

巻線形誘導機の系統並列時の突入電流抑制法と そのシミュレーション

宮川 隆寛* 篠原 勝次** 猿喰 考倫***

SUPPRESSION OF INRUSH CURRENTS OF A WIND POWER GENERATION
SYSTEM USING A WOUND ROTOR INDUCTION GENERATOR INTER-
CONNECTING WITH DISTRIBUTION LINE AND ITS SIMULATION

Takahiro MIYAKAWA, Katsuji SHINOHARA, and Takamichi SARUBAN

Recently, the utilization of the natural energy, such as the solar or wind energy utilization, has been a great wish of the human. Further more, the necessity of the development of the natural energy become more increased due to the limited fossil fuel and the environmental problems. In this paper, we describe about a wind power generation system using a wound rotor induction generator. Especially, we deal with the control about suppression of inrush current or active power and reactive power.

Keywords: wind power generator, induction generator, inrush current, converter

1. はじめに

近年、CO₂ 排出の規制や電力需要の急速な伸びに関連して、資源エネルギーの有効活用という問題が浮上してきた。特に太陽光や風力エネルギーを利用した発電方式が注目されるようになった。本研究では風力発電の問題を扱い、特に巻線形誘導機を用いて系統並列を行うときに生じる問題について理論的、技術的な観点から取り扱うものとする。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。このうち同期機は可変速制御方式であるが、発電出力を直流に変換し、インバータにより交流に変換する AC-DC-AC 方式が

2004年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻 (社会人)

(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

*** 博士前期課程電気電子工学専攻

一般的であり、設備の大型化に伴い、コストの増加につながる。このため、本論文では可変速で系統並列が可能な巻線形誘導機による発電方式のなかで二次励磁を用いた風力発電システムを取り上げる。二次励磁方式では一次側の周波数や電圧の大きさを一定に調整するため二次角度および二次電流を調整しておこなう方式が多いが^{1) 2)}、本論文では発電出力を制御するため二次電圧を調整している³⁾。そして、系統並列時に生ずる突入電流や電圧降下の影響を抑えた対策を施すものとする。さらに定常時における発電出力を制御するため任意の回転数における有効電力と無効電力を制御し、力率が1.0となる理想的な発電出力が得られるような制御を試みるものとする。なお、動作確認のため電力解析用ソフトである PSIM を用いてシミュレーションをおこなった。さらに、風速が変化したときの発電出力や効率、力率の変化に着目して解析を試みた。これらの結果から、二次励磁による発電出力や効率

は速度に関係なく一定であるため、風力発電に適した制御法であることが確認された^{4) 5) 6)}。

2. システム構成

図—1に制御ブロック図を示す。また、制御回路における定数、および巻線形誘導機における定数は表—1および表—2に示すものとする。巻線形誘導機の固定子側は系統並列用スイッチ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、系統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式を(1)、(2)式に示す。

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

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

電流、電圧を検出し、計算より有効電力 p と無効電力 q は求まり、各指令値 p^* 、 q^* と比較し、その誤差の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、 v_{dr}^* 、 v_{qr}^* を(3)式に示す。

$$\begin{aligned} v_{dr}^* &= v_p + \omega_s L_m i_{qs} + \omega_s L_r i_{qr} \\ v_{qr}^* &= v_q - \omega_s L_m i_{ds} - \omega_s L_r i_{dr} \end{aligned} \quad (3)$$

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(回転子漏れインダクタンス+励磁インダクタンス)である。定常状態では電力の制御のみ必要であり、(3)式の電圧が電力制御のための指令値である。しかし、系統並列時においては過大な突入電流が流

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

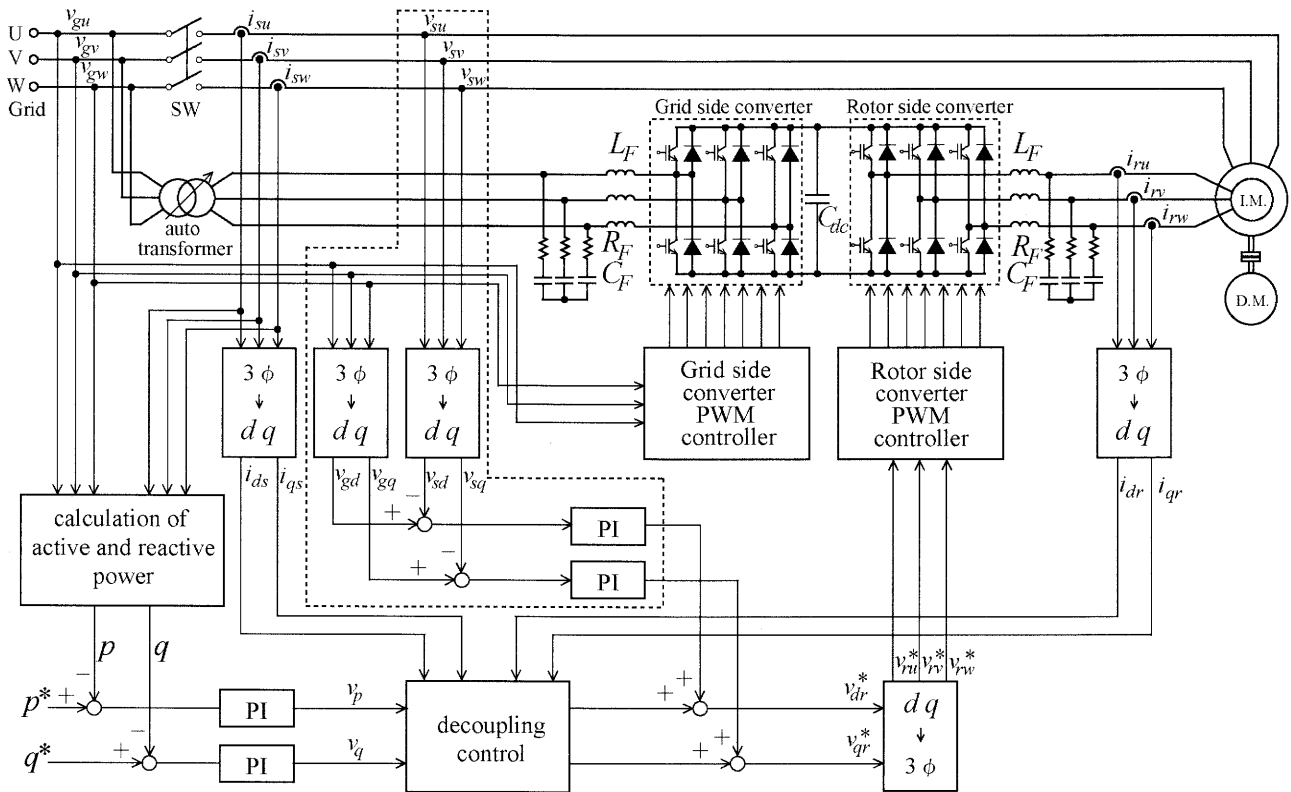
表—2 巻線形誘導機の定数

定格出力	2.2 kW
極数	6
固定子電圧	220V
固定子電流	11.0A
回転子電圧	39.2V
回転子電流	34.1A
固定子抵抗	0.765 Ω
回転子抵抗	0.832 Ω
固定子漏れインダクタンス	2.92 mH
回転子漏れインダクタンス	2.92 mH
励磁インダクタンス	39.6 mH
巻数比	5.19

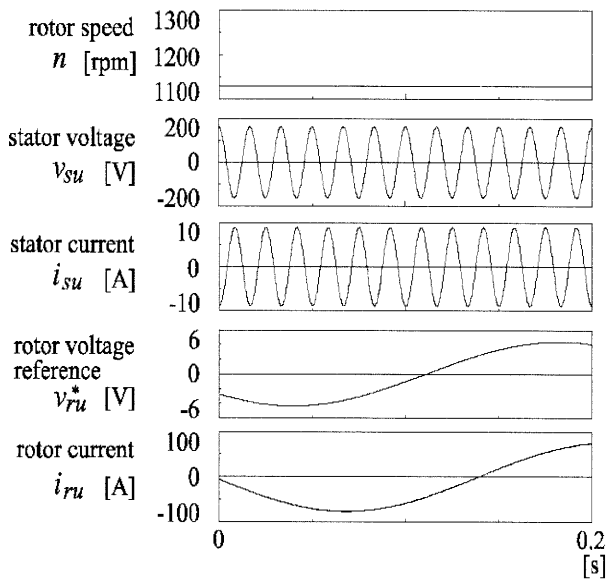
れるので、突入電流抑制機能が必要となり、図—1の破線で囲った部分で、この制御をおこなっている。この部分の動作はスイッチSWをオンして系統並列になる前に、系統側の電圧と巻線形誘導発電機の固定子側の電圧の位相、振幅の同期をとると、系統並列時には電位差がないので、固定子側に過大な突入電流が流れない。このため、突入電流を抑制するための dq 座標上の回転子電圧と(3)式での回転子電圧を加え、 dq 座標における回転子電圧の指令値 (v_{dr}^* 、 v_{qr}^*) とする。次に dq -三相変換し、2 kHz の三角波と比較して回転子側のスイッチングを決定する。なお、スイッチ SW がオンする以前は p^* および q^* を 0 としておくとも有効電力 p と無効電力 q も 0 ゆえ、系統並列時の突入電流の抑制の制御のみがおこなわれる。また、系統側コンバータは超同期動作時に、回転子電流が系統側に流れるように系統側と同期している。

3. 突入電流抑制シミュレーション

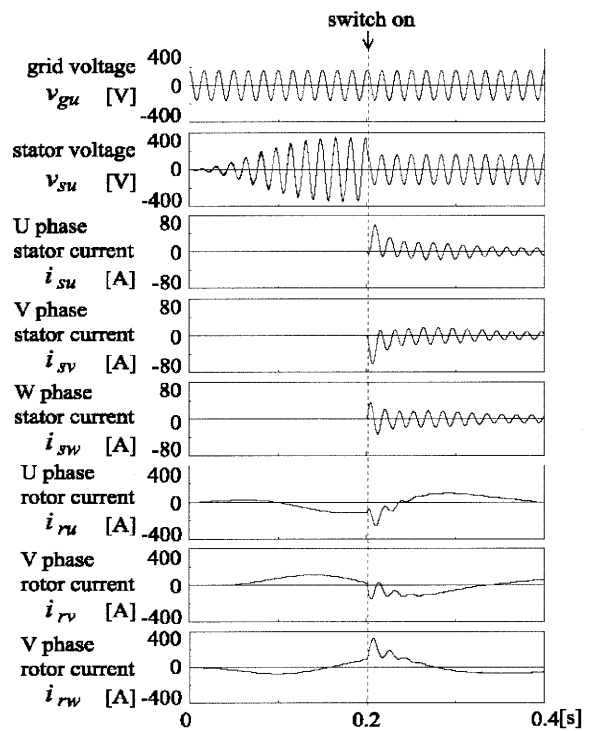
定常発電状態のシミュレーションを図—2に示す。回転速度 1130rpm (すべり 0.0583) であり、



図—1 制御ブロック図



図—2 定常状態波形



図—3 系統並列時の突入電流

同期速度より低い次同期速度で運転中の波形であるが、二次励磁による電力が回転子に加わることで発電が可能である。また、固定子電圧と固定子電流は逆位相の波形であるが、固定子電流は系統から固定子に流れる方向を正としているので発電状態では電圧と逆位相の関係にある。図-3は系統並列時の突入電流の対策を施してない制御回路で固定子と系統を接続したときの電流を示したものである。固定子と系統電圧の間に大きな電位差があるため、固定子側に過大な電流が流れ、回転子にも大きな電流が流れている。他方、図-4は突入電流の対策を施した制御回路(図-1)における系統並列時のシミュレーションを示したものである。図-4(a)は $t = 1.0$ sで系統並列している。この波形は、固定子電圧が系統並列の直前から系統電圧と同期しており、突入電流が抑制されていることが確認される。また、図-4(b)は図-4(a)の突入電流抑制前後の拡大図を示しており、系統並列後は速やかに定常状態に移行していることが確認できる。

4. 制御システムにおける諸特性

図-5の(a)から(c)は提案したシステムの巻線形誘導発電機の回転子電流が変化したときの発電出力、効率、力率の特性を計算し、図示したものである。

図-5(a)は回転速度が1130rpm(すべり 0.0583、次同期速度)のときの特性を表し、図-5(b)は回転速度が1200rpm(すべり 0.0、同期速度)のときの特性を、図-5(c)は回転速度が1270rpm(すべり -0.0583、超同期速度)のときの特性を表す。図-5より各特性はほぼ一致しており、回転速度が変わっても特性は変わらないことが確認できる。また、回転子電流が増加すると発電出力も増加する。このことは、回転子側から固定子側への電力が増加するため発電出力が増加するものと思われる。しかし、回転子電流が50Aを超えると内部の損失が増え、効率は低下する。また、無効電力は0になるよう制御されており、力率は100%を維持している。

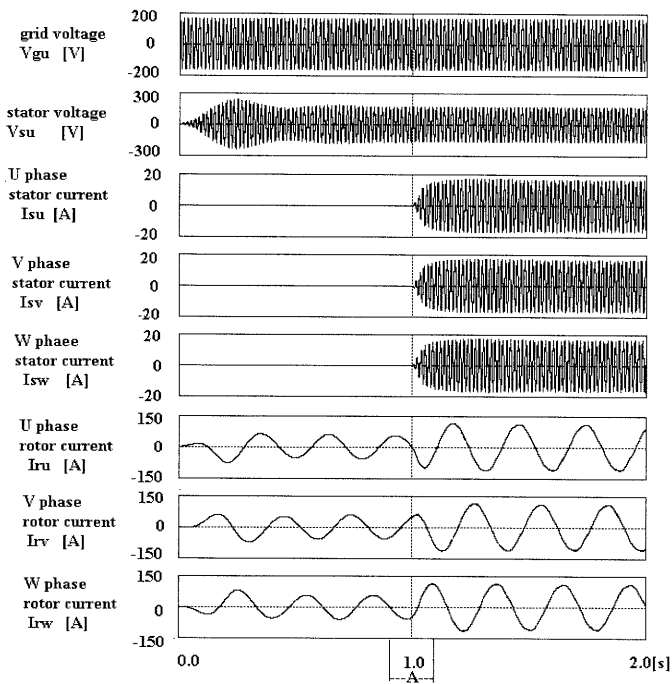
5. まとめ

本稿では、系統並列前に固定子電圧を系統と位相、振幅を一致するように調整し、系統側の電位差をなくすことで突入電流を抑制ができた。また、定常時には、二次励磁を調整することで発電電力の調整が可能と

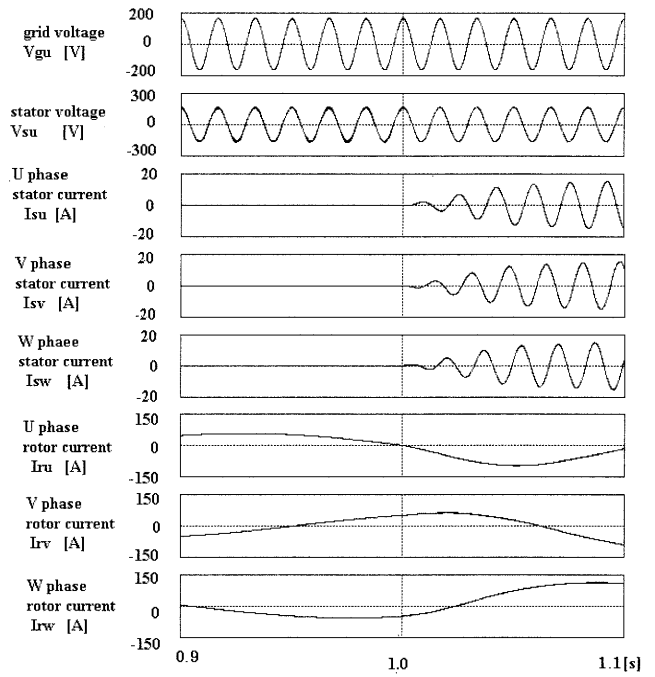
なり、風力発電に適した制御システムであることが確認できた。

参考文献

- 1) 佐藤、常広:「巻線形誘導機を用いた風力発電システム」、電学誌、114-D、pp.778-783(1994)
- 2) 大西、宮地:「自然エネルギー利用における不規則波シミュレータ駆動二次励磁誘導発電機の適用」、シミュレーション、第6巻第1号(1986)
- 3) 篠原、猿喰:「巻線形誘導機による風力発電システムの系統投入時の突入電流抑制法」、電気学会全国大会、第5分冊、pp.154-155(2004)
- 4) 宮川、篠原、猿喰:「巻線形誘導発電機風力発電システムの系統並列時の突入電流抑制」、電気学会研究会資料、SPC-04-106(2004)
- 5) 宮川、篠原、猿喰:「巻線形誘導発電機風力発電システムの系統並列時の突入電流抑制シミュレーション」、電気学会産業応用部門大会、3-65(2004)
- 6) Miyakawa, Shinohara, and Saruban 「Output Characteristics of Wind Power System Using a Wound-Rotor Machine」、Record of 2004 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, 04-1A-06(2004)

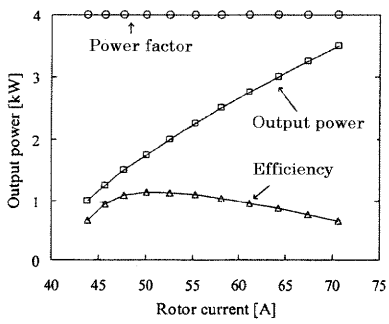


(a) 電圧、電流波形

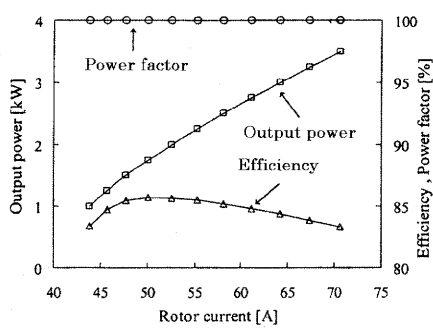


(b) Aの拡大波形

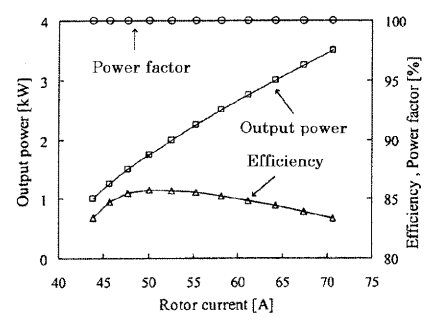
図—4 突入電流抑制時波形



(a) $n = 1130\text{rpm}$



(b) $n = 1200\text{rpm}$



(c) $n = 1270\text{rpm}$

図—5 発電、効率、力率の特性