

自励式誘導発電機の低トルク入力時における発電特性の検討

秋山 祐一郎* 山本 吉朗
(鹿児島大学大学院 理工学研究科)

1 はじめに

自励式誘導発電機(SEIG)は安価、堅牢、省メンテナンスといった長所をもち、系統から独立したマイクロ水力発電システムや風力発電システム等のアプリケーションに適している。しかし、速度変動により出力および周波数が大きく変動してしまうため、入力を一定に保ち、定格速度付近で発電させることが一般的である。そのため、機械入力や回転数が不十分な環境における SEIG の特性について検討した報告はほとんどない。そこで本論文では、機械入力が不十分な場合の SEIG の発電特性について数学モデルを用いて検討した。また、低トルク入力時において、簡単な負荷制御により、発電の持続が可能なことをシミュレーションにより示したので報告する。

2 SEIG システムの数学モデル

本論文では、表 1 に示す定格のかご形誘導電動機のご定端子に、これと並列に $C_{sh} = 336 \mu\text{F}$ の励磁用コンデンサを接続し、整流器とチョップを介して、単相負荷 R_{Load} に電力を供給する SEIG システムについて検討する。本論文で検討した SEIG システムを図 1 に示す。

数学モデルとして、 $\alpha\beta$ 座標系における誘導機電圧方程式、端子に接続した励磁用コンデンサに関する式、機械系の式および負荷に関する式から得られる以下の 8 つの微分方程式を用いる。

$$p i_{\alpha s} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} (R_s L_r i_{\alpha s} - \omega_{re} L_m^2 i_{\beta s} - R_r L_m i_{\alpha r} - \omega_{re} L_m L_r i_{\beta r} - L_r v_{\alpha s}) \quad (1)$$

$$p i_{\beta s} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} (\omega_{re} L_m^2 i_{\alpha s} + R_s L_r i_{\beta s} + \omega_{re} L_m L_r i_{\alpha r} - R_r L_m i_{\beta r} - L_r v_{\beta s}) \quad (2)$$

$$p i_{\alpha r} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} (-R_s L_m i_{\alpha s} + \omega_{re} L_m L_s i_{\beta s} + R_r L_s i_{\alpha r} + \omega_{re} L_s L_r i_{\beta r} + L_m v_{\alpha s}) \quad (3)$$

$$p i_{\beta r} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} (-\omega_{re} L_m L_s i_{\alpha s} - R_s L_m i_{\beta s} - \omega_{re} L_s L_r i_{\alpha r} + R_r L_s i_{\beta r} + L_m v_{\beta s}) \quad (4)$$

$$p v_{\alpha s} = -\frac{i_{\alpha s} + i_{\alpha Load}}{C_{sh}} \quad (5)$$

$$p v_{\beta s} = -\frac{i_{\beta s} + i_{\beta Load}}{C_{sh}} \quad (6)$$

$$p \omega_{re} = \frac{P}{2J} (T_{shaft} - T_e) \quad (7)$$

$$p i_{L1} = \frac{1}{L_{Load}} (-R_{Load} i_{L1} + v_{L1}) \quad (8)$$

ここで、 ω_{re} は回転子角速度(電気角)であり、 L_s 、 L_r は L_{ls} 、 L_{lr} と励磁インダクタンスを用いて、

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (9)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (10)$$

また、電磁トルク T_e 、励磁電流の実効値 I_m 、および励磁インダクタンス L_m は以下の式から得られる。

$$T_e = \frac{3}{4} P L_m (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}) \quad (11)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{(i_{\alpha s} + i_{\alpha r})^2 + (i_{\beta s} + i_{\beta r})^2}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

$$L_m = a + b I_m + c I_m^2 + d I_m^3 \quad (a, b, c, d \text{ は定数}) \quad (13)$$

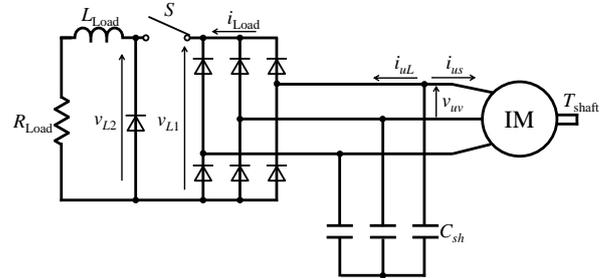


図 1 検討した SEIG モデル

表 1 使用したかご形誘導電動機の定格

定格出力	0.75 kW
P : 極数	4
定格速度	1710 rpm
定格トルク	4.2 Nm
J : イナーシャ	0.0067 kg-m ²
定格電圧	200 V
定格電流	3.3 A
R_s : 固定子巻線抵抗	3.37 Ω
R_r : 回転子巻線抵抗	1.73 Ω
L_{ls} : 固定子漏れインダクタンス	8.29 mH
L_{lr} : 回転子漏れインダクタンス	8.29 mH

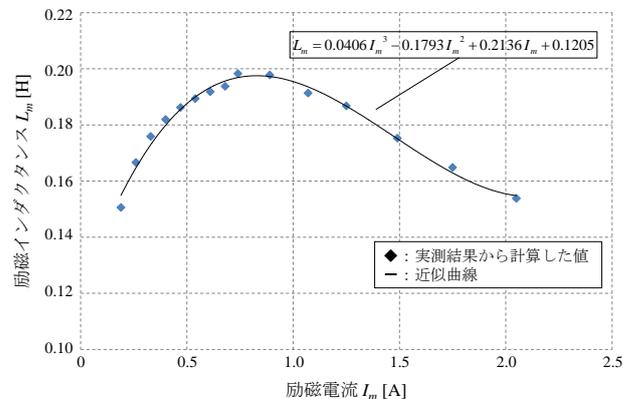


図 2 誘導電動機の励磁インダクタンス-励磁電流特性

図 2 の励磁インダクタンス-励磁電流特性は、表 1 に示す定格の誘導電動機における無負荷試験の実測結果より得た。励磁インダクタンス L_m の式(13)は図 2 の励磁インダクタンス-励磁電流特性を 4 次関数として近似して求めたものである^[1]。式(1)~(13)を用い、図 3 に示すフローチャートに沿ってシミュレーションを行った。また、本論文のシミュレーションはすべて Fortran を用いて行い、式(1)~(8)に示す 8 つの微分方程式については、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いて解いた。

3 シミュレーションと実験の比較

SEIG システムの数学モデルを評価するため、無負荷時における SEIG の発電特性についてシミュレーション結果および実験結果を比較する。入力トルクが定格トルクの 20% 以下の場合における発電特性として、図 4 に線間電圧-トルク特性を、図 5 に速度-トルク特性

を示す。図 4, 図 5 では, シミュレーション結果が実験結果と同様な特性を示している, 用いた SEIG システムの数学モデルは概ね信頼できると判断した。また, 実験結果から SEIG が発電を維持するためには, 最低 594 rpm の回転数が必要であり, そのときの線間電圧の瞬時値は 43.8 V であることがわかった。

4 負荷接続時 SEIG のシミュレーション結果

4.1 チョップ制御なしの場合の発電特性

入力トルクが $T_{\text{shaft}} = 0.56 \text{ Nm}$ (定格トルクの約 13%), 単相負荷を $R_{\text{Load}} = 30 \Omega$ とした場合の SEIG の発電特性についてシミュレーションで検討した。図 6 に速度, 負荷電流, 線間電圧の各波形のシミュレーション結果を示す。図 6 のシミュレーション結果より, 負荷電流が増加すると, 回転数が減少して線間電圧が崩壊している, 入力トルク 0.56 Nm では自己励磁発電が持続しないことがわかった。

4.2 チョップ制御を用いた場合の発電特性

SEIG にチョップ制御を設ける場合のシミュレーションでは, 図 3 のフローチャートに示したように整流電圧 v_{L1} と三角波 v_{tri} を比較して負荷電圧を決定している。SEIG が発電を維持できる線間電圧の瞬時値は約 40 V であり, そのときの三相全波整流した後の平均電圧 v_{L1} は 54 V となる。つまり v_{L1} が 54 V を下回らない限り, 自己励磁発電は持続する。そこで, 三角波 v_{tri} の最小電圧を 54 V, 振幅を 20 V, 周波数を 5 kHz とし, v_{L1} と比較することにより, v_{L1} の大きさに応じてデューティ比を決定し, v_{L1} が 54 V を下回る場合は負荷を切り離す制御を行った。また, 平滑リアクトル L_{Load} は 5.0 mH とした。図 7 にチョップ制御を設けた場合の発電特性のシミュレーション結果を示す。チョップ制御により, SEIG は速度, 線間電圧を一定に保ち, 負荷に電流を流し続けることができています。

5 まとめ

本論文で検討した SEIG システムにおいて, 従来, 発電を持続できなかった低トルク入力の場合でも, チョップ制御を設けることにより発電の持続が可能となることをシミュレーションにより明らかにした。

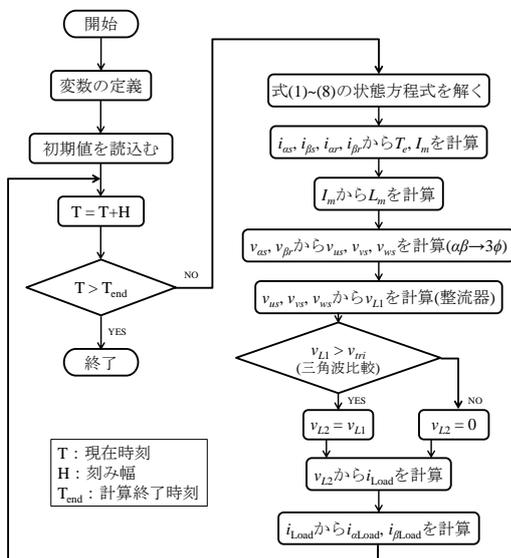


図 3 SEIG シミュレーションのフローチャート

文献

- [1] Bhim Singh, S. S. Murthy, Sushma Gupta: "Transient Analysis of Self-Excited Induction Generator With Electronic Load Controller (ELC) Supplying Static and Dynamic Loads," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.41, no.5, Sep./Oct. 2005

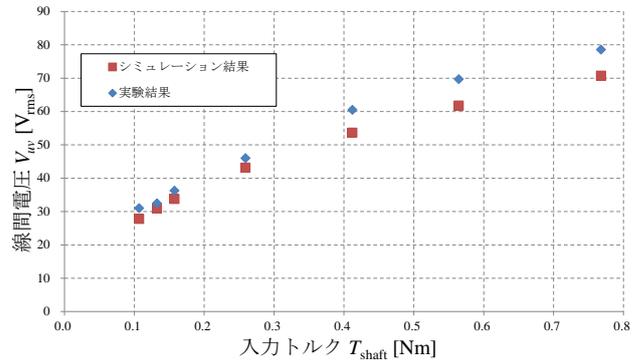


図 4 無負荷時 SEIG の線間電圧-トルク特性

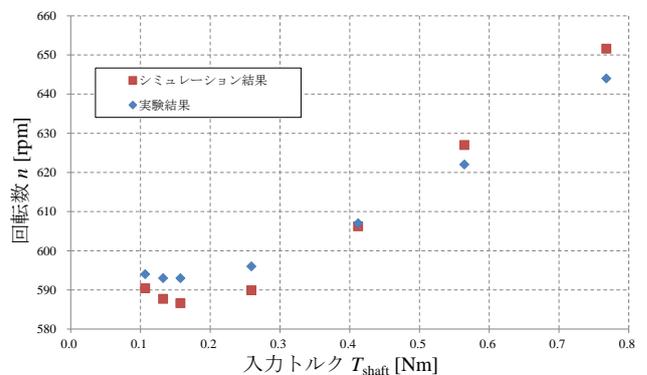


図 5 無負荷時 SEIG の速度-トルク特性

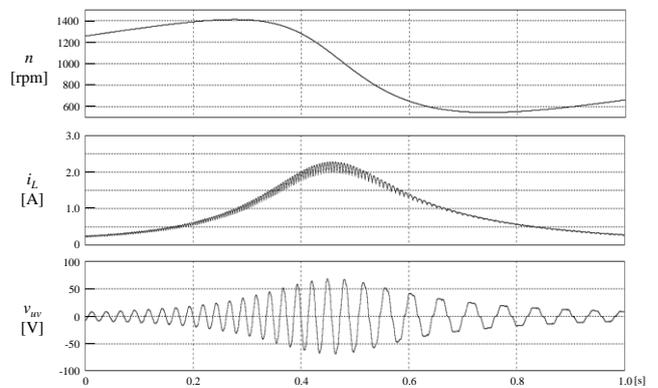


図 6 チョップ制御なしの場合の SEIG 発電特性のシミュレーション結果 ($T_{\text{shaft}} = 0.56 \text{ Nm}$, $R_{\text{Load}} = 30 \Omega$)

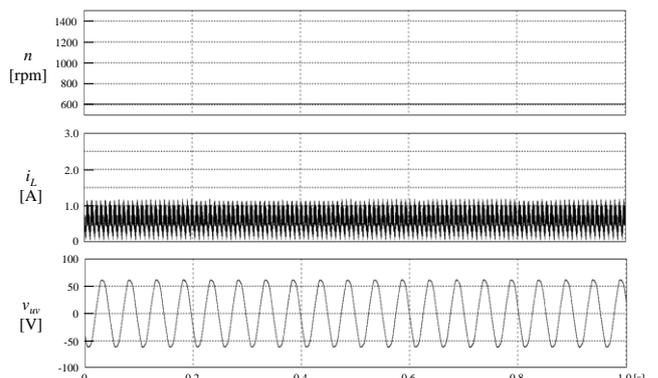


図 7 チョップ制御ありの場合の SEIG 発電特性のシミュレーション結果 ($T_{\text{shaft}} = 0.56 \text{ Nm}$, $R_{\text{Load}} = 30 \Omega$)