琉球大学学術リポジトリ

かご形誘導機起動時の突入電流抑制法

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): Squirrel-cage induction machines, Transient current, Current-limiting reactor 作成者: 山下, 勝己, 漢那, 長武, 宮城, 隼夫, 安里, 貞夫, Yamashita, Katsumi, Kanna, Osamu, Miyagi, Hayao, Asato, Sadao メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5455

かご形誘導機起動時の突入電流抑制法

山下 勝己*　漢那 長武**　宮城 隼夫***　安里 貞夫****

A Method of Damping Rush Current of Squirrel-Cage Induction Machines

Katsumi YAMASHITA*, Osamu KANNA**, Hayao MIYAGI***, and Sadao ASATO****

Abstract

In recent years, squirrel-cage induction machines are widely used as wind generators because of their robustness and cost effectiveness, and capability of asynchronus operation with power grid. However,the induction machines have the diasadvantageous point that the transient current amounts to several times as large as the rated value when they are connected to systems, and causes the voltage variation of the system.In this paper, the authers denote the machine dynamics using the d-q axis notation and then investigate the electrical transient phenomena through computer simulations. Furthermore, we propose a method of damping the transient rush current of squirrel-cage induction machines.

Key Words: Squirrel-cage induction machines, Transient current, Current-limiting reactor.

1. まえがき

かご形誘導発電機は構造が簡単で堅牢である上安価であり，かつ系統並列時に位相調整の必要がない等の多くの利点を有する．このため，近年，かご形誘導発電機は風力発電機として多く使用されるようになってきた．しかしながら，同発電機は系統並列起動時に定格電流の6～7倍にも及ぶ励磁突入電流を流し，特に大形の風力発電機では，電力系統における電圧を過渡的に大幅に変動させる等の欠点を有する．一方，風力発電機は空間・時間により大きく変動する自然風により駆動され，必然的に頻繁な系統並列運転を余儀なくされる．以上のことから，風力発電機の系統並列時における励磁突入電流を調査することは非常に重要な課題となる．この点を考慮し，文献 [1] および [2] では励磁突入電流の大きさが，電力系統の内部インピーダンスおよび系統並列時の線路電圧位相角等により大きく影響されることを明らかにしている．

本論文では，d-q 変換法を用いることにより，誘導機の電気系の動特性を表す電圧方程式および誘導機の機械系の動特性を表す運動方程式を導出し，この基本方程式に基づき系統並列時の線路電圧位相角，線路電圧の大きさおよび電力系統の内部インピーダンス等の励磁突入電流への影響を調べる．次に，励磁突入電流を抑制するための一手法として限流リアクトルを用いる方法を提案すると共に，本手法の有効性を計算機シミュレーションにより検証する．

2. 誘導機の動特性

図1に固定子巻線 A,B,C および回転子巻線 a,b,c の各巻線間が対称で，かつエアギャップが一様である対称3相かご形誘導機を示す．同図において，回転子の回転方向を右回転としたとき，固定子巻線 A に対する回転子巻線 a の回転角を θ とする．このとき，固定子の A 相を基準軸，すなわち，d 軸に設定したときのかご形誘導機の d-q 変換した動特性式を導く．まず，固定子および回転子巻線における電圧方程式は次式で与えられる．

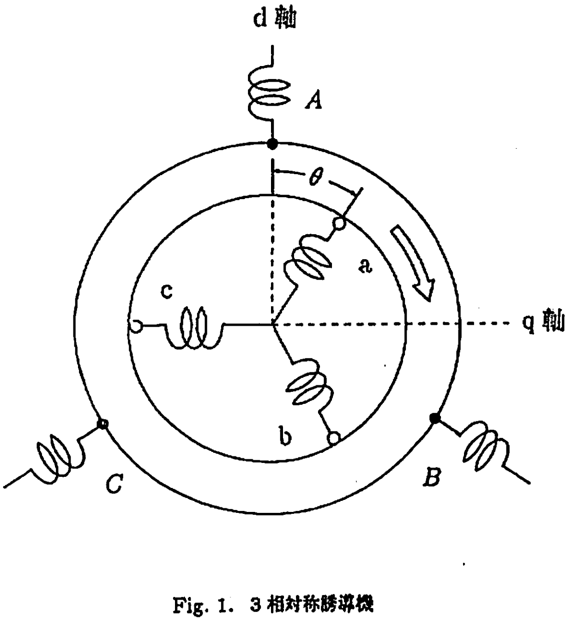

Fig. 1. 3相対称誘導機

受理：1996年5月20日
*工学部電気電子工学科
(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Fac. of Eng.)
**大学院工学研究科 電気・情報工学専攻
(Graduate Student, Electrical and Information Eng.)
***工学部情報工学科
(Dept. of Information Engineering, Fac. of Eng.)
****沖電設計株式会社
(Okiden Design Company, Inc.)

$$\boldsymbol{v}_1 = R_s \boldsymbol{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_1}{dt} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v}_2 = R_r \boldsymbol{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_2}{dt} \tag{2}$$

但し,

$$\boldsymbol{v}_1 = [v_A \ v_B \ v_C]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{v}_2 = [v_a \ v_b \ v_c]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{i}_1 = [i_A \ i_B \ i_C]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{i}_2 = [i_a \ i_b \ i_c]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{\Psi}_1 = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{\Psi}_2 = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^{\mathrm{T}}$$

ここに,

v_A, v_B, v_C：固定子巻線A, B, C相の電圧
v_a, v_b, v_c：回転子巻線a, b, c相の電圧
i_A, i_B, i_C：固定子巻線A, B, C相の電流
i_a, i_b, i_c：回転子巻線a, b, c相の電流
ψ_A, ψ_B, ψ_C：固定子巻線A, B, C相の磁束鎖交数
ψ_a, ψ_b, ψ_c：回転子巻線a, b, c相の磁束鎖交数
R_s：固定子巻線の抵抗
R_r：回転子巻線の抵抗

また,固定子巻線および回転子巻線における磁束方程式は次式で与えられる.

$$\boldsymbol{\Psi}_1 = L_s \boldsymbol{i}_1 + M_{sr} \boldsymbol{\Theta}_1 \boldsymbol{i}_2 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_2 = L_r \boldsymbol{i}_2 + M_{sr} \boldsymbol{\Theta}_2 \boldsymbol{i}_1 \tag{4}$$

但し,

$$\boldsymbol{\Theta}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta-120^\circ) & \cos\theta & \cos(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Theta}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

ここに,

L_s：固定子の自己インダクタンス
L_r：回転子の自己インダクタンス
M_{sr}：相互インダクタンス

いま,変換行列$\mathbf{T}$および$\tilde{\mathbf{T}}$をそれぞれ次式で定義する.

$$\boldsymbol{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos 120^\circ & \cos(-120^\circ) \\ 0 & \sin 120^\circ & \sin(-120^\circ) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\tilde{\boldsymbol{T}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta+120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) \end{bmatrix} \tag{6}$$

このとき,式(3)を式(1)に代入し得られた関係式に変換行列$\boldsymbol{T}$左乗し,また,式(4)を式(2)に代入し得られた関係式に変換行列$\tilde{\boldsymbol{T}}$を左乗すると共に,

$$\boldsymbol{v}_s = \boldsymbol{T}\boldsymbol{v}_1 \tag{7}$$
$$\boldsymbol{i}_s = \boldsymbol{T}\boldsymbol{i}_1 \tag{8}$$
$$\boldsymbol{v}_r = \tilde{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{v}_2 \tag{9}$$
$$\boldsymbol{i}_r = \tilde{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{i}_2 \tag{10}$$

$$\tilde{\boldsymbol{T}} = \frac{2}{3}\boldsymbol{T}\boldsymbol{\Theta}_1 \tag{11}$$

$$\boldsymbol{T} = \frac{2}{3}\tilde{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\Theta}_2 \tag{12}$$

但し,

$$\boldsymbol{v}_s = [v_{sd} \ v_{sq}]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{i}_s = [i_{sd} \ i_{sq}]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{v}_r = [v_{rd} \ v_{rq}]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{i}_r = [i_{rd} \ i_{rq}]^{\mathrm{T}}$$

の関係を用いれば,かご形誘導機のd-q変換した電圧方程式は次式で与えられる.

$$\boldsymbol{v}_s = (R_s + L_s\frac{d}{dt})\boldsymbol{i}_s + M\frac{d\boldsymbol{i}_r}{dt} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{v}_r = (R_r + L_r\frac{d}{dt})\boldsymbol{i}_r + M\frac{d\boldsymbol{i}_r}{dt} + \omega(M\tilde{\boldsymbol{i}}_s + L_r\tilde{\boldsymbol{i}}_r) \tag{14}$$

但し,

$$\tilde{\boldsymbol{i}}_s = [i_{sq} \ -i_{sd}]^{\mathrm{T}}, \quad \tilde{\boldsymbol{i}}_r = [i_{rq} \ -i_{rq}]^{\mathrm{T}}, \quad M = \frac{3}{2}M_{sr}$$

ここに,

ω：電気角速度

一方,かご形誘導機の出力は,式(14)における第3項が速度起電力に相当する項であることから,同項に$\boldsymbol{i}_r$を乗じることにより得られる.それ故,かご形誘導機の機械系の運動方程式は,出力を電気角速度ωで除したトルクTを用いて次式で与えられる.

$$J\frac{d\Omega}{dt} = T - T_L \quad ：誘導電動機 \tag{15}$$

$$J\frac{d\Omega}{dt} = T + T_G \quad ：誘導発電機 \tag{16}$$

但し,

$$\omega = \Omega P, \quad T = P(M\tilde{\boldsymbol{i}}_s + L_r\tilde{\boldsymbol{i}}_r)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{i}_r$$

ここに,

Ω：機械角速度
P：かご形誘導機の極対数
J：慣性モーメント
T_L：誘導電動機の負荷トルク
T_G：誘導発電機の駆動トルク

以上より,式(13)から式(16)を用いると共に,誘導機においては回転子側の電圧$\boldsymbol{v}_r$が零であることから,誘導機のd-q変換した動特性は次式のようになる.

$$\begin{aligned} v_{sd} &= (R_s + L_s\frac{d}{dt})i_{sd} + M\frac{di_{rd}}{dt} \\ v_{sq} &= (R_s + L_s\frac{d}{dt})i_{sq} + M\frac{di_{rq}}{dt} \\ 0 &= M\frac{di_{sd}}{dt} + \omega M i_{sq} + (R_r + L_r\frac{d}{dt})i_{rd} + \omega L_r i_{rq} \\ 0 &= -\omega M i_{sd} + M\frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_r i_{rd} + (R_r + L_r\frac{d}{dt})i_{rq} \\ J\frac{d\Omega}{dt} &= T - T_L \quad ：誘導電動機 \\ J\frac{d\Omega}{dt} &= T + T_G \quad ：誘導発電機 \end{aligned} \tag{17}$$

但し,

$$T = PM(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq})$$

3.　シミュレーション結果

本章では，かご形誘導機を電動機および発電機として使用した場合の，起動時における A 相電流,A 相電圧および誘導機の電気角速度の過渡現象を計算機シミュレーションにより解析する．まず，かご形誘導機を電動機として使用した際の諸特性を示す．なお，図 2には本シミュレーションに用いた系統モデルを，また表 1にはかご形誘導電動機の諸定数を示している．

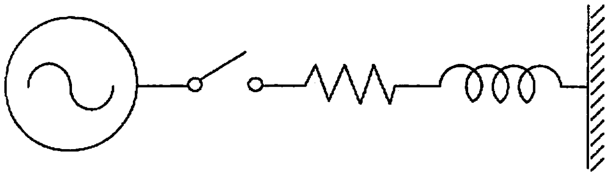

Fig. 2.　系統モデル

TABLE 1　誘導電動機の諸定数

定格電圧：200 [V]	定格電流：3.3[A]
定格出力：1099[W]	定格周波数：60[Hz]
相数 ：三相	極対数 ：2
R_r, R_s : 1.3[Ω]	L_r, L_s : 0.12[H]
M : 0.11[H]	J : 0.024[kg-m^2]

図3から図6には，系統インピーダンスの抵抗値が0.1[Ω]，インダクタンス値が0.01[H]，印加電源電圧の大きさが210[V] および印加電源の位相がそれぞれ0°, 90°, 180°, 270° のときの A 相電流,A 相電圧および誘導機の電気角速度の計算機シミュレーション結果を示したものである．同図から明らかなように，突入電流の大きさは印加電源電圧の位相に大きく影響を受け，特に，電源電圧位相が 0° および 180° のときに最大の影響を受け，その値は定常電流の約 6 倍程度になることが分かる．一方，印加電源位相に対する誘導電動機の端子電圧への影響は突入電流が受ける影響に比べ少なく，各電圧位相に対する端子電圧の変動は一様に，定常電圧の約 25%の落ち込みになることが分かる．なお，参考のために誘導電動機の電気角速度の動特性も図示している．次に，印加電源電圧の大きさが突入時の諸特性に与える影響を調べるため，印加電源電圧の大きさが 250[V] のときの電流，電圧および速度特性を示したものが図 7である．図 3および図 7の比較から明らかなように，印加電源電圧が大きくなれば過渡電流も大きくなり，端子電圧の変動も大きくなることが分かる．また，内部インピーダンスの大きさによる突入時の諸特性に与える影響を調べるため，系統インピーダンスの値を基準値の 10 分の 1，すなわち，抵抗値 0.01[Ω]，インダクタンス値 0.001[H] に対する突入時の諸特性を調べたものが図 8である．図 3および図 8の比較から明らかなように，内部インピーダンスの大きさにも大きく影響され，内部インピーダンスの大きさが大きいほど突入電流が抑制されるものの端子電圧への影響が大きくなることが分かる．

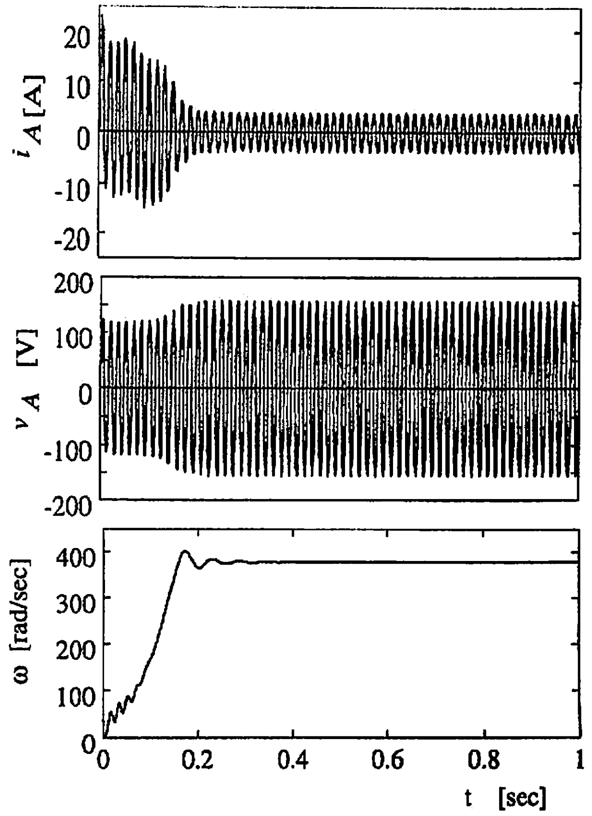

Fig. 3.　印加電源電圧位相 0° に対する動特性

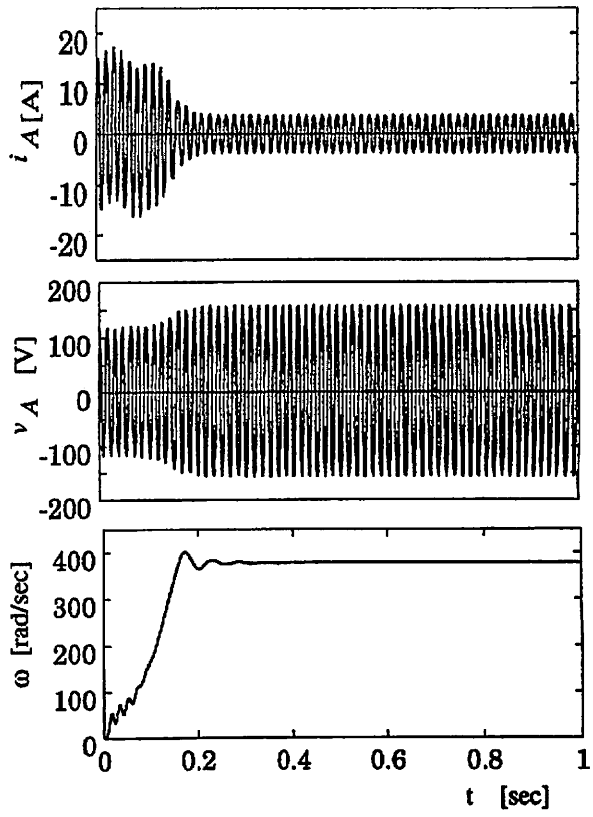

Fig. 4.　印加電源電圧位相 90° に対する動特性

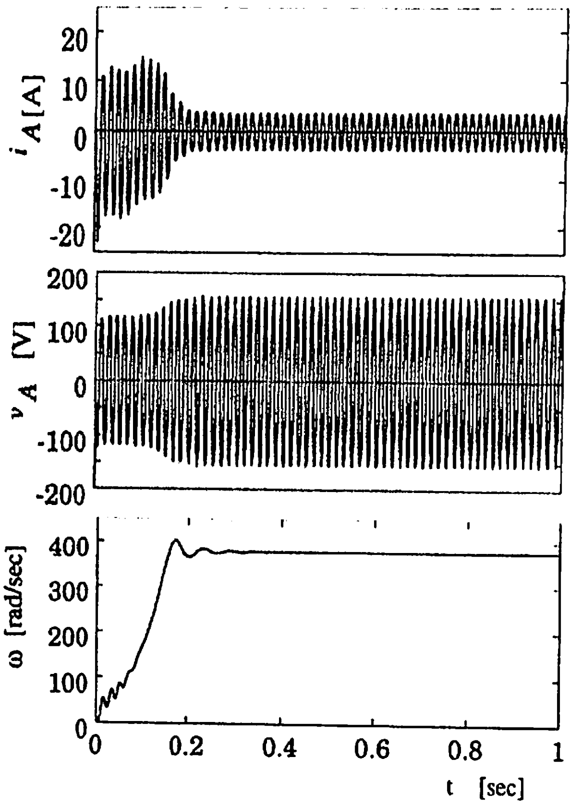

Fig. 5. 印加電源電圧位相 180° に対する動特性

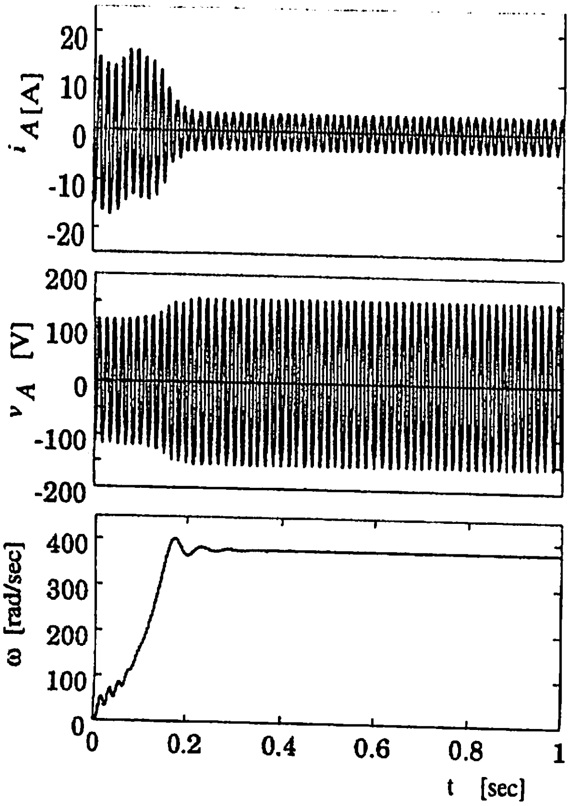

Fig. 6. 印加電源電圧位相 270° に対する動特性

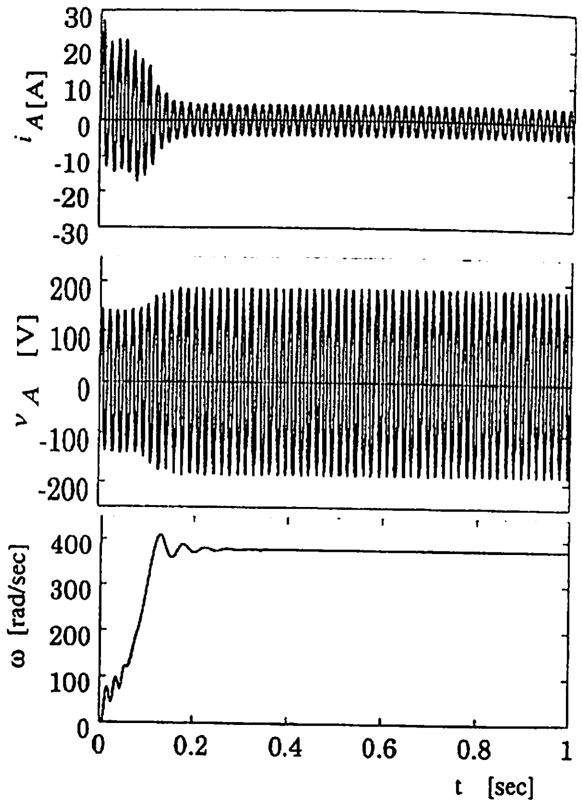

Fig. 7. 印加電源電圧 250[V] に対する動特性

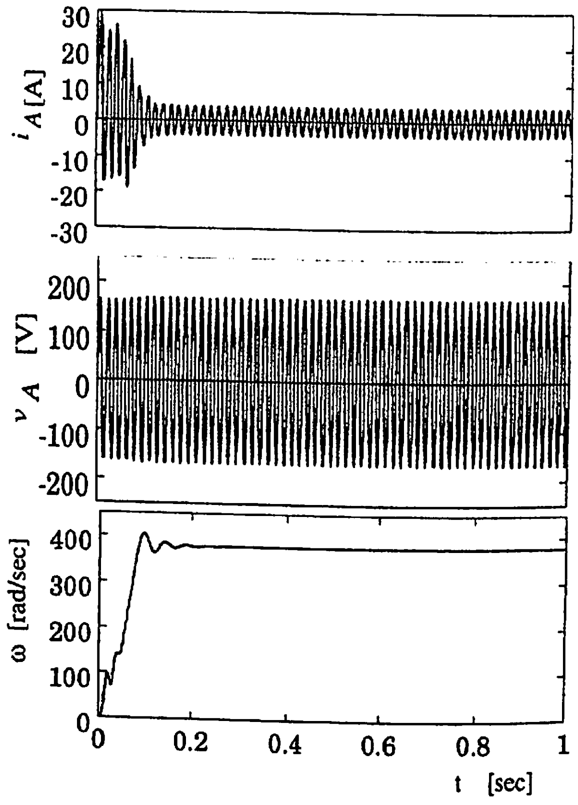

Fig. 8. 系統インピーダンス変化に対する動特性

次に，かご形誘導機を発電機として使用した際の，系統並列時の諸特性を示す．なお，本シミュレーションに用いた系統モデルは先と同じモデルを用い，また，かご形誘導発電機の諸定数は表2を用いる．

TABLE 2　誘導発電機の諸定数

定格電圧：200 [V]	定格電流：2.8[A]
定格出力：384.18[W]	定格周波数：60[Hz]
相数：三相	極対数：2
R_r, R_s : 1.3[Ω]	L_r, L_s : 0.12[H]
M : 0.11[H]	J : 0.024[kg-m²]

かご形誘導発電機の系統への投入は，発電機の電気角速度ωが電源角速度になったときに行なうものとする．このとき，印加電源の位相がそれぞれ0°, 90°, 180°, 270°のときのA相電流,A相電圧および誘導機の電気角速度の計算機シミュレーション結果を図9から図12に示す．同図から明らかなように，電動機の場合と同様に印加電源電圧の位相が0°および180°のときに最大の過渡電流，すなわち，定常電流の約6倍の電流が流れることが分かる．一方，各電圧位相に対する端子電圧の変動はほぼ同じであり，一様に定常電圧の約25 %の落ち込みが見られる．なお，参考のために誘導発電機の電気角速度の動特性も図示している．次に，印加電源電圧の大きさが突入時の諸特性に与える影響を調べるため，印加電源電圧の大きさが250[V]のときの電流，電圧および速度特性を示したものが図13である．

図9および図13の比較から明らかなように，印加電源電圧が大きくなれば過渡電流も大きくなり，端子電圧の変動も大きくなることが分かる．また，図9および図14の比較から明らかなように，内部インピーダンスの大きさが大きいほど突入電流が抑制されるものの端子電圧への影響が大きくなることが分かる．一方，図15には，系統インピーダンスに0.04[H]の限流リアクトルを直列に挿入した場合の諸特性である．図9および図15の比較から明らかなように，限流リアクトルを挿入することにより過渡電流を抑制することができるが，誘導発電機の端子電圧の変動を大きくする欠点が生じる．

4. むすび

本論文では,d-q変換法を用いることにより誘導機の動特性式を導出し，この動特性式に基づき系統並列時の線路電圧位相角，線路電圧の大きさおよび電力系統の内部インピーダンスの励磁突入電流等への影響を調べた．また，励磁突入電流を抑制するための一手法として限流リアクトルを用いる方法を提案した．なお，限流リアクトルを用いると励磁突入電流を抑制することができるものの，誘導発電機の端子電圧の変動を大ききする欠点が見られた．

今後の課題として，突入電流を抑制し，かつ電圧変動を小さくし得る制御器の構築があげられる．

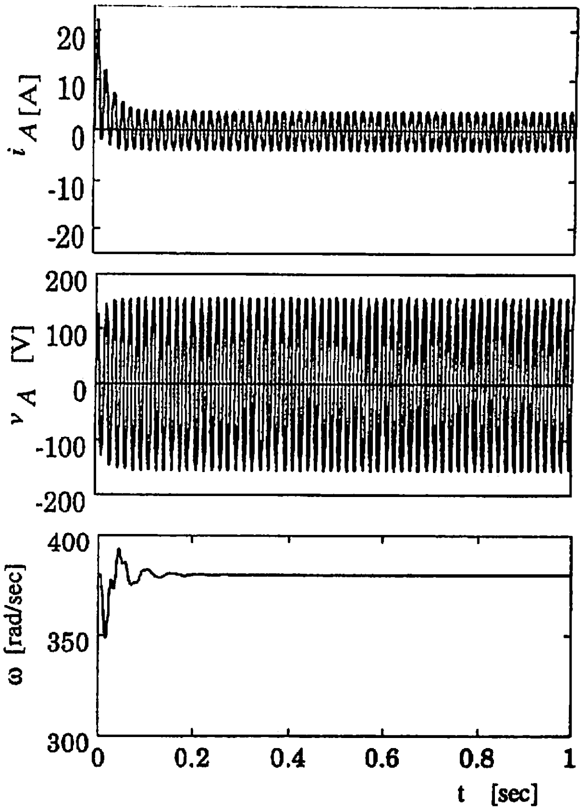

Fig. 9. 印加電源電圧位相 0° に対する動特性

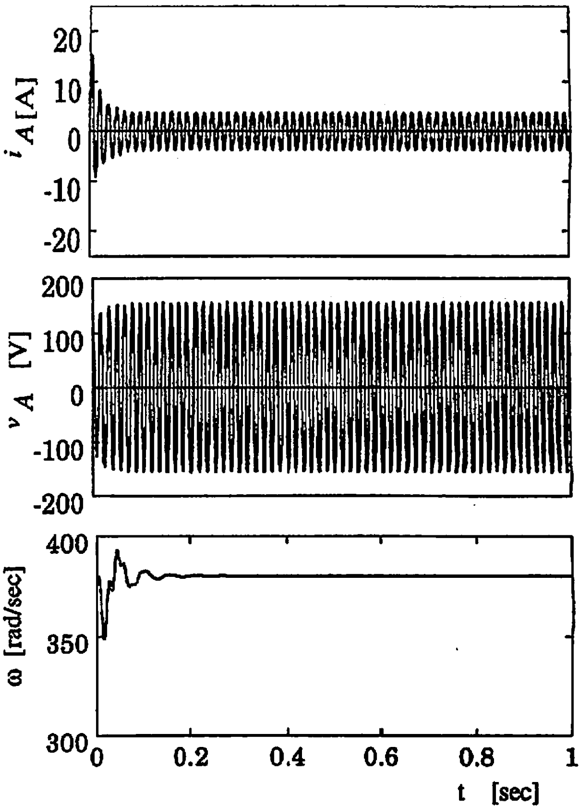

Fig. 10. 印加電源電圧位相 90° に対する動特性

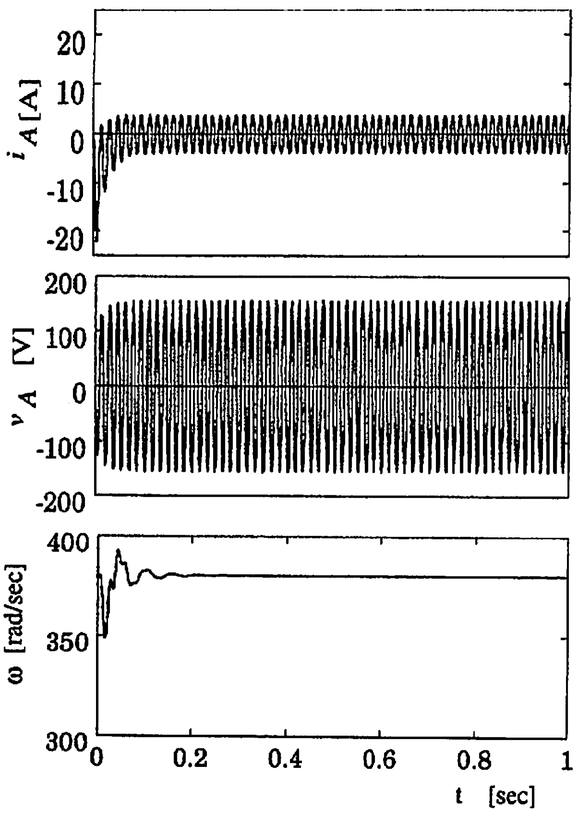

Fig. 11. 印加電源電圧位相 180° に対する動特性

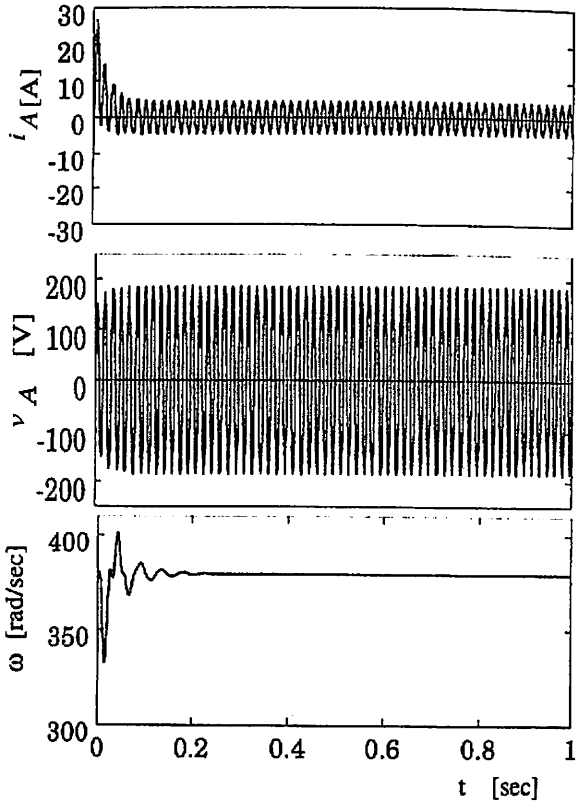

Fig. 13. 印加電源電圧 250[V] に対する動特性

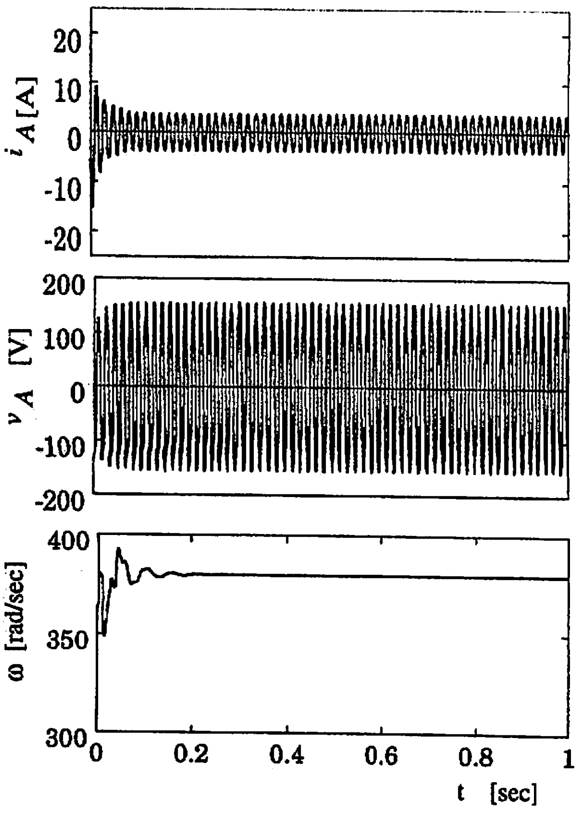

Fig. 12. 印加電源電圧位相 270° に対する動特性

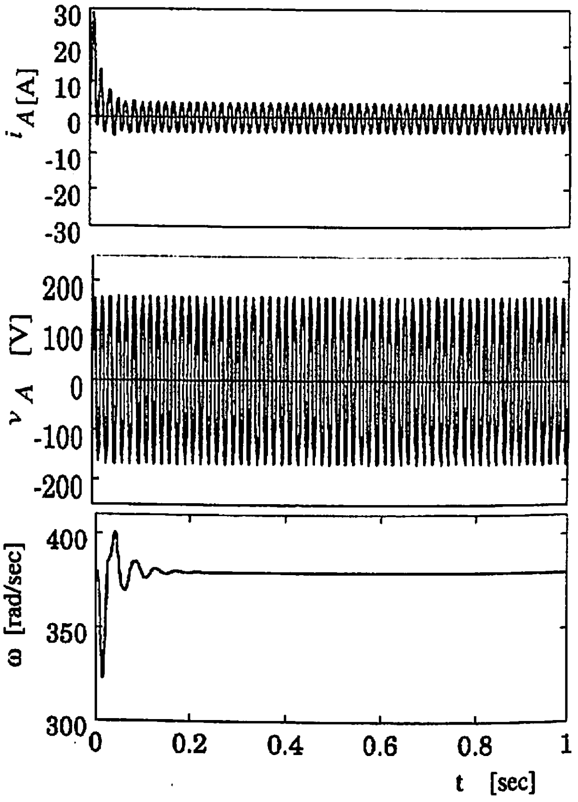

Fig. 14. 系統インピーダンス変化に対する動特性

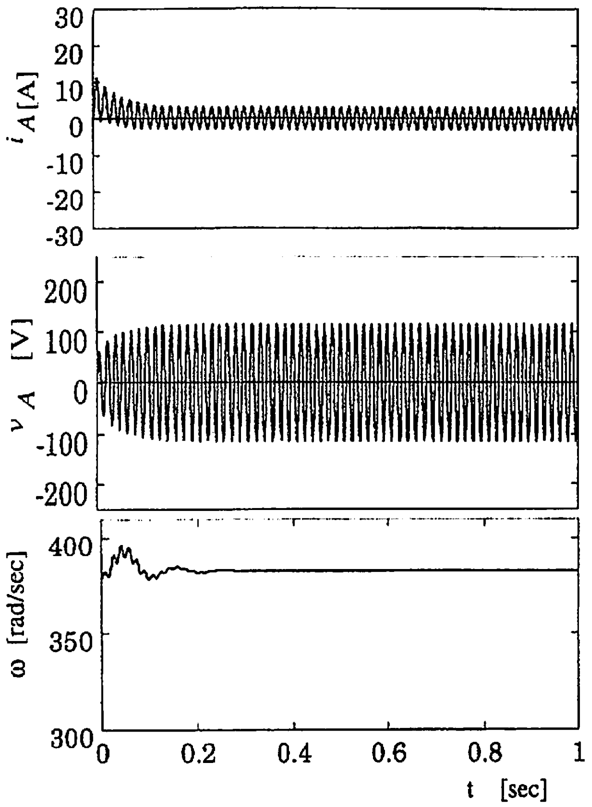

Fig. 15. 限流リアクトル挿入に対する動特性

謝　　辞

本研究を遂行するにあたり有益な御助言を頂いた本学情報工学科翁長健治教授並びに，八戸工業大学電気工学科松坂知行教授に謝意を表す．また，熱心に計算に取り組んでくれた本学電子・情報工学科大城学君に謝意を表す．最後に，本研究は沖縄電力共同研究費により補助を受けたことを記す．

文献

[1] 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の相関」，電気学会回転機研資, MR-83-82(昭和58)

[2] 松坂・佐々木:「かご形誘導機起動時の過渡現象シミュレーション」，八戸工業大学情報システム工学研究所紀要, Vol.5,pp.29-36,1993.