

PM 発電機を電源とする PWM 整流器における 外乱オブザーバを用いた DC 電圧制御性能の向上

学生員 星野 哲馬 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Study about an Improvement of DC-Voltage Control Performance Using a Disturbance Observer for a PWM Rectifier and a PM Generator

Tetsuma Hoshino, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes an improve method of DC voltage control performance for a PWM rectifier and a PM generator using a disturbance observer. Reactance and its time constant of the PM generator are about ten times large as a boost-up reactor used for grid interconnection. In order to correct dead-time error voltage, the PM generator system should use disturbance observer instead of high-gain current regulator. As the result, performance of the system is obtained by the disturbance observer.

キーワード : PM 発電機, 外乱オブザーバ, デッドタイム

Keywords : PM generator,, disturbance observer, dead-time

1. はじめに

近年, PWM 整流器は PM 発電機と組み合わせ, 風力発電やハイブリッド EV における機械-電気変換の効率向上に盛んに用いられている。しかし, PWM 整流器の DC リンクキャパシタは, 入出力の変動に対する電圧リップルを低減するために大容量の電解コンデンサが使用されており, 屋外で使用する機器にとって耐環境性の問題が生じる。

一方, DC リンクに固形誘電体を用いたキャパシタを用いて耐環境性を向上させる試みがあるが, 単位体積当たりのキャパシタンスが低下し, 入出力の変動に対して電圧リップルが大きくなるため, 制御性能を向上させる必要がある。しかし, 入力 PM 発電機の場合は同期リアクタンスが大きく, 電流制御性能の面で不利となる。特に, デッドタイムによる誤差電圧を補償する場合, 電流制御器のゲインを高く設定するが, PWM 整流器が出力可能な電圧は DC リンク電圧により制限されるため, 補償性能には限界がある。

本論文では, 電流制御器のゲインを高める代わりに, 外乱オブザーバを用いた電圧誤差補償を行う。同様な手法として電動機のデッドタイム誤差補償に外乱オブザーバを用いるものがあるが⁽¹⁻²⁾, 本論文では PWM 整流器を対象とする。結果, シミュレーションにより外乱オブザーバを用いた手法の有効性を確認したので報告する。

2. 原理

〈2・1〉 PM 発電機と組み合わせた PWM 整流器

図 1 に PWM 整流器と PM 発電機を組み合わせた場合の回路を示す。PM 発電機は 3 相電圧源と同期リアクタンスの組

み合わせとみなせ, 昇圧リアクトルとして PM 発電機の同期リアクタンスを用いる。

PM 発電機の同期リアクタンスは, 一般の電源系統を対象とした PWM 整流器で使用する昇圧リアクトルに比べ 10 倍以上大きく, 電流制御性能が相対的に悪化する。比較の目安としてリアクトルの時定数 t_L を(1)式から求める。

$$t_L = \frac{I_n}{V_n} L \dots\dots\dots(1)$$

ただし, V_n は定格電圧, I_n は定格電流である。

一般の電源系統に対する昇圧リアクトルの値は $\%X_L = 5\%$ 程度に設計し, 200V, 50Hz, 1kW の系においては 6.37mH 程度となる。一方, PM 発電機の同期リアクタンスを昇圧リアクトルとして用いる場合, $\%X_L = 50\%$ 以上が一般的であり, 200V, 50Hz, 1kW の系においては 63.7mH 以上となる。

ここで, 同期リアクタンスの時定数を求めると 1.59ms となり, 100rad/s の応答しか期待できない。よって PM 発電機と PWM 整流器を組み合わせるときは, 電流制御器の応答を相当に下げることが必要。その結果, 電流制御器の応答は

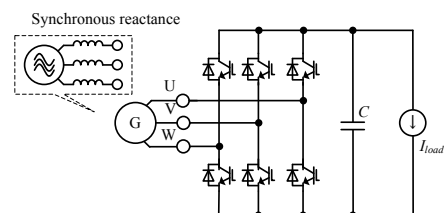


図 1 PM 発電機と組み合わせた PWM 整流器
Fig. 1. A PWM rectifier for a PM generator.

表 1 PWM 整流器のパラメータ
Table 1. Parameters of a PWM rectifier.

AC-side ratings	200V, 2.89A, 1kW
Boost-up reactor	63.7mH
ACR parameters	$K_p=53.5, T_i=2.33 \times 10^{-3}$
DC-side ratings	360V, 2.78A, 1kW
DC-link capacitor	159 μ F
AVR parameters	$K_p=0.0287, T_i=14.1 \times 10^{-3}$
Carrier frequency	10kHz
Dead-time period	6 μ s

一般的な PWM 整流器で昇圧リアクトル時定数 0.159ms (1000rad/s) を用いた場合に比べ、10 倍以上遅い応答となるので、デッドタイム誤差電圧の補償効果は期待できない。
 〈2.2〉外乱オブザーバを用いた制御性能向上

図 2 に PWM 整流器を制御電圧源 V_{rec} とおいた場合の等価回路を示す。同期インダクタンス L と発電機電圧 V_G 、PWM 整流器の出力電圧 V_{rec} の関係は(2)式で表される。

$$V_{rec} = sLI_L + V_G \dots\dots\dots(2)$$

外乱オブザーバは(2)式に基づいて誤差電圧を推定する。 V_{rec} と I_L の関係から誤差電圧推定値 ΔV_{est} は(3)式で推定できる。

$$\Delta V_{est} = \frac{1}{1+sT_f} (V_{rec}^{**} - sL_c I - \hat{V}_G) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 T_f は外乱オブザーバの時定数、添字の c はコントローラのパラメータ、 \hat{V}_G は発電機電圧の推定値を示す。図 3 には外乱オブザーバを適用した電流制御系のブロック図を示す。

3. シミュレーション結果

表 1 に PWM 整流器に用いるパラメータを示す。なお、発電機部は 3 相交流電源と昇圧リアクトルで模擬し、DC キャパシタの時定数は昇圧リアクトルの時定数の 10 倍とした。電圧制御器 (AVR) のパラメータは制動係数 $\zeta=0.7$ 、固有角周波数 $\omega_n=100\text{rad/s}$ とし、同期リアクタンスの時定数に合わせ設計した。電流制御器 (ACR) のパラメータは $\zeta=0.7$ 、 $\omega_n=600\text{rad/s}$ とし、AVR に対し固有角周波数が 6 倍離れるよう設計した。また、外乱オブザーバの時定数は $T_f=0.167\text{ms}$ とし、AVR の固有角周波数に対し十分短く設定した。

図 4 に外乱オブザーバを適用することによる電圧制御性能の改善を示す。DC 側電圧を 360V 一定に制御を行い、0.1s~0.2s および 0.4s~0.5s にて発電機から DC 側へ力行、0.2s~0.4s にて発電機へ DC 側から回生を行った。また、負荷の最大値は $\pm 100\text{W}$ をピークとする三角波を与えた。なお、発電機の力率は 1 となるよう制御した。

図 4(a)に外乱オブザーバによる補償を行わない場合の結果を示す。力行と回生の切り替わり点である 0.2s と 0.4s において、4V 程度の振動が発生している。この点では、電流振幅が非常に小さく、デッドタイム誤差電圧の影響を大きく受ける。そのため、ACR だけでは補償不足となっている。

図 4(b)に外乱オブザーバによる補償を行った場合の結果を示す。力行と回生の切り替わり点での振動は 0.3V 以下に抑えられており、外乱オブザーバによりデッドタイム誤差電圧が効果的に補償されている。

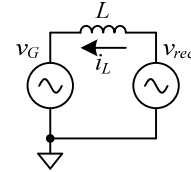


図 2 PWM 整流器の等価回路
Fig. 2. An equivalent circuit of a PWM rectifier.

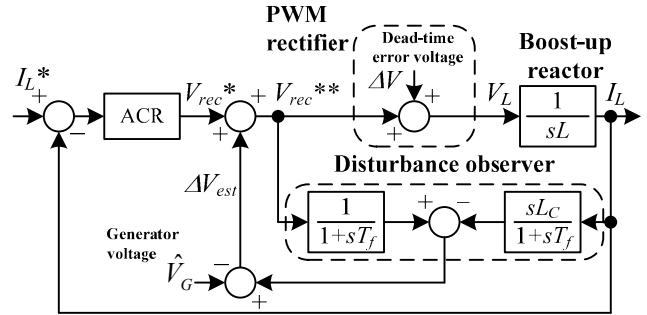
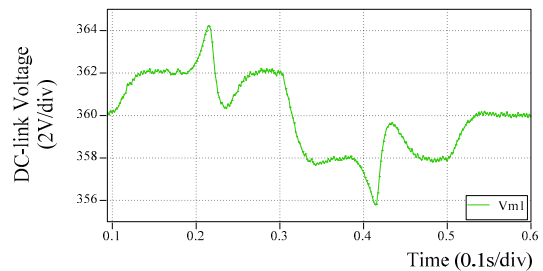
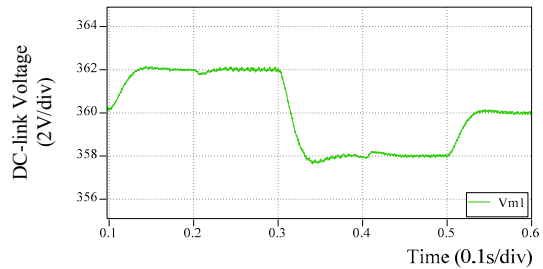


図 3 外乱オブザーバを適用した電流制御系のブロック図
Fig. 3. A block diagram of current controller.



(a)without correction using disturbance observer



(b)with correction using disturbance observer

図 4 外乱オブザーバによる電圧制御性能の改善
Fig. 4. Improvement of AVR performance using disturbance observer.

4. まとめ

本論文では、PWM 整流器の電流制御系に外乱オブザーバを適用し、制御性能の改善を行った。シミュレーションの結果、外乱オブザーバを適用することにより力行回生の反転時に発生する電圧の振動を抑制できることを確認した。

文 献

- (1) 星野 哲馬, 伊東 淳一: “誘導機 の速度センサレスベクトル制御における外乱オブザーバを用いた出力電圧誤差補償”, 電学論D, Vol. 129, No. 9, pp.945-946 (2009)
- (2) N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, T. Funabashi., : “An Adaptive Dead-Time Compensation Strategy for Voltage Source Inverter Fed Motor Drives” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 5, (Sep. 2005).