

巻線形誘導発電機の二次励磁による風力発電 システムの定常特性

宮川 隆寛* 篠原 勝次**

Steady State Characteristics of a Wind Power System Using Secondary Excitation of a Wound Rotor Induction Generator

Takahiro MIYAKAWA and Katsuji SHINOHARA

In this paper, we present about a wind power generation system using a wound rotor induction generator. Then, we deal with the control about active power and reactive power. The performance of a wound rotor induction generator controlled by a voltage phasor at the rotor side is investigated. The control system has been developed and several results of simulation show the effectiveness of the proposed wind system.

Keywords : wind power generator, wound rotor induction generator, secondary excitation

1. はじめに

近年、化石エネルギー資源の枯渇や CO₂ 排出の規制などエネルギーに関する諸問題が急速に浮上してきた。そのため、太陽光や風力などの自然エネルギーを利用した発電方式が急速に注目されるようになってきた。しかし、いずれもエネルギー密度が低いため、エネルギーの集約が必要とされ、大型のウィンドファームのように大規模な設備が必要とされる。そのため、設置場所が問題となり、エネルギー消費地との距離が遠いため、電力送電には系統との連系が必要とされる。

本研究では風力発電の問題を扱い、特に巻線形誘導発電機を用いた方式で系統連系をおこなうときに

2005年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻
(北九州工業高等専門学校電気電子工学科)

** 電気電子工学科

生じる問題について理論的、技術的な観点から検討した。現在多くの風力発電に用いられている発電機には同期機および誘導機がある。このうち同期発電機は可変速での発電が可能であるが、AC-DC-AC方式での設備が必要であり、コストの増加や損失が伴う。誘導発電機は普通かご形誘導発電機が用いられているが、発電のためには、同期速度以上の回転が必要とされ、極数やギア比の切り替えで回転数を高速にする必要がある。

他方、巻線形誘導発電機は二次励磁方式を用いて回転子側へすべり周波数の交流電圧を加えることで可変速での発電が可能である^{1) 2)}。本論文では可変速で系統並列が可能である巻線形誘導発電機を用いた風力発電方式について発電出力を制御する方法を述べ、定常における各特性について調べた。この風力発電システムで発電出力の制御をおこなうには、固定子側の電圧、電流を検出することで有効電力、無効電力を計算し、各指令値との偏差から

必要な回転子電圧を供給する。また、無効電力の制御が可能であることは、力率を-1.0（発電を負とする）にして、風速に関係なく発電出力を一定にすることも可能である。そのため、安定した電力の供給が可能な制御法といえる^{3) 4)}。

2. システム構成

図1に制御ブロック図を示す。巻線形誘導機の固定子側はSWを介して系統に接続し、回転子側は回転子側コンバータ、直流リンクコンデンサ、系統側コンバータ、単巻変圧器を介して系統と接続している。また、回転子側および系統側コンバータにはスイッチングによる高調波除去用のフィルタを接続している。固定子に接続しているスイッチSWをオンした後、固定子電圧と固定子電流から有効電力 p と無効電力 q を計算することが出来る。なお、有効電力及び無効電力の計算を(1)、(2)式に示す。

$$p = v_{su}i_{su} + v_{sv}i_{sv} + v_{sw}i_{sw} \quad (1)$$

$$q = \frac{\sqrt{3}}{3} \{v_{su}(i_{sw} - i_{sv}) + v_{sv}(i_{su} - i_{sw}) + v_{sw}(i_{sv} - i_{su})\} \quad (2)$$

固定子側の電流、電圧を検出し、(1)、(2)式の計算より有効電力 p と無効電力 q は求め、各指令値 p^* と q^* と比較し、その誤差からPI制御をおこなう。さらに、非干渉制御部で干渉成分を取り除き、望ましい電力を得るために必要とされる回転子電圧を計算する。なお、電圧は dq 座標上の成分で計算する。また、干渉成分を考慮した回転子電圧の指令値は(3)、(4)式に示す。

$$v_{dr}^* = v_p + \omega_s L_m i_{qs} + \omega_s L_r i_{qr} \quad (3)$$

$$v_{qr}^* = v_q - \omega_s L_m i_{ds} - \omega_s L_r i_{dr} \quad (4)$$

ただし、 ω_s はすべり角速度、 L_m は励磁インダクタンス、 L_r は回転子インダクタンスである。

その後、 dq -三相変換をおこない、10 kHzの三角波と比較することでPWMインバータ信号が得ら

れIPMのゲート信号とする。

3. ベクトル図

本制御システムで有効電力、無効電力を制御したとき、定常時における回転子、固定子の電圧、電流ベクトルについて説明する。

図2に次同期速度 $n = 1700(\text{rpm})$ における回転子および固定子の電圧、電流のベクトルを表示するものとする。ここで、有効電力 $P = 2(\text{kW})$ 、無効電力 $= 0(\text{Var})$ に設定しているものとする。

このとき、巻線形誘導発電機は系統と並列に接続されており、回転速度や電力に関係なく固定子側の電圧 V_1 は系統電圧と一致し、励磁電流 I_m はほぼ一定である。そのため、固定子側に流れる固定子電流 I_1 は固定子電圧と 180° 位相がずれており、その大きさは有効電力（発電出力）によって決まる。

固定子側の内部インピーダンスによる電圧降下を V_1 から引いたものが誘起起電力 E_1 である。この E_1 より巻数比とすべりから回転子側の誘起起電力 E_2 が決定する。一方、電流に着目すると固定子電流と励磁電流 I_m より回転子電流の固定子側に換算した電流 I_1' が決定する。そのため、回転子電流 I_2 が決定して、回転子側のインピーダンスより回転子側の外部電圧 E_c と誘起起電力 sE_2 の合成起電力及び E_c が決定する

4. 等価回路

巻線形誘導発電機の固定子側に換算した等価回路を図5に示す。かご形誘導機と異なり外部から回転子に加える外部電圧 E_c が存在する。かご形誘導発電機の場合はすべりが0以下になると発電機となり、回転子および固定子に流れる電流の方向は電動機の場合と逆方向になる。しかし、巻線形誘導発電機は外部電源 E_c の働きにより電流 I_2 を調整できるので、すべりが0以上の場合でも電動機の場合と逆方向に電流 I_2 を流すことができるので、発電機として動作することが可能となる。

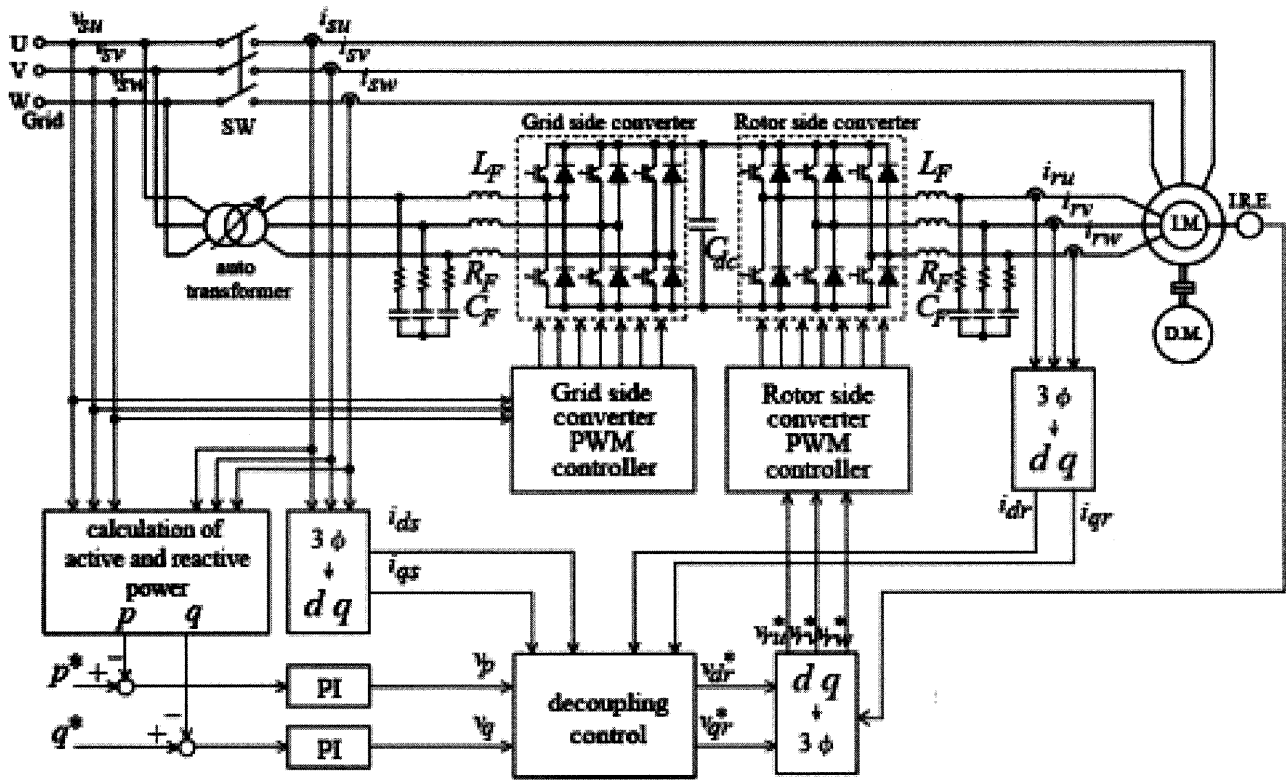


図-1 制御ブロック図

表 - 1 制御回路の定数

C_{dc}	3900 μ F
L_F	0.5 mH
R_F	3 Ω
C_F	23.1 μ F

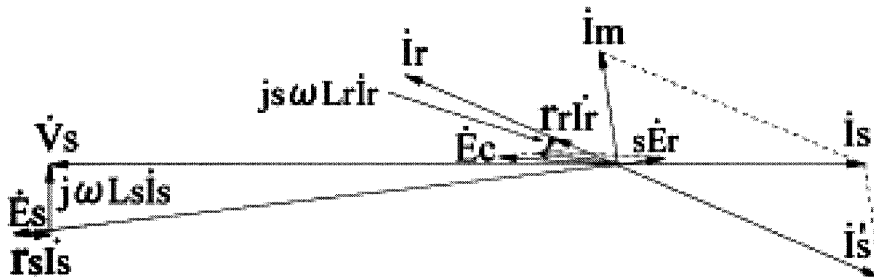


表 - 2 巻線形誘導機の定数

図-2 ベクトル図 (n=1700 rpm、P=2kW)

定格出力	2kW
極数	4
固定子電圧	200V
固定子電流	8.5A
回転子電圧	232V
回転子電流	5.18A
固定子抵抗	0.67 Ω
回転子抵抗	0.66 Ω
固定子漏れインダクタンス	4.18mH
回転子漏れインダクタンス	4.18mH
磁化インダクタンス	76.7mH
巻数比	0.82

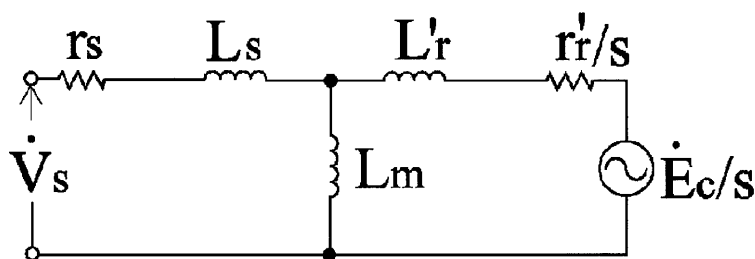
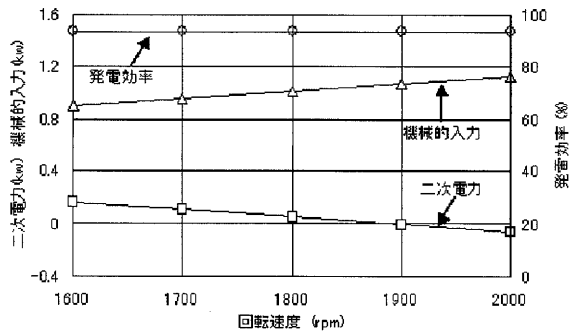
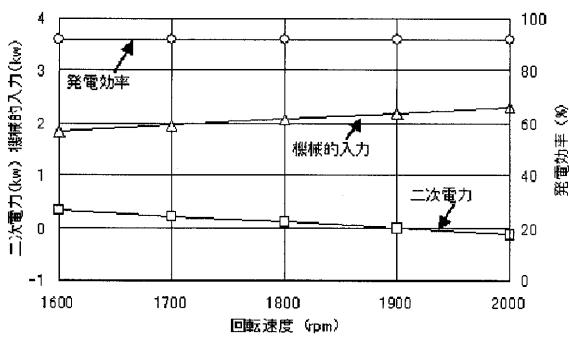


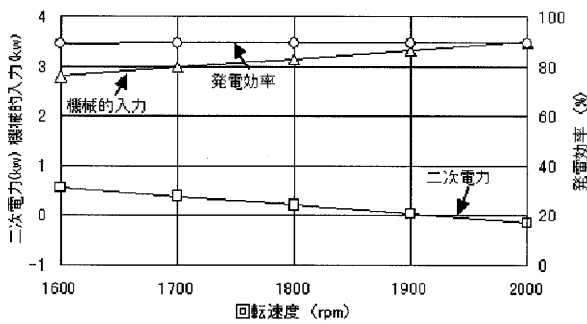
図-3 等価回路



(a) 発電出力=1(kw)

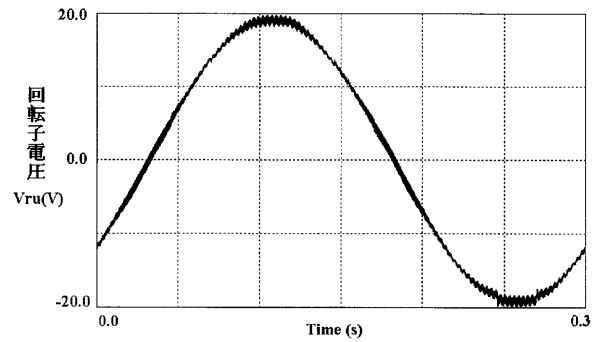


(b) 発電出力=2(kw)

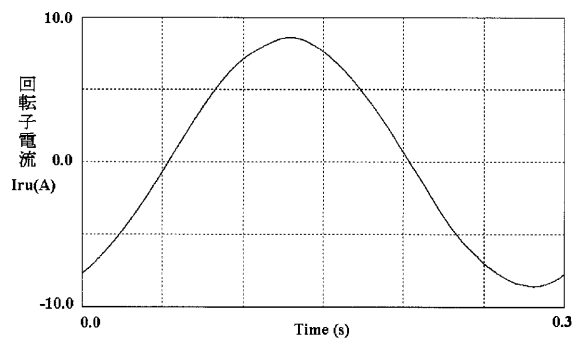


(c) 発電出力=3 (kW)

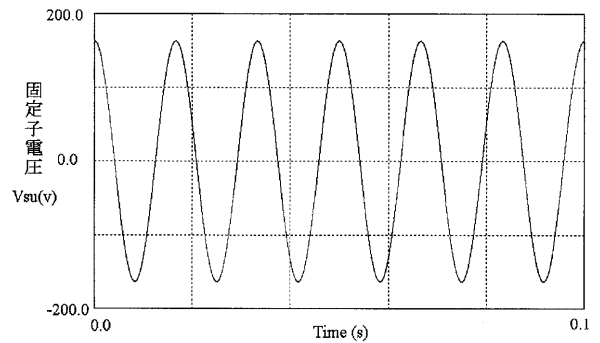
図—4. 定常特性



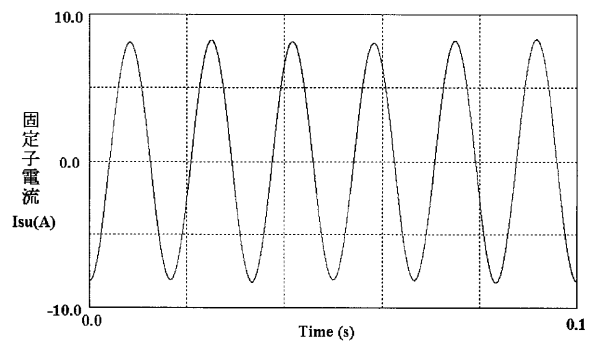
(a) 回転子電圧



(b) 回転子電流



(c) 固定子電圧



(d) 固定子電流

図—5. 固定子、回転子電圧電流波形
(n=1700rpm、P=2kW)

5. 定常特性

定常状態における各特性については、図4の(a)から(c)に示す。ここでは巻線形誘導機の回転速度が次同期速度から超同期速度まで変化したときの機械的入力、二次入力、効率との関係を示している。図4(a)は発電出力が1(kW)、図4(b)は発電出力が2(kW)、図4(c)は3(kW)における特性を示している。

それぞれの発電出力において、回転速度が次同期速度(<1800 rpm)の領域では指令の発電出力に対して機械的入力だけではエネルギーが不足するため、回転子側から不足エネルギーを供給することで足りない分を補っている。

また、同期速度(1800 rpm)では回転子は同期速度で回転するため、外部から加える電圧は直流となり、加えられるエネルギーはほとんど二次抵抗の銅損に消費される。さらに回転速度が上昇して超同期速度(>1800 rpm)の領域では、機械的入力が発電出力指令より過大になるため、余分なエネルギーは回転子側に供給され、回転子側の電源がバッテリーやコンデンサーの場合は充電される。このように機械的入力と二次入力の和は一定であり、銅損を差し引いたエネルギーが発電出力となる。また、発電出力が一定の時はベクトル図より回転子電流、固定子電流の値が一定であるため、銅損が同じ値となり、効率も同じ値となる。

6. シミュレーションによる波形

シミュレーション用ソフトPSIMを用いて $n=1700$ (rpm)における巻線形誘導発電機の固定子側、回転子側の電圧、電流波形を図5に示す。

回転子側の電圧、電流波形は三角波と比較されたPWM信号によって電圧波形は矩形波となるが、高調波成分除去用のフィルタがあるので、正弦波に近い電圧波形が回転子側に加わる。そのため、回転子電流も正弦波形である。固定子側については、系統と並列で運転されているので電圧波形は系統と一致する。また固定子電流も回転子電流が正弦波であるので正弦波となる。また、固定子側の電圧と電流を比べると回転子電圧と回転子電流が逆位相の波形

であるが、これは固定子電流を系統から固定子に流れる方向を正(電動機)としているので発電状態では固定子における電圧と電流は逆位相の関係にある。

7. まとめ

本稿では、二次励磁を調整することで、発電出力の制御が可能な発電方式である。この制御システムでは発生する電力を計算し、指令値との比較で二次電圧の振幅と位相を決定している。

このように本制御方式は二次励磁により有効電力と無効電力の制御が可能となる。今回はシミュレーションで定常特性を検討したが、今後は制御装置を組み込んだ装置を製作し、二次励磁方式の検討をおこないたい。

参考文献

- 1) S. Muller, M. Deicke, RIK, W. De Doncker: 「Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines」, IEEE Industry Applications Magazine, 8-5/6, pp26-33, (2002)
- 2) 金、中村: 「二次励磁誘導発電機を用いた孤立電源用不規則入力発電システム」、電気学会論文誌、108-D、pp1056-1062、(1988)
- 3) 宮川、篠原: 「巻線形誘導発電機風力発電システムの定常特性」、電気学会全国大会、No4-121、(2004)
- 4) 宮川、篠原: 「巻線形誘導発電機風力発電システムの出力制御」、電気学会産業応用、3-69、(2005)