた、本法によれば誘導機それ自体は勿論、非線形項も含む電気機械系や誘導発電機による風力発電システムなどのようなシステムの動特性の全体像を速やかに解析することが可能かつ容易であり、その有用性が大であると考え

る。本実験で使用した誘導機は小型のものであるため、磁気飽和によるパラメータの変化はあまり大きくはないので実験結果とシミュレーション結果がよく一致したと思われるが、大型の誘導機では磁気飽和の影響を考慮したシミュレーションが必要であると考え

今後は、大型の誘導機に適用できる磁気飽和の影響を考慮したモデルを検討するとともに、本法の手法を用いて巻線形誘導機や誘導機を含む風力発電システムなどの動特性解析をより一層推し進めて行きたいと考えている。

## 文 献

- 1) 山村・安井：「誘導電動機の過渡トルク」，電学誌 75, 493 (昭 30-5)
- 2) 松瀬・高木：「シグナルフローグラフを用いた三相誘導電動機のアナログシミュレーション」，電学誌 90, 691 (昭 45-4)
- 3) 竹内：「運転中の誘導電動機の電源切換えによる過渡現象」，電学誌 79, 1055 (昭 34-8)
- 4) 山田：「電圧動揺時における誘導電動機の過渡特性の計算法に関する考察」，電学誌 85-11, 1873 (昭 40-11)
- 5) 内島・加藤・西条：「誘導電動機における線形近似式の適用範囲に関する考察」，電学論 B, 104, 349 (昭 59-6)
- 6) 内島・西条：「誘導発電機の電力特性と線形領域に関する考察」，電学論 B, 106, 495 (昭 61-6)
- 7) 松坂・佐々木：「連続系シミュレーション言語 (MCSP) による電気機械動特性シミュレーション」，昭 62 電気学会全大, No. 639, p. 775
- 8) 松坂・佐々木：「誘導発電機系並列時における電圧変動シミュレーション」，昭 63 電気関係学会東北支部連大, 2E14, p. 187
- 9) 佐々木・松坂：「連続系シミュレーション言語 (DECS) による誘導機起動時の過渡特性シミュレーション」，平元電気関係学会東北支部連大, 116, p. 304
- 10) 佐々木・松坂：「かご形誘導機起動時の過渡現象シミュレーション」，平 2 年電気学会全大, No. 690, p. 7-13, 14
- 11) T. Matsuzaka, K. Sasaki: "Voltage fluctuation simulation of power system due to a wind driven induction generator", Proc. of Asian and Pacific Area Wind Energy Conference, Shanghai p. 124 (1988)
- 12) 松坂：「パソコンから大型機まで実行できる連続系シミュレーション言語」SENAC Vol. 21, No. 7 (昭 63)
- 13) 佐藤・志満・馬場・三瓶・高橋：「誘導発電機系統並列位相角と突入電流」，電気学会回転機研資 MR-83-82 (昭 58-8)
- 14) 難波江，他：基礎電気機器学, p. 139-147 (昭 59)，電気学会