

PWM 変換器を直列接続した風力発電システムにおける 誘導発電機系統並列時の突入電流抑制法

山田 洋明*

A Novel Method of Suppressing the Inrush Current in Wind Power Generation Systems Using Series-connected PWM Converters

Hiroaki Yamada*

Abstract– This paper proposes a new method of suppressing inrush current under the connecting to the grid in wind power generation systems using the PWM converters. The PWM converters are connected to the grid in series. The PWM converter behaves as a resistor for a source current. The basic principle of the proposed inrush current suppressor is discussed, and then confirmed by digital computer simulation using PSCAD/EMTDC. Simulation results demonstrate that the inrush current can perfectly suppress by the proposed inrush current suppressor.

キーワード：風力発電，誘導発電機，突入電流，PWM 変換器

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

1. まえがき

近年、環境問題に対する意識の高揚から再生可能なエネルギーが注目されており、各国で風力発電システムの導入が進められている。また、日本においては 1996 年に電力が自由化されている。IPP (Independent Power Producer) などが再生可能エネルギーを利用した発電システムを大量に導入されることで、電気事業者側の信頼度維持に関する制御能力もかなり低下すると考えられる⁽¹⁾。風力発電システムは大容量化が可能であり、日本ではグリーン電力制度や RPS(Renewables Portfolio Standard) 制度の施行により、導入が進んでいる。しかしながら、風力が変動するために頻繁に系統解列および並列が行われるが、誘導発電機を用いた風力発電システムでは系統並列時に突入電流が発生する。一般に、風力発電システムは系統の末端に接続されることが多く、突入電流の発生は電力系統の瞬時電圧低下など電力品質に影響を及ぼす問題がある。系統並列時の突入電流を抑制する方法として、かご形誘導発電機を用いた風力発電システムでは、一般にソフトスタータを用いたシステムが広く用いられている⁽²⁾。実システムではソフトスタータの動作期間は 1~3s 程度であり、この期間に発生する高調波電流は無視できない。高調波電流を発生しない突入電流抑制法として、誘導発電機と並列に接続されたキャパシタに対して直列に外部抵抗を接続する方法が提案されている⁽³⁾。しかしながら、この方法では突入電流抑制時に抵抗における電力損失を生じる。

本稿では、電圧形 PWM (Pulse Width Modulation) 変換器を直列接続し、電源電流に対して PWM 変換器を等価的

に抵抗として動作させる突入電流抑制法を提案する。提案する突入電流抑制法では PWM 変換器が抵抗として動作するため、突入電流抑制時の有効電力を再生できる点に特長がある。また、ソフトスタータを用いないために高調波電流を生じない。

本稿では、はじめに提案する突入電流抑制装置のシステム構成について述べる。次に、電力系統過渡解析シミュレータ PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design / Electromagnetic Transients including DC) を用いた計算機シミュレーションにより、従来の問題点である誘導発電機を系統並列する際の突入電流現象とソフトスタート時の高調波電流を確認する。最後に、提案する突入電流抑制法の有効性を計算機シミュレーションにより確認する。

2. 提案する突入電流抑制法

図 1 に、提案する直列接続した PWM 変換器を用いた突入電流抑制装置の主回路構成図を示す。PWM 変換器は、電力系統側と誘導発電機の間にも各相ごとに直列に接続する。PWM 変換器の出力側には、スイッチングリップ抑制用の LPF (Low-Pass Filter) を接続している。PWM 変換器の各相ごとの出力電圧指令値 v_{Out}^* は、各相の電源電流 i_S を検出し、検出した電流に制御ゲイン K を乗算することにより決定する。したがって、出力電圧指令値 v_{Out}^* は次式となる。

$$v_{Out}^* = i_S \cdot K \dots \dots \dots (1)$$

上式から、PWM 変換器は電源電流 i_S に対して等価的に $K[\Omega]$ の抵抗として動作し、誘導発電機を系統並列する際の突入電流を抑制する。

図 2 に、提案する突入電流抑制装置の制御ブロックを示

* 釧路工業高等専門学校 電子工学科

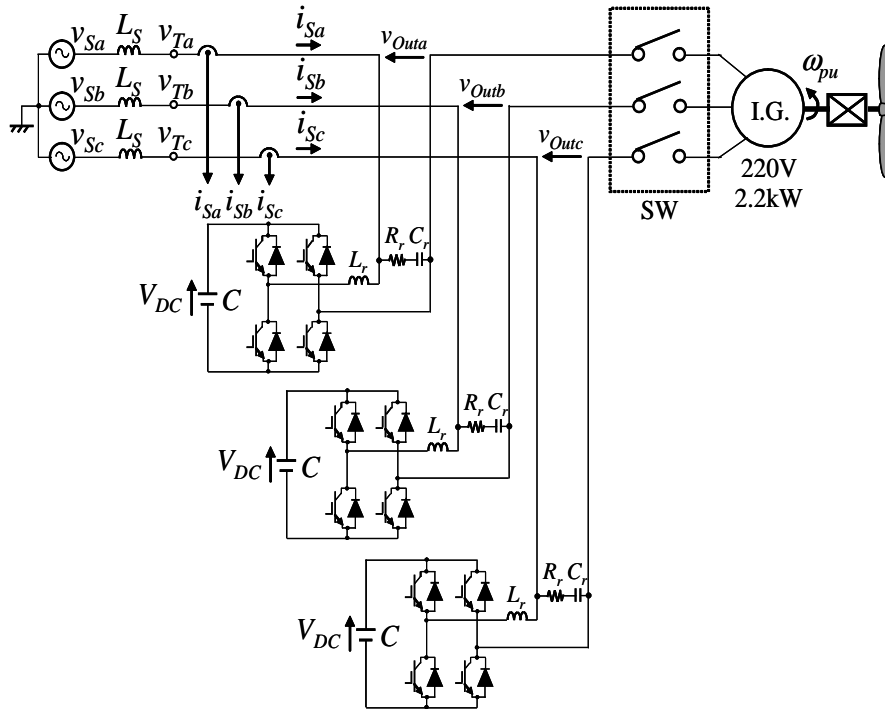


図 1 直列接続した PWM 変換器を用いた誘導発電機系統並列時の突入電流抑制装置の主回路構成図

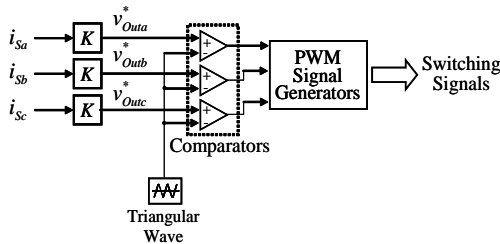


図 2 提案する突入電流抑制装置の制御ブロック

す。各相の電源電流を検出し、制御ゲイン K を乗算して出力電圧指令値を決定する。この指令値と三角波を比較し、PWM 変換器の制御信号を決定する。誘導発電機の回転速度が同期速度に達するとスイッチ SW をオンとして、誘導発電機を系統並列する。PWM 変換器は系統並列前から零電圧を出力させておき、電流が流れると電流に対して $K[\Omega]$ の抵抗として動作する。制御ゲインは、誘導発電機投入直後を最大として、約 300ms の期間に線形的に減少させる。突入電流を抑制後、 $K=0$ として PWM 変換器を短絡状態とする。

3. シミュレーション結果

提案する突入電流抑制法の有効性を確認するために、PSCAD/EMTDC を用いた計算機シミュレーションを行う。表 1 に、風車の仕様を示す。本論文におけるシミュレーションでは、風車の慣性モーメントを考慮している。かご形誘

導発電機は、定格 220V、60Hz、2.2kW のものを用いる。電源は、線間電圧実効値 200V、周波数 60Hz とした。電源側インピーダンスは、定格インピーダンスの 5% を考慮している。

(3・1) かご形誘導発電機の系統並列時の突入電流

図 3 に、かご形誘導発電機を用いた風力発電システムの構成図を示す。誘導発電機を用いた風力発電システムでは、風力が変動するために頻繁に系統並列および解列が行われる。誘導発電機は系統から励磁電流の供給が必要であるため、系統並列時に定格電流の 6 倍程度の突入電流が発生することが知られている⁽⁴⁾。風力発電システムは、風況の強い地域に設置されることから、配電線長の長い線路の末端に設置されることが多く、系統並列時の突入電流により瞬時的に電圧が低下する。誘導機に全電圧を印加する際の過渡電流 $i(t)$ は、電源電圧 $v_S = \sqrt{2}V_S \cos(\omega t + \pi)$ とすると、電源側インピーダンスを考慮して次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$i(t) = -\frac{\sqrt{2}V_S}{Z_S + Z_M} \{ \cos(\omega t + \phi) - \cos \phi \} e^{-\alpha t} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 α は

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{x_1 r_2 + x_2 r_1}{x_1 x_2 - x_m} \dots \dots \dots (3)$$

であり、 α の逆数は誘導機の短絡過渡時定数である。 Z_M は、誘導機の合成インピーダンスである。このような突入電流の発生により、受電端電圧の瞬時的な低下を引き起こし、系統の電力品質を低下させる原因となる。

表 1 風車の仕様

翼	r [m]	2.2
空気密度	ρ [kg/m ³]	1.204
ピッチ角	β [°]	10
慣性モーメント	J [kgm ²]	0.44
定格出力	P_w [kW]	2.2

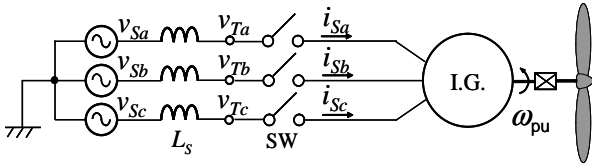


図 3 誘導発電機を用いた風力発電システム（直入れ）

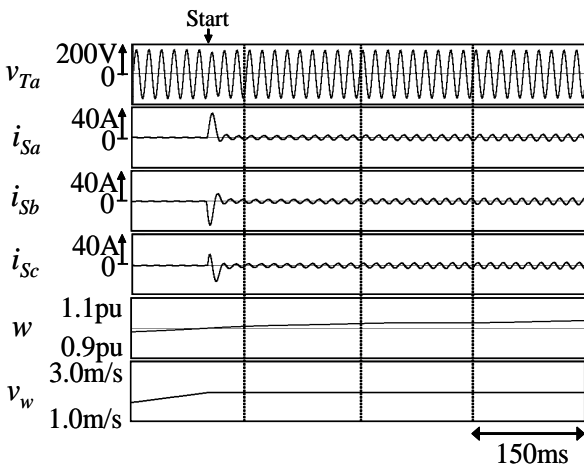


図 4 誘導発電機の系統並列時における突入電流発生時のシミュレーション波形

図 4 に、突入電流発生時のシミュレーション波形を示す。シミュレーション波形は上から、a 相における受電端電圧 v_{Ta} 、各相の電源電流 i_{Sa} 、 i_{Sb} 、 i_{Sc} 、誘導発電機回転速度 ω 、風速 v_w を示している。誘導発電機回転速度が同期速度に到達すると、スイッチ SW をオンとして誘導発電機を系統並列している。この系統並列の際に図 4 に示すように最大で約 35A に到達する突入電流が生じている。また、電源側インピーダンスにより受電端電圧が突入電流発生時に低下していることが確認できる。このような瞬時電圧低下は、工場における生産設備の停止を引き起こす事例が報告されている⁶⁾。

〈3・2〉 ソフトスタート時の高調波電流 誘導発電機を系統並列する際の突入電流の発生を防止するために、ソフトスタータを用いた突入電流抑制法が広く用いられている。図 5 に、ソフトスタータを用いた風力発電システムの構成図を示す。ソフトスタータは逆並列接続したサイリスタから構成される。ソフトスタータは誘導発電機の回転速度が同期速度の 95% に到達すると動作を開始し、誘導発電機を系統に並列接続する⁶⁾。サイリスタの制御角は、系統

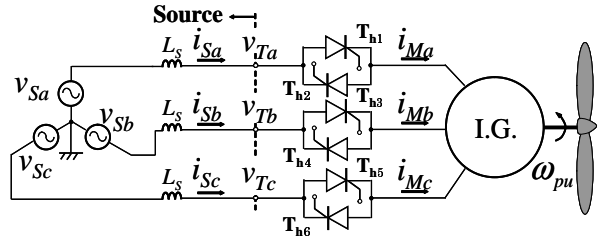


図 5 ソフトスタータ付き風力発電システム

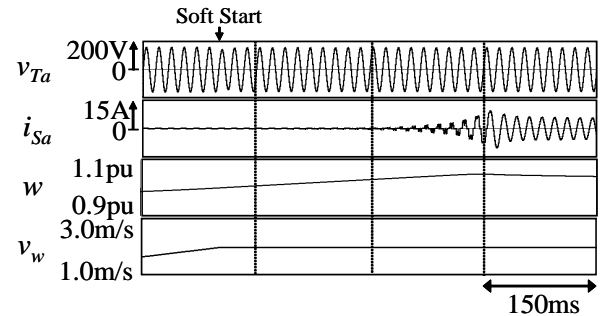


図 6 ソフトスタート時のシミュレーション波形

並列直後から 0.2s 間で 180 度から 90 度まで線形的に変化させる。

図 6 に、ソフトスタート時のシミュレーション波形を示す。ソフトスタータにより、誘導発電機を系統並列する際の突入電流が抑制され、最大で約 8A 程度の電流となっている。しかしながら、ソフトスタータを構成するサイリスタのスイッチングにより、電源電流に高調波成分が重畳していることが確認できる。このような高調波電流は電源側で反共振を引き起こし、電源品質の低下をまねくだけでなく、電力系統上の進相キャパシタの焼損などを引き起こす原因となる。一般的なシステムでは連系用インダクタを直列に接続することにより高調波電流を低減しているが、率が悪くなる問題がある。

〈3・3〉 提案する突入電流抑制法 提案する突入電流抑制法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行った。表 2 に、システムの回路定数を示す。PWM 変換器の直流電源には原理確認を目的として直流電圧源を用いた。また、PWM 変換器の出力側に接続するスイッチングリプル抑制用フィルタの回路定数は、カットオフ周波数が約 2kHz となるように各定数を決定した。制御ゲイン K は、系統並列時の電源電流が誘導発電機の定格電流値を超えないように 22Ω とした。

図 7 に、提案する突入電流抑制法を用いた場合のシミュレーション波形を示す。図 7 において、 v_{Outa} は a 相における PWM 変換器出力電圧である。誘導発電機を系統並列する前は PWM 変換器が常に動作し、零電圧を出力させているが、出力電圧にわずかに電圧リプルが生じている。この状態で、誘導発電機回転速度が同期速度に到達すると同時に、

表 2 図 1 の回路定数

電源電圧	V_S [V]	200
電源周波数	f [Hz]	60
電源側インピーダンス	L_S [mH]	2.9
直流電圧源	V_{DC} [V]	400
リップルフィルタリアクトル	L_r [mH]	5.0
リップルフィルタキャパシタ	C_r [μ F]	1.0
リップルフィルタ抵抗	R_r [Ω]	20

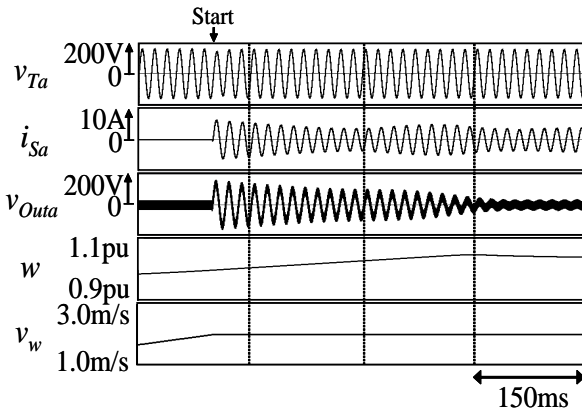


図 7 提案する突入電流抑制法を用いた場合のシミュレーション波形

スイッチ SW をオンとして誘導発電機を系統並列し、電源電流に比例した電圧が出力されているため、PWM 変換器が等価的に 22Ω の抵抗として動作する。シミュレーション結果から、系統並列直後の電源電流は約 6.3A であり、定格電流値以下に電流を抑制できていることが確認できる。また、誘導発電機系統並列直後から制御ゲインを可変としているが、制御ゲイン $K=0$ となると PWM 変換器から零電圧が出力されている。このため、PWM 変換器は見かけ上、短絡状態となる。

提案する突入電流抑制法における変換器容量を算出する。PWM 変換器出力電圧最大値 V_{Out} は 166V、電源電流最大値 I_S は 6.3A であり、変換器容量は次式により算出できる。

$$\begin{aligned}
 S_p &= 3 \cdot \frac{V_{Out}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_S}{\sqrt{2}} \\
 &= 3 \cdot \frac{166}{\sqrt{2}} \cdot \frac{6.3}{\sqrt{2}} \\
 &\approx 1.6\text{kVA} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

したがって、提案する突入電流抑制法を用いた場合、定格発電機容量の約 73% の変換器容量が必要であることが分かる。

先に文献(7)で提案したソフトスタート時の高調波電流補償法と本論文で提案する突入電流抑制法について比較する。提案する突入電流抑制法は高調波電流を全く生じない点や制御法で利点があるが、パワー半導体デバイスを 12 個 (1 相につき 4 個) 必要であるだけでなく、変換器容量が増

大する点が実用化に向けて課題となる。

4. むすび

本論文では、電圧形 PWM 変換器を直列接続し、電源電流に対して PWM 変換器を等価的に抵抗として動作させる突入電流抑制法を提案した。

はじめに電圧形 PWM 変換器を電源と誘導発電機の間で直列接続する突入電流抑制法を提案した。次に、電力系統過渡解析シミュレータ PSCAD/EMTDC を用いた計算機シミュレーションにより、従来の問題点である誘導発電機を系統並列する際の突入電流現象を確認した。計算機シミュレーション結果から、定格 2.2kW の発電機を用いた場合、定格電流の約 5 倍となる約 35A の突入電流が発生し、受電端電圧の瞬時低下を確認した。次に、ソフトスタータを PSCAD/EMTDC 上で構成し、計算機シミュレーションを行った。シミュレーション結果から、ソフトスタータによる突入電流の抑制効果、および、ソフトスタート時に高調波電流が発生することを確認した。次に、提案する突入電流抑制法の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。シミュレーション結果から、提案する突入電流抑制法により突入電流を全く生じることなく、定格電流値以下に電流を抑制しながら誘導発電機を系統並列できることを確認した。提案手法の場合、突入電流および高調波電流を全く生じない点で従来法より有利となることを明らかにした。今後の課題として、システムの始動法の検討および変換器容量の低減が挙げられる。

文 献

- (1) 長谷川淳・斉藤浩海・大山力・北裕幸・三谷康範:「電力系統工学」, オーム社, p.130, 2002
- (2) 甲斐隆章:「風力発電の系統連系について」, 電学誌, **124**, No. 1, pp. 27-31, 2004
- (3) Torbjörn Thiringer, "Grid-Friendly Connecting of Constant-Speed Wind Turbines Using External Resistors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.17, pp. 537-542, 2002
- (4) 佐々木裕治・原田憲朗・甲斐隆章・佐藤達則:「風力発電システムの系統並列時の瞬時電圧低下とその対策について」, 電学論 B, **120**, No. 2, pp. 180-186, 2000
- (5) 猪狩武尚:「電気機械理論」, コロナ社, pp.144-146, 1977
- (6) 坂本幸治・阿部実:「瞬時電圧低下現象」, 電学誌, **128**, No. 9, pp. 598-601, 2008
- (7) Hiroaki Yamada, Eiji Hiraki, Toshihiko Tanaka, "A New Method of Compensating Harmonic Currents for Wind Power Generation Systems with the Soft Starter Using a Hybrid Active Filter", 電学論 D, **128**, No. 7, pp. 885-891, 2008