

(101) 電力工学

電力系統安定化を目的とした単相同期化インバータの実験的検証

An Experimental Study of a Single-phase Synchronous Inverter

松尾 興祐[†] 足立 虹太[†] 関崎 真也[†] 餘利野 直人[†]

佐々木 豊[†] 造賀 芳文[†] 西崎 一郎[†] 清水 敏久^{††}

Kosuke Matsuo[†] Kota Adachi[†] Shinya Sekizaki[†] Naoto Yorino[†]

Yutaka Sasaki[†] Yoshifumi Zoka[†] Ichiro Nishizaki[†] Toshihisa Shimizu^{††}

[†]広島大学 大学院工学研究科 システムサイバネティクス専攻

^{††}首都大学東京 大学院システムデザイン研究科 電子情報システム工学域

1 はじめに

再生可能エネルギー (RES: renewable energy sources) の急速な導入により, 電力系統における従来の信頼度基準^[1-3]の維持が困難となる問題が懸念され, 系統安定化策が検討されている. 著者らは, 電力系統の慣性力低下に起因する安定度の問題に注目し, 三相および単相インバータに擬似的な同期化力を具備するための研究開発を行ってきた^[4,5]. 著者らは, 同期化力を具備した単相インバータを単相同期化インバータ (single-phase synchronous inverter: SSI) と呼び, 提案制御系を実装した SSI を実現するための数値シミュレーションおよび HIL (hardware-in-the-loop) システムにより, その有効性を段階的に検証してきた^[6]. 本稿では, 提案制御系をデジタル制御系として再設計し, DSP (digital signal processing) ボードに実装した上で, 簡易電力系統モデルを用いて実験的検証を行ったので報告する.

2 提案制御系

本稿では, 同期機 X'_d モデル, ガバナ, および自動電圧調整装置 (automatic voltage regulator: AVR) からなる線形化同期機モデル(1)-(7)式を採用している. (1)-(5)式において, θ_{inv} は SSI の擬似回転子角度, M_{inv} は擬似慣性定数, D_{inv} は擬似ダンピング係数, P_m は擬似機械入力, P_e は単相有効電力出力, P_{gov} はガバナ出力, K_{gov} はガバナゲイン, T_{gov} はガバナ時定数, ω_{ref} は周波数指令値である. 記号 Δ は定常状態における平衡点からの微小変動量を表す. (1)(2)(3)式は, 時間 t , θ_{inv} , 内部周波数 ω_{inv} , 周波数指令値 ω_{ref} の関係を表す. (5)式はガバナのドループ特性を示す. (6)(7)式において, V^{avr} は AVR 出力, K_{avr} は AVR ゲイン, T_{avr} は AVR の時定数, V^{grid*} は系統電圧指令値の実効値である. (6)式において, 出力電圧実効値 V^{inv} は, 系統電圧実効値と AVR 出力の和によって計算される. (7)式では, AVR は一次遅れ特性を持ってお

(同期機モデル)

$$M_{inv} \frac{d^2 \Delta \theta_{inv}}{dt^2} + D_{inv} \frac{d \Delta \theta_{inv}}{dt} = P_m + P_{gov} - P_e \dots (1)$$

$$\theta_{inv} = \omega_{inv} t + \Delta \theta_{inv} \dots (2)$$

$$\Delta \omega_{inv} = \frac{d \Delta \theta_{inv}}{dt} \dots (3)$$

$$\omega_{inv} = \omega_{ref} + \Delta \omega_{inv} \dots (4)$$

(ガバナ)

$$T_{gov} \frac{dP_{gov}}{dt} + P_{gov} = -K_{gov} \Delta \omega_{inv} \dots (5)$$

(AVR)

$$V^{inv} = V^{grid} + V^{avr} \dots (6)$$

$$T_{avr} \frac{dV^{avr}}{dt} + V^{avr} = K_{avr} (V^{grid*} - V^{grid}) \dots (7)$$

り, 飽和発生時のワインドアップを回避するために, 積分器を持つ比例積分 (proportional integral: PI) 制御を用いることは避けている. (1)式に基づき, P_e が平衡点から増加した場合, (1)式の右辺が 0 になるように, SSI は擬似回転子角度 $\Delta \theta_{inv}$ を減少させる. 一方で, P_e が減少した場合, SSI は $\Delta \theta_{inv}$ を増加させる. したがって, SSI の出力電圧位相 θ_{diff} は θ_{inv} により自動的に制御されることになる. この同機器の同期メカニズム) は, PLL (phase locked loop) なしに同期を実現することができ, PLL の不安定性を回避し, 安定な同期を達成することができる. 特に, マイクログリッドの独立運転における安定運用において有効である.

3 実験装置の構築

図 1 に, 実際に構築した実験環境を示す. DC/DC コンバータ (MWEPC-DDN-A5R0: Myway Plus Corp.) へ印加する直流電圧源として, 鉛蓄電池 (12V) を 4 台直列に繋いだものを用意した.

DC/DC コンバータは SSI の直流リンク電圧を 180V に維持する. 開発した制御系は C 言語によりコード化され, DSP ボード (PE-Expert4: Myway Plus Corp.) に実装される. マイクログリッド内の電流センサ, 電圧センサから検出された値は A/D, D/A 変換器を介して PE-Expert4 に送信される. 提案制御系は検出された値に基づき, インバータ (MWINV-1R022: Myway Plus Corp.) を制御するためのゲート信号を生成する. 図 1(b)は実験に用いるマイクログリッドである. 1 台の SSI を AC フィルタ, 線路, 開閉器, 同期検定器を介して 100V, 60Hz 系統に接続している. 系統との間にある線路インピーダンスは小さいため, 同期検定器を用いて安全に留意して実験を行っている. また, 何らかの要因で SSI 制御系が不安定になり, 過電流が発生した場合であっても系統側に影響を及ぼさないように, 遮断器を系統との間に設置している. 表 1 に回路パラメータを, 表 2 に SSI パラメータを示す. また, 本稿では(5)式のガバナ機能はオフにしている.

具体的な手順は以下の通りである.

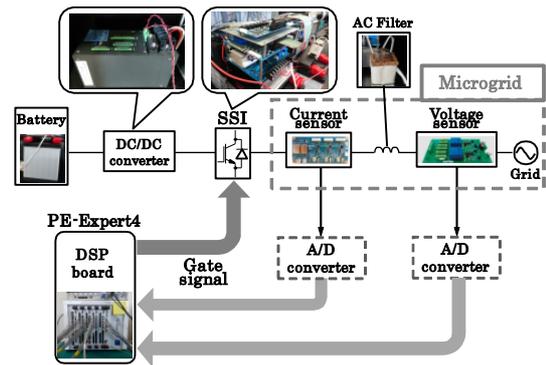
- ・図 1(b)で SW #1, SW #2 の初期状態はともに「開」.
- ・DC/DC コンバータの電源を投入し, SSI の直流リンク電圧を 180V にする.
- ・PE-Expert4 に実装された提案制御系を実行し, SSI を出力電圧 100V, 内部周波数 60Hz になるまで加速させる.
- ・SSI 内部周波数を系統周波数と等しくなるまで加速させた後, SW #1 を閉じる.
- ・同期検定器が SSI の出力電圧と系統電圧の位相が一致したのを検出した瞬間に SW #2 を閉じることで, SSI と系統が同期連系する.

4 実験結果

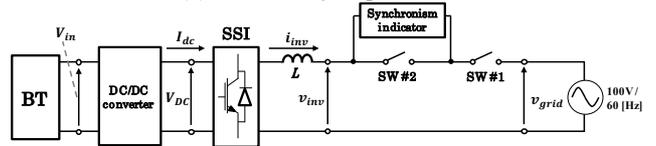
図 2 は $t = -0.99\text{s}$ で同期連系を行ったときの結果であり, 図 2 の(a), (b)はそれぞれ同期連系時の SSI の有効電力出力 P_e , SSI 内部周波数を示している. 図 2 から $t = -0.99\text{s}$ で系統と連系後も, SSI は不安定化することなく同期運転していることが確認できる. 以上より, 提案制御系の性能が実機のインバータを用いた実機実験でも確認できた.

5 おわりに

本稿では, 開発した単相同期化力インバータの制御系を実機に実装し, その動作検証を実機のインバータを用いて行った. 実験により, SSI が実系統とも同期連系できることを確認した. 今後はマイクログリッド運用を実現するため, 複数台の SSI を連系し, 検証を行う予定である.



(a) Laboratory experiments.



(b) Circuit configuration of single-phase microgrid

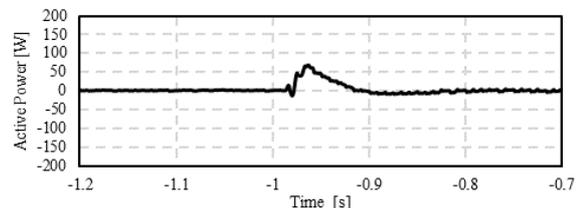
図 1 構築した実験環境

表 1 実験回路パラメータ

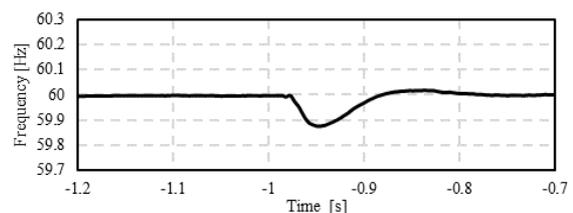
Design parameters	Value
Battery voltage V_{in}	48V
DC link voltage V_{DC}	180V
AC filter L	10mH
Synchro-scope Resistor	54 Ω
Output frequency	60Hz
Switching frequency	20kHz
Grid Voltage & Frequency	100V / 60Hz

表 2 SSI パラメータ

Design parameters	Value
Virtual inertia coefficient M_{inv}	1
Virtual damping coefficient D_{inv}	50
Virtual mechanical input P_m	0W
Reference frequency ω_{ref}	377rad/s
Time constant for the AVR T_{avr}	0.001s
AVR gain K_{avr}	1.0
Reference voltage V^{grid*}	100V



(a) Output power



(b) Frequency

図 2 同期連系時の出力結果

参考文献

- [1] T. E. Dy Liacco, "System security: the computer's role," *IEEE Spectrum*, vol. 15, no. 6, pp. 43-50, Jun. 1978.
- [2] B. Stott and E. Hobson, "Power system security control calculations using linear programming, Part1&2," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1713-1731, Sep./Oct. 1978.
- [3] M. H. Banakar and F. D. Galiana, "Power system security corridors concept and computation," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4524-4532, Nov. 1981.
- [4] 野口敬太, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人, "同期化ラインバータを用いた系統安定化制御,"平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp.67-68, 2013 年 10 月 19 日, 岡山大学
- [5] 中村優希, 関崎真也, 佐々木豊, 三宅正堯, 造賀芳文, 餘利野直人, "系統安定化を目的とした同期化ラインバータを用いた電力システムシミュレーションと簡易実験による検証," パワーエレクトロニクス学会若手研究会, JIPE-40-33, 2014 年 12 月 20 日, 同志社大学
- [6] 関崎真也, 餘利野直人, 佐々木豊, 松尾興佑, 中村優希, 造賀芳文, 清水敏久, 西崎一郎, "電力系統安定化と非常時のマイクログリッド運用を目的とした特性非干渉型単相同期化ラインバータの提案と実験的検証," 電学論 B, Vol. 138, No. 11, pp. 893-901 (2018).