

V/f 制御を適用した仮想 PM 同期発電機による 三相系統連系インバータの実機検証

学生員 西川 滉大 正員 渡辺 大貴 上級会員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Verification of Three-phase Grid-tied Inverters with the V/f controlled Virtual PM Synchronous Generator

Kodai Nishikawa, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

The paper discusses a V/f controlled virtual PM synchronous generator (VSG). The V/f control is used to a speed control for permanent magnet synchronous motors (PMSM). However, a speed control is not achieved with the grid-tied operation because the power grid frequency cannot be controlled by the grid-tied inverter. A VSG provides the relationship between a motor torque, a load torque and a rotation speed for a speed controller. Thus, the V/f controlled VSG achieves the grid-tied operation by a torque control of VSG. In this paper, a control response and a stability are analyzed by a simplification. The experimental results are demonstrated with the 1-kW inverter.

キーワード : 連系インバータ, 三相インバータ, 仮想同期電動機, V/f 制御

Keywords : grid-tied inverter, three-phase inverter, virtual synchronous generator, V/f control

1. はじめに

近年, 省エネルギー化の観点から効率が高い永久磁石同期電動機(PMSM)が注目されている。PMSM の等価回路は, 回路要素として電機子抵抗, 同期リアクタンス, 誘導起電力の直列接続として表すことができる。この構成を系統連系と比較すると, 電機子抵抗は配線および連系インダクタの抵抗, 同期リアクタンスは連系インダクタンス, 速度起電力は系統電圧に対応する。そのため, 制御器上において PMSM と電力系統の制御は等価と考えることができる。例えば PMSM の制御法として一般的に用いられるベクトル制御では, 磁極位置を用いることによって電流制御を行っている。これは系統連系において系統電圧位相を用いた電流制御に相当する。また系統連系時の電流制御は出力有効電力を制御するために使用されるが, ベクトル制御と比較すると系統周波数で回転する PMSM のトルク制御に相当する。

PMSM を駆動する方法として, V/f 制御がある⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。V/f 制御は PMSM の回転子位置情報を必要とせず, 基本的に電圧制御で動作する。V/f 制御でも PMSM は力行回生(電動機動作発電動作)が可能である。従って, PMSM 制御と系統連系制御の等価性から, 発電機動作している PMSM の V/f 制御を系統連系に適用すると, 仮想同期発電機(VSG)⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾

と同様に電圧制御による系統連系が実現できる可能性がある。

そこで本論文では, 三相連系インバータの出力電力制御法として, V/f 制御を適用した VSG を提案する。提案法に用いる V/f 制御の原理は, PMSM において提案されている安定化制御と無効電力最小化に基づく高効率制御を付加した V/f 制御を元としている。系統周波数は一定であるため, 速度制御である V/f 制御を適用するには工夫が必要である。そこで V/f 制御に従来の VSG でも使われている電力制御器を導入し, 速度指令値により有効電力を制御する。提案法での出力電力応答は VSG のモデルを含め安定化制御ゲインによって変化するため, 出力電力応答について解析を行い, 従来の VSG 制御との違いを明確にする。さらに, 実機検証にて提案法による出力電力制御の有用性について確認する。

2. V/f 制御を適用した VSG

図 1 に V/f 制御を適用した VSG の制御ブロック図を示す。図 1 では系統周波数を一定と置き, VSG の印加トルク, 制動トルクをそれぞれ出力電力指令値 $P_{command}^*$, 出力電力 P_{out} に置き換えて表現している。ここで, 電力系統を突極性のない表面永久磁石型同期電動機(SPMSM)としての解析のもとに電力応答について検討する。SPMSM の電圧方程式を $\gamma\delta$

図3に高効率制御のブロック図を示す。SPMSMではトルク/電流比を最小化するために $i_d=0$ に制御を行う。V/f制御は電流制御系がないため、 $i_d=0$ 制御は無効電流を用いて間接的に達成する。dq座標上での無効電力 Q_{dq} は(15)式で与えられる。

$$Q_{dq} = v_q i_d - v_d i_q \dots\dots\dots (15)$$

(14)式より、 $i_d=0$ が達成されているときの無効電力は(16)式で表される。

$$Q_{dq} = \omega \{ L(i_d^2 + i_q^2) + \psi_m i_d \} \dots\dots\dots (16)$$

定常状態において、無効電力は電圧方程式より示すことができ、(17)式となる。

$$Q_{dq} = \omega L i_q^2 = \omega L I^2 \dots\dots\dots (17)$$

また、 $\gamma\delta$ 座標軸での無効電力 Q は以下の(18)式のように表すことができる。

$$Q_{\gamma\delta} = v_\delta i_\gamma \dots\dots\dots (18)$$

これらによって、 $i_d=0$ を達成するために必要な条件は(19)式となる。

$$\omega L (i_d^2 + i_q^2) = v_\delta i_\gamma \dots\dots\dots (19)$$

3. V/f 制御による VSG の電力応答

図4に検討および実機検証を行う三相系統連系インバータの回路構成を示す。連系インダクタによるリアクタンス成分が配線抵抗に比べて十分大きいとして検証を行う。

表1に実機条件を示す。周波数特性解析やシミュレーションによる電力応答の確認にも同様のパラメータを用いている。ここではPMモータを模擬して、基本動作確認するため連系インダクタンスは大きな値を仮定している。連系インダクタンスの最小化については、稿を改めて報告する。

図5に電力指令から電力までの伝達関数のゲイン-周波数特性を示す。ここではVSGに図2(a)を用いた場合による2次標準形の特性、図2(b)の比例ゲインを用いてフィードバックゲイン $K_f=0$ とした1次系の特性、また図2(b)の比例ゲインを用いてHPFのカットオフ周波数が制御系の固有角周波数に対して十分大きい(12)式の場合の特性を比較している。ここで、(12)式の場合の特性に着目すると、HPFのカットオフ周波数を大きくすることによって、2次標準形と同等な減衰特性を示す一方、周波数が増加していくにつれ傾きが1次系と同じ-20dB/decとなっている。ここから、(11)式の ω_{n1} に対して ω_{HPF} を十分大きくすることで、有効電流によるフィードバックがおいて支配的となり、(7)式に近い特性が得られる。従来のVSG制御⁶⁾では制御応答が図2(a)の場合と同様の2次標準形であるため、HPFを考慮した図2(b)の場合では1次系および2次系と同等、またはそれらの中間の特性を設計できることが確認できる。

図6にシミュレーションによる出力電力応答波形を示す。ここでは、図5で解析した条件における伝達関数の過渡応答と図2(b)を適用した場合のシミュレーションによる制御応答を比較する。電力指令値は時間 $t=0$ で0Wから1000Wまでステップ状に増加させた。図2(b)を適用したシミュレー

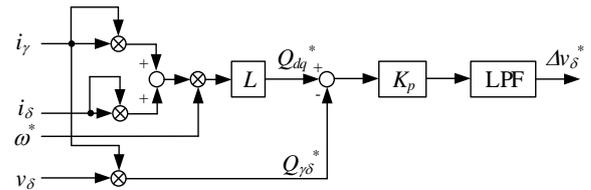


Fig.3 the control diagram of the high efficiency control.

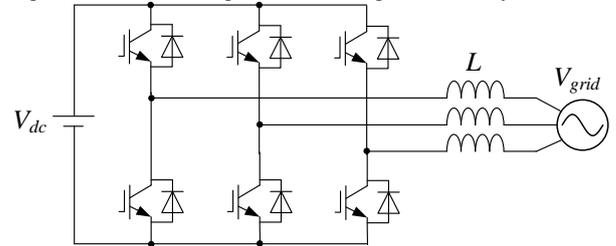


Fig. 4. The diagram of a three-phase grid-tied inverter.

Table 1 the simulation conditions.

| Rated output power | P_{out} | 1 kW |
|---------------------------|------------|-----------------------|
| Grid-tied inductance | L | 10 mH(%Z:24%) |
| Line resistance | R | 0.2 Ω |
| Virtual inertia | J | 0.08 kgm ² |
| Grid angular frequency | ω | 314 rad/s |
| Grid line-to-line voltage | V_{grid} | 200 V _{RMS} |
| Damping factor | ζ | 0.707 |
| Natural angular frequency | ω_n | 22.5 rad/s |

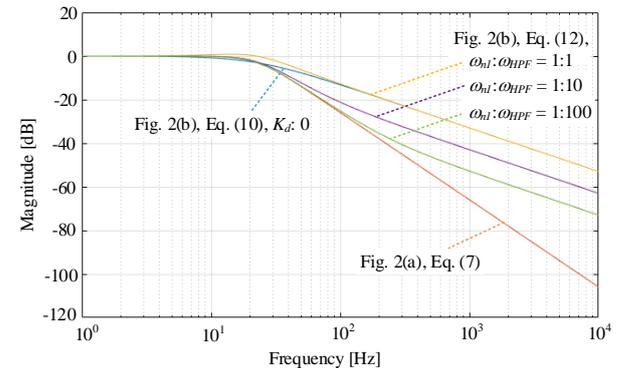


Fig. 5 The frequency characteristics of the proportional control with the damping control.

ション結果と(12)式の結果を比較するとほとんど一致していることから、所望の制動係数と固有各周波数から出力電力応答を設計することが可能であることがわかる。過渡応答を比較すると、(12)式では1次の微分項を持っているためより早い立ち上がりを持っている一方、オーバーシュートが大きくなっていることがわかる。また、HPFのカットオフ周波数を十分大きくすることで、2次標準形とほぼ同等の応答になる。従って、V/f制御にもとづくVSG制御ではHPFを適切に設定することにより、VSGに比べ、立ち上がり時間を早めることが可能となる。パラメータの最適な設計法については今後の課題とする。

4. 実験結果

実機検証では、パラメータにより設計された出力電力応答が所望の応答となるか確認する。ここでは、図2(b)に示す

VSGの応答について ω_{nl} と ω_{HPF} の比を1:100として実験検証を行う。

図7に電力指令値を0 Wから1000 Wまでステップ上に变化させた時の出力電力応答を示す。設計された固有角周波数と制動係数より、指令値のステップ変化から出力電力ピークまでの理論時間は197 msである一方、実験値では173 msとなっており、-12%の誤差が生じている。これは、主に負荷角0付近の出力電流がゼロに近い領域とそれ以外の領域においてデッドタイムによる電圧誤差の振る舞いが異なることにより、負荷角と出力電力の非線形性によると推測する。また出力電力に生じる脈動成分は系統周波数成分と低次高調波成分があるが、このうち系統周波数成分は電流検出誤差による不平衡成分によるもの、出力電流の低次高調波によるものとそれぞれ考えられるため、今後抑制法について検討する。

図8に電力指令値を1000 Wから0 Wまでステップ上に变化させた時の出力電力応答を示す。図7と同様に指令値のステップ変化から出力電力ピークまでの理論時間は197 msである一方、実験値では214 msとなっており、9%の誤差が生じている。図7と同様に出力ゼロ付近における非線形性が応答時間に影響していると推測する。

5. まとめ

本論文では、V/f制御を適用したVSGによる三相系統連系インバータについて提案した。速度制御系であるV/f制御にVSGを導入することで、系統連系時における出力電力の制御を可能とし、実際に系統連系動作が行えることを実験検証により確認した。また、電力応答についても解析を行い、応答時間について設計値と実験値では誤差9~12%であることを確認した。今後は、V/f制御が電圧制御であることを利用し、同一制御系による系統連系動作と自立運転動作の切替について検討を行う。

文 献

- (1) J. Itoh, N. Nomura, and H. Ohsawa, "A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor", PCC2002, pp.1310-1315, (2002).
- (2) J. Itoh, T. Toi, M. Kato: "Maximum Torque per Ampere Control Using Hill Climbing Method Without Motor Parameters Based on V/f Control", 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16), No. DS3d-Topic 4-0283, (2016).
- (3) J. Itoh, T. Toi, K. Nishizawa: "Stabilization Method Using Equivalent Resistance Gain Based on V/f Control for IPMSM with Long Electrical Time Constant", The 2018 International Power Electronics Conference, No. 23E1-5, pp. 2229-2236, (2018).
- (4) J. Itoh, T. Toi, K. Nishizawa: "Stabilization Method for IPMSM with Long Electrical Time Constant Using Equivalent Resistance Gain Based on V/f Control", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 8, No. 4, pp. 592-599 (2019)
- (5) 伊東 淳一, 豊崎 次郎, 大沢 博, 『永久磁石同期電動機のV/f制御の高性能化』, 電気学会論文誌D, 122 巻, 3 号, p. 253-259, (2002)
- (6) X. Xiong, C. Wu and F. Blaabjerg, "An improved Synchronization Stability Method of Virtual Synchronous Generators Based on Frequency Feedforward on Reactive Power Control Loop", IEEE Transactions on Power electronics, Vol. 36, No. 8, (2021)

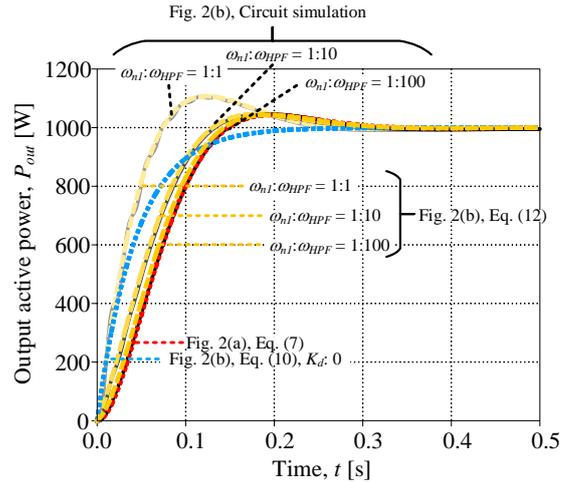


Fig. 6 The output power control response by the proportional control with the damping control.

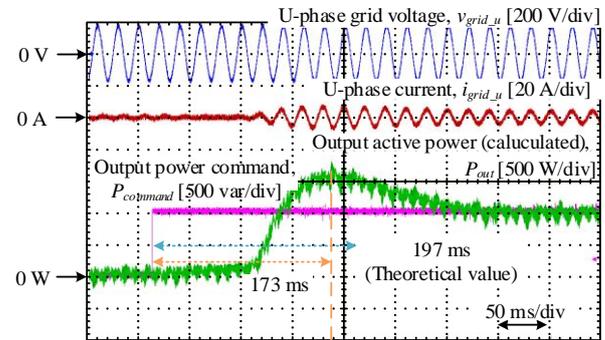


Fig. 7. Output power response by the step power command from 0 W to 1000 W.

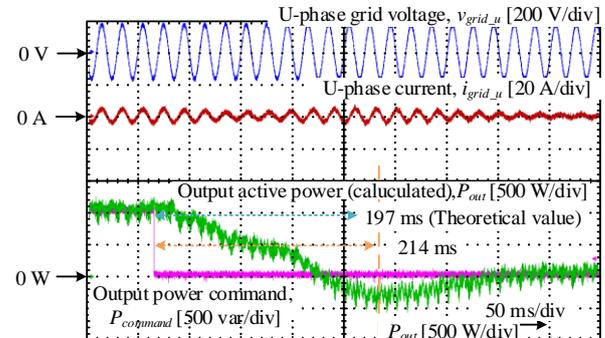


Fig. 8. Output power response by the step power command from 1000 W to 0 W.

- (7) Z. Shuai, C. Shen, X. Liu, Z. Li and J. Shen, "Transient Angle Stability of Virtual Synchronous Generators Using Lyapunov's Direct Method", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 4 pp. 4648-4661, (2019)
- (8) H. Cheng, Z. Shuai, C. Shen, X. Liu, Z. Li and J. Shen, "Transient Angle Stability of Paralleled Synchronous and Virtual Synchronous Generators in Islanded Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 8, pp. 8751-8765, (2020)
- (9) C. Li, Y. Yang, Y. Cao, A. Aleshina, J. Xu and F. Blaabjerg, "Grid Inertia and Damping Support Enabled by Proposed Virtual Inductance Control for Grid-Forming Virtual Synchronous Generator," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 1, pp. 294-303, (2023).
- (10) O. Mo, S. D'Arco and J. A. Suul, "Evaluation of Virtual Synchronous Machines With Dynamic or Quasi-Stationary Machine Models," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5952-5962, (2017).
- (11) 龍建儒, 新帯俊信, 柿々野浩明, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「仮想同期発電機を用いた家庭様分散型電源の商用系統連系・解列の無瞬断切り替え制御」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 5, pp. 430-438, (2012)