

電流源形モータエミュレータによる三相系統連系インバータ向け 仮想同期発電機制御の基礎検討

田中 元粋* 渡辺 大貴 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Fundamental Consideration of Virtual Synchronous Generator Control for Three-phase Grid-tied Inverter
Using Current Source Type Electric Motor Emulator
Gensui Tanaka*, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes virtual synchronous generator (VSG) control for a three-phase grid-tied inverter using a current source type electric motor emulator. The key feature of the proposed method is its ability to simultaneously achieve interconnection with an inductor (L) and GFM (Grid-Forming) operation while emulating the transient behavior of a synchronous generator's armature. By selecting a current-source configuration for the emulator, the proposed method enables the downsizing of the interconnection inductor, similar to current-controlled VSG control. Furthermore, by utilizing a synchronous generator model instead of virtual impedance, the method not only provides inertia support but also enables GFM operation, which was not possible with conventional current-controlled VSG methods. A voltage-source motor emulator was designed in response to the current-source motor emulator and implemented. Simulations were conducted to verify the inertia support capability and GFL (Grid-Following) operation, and the results are reported.

キーワード：系統連系インバータ，三相インバータ，仮想同期発電機，モータエミュレータ
(grid-tied inverter, three-phase inverter, virtual synchronous generator, electric motor emulator)

1. はじめに

太陽光や風力をはじめとする再生可能エネルギーを用いた発電では、系統連系インバータによって電力系統に連系する。系統へのインバータ接続数が増加すると同期発電機の接続割合が低下し、系統慣性が低下する。系統慣性の低下は、電力需給のバランスが崩れた場合に系統周波数変動を引き起こすため、再生可能エネルギーの導入拡大における重大な課題となる。この課題に対し、動揺方程式を用いて制御的に同期発電機の慣性を実現する仮想同期発電機(VSG)制御が提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。VSG 制御を適用することでインバータに慣性をもたせることができるため系統慣性の低下を抑制できる。特に電圧制御形 VSG 制御を適用した連系インバータは系統形成が可能な GFM(Grid-Forming Inverter)である。

また、系統連系インバータの導入数増加を受けて、システムの小型化、特にシステム内で大きな体積を占める連系インダクタの小型化が求められている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで、系統慣性と連系インダクタの小型化を両立する手法として電流制御形 VSG 制御が提案されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。電流制御形 VSG 制御では動揺方程式を用いて疑似慣性、仮想インピーダンスモデルを用いて連系インダクタの小型化を実現する。しかし、近

似したインピーダンスモデルを用いるため同期発電機の電流応答を再現できない。また、電流制御形 VSG 制御を適用した連系インバータは GFL(Grid-Following Inverter)であり系統形成ができない。

一方、電力変換器でモータの挙動を模擬するモータエミュレータの開発が進められている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。モータエミュレータは実装するモータモデルを変更することでモータの種類や特性を容易に変更できる。また、電圧制御でモータの速度起電力を再現する電圧源形と電流制御でモータ電流を再現する電流源形に大別できる。特に電流源形モータエミュレータは、過渡現象を含めたモータの挙動を模擬するため、汎用性と実用性が高い。これまでに航空機用発電機や系統に接続する発電機等の電圧源を電圧源形モータエミュレータで模擬する同期発電機エミュレータが提案されている。電圧源形モータエミュレータで実現する VSG は同期発電機の挙動を再現しつつ GFL 動作が可能である。しかし、連系 L の小型化との両立はできない。

そこで本論文では、電流源形モータエミュレータによる VSG 制御を提案する。提案法における最大の特徴は、同期発電機の電機子の過渡現象を含めて模擬しつつ連系 L と GFM 動作を両立する点にある。VSG 制御を実現するエミュレータ方式として電流源形を選択することで、電流制御形

VSG 制御と同様に連系 L の小型化を実現する。さらに、仮想インピーダンスに代わり同期発電機モデルを使用することで慣性付与だけでなく、従来の電流制御形 VSG 制御では不可能であった、GFM 動作を実現する。電圧制御形モータエミュレータの設計を電流源形モータエミュレータに応答して実装し、シミュレーションにより慣性サポートと GFL 動作を確認したため報告する。

2. 電流源形モータエミュレータ

図 1 に電流源形モータエミュレータを用いたインバータ試験システムの構成図を示す。回路はカップリングインダクタと三相インバータで構成され、コントローラにはモータモデルと電流制御器を実装する。図 1 に示すように電流源形モータエミュレータの回路構成は連系インダクタとインバータの構成と同一である。したがって、従来の系統連系回路構成を変更することなく提案制御を適用できる。

電流源形モータエミュレータではモータへの印加電圧からモータ電流を算出し、算出したモータ電流を指令値として電流制御を行うことでモータの挙動を再現する。さらに、モータトルクとモータ回転数を同時にコントローラ内で算出する。再現対象とするモータの状態方程式をモータモデルとしてコントローラに実装する。本論文では、突極性のない表面磁石型同期電動機(SPMSM)モデルを実装し発電機動作を再現する。dq 軸座標における SPMSM の状態方程式は(1)式で表される。

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_{re} \\ \omega_{re} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_{re}\psi}{L} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i_{dq} は dq 軸電流、 v_{dq} は dq 軸電圧、 R は電機子巻線抵抗、 L は電機子インダクタンス、 ω_{re} は回転電気角周波数、 ψ は永久磁石の鎖交磁束、 p は微分演算子である。

また、出力トルクと電気角周波数の関係は(2)、(3)式で表される。

$$T_{out} = P_f \psi i_q \dots\dots\dots (2)$$

$$p\omega_{re} = \frac{P_f}{J}(T_{out} - T_L) - P_f D \omega_{re} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T_{out} は出力トルク、 T_L は負荷トルク、 P_f は極対数、 J は慣性モーメント、 D は粘性抵抗である。

(1)~(3)の状態方程式をコントローラに実装しオイラー法を用いて解くことでモータ電流指令値および出力トルクとモータ電気角周波数を算出する。

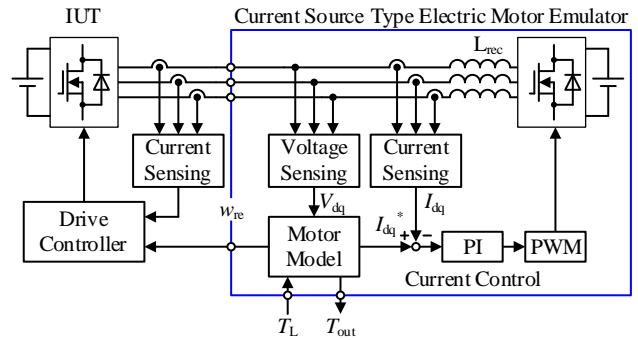
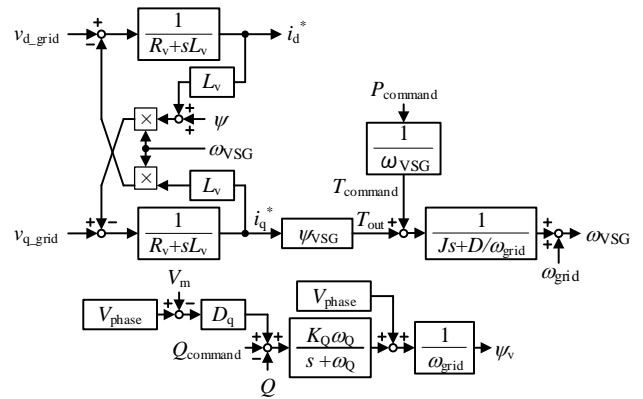
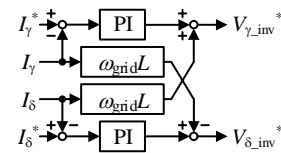


Fig. 1. Configuration of an inverter test system using the current source type electric motor emulator.



(a) VSG control using current source type electric motor emulator.



(b) current control.

Fig. 2. Block diagram of proposed VSG control.

3. 電流源形モータエミュレータによる系統連系制御

〈3・1〉電流源形モータエミュレータによる仮想同期発電機制御

図 2 に電流源形モータエミュレータによる VSG 制御のブロック図を示す。負荷トルクと出力トルクをそれぞれインバータ出力角周波数で除することで有効電力指令および出力有効電力となる。また、電機子巻線抵抗を仮想配線抵抗、電機子インダクタンスを仮想連系インダクタとすればよい。同期発電機の回転角周波数は定常的には系統電圧角周波数と一致する。ところが、負荷トルク、つまり有効電力指令を与えると過渡的に角速度が変化する。この

とき、インバータ出力角周波数 ω_{inv} と系統電圧角周波数 ω_{grid} には差が生まれ、このときの各速度差を $\Delta\omega_{inv}$ 、その積分を δ とするとそれぞれ(4)式で表せる。

$$P\delta = \Delta\omega_{inv} = \omega_{inv} - \omega_{grid} \dots\dots\dots (4)$$

$\Delta\omega_{inv}$ は(3)式の左辺の相当し、(4)式に従って $\Delta\omega_{inv}$ を調整することにより有効電力制御を実現する。同時に、従来制御における動揺方程式と同様に提案法での慣性サポートを実現する。また、提案法では同期発電機の鎖交磁束を制御することで無効電力制御と出力電圧制御を行う。このとき、鎖交磁束 ψ_v は(5)式で表せる。

$$\psi_v = \frac{V_{VSG}}{\omega_{inv}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 V_{VSG} はVSGの出力電圧実効値である。提案法では鎖交磁束 ψ_v を制御することで間接的にVSG出力電圧を制御することができる。そのため、非連系時においてVSG出力電圧を系統電圧になるように制御することでGFM動作を実現する。これらをふまえ、極対数を1として(1)~(3)式を再掲すると(6)~(8)式となる。

$$P \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_v}{L_v} & \omega_{VSG} \\ -\omega_{VSG} & -\frac{R_v}{L_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_v} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_{VSG}\psi_v}{L_v} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$T_e = \psi_v i_q \dots\dots\dots (7)$$

$$p\omega_{VSG} = \frac{T_m - T_e - D_v \omega_{VSG}}{J_v} \dots\dots\dots (8)$$

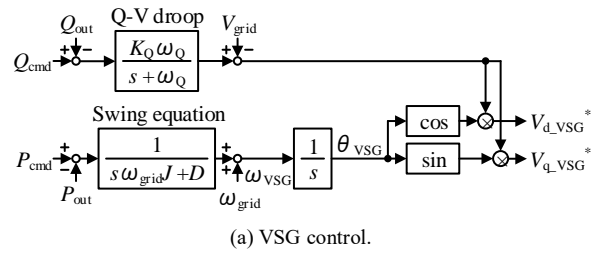
ここで、 R_v は仮想配線抵抗、 L_v は仮想連系インダクタンス、 ω_{VSG} はVSGの回転角周波数、 T_m は同期発電機に直結された原動機の発生トルク、 T_e はVSGの出力トルク、 J_v は仮想慣性モーメント、 D_v は仮想粘性抵抗、 ψ_v は仮想鎖交磁束である。

〈3・2〉有効電力制御の設計 図3に従来制御法のブロック図を示す。本論文の有効電力制御法は従来法と同様に決定する。(7)、(8)式を定常状態近傍で線形近似し、状態方程式を2次系に近似する⁽¹⁴⁾ことで、出力電力制御の閉ループ伝達関数は(9)式で表せる。

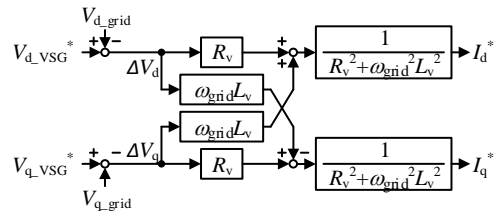
$$\frac{P(s)}{P_{command}^*(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (9)$$

このとき制動係数 ζ と固有角周波数 ω_n は(10)、(11)式で表さる。

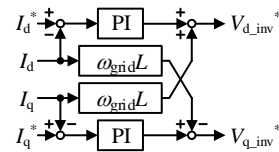
$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{J}{L}} D \dots\dots\dots (10)$$



(a) VSG control.



(b) Virtual impedance model.



(c) Current control.

Fig. 3. Block diagram of conventional VSG control.

$$\omega_n = \frac{V_{grid}}{\omega_{grid} \sqrt{JL}} \dots\dots\dots (11)$$

したがって、仮想慣性モーメントおよび仮想粘性抵抗を(12)、(13)式とすれば良い。

$$J = \frac{V_{grid}^2}{(\omega_n^2 + \omega_{grid}^2)L} \dots\dots\dots (12)$$

$$D = 2V_{grid} \zeta \sqrt{\frac{J}{L}} \dots\dots\dots (13)$$

4. シミュレーション結果

表1にシミュレーション条件を示す。同期発電機の同期リアクタンスは50%以上が一般的であるため、同期リアクタンスが50%となるよう仮想連系インダクタを10.6 mHとした。一方、一般的な連系インダクタは5%程度で設計するが、電流制御形VSG制御および提案法では実際の連系インダクタの小型化が可能であることを示すため同期リアクタンスが0.5%となるように106 μHとした。実際にはスイッチングリップルやフィルタを含めた体積の観点から決定する必要があるため今後の課題とする。

図4に電力指令を0 W から 1000 W までステップ状に変

化させたときの出力電力応答波形を示す。(a)より提案法および従来法の応答が設計応答である二次標準形と一致していないことが分かる。これは提案法の動作条件が設計時に適用した近似条件から外れているためである。提案法では、過渡的に生じるインバータ出力角周波数 ω_{nv} と系統電圧角周波数 ω_{grid} の差 $\Delta\omega_{nv}$ を考慮したモデルを使用している。そのため、設計応答との間に誤差が生まれる。また、近似条件では無視できるほど小さいとしている仮想配線抵抗を $1\ \Omega$ としている。これは、仮想配線抵抗が小さいときには外乱発生時に電力応答にのる振動抑制と電圧制御の発散を防止するためである。一方、(b)に示すように、提案法および従来法において当初の近似条件に合わせるために $\Delta\omega_{nv}$ の影響を無視し、仮想配線抵抗を小さな値にすることで両者の応答が二次標準形と一致する。したがって、有効電力の応答は(12)、(13)式によって設計できる。

図5に系統電圧実効値を変動させたときの有効電力応答を示す。従来法、提案法ともに系統の電圧がステップ状に低下すると、それに伴って有効電力が低下する。両方式において低下量はほとんど変化しないが、提案法のほうが目標値への追従が早い。したがって提案法は従来法に比べて外乱応答が良好である。

図6に系統周波数を変動させたときの有効電力応答を示す。従来法では系統周波数を変動しても電力応答への影響が見られない。これは近似モデルを使用しており周波数特性を持たないためである。一方、提案法では系統周波数の変動に対して電力変動が生じている。これは、系統周波数の変動によりモータの回転速度が変化するためである。したがってモータモデルをしようしている提案法ならではの外乱応答であるが、系統電圧変動時と比べてもほとんど影響はないため問題にはならない。

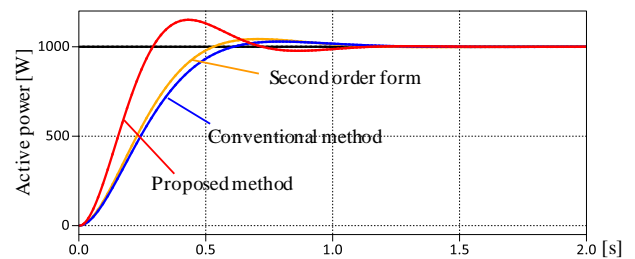
図7に抵抗負荷接続時の電力応答を示す。(a)に示すように提案法では系統に連系せず負荷が接続された場合においても動作が確認できる。また、負荷の変動に対して電圧値の飛びは見受けられるが、電圧振幅は保っていることがわかる。(b)に示すように、連系動作からGFM動作への切り替わりについてもトリップすることなく行えている。切替時に電圧にひずみが見られるが、系統10周期程度で収まっている。また、有効電力指令に従って供給していた有効電力が負荷に応じて変化している。以上より提案法のGFM動作を確認した。

5. まとめ

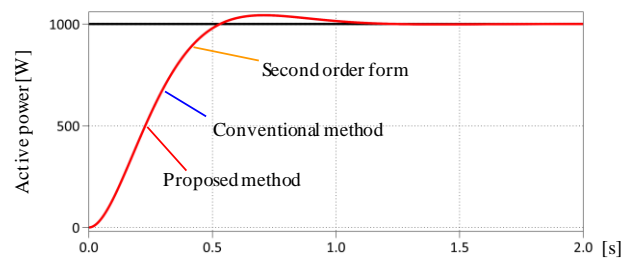
本論文では、電流源形モータエミュレータによる仮想同期発電機制御を提案した。提案法では同期発電機の挙動を電流源形モータエミュレータにより再現することで、連系Lの小型化とGFL動作の両立を実現した。また従来法との比

Table 1. Simulation conditions.

Parameter	Symbol	Value
Rated power	P	2 kW
Grid voltage	V_{grid}	200 V _{RMS}
Grid voltage	f_{grid}	50 Hz
Virtual inductance	L_v	10.6 mH (% $X_L=50\%$)
Grid-tied inductance	L	106 μ H (% $X_L=0.5\%$)
Line resistance	R	1 Ω
Active power response frequency	f_n	1 Hz
Proportional gain of Q-V droop control	K_Q	0.001
Cutoff frequency of Q-V droop control	f_Q	0.001 Hz
Damping factor	ζ	0.707
ACR bandwidth	f_{ACR}	1000 Hz



(a) No approximate condition.



(b) Approximately condition.

Fig. 4. Output power control response

較により、系統擾乱等の外乱に対する応答が良好であることを確認した。今後は実機にて検証を行う。

文 献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)

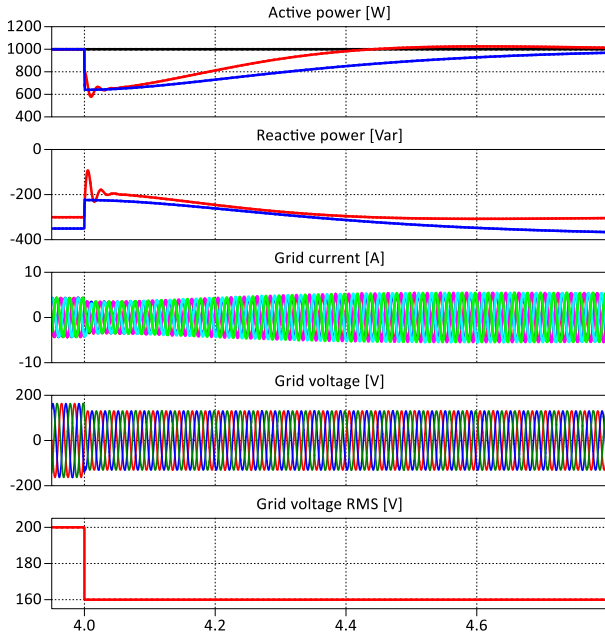


Fig. 5. Responses to grid voltage fluctuations.

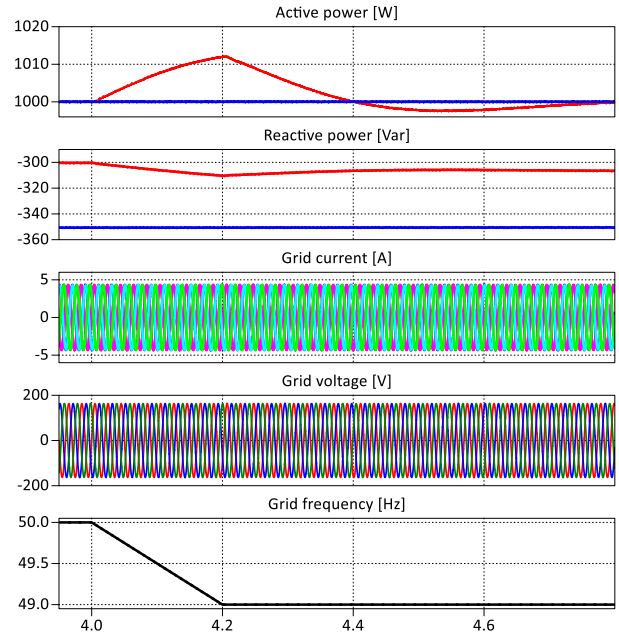
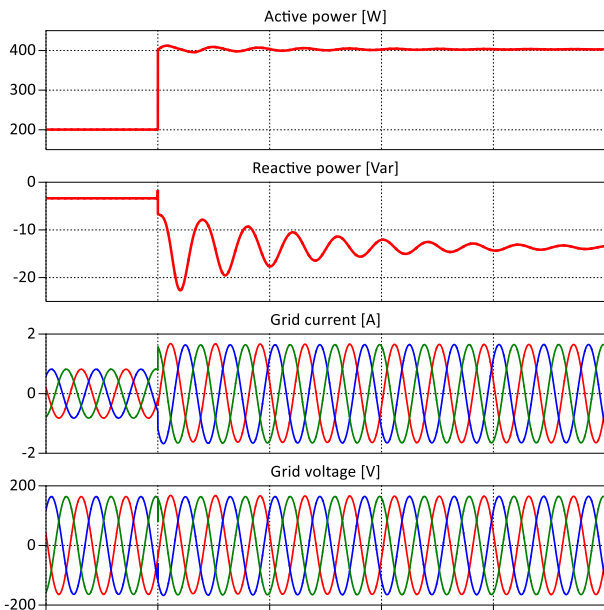
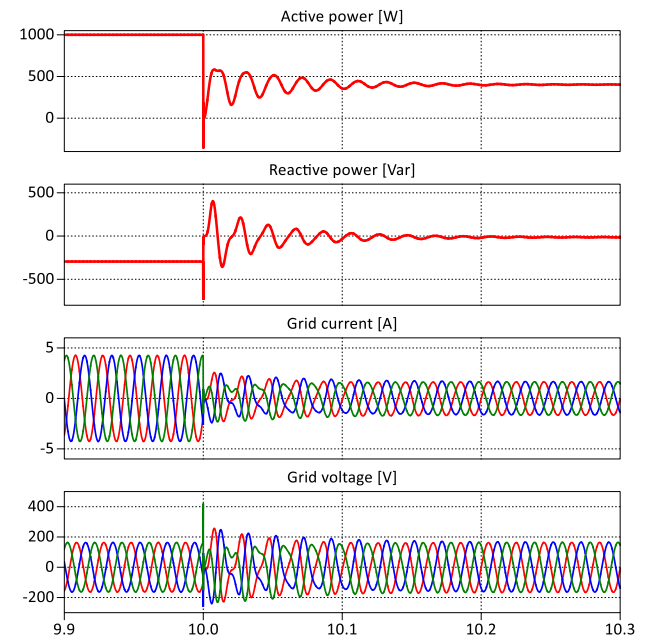


Fig. 6. Responses to grid frequency fluctuation.



(a) Load regulation



(b) operation changing

Fig. 7. Waveform in GFM operation.

- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) R. Peña-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez and Y. Yang, "LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2192-2203, Nov. 2014
- (7) 永井悟司, 伊東淳一: 「小型連系インダクタを有する三相系統連系インバータのFRT制御」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No.SPC-18-137/MD-18-097(2018)
- (8) X. Fu, M. Huang, C. K. Tse, J. Yang, Y. Ling and X. Zha, "Synchronization Stability of Grid-Following VSC Considering Interactions of Inner Current Loop and Parallel-Connected Converters," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 6, pp. 4230-4241, Nov. 2023
- (9) C. Blanco, D. Reigosa, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero and F. Briz, "Virtual Admittance Loop for Voltage Harmonic Compensation in Microgrids," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 4, pp. 3348-3356, July-Aug. 2016
- (10) Z. Zhang, Y. Liu and J. Li, "A HESM-Based Variable Frequency AC Starter-Generator System for Aircraft Applications," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 4, pp. 1998-2006
- (11) R. S. Kaarthik, K. S. Amitkumar and P. Pillay, "Emulation of a Permanent-Magnet Synchronous Generator in Real-Time Using Power Hardware-in-the-Loop," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 2, pp. 474-482, June 2018
- (12) Y. Xie, J. Zhang, D. Jiang, Z. Liu and L. Tian, "Emulation of Integrated Starter/Generator Using Power Electronic Devices," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 5, pp. 6556-6567, Sept.-Oct. 2023
- (13) Q. -C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, April 2011
- (14) 西川滉大, 渡辺大貴, 伊東淳一: 「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」, 2023年産業応用部門大会, Vol. , No. 44942, pp. 119-122 (2023)