

単相連系インバータの VSG 制御を元にした 連系・自立無瞬断切替え制御

西川 滉大* 日下 佳祐 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Uninterrupted Switching Control based on Virtual Synchronous Generator Control between
Grid-Connected Operation and Stand-Alone Operation of Single-Phase Grid-Tied Inverter
Kodai Nishikawa*, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh, (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes an operation switching control method between grid-connected operation and stand-alone operation by the output frequency command switching. Especially, Virtual Synchronous Generator (VSG) control is adapted to the switching from grid-connected operation to stand-alone operation because VSG control allows switching with the same control. The proposed switching control method is validated by the experiments with a prototype.

キーワード：単相インバータ，系統連系インバータ，自立運転，VSG 制御
(single-phase inverter, grid-tied inverter, stand-alone operation, VSG control)

1. はじめに

近年，風力発電や太陽光発電など再生可能エネルギーの導入が拡大しており，これに伴って発電設備を電力系統へ連系させるための連系インバータの普及が進んでいる。その中でも，停電時において自立運転を行い負荷への電力供給が可能である連系インバータも登場している。しかし，自立運転可能な連系インバータは系統連系時に出力電力に応じた電流制御を行っている一方，自立運転時では電圧制御である定電圧定周波数(CVCF)制御を行っている。そのため，系統連系と自立運転とを切替えるためには電流制御系と電圧制御系の間で制御を切替える必要があり，無瞬断での連系・自立切替え動作が困難となっている。停電時においても連続して負荷へ電力を供給可能な装置として無停電電源装置(UPS)がある。UPS は常に CVCF 制御を行っているため制御系を切替える必要がない。しかし，CVCF 制御では系統連系時に出力電力を制御することができない。

無瞬断での連系・自立切替え動作を実行可能な制御方法として報告されているものに，仮想同期発電機(VSG)制御がある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。VSG 制御は電圧制御による系統連系が可能であるため，自立運転においても同一の制御系を用いて動作を行うことが可能となっている。VSG 制御の特徴として，同期発電機の動作を模擬することによる慣性がある。これにより，系統連系時に系統擾乱が生じた場合などにおける系統の安定性を向上させることができる⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。しかし，自立運

転時において慣性による安定性向上は重要な要素とならない他，電力指令値と実際の出力電力の偏差によって出力周波数に変動が生じる等の問題が VSG 制御には存在する。また，自立運転から系統連系へ切替えを行う場合，PLL による位相制御を適用できないため，同期発電機のように同期投入を行う必要がある。

本論文では，系統へ接続された負荷に対し，停電時などにおいても無瞬断で電力を供給することを目的とし，系統連系から自立運転への切替え動作にのみ VSG 制御を適用した連系・自立無瞬断切替え制御を提案する。提案制御法では，出力周波数指令を切替えることで VSG 制御や CVCF 制御，PLL による位相の同期を使い分けながら連系・自立切替えを実現する。提案手法を用いることで，VSG 制御による自立運転時の周波数変動を抑制し PLL による同期が可能になる。また，VSG 制御の出力電力指令を自由に設定することができるため，系統から負荷へ流れている電流を打ち消すように電力を出力することで負荷を系統から切り離した際のサージ電圧低減を図ることが可能となる。提案法を適用した単相連系インバータの実機検証より，連系・自立無瞬断切替えが達成可能であることが確認されたため報告する。

2. システム構成

(2.1) 対象とする回路構成

図 1 に，本論文において提案制御法を適用する単相インバータの回路構成を示す。本回路は入力側に直流電源を持

ち、交流側の負荷に対して電力を供給する。また交流側には負荷を系統と並列するための電磁接触器(MC)を設けている。

(2.2) VSG の構成

図 2 に、本論文中で使用する VSG 制御において模擬される同期発電機のモデルを示す。このモデルをもとに、VSG 制御についての説明を行う。

図 3 に図 2 に示す同期発電機モデルにおける電圧のフェーザ図を示す。同期発電機の出力電圧を \dot{V}_{SG} 、系統電圧振幅を \dot{V}_{Grid} 、連系インダクタ電圧を $\dot{V}_{L_{Grid-tied}}$ とすると、出力電流は(1)式となる。

$$\dot{I}_L = \frac{V_{SG} \sin \theta - j(V_{SG} \cos \theta - V_{Grid})}{\omega L_{Grid-tied}} \quad (1)$$

ここで、 θ は系統電圧と同期発電機電圧の位相差である。系統電圧を基準にすると同期発電機が出力する有効電力 P と無効電力 Q はそれぞれ(2)、(3)式となる。

$$P = \frac{V_{SG} V_{Grid} \sin \theta}{\omega L_{Grid-tied}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_{SG} V_{Grid} \cos \theta - V_{Grid}^2}{\omega L_{Grid-tied}} \quad (3)$$

出力周波数を増減させることで(2),(3)式中の θ を制御することができ、それによって所望の電力を出力する。

(2.3) VSG 制御

仮想同期発電機の慣性モーメントを J 、回転子の運動エネルギーを W 、回転子角周波数を ω_R とすると、運動エネルギー W は以下ようになる。

$$W = \frac{1}{2} J \omega_R^2 \quad (4)$$

ここで、運動エネルギー W を同期発電機の定格容量 P_{max} で、回転子角周波数 ω_R を定格角周波数 ω_0 で規格化すると、(4)式は単位慣性定数 M を用いて(5)式となる。

$$\frac{W}{P_{max}} = \frac{1}{2} M \frac{\omega_R^2}{\omega_0^2} \quad (5)$$

規格化後の運動エネルギーを W_{pu} 、回転子角周波数を $\omega_{R_{pu}}$ とすると、(5)式は(6)式となる。

$$W_{pu} = \frac{1}{2} M \omega_{R_{pu}}^2 \quad (6)$$

このとき、慣性モーメント J と単位慣性定数 M は(7)式の関係となる。

$$J = \frac{M P_{max}}{\omega_0^2} \quad (7)$$

運動エネルギー W_{pu} の時間変化は電力指令 $P_{command_{pu}}$ と出力電力 $P_{out_{pu}}$ より以下で表される。

$$P_{command_{pu}} - P_{out_{pu}} = \frac{dW_{pu}}{dt} \quad (8)$$

また、 W_{pu} の時間変化は(6)式の時間微分により(9)式で表される。

$$\frac{dW_{pu}}{dt} = M \omega_{R_{pu}} \frac{d\omega_{R_{pu}}}{dt} \quad (9)$$

(8)式と(9)式より

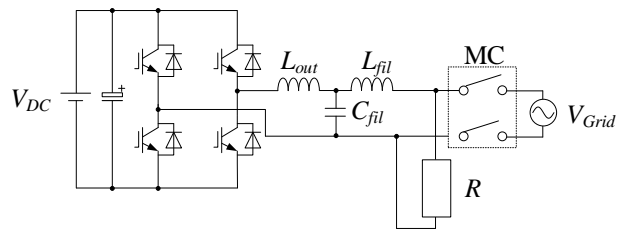


Fig. 1. Inverter circuit configuration.

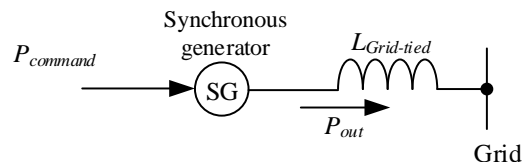


Fig. 2. Synchronous generator model.

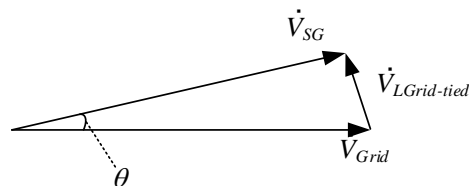


Fig. 3. Phasor diagram of synchronous generator model.

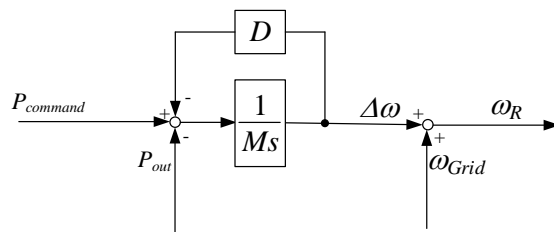


Fig. 4. VSG control block.

$$P_{command_{pu}} - P_{out_{pu}} = M \omega_{R_{pu}} \frac{d\omega_{R_{pu}}}{dt} \quad (10)$$

ここで、同期発電機の制動巻線による制動効果 $P_{D_{pu}}$ は制動係数 D を用いて(11)式で表される。

$$P_{D_{pu}} = -D \frac{\omega_{Grid_{pu}} - \omega_{R_{pu}}}{\omega_{Grid_{pu}}} \quad (11)$$

これを(10)式に含めると以下ようになる。

$$P_{command_{pu}} - P_{out_{pu}} = M \omega_{R_{pu}} \frac{d\omega_{R_{pu}}}{dt} - D \frac{\omega_{Grid_{pu}} - \omega_{R_{pu}}}{\omega_{Grid_{pu}}} \quad (12)$$

ここで、系統角周波数 $\omega_{Grid_{pu}}$ および回転子角周波数 $\omega_{R_{pu}}$ は 1p.u. からほとんど変動しないため、(12)式は以下のように近似できる。

$$P_{command_{pu}} - P_{out_{pu}} = M \frac{d\omega_{R_{pu}}}{dt} - D(\omega_{Grid_{pu}} - \omega_{R_{pu}}) \quad (13)$$

(13)式を整理すると(14)式となる。

$$\frac{d\omega_{R_{pu}}}{dt} = \frac{P_{command_{pu}} - P_{out_{pu}} - D(\omega_{R_{pu}} - \omega_{Grid_{pu}})}{M} \quad (14)$$

(14)式は同期発電機の動揺方程式を表す。

図 4 に(14)式による VSG 制御ブロックを示す。VSG 制御

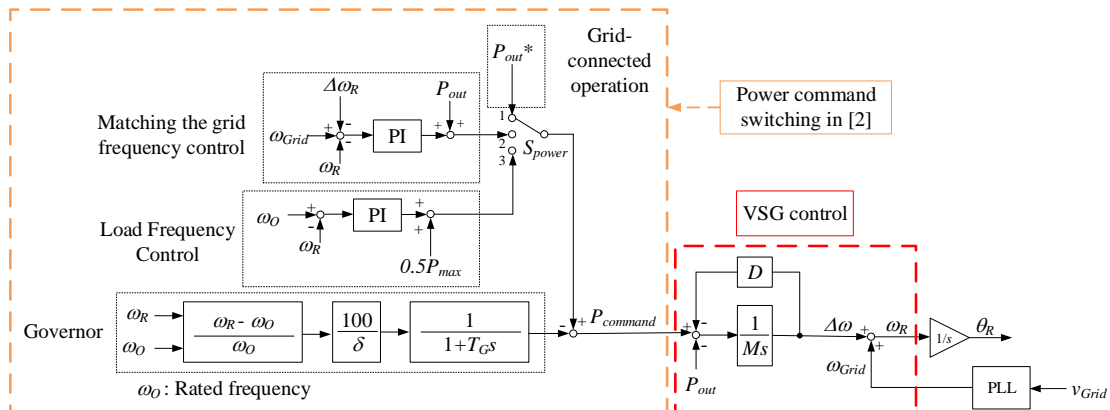


Fig. 5. Switching control between grid-connected operation and stand-alone operation.

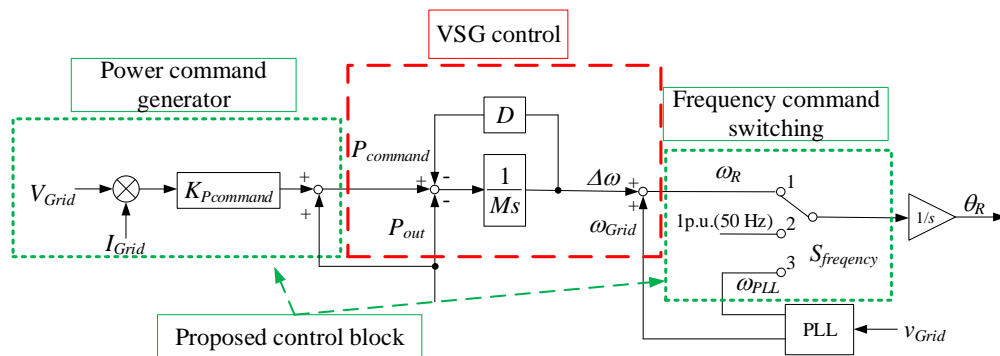


Fig. 6. Operation mode switching control by frequency command switching.

では出力電力指令と出力電力の偏差から出力周波数を決定する。

〈2・4〉 従来制御法

図 5 に、文献[2]で提案されている VSG 制御を用いた連系・自立無瞬断切替え法による制御系を示す。ここで、 δ は速度調定率、 T_G はガバナ制御のローパスフィルタの時定数である。文献[2]の制御方法では、連系・自立運転の切替えに合わせて出力電力指令の切替えを行う。系統連系時($S_{power}=1$)では任意の出力電力指令での動作を行う。自立運転時($S_{power}=3$)では、負荷の大きさに応じてガバナの速度調定率により出力周波数が変化するため、負荷周波数制御により基準周波数との差分に応じて出力の調整を行うことができる。自立運転から系統連系への切替え動作($S_{power}=2$)では、系統周波数との差分に応じて出力電力指令を決定し周波数を同期させる。同時に、 $\Delta\omega_R$ を加算することで位相が同期する瞬間を作り出し連系が可能となる。

〈2・5〉 従来制御法の課題

VSG 制御では自立運転時の出力電力は負荷の容量によって決定される。このとき、出力電力指令と実際の出力電力との間に差が生じると出力周波数の変動となって現れる。そのため、従来制御法では負荷周波数制御によって変動を抑制する。また、従来制御法では出力周波数を直接制御することができないため、自立運転から系統連系へ切替えを行う際に系統と位相を固定させることができない。そのため、位相が系統と同期した瞬間に切替えを行う必要がある。今回

使用する MC のように系統との並列動作に遅れがある場合、同期した瞬間に切替えを行うことができなくなり過電流が生じる可能性がある。

3. 提案手法

〈3・1〉 周波数指令切替え法

図 6 に、周波数指令切替えによる提案制御系を示す。従来法では連系・自立運転の切替え時に出力電力指令を切替えるため、自立運転時の出力周波数変動や同期投入時の位相の同期ができないという課題が存在する。そこで、提案制御法では周波数指令を直接切替えることにより、出力周波数の変動抑制と PLL を用いた位相の固定を可能とする。

〈3・2〉 系統連系時の出力電力制御($S_{frequency}=1$)

系統連系時は、VSG 制御により出力電力制御を行う。このとき、出力電力の指令値 $P_{command}$ は、系統電流振幅 I_{Grid} 、系統電圧と出力電圧との位相差 θ より、以下のように表される。

$$P_{command} = K_{Pcommand} I_{Grid} V_{Grid} + \frac{V_{Grid}^2}{2\pi f_{Grid} (L_{out} + L_{fil})} \sin \theta \tag{15}$$

ここで、 $P_{command}$ を一定とし位相差 θ を増加させた場合、系統電流 i_{Grid} をインバータの出力電流で打ち消す動作となる。これにより、負荷を系統から解列した際に生じる電圧サージの抑制を可能とする。

〈3・3〉 自立運転時の出力電圧制御($S_{frequency}=2$)

自立運転時には出力周波数を一定としてインバータの出力電圧指令を決定することで、VSG 制御の影響による周波数変動を生じさせることなく電圧出力を行う。

〈3・4〉 自立運転から系統連系への切替え制御($S_{frequency}=3$)

自立運転時には系統との同期を行わないため、インバータ出力電圧と系統電圧との間に位相差が生じる。そのため、自立運転動作から系統連系動作への切替えには、系統電圧とインバータ出力電圧の位相の同期が必要である。そのため、提案手法ではゼロクロス検出による PLL を用いて位相の同期を行う。

図 7 にゼロクロス検出 PLL を用いた周波数指令の生成のブロック図を示す。図 7(a)に示すゼロクロス検出 PLL により系統電圧のゼロクロスを検出し、自立運転時の出力位相との位相差を取得する。その後、図 7(b)に示す PI 制御器を用いて位相差が 0 となるように出力周波数を生成することで、位相の同期が可能となる。従来法のように出力電圧と系統電圧の位相が重なったタイミングで MC をオンさせる必要はなく、MC の動作タイミングの遅延は問題とならない。

〈3・5〉 提案手法を適用した単相連系インバータ制御

図 8 に、提案手法を適用した単相連系インバータの制御系を示す。系統電圧と系統電流の振幅値は、バンドパスフィルタ(BPF)を用いて 50 Hz 成分のみ取得を行う。また、出力電圧指令は振幅と位相によって決定され、オープンループで出力する。本制御系による、系統連系開始から自立運転への切替え手順を以下に示す。

- (1) PLL により系統から周波数と位相を取得する。
- (2) 系統の位相が 0 rad となった瞬間に $S_{frequency}$ が 1 の状態で連系インバータの動作を開始する。
- (3) 系統電流振幅値 I_{Grid} が閾値 $I_{Grid_Threshold}$ 以下となった瞬間に $S_{frequency}$ を 2 に切替え自立運転動作に切替える。同時に MC をターンオフする。

この時、位相が 0 rad で動作を開始する理由は系統電圧との電位差によって生じる過電流を防止するためである。

次に、自立運転から系統連系への切替え手順を以下に示す。

- (1) $S_{frequency}$ を 2 から 3 へ変更し、PLL に現在の出力電圧位相と出力周波数を与える。
- (2) 系統電圧との位相差 θ が閾値 $\theta_{Threshold}$ 以下となった瞬間に MC をターンオンする。
- (3) MC がオンしたことを確認した後、連系インバータの動作を終了する。

4. 実機検証

単相連系インバータに提案切替え制御を適用した際の、系統連系から自立運転への切替え動作、並びに自立運転から系統連系への切替え動作を、実機において検証する。表 1 に実験条件を、表 2 に制御パラメータをそれぞれ示す。

〈4・1〉 系統連系から自立運転への切替え

図 9 に、系統連系から自立運転への切替え時の実験波形

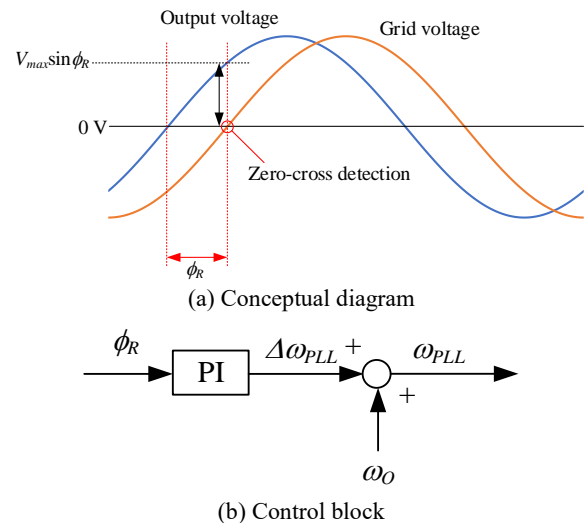


Fig. 7. Frequency command generation method by zero-cross detection PLL.

Table 1. Experimental condition.

Rated Power	P_{rated}	5 kVA
DC-link voltage	V_{DC}	350 V
Grid voltage	V_{Grid}	200 V _{RMS}
Utility frequency	f_{Grid}	50 Hz
Switching frequency	f_{SW}	10 kHz
Grid-tied inductor	L_{out}	2.3 mH
Filter inductor	L_{fil}	100 μH
Filter capacitor	C_{fil}	6 μF

Table 2. Controller parameter.

Damping coefficient	D	15p.u.
Inertia constant	M	0.1 s
Power command generator gain	$K_{Pcommand}$	0.5p.u.
Threshold of grid current	$I_{Grid_Threshold}$	5 A
Threshold of phase different	$\theta_{Threshold}$	0.015 rad
PLL	K_{pPLL}	0.01 s ⁻¹
PI gain	T_{iPLL}	0.0002 s

を示す。インバータ動作開始前、負荷には系統から電力が供給されるため、系統電流 i_{Grid} は負荷に応じた電流値である。

ここで、インバータを系統に連系し、インバータから負荷に対して電力供給を行い始める。波形より、系統電圧のゼロクロスとほぼ同じタイミングでインバータの出力電流が増加し始めており、系統位相 0 rad でインバータは動作を開始できていることが確認できる。また、インバータ出力電流の振幅増加に伴って系統電流振幅を低減できていることが確認できる。

次に、系統電流 i_{Grid} を十分低減させたタイミングで MC をターンオフし自立運転への切替えを行う。ここで、系統電流振幅の閾値 $I_{Grid_Threshold}$ は 5 A であるが、実際に OFF 信号が出力される 40 ms ほど前の時点で系統電流の振幅は 5 A を下回っている。この要因として、系統電流の振幅は 50 Hz 成

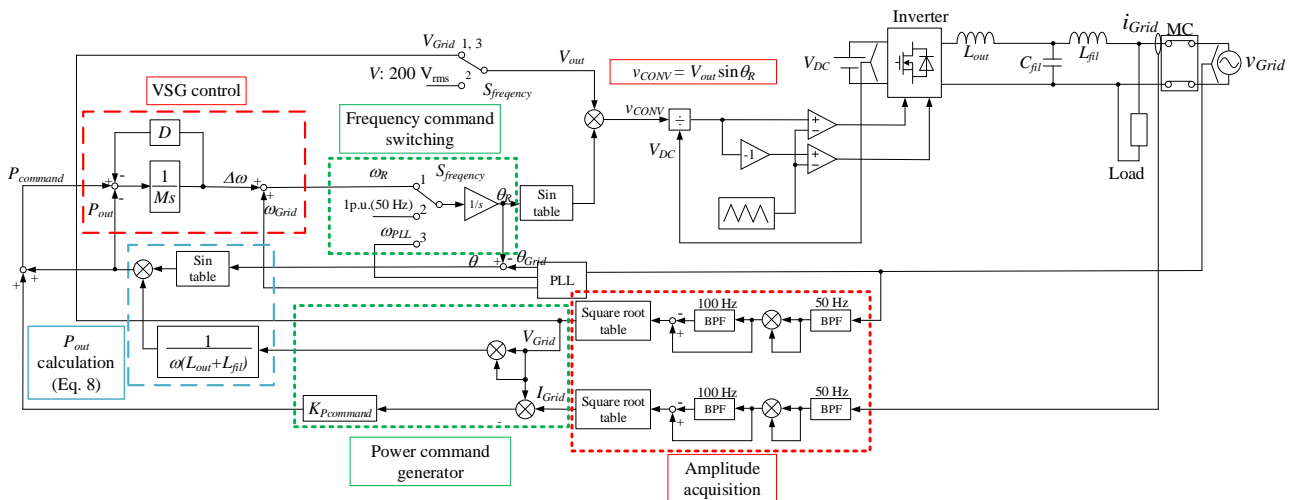


Fig. 8. Experimental control block diagram.

分のみ取得していることや検出時の誤差による影響があるものと考えられる。また、MCをターンオフし系統電流が0となった後も、連続して電力出力の継続が行えていることから無瞬断での自立運転への切替え動作を達成できていることが確認できる。

〈4・2〉 自立運転から系統連系への切替え

図10に、自立運転から系統連系への切替え動作時の実験波形を示す。自立運転時にはインバータの出力電圧は系統電圧の位相と同期していないため、PLLによる同期動作を行う。系統と位相同期後、MCをONにすることで系統連系を行い系統から負荷へ電力を供給する。図10(a)では、自立運転から系統連系への切替え動作によってインバータの出力電流が0A近くまで減少していることが確認できる。ここで、系統電圧と出力電圧との位相差は、(1)式より0rad付近である。また、MCにON信号を出力してから実際にONになるまで25msの時間を要しているが、PLLにより位相が同期しているため位相ずれによる電位差により過電流等を生じることなく連系への切替えを行うことが可能となっている。図10(b)では、PLLによる同期を開始した時点で約0.8πradの位相差が存在しているものの、同期開始から約1秒後には同期が完了し、自立運転から系統連系動作への切替えが行われていることが確認できる。

以上の結果から、提案する周波数指令切替えによる連系・自立動作切替え制御により、連系・自立無瞬断切替えが達成可能であることが確認された。

5. 結論

本論文では、系統へ接続された負荷に対して無瞬断で電力を供給することを目的として、系統連系インバータにおける系統連系から自立運転への切替え動作にのみVSG制御を適用した連系・自立無瞬断切替え制御を提案した。提案制御法である出力周波数指令切替えでは、VSG制御とCVCF制御を使い分けることができるため、従来のVSG制御の課題であった自立運転時の周波数変動や系統連系時に位相同

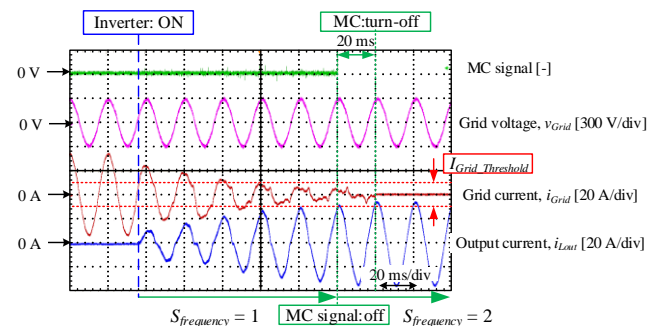


Fig. 9. Switching operation waveform from grid-connected operation to stand-alone operation.

期ができないことによるMCの動作遅れの影響について解決することが可能である。また、無瞬断での連系動作から自立運転への切替えと自立運転から連系動作への切替えが可能であることを実機検証により示した。今後は、非線形負荷に対して適用した場合の検討や連系インダクタンスを低減することによる影響の調査を行う。

文 献

- (1) 崎本謙一, 三浦友史, 伊瀬敏史:「仮想同期発電機の機能を有する分散電源を含む局所系統の無瞬断系統解列」,平成23年電気関係学会関西支部連合大会, 30P2-19, pp. 449-450, 2011
- (2) 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
- (3) Z. Peng, J. Wang, Y. Dai, Y. Wen, Z. John Shen, Z. Li and D. Bi, "Improved Virtual Synchronous Generator Control Strategy for Seamless Switching"
- (4) Y. Hirase, O. Noro, E. Yoshimura, H. Nakagawa, K. Sakimoto and Y. Shindo, "Virtual Synchronous Generator Control with Double Decoupled Synchronous Reference Frame for Single-Phase Inverter", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.4, No.3, pp. 143-151, 2014
- (5) 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

- (6) 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
- (7) 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
- (7) X. Xiong, C. Wu, G. Hu, D. Pan, F. Blaabjerg, "Transient Damping Method for Improving the Synchronization Stability of Virtual Synchronous Generators", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, No. 7, pp. 7820-7831, 2021

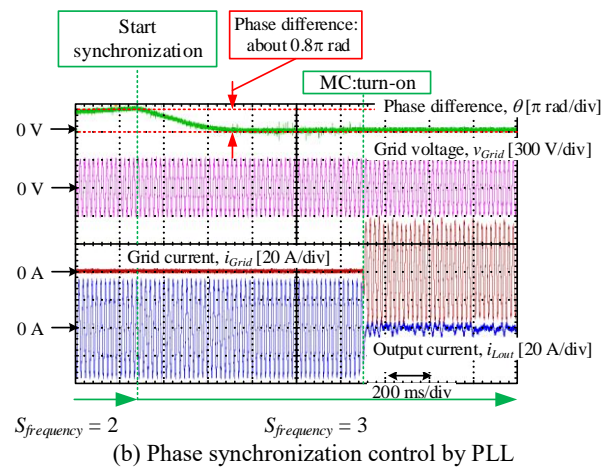
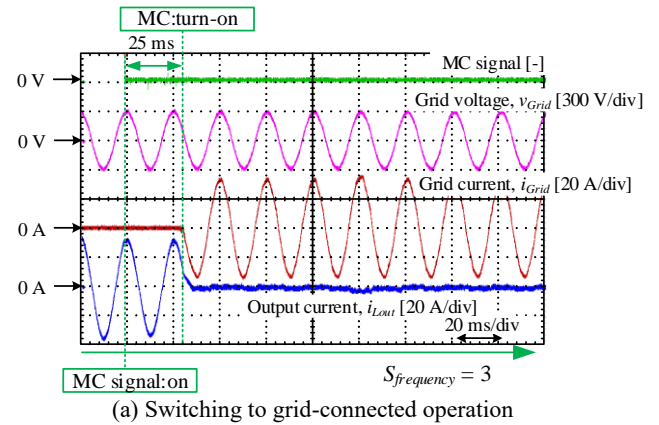


Fig. 10. Switching operation waveform from stand-alone operation to grid-connected operation.