

喜久里 浩之

本成果は、NEDOの委託業務(JPNP19002)の結果得られたものである。

擬似慣性機能付きPCSの性能評価

第2回地域自律型MG研究会 @早稲田大学 July 14, 2023

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター



発表内容

■ 産総研とFREAのご紹介

- PCS電源の大量導入時代に何が求められるのか?
- 擬似慣性機能付きPCSの性能評価試験
 PHIL試験による周波数安定化性能の検証
 JET試験による保護機能との干渉の検証

230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



産総研とFREAのご紹介



AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

- Established in 2001 by reorganizing 16 institutes under METI
- Total income: 110 billion JPY
 90%: Government, 10%: Industry
- 2901 employees (as of July. 2022)
 - 2214 researchers
 - 687 administrative employees
 - + executives, visiting researchers, postdocs, technical staff
- 7 research departments







FREA (Fukushima Renewable Energy Institute, AIST)

- Established in Koriyama, Fukushima in 2014 for promoting
 - R&D of renewable energy internationally
 - Reconstruction of disaster area of 3.11

Hydrogen plant

Smart System Research Facility (FREA-G)

Power System Lab

Has over 200 researchers in 9 research teams

Energy Network

Source: FREA https://www.aist.go.jp/fukushima/

Hydrogen Photovoltaic

Wind Power Geothermal Shallow Geothermal

300 kW WT

500 kW PV



Power System Laboratory (Movie)



- AC source
 - **Grid simulator: 500 kVA, 30 kVA**
- DC source
 - PV simulator: 600 kW
 - Batter simulator: 207 kW
 - **Lithium-ion battery: 16 kWh**
- Inverter
 - □ GFM (VSG control)
 - **GFL** (smart inverter, virtual inertia, etc.)
- Digital real-time simulator (DRTS)
 - RTDS Technologies: NovaCor, PB5
 - Typhoon HIL: HIL604
- RLC load: 200 kVA
- Data acquisition system
- Connectivity to demonstration field

Smart System Research Facility called "FREA-G"

- Established in 2016 for testing large-size grid-connected inverters
- Testing capability
 - Grid simulator: AC 5 MVA (1.67 MVA × 3 units)
 - PV/battery simulator: DC 3.3 MVA, 2000 V
 - Grid interconnection testing room (L, M, S)
 - Environmental testing room: -40 to +85°C, 30 to 90%RH
 - EMC testing room: 34 m×34 m×7.8 m, largest in Japan







230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



PCS電源の大量導入時代に 何が求められるのか?



分散電源の増加に伴う要件の変化

Evolution of grid support functions



Source: NREL

IEEE

IEEE STANDARDS ASSOCIATION



低慣性系統における周波数安定性の低下

系統事故時の周波数変化率(RoCoF)増加および周波数最下点(Nadir)低下の緩和
 分散電源の単独運転検出機能等の不要動作を回避





PCSには同期発電機のアンシラリー機能を多く引き継ぐことが期待されている

■ PCSの擬似慣性機能: (1秒未満の) 高速な周波数応答が想定されている





擬似慣性機能付きPCSの研究開発を包括的かつ爆速で進める諸外国

- 米国
 - FY2016–FY2018: DOE "<u>SuNLaMP</u>"、FY2021–: DOE "<u>UNIFI</u>"
 - IEEE 2800-2022: GFMはスコープ外になったが適用を妨げないと明記
- 欧州
 - □ 2016–2019: EU Horizon 2020 "<u>MIGRATE</u>"、2018–2021: 同 "<u>OSMOSE</u>"
 - 英国NGESO: GFMの要求仕様を含めたGrid code (GC0137)を2022年に発効。
 - ENTSO-e: GFMの要求仕様を含めた"<u>NC RfG 2.0</u>"を2024年に発効予定。2027年までに各国 Grid codeに反映予定。
- 豪州
 - AEMO: "Voluntary Specification for Grid-forming Inverters," 2023
 - □ ARENA: "Large Scale Storage Funding Round" 合計 2.0 GW/4.2 GWh、GFM、2023
- その頃、日本では
 - FY2019–FY2021: 「<u>再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定</u> 化技術開発」← 今回の発表内容
 - FY2022–FY2026: 「<u>再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク</u> 安定化技術開発(STREAMプロジェクト)」



大規模系統で100%再工ネは達成可能か

South Australia – Already at 100% IBR (but...)



Source: B. Kroposki, "The Need for Grid-forming (GFM) Inverters in Future Power Systems" https://research.csiro.au/ired2022/wp-content/uploads/sites/477/2022/11/The-Need-for-Grid-forming-GFM-Inverters-in-Future-Power-Systems.pdf



8 GFM batteries with total capacity of 2.0 GW/4.2 GWh



Source: ARENA, Large Scale Storage Funding Round <u>https://arena.gov.au/news/arena-backs-eight-grid-scale-batteries-worth-2-7-billion/</u> ARENA <u>https://arena.gov.au/blog/arena-backs-eight-big-batteries-to-bolster-grid/</u> 230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



擬似慣性機能付きPCSの性能評価試験



擬似慣性機能付きPCSを試験する目的

- 多数の擬似慣性機能が提案されている中で、
 - ■実機への実装を確認
 - ・PCSメーカが試作機を製作し、FREAで試験を実施
 - ■多様な系統条件における性能を確認
 - ・PHIL試験環境を構築し、系統の周波数安定化への効果を評価
 - □ 他機能との干渉を確認
 - ・現行のJET試験を実施し、保護機能との干渉を検証



擬似慣性機能付きPCSの試作機を複数メーカ・制御方式で製作

	Grid-following inverter		Grid-forming inverter			
	GFL 1	GFL 2	GFM 0	GFM 1	GFM 2	
制御方式	df/dt-P droop f-P droop	df/dt-P droop f-P droop	VSM Q-V droop	P-f droop Q-V droop	VSM Q-V droop	
定格容量 (kVA)	20	49.9	12	20	50	
交流定格電圧 (V)	200	200	420	200	440	





GFL方式とGFM方式の主たる制御系の一例

Grid-following 方式

 電流源の特性をもつ

Grid-forming 方式
 電圧源の特性をもつ

DFDT (df/dt+df)



Frequency-Watt、FFR



Droop



Virtual synchronous machine (VSM)





(参考)系統周波数変化時のPCS試作機の周波数応答



- 主たる制御パラメタを同等に設定して比較
 - GFL、GFMの比較
 - ・周波数応答速度:GFL < GFM
 - ・動揺の大きさ:GFL < GFM
 - GFL同士、GFM同士の比較
 - ・大きな推移はほぼ同等
 - ・遅れなどの影響がやや異なる模様
 - 制御パラメタを変更しても同様の傾向

230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



PHIL試験による周波数安定化性能の検証 擬似慣性機能付きPCSの性能評価試験



PCS試作機の模擬慣性機能評価と親和性が高いPHIL試験

- 擬似慣性機能に求められること
 - a. PCS比率が増加した(低慣性)系統で、
 - b. 事故発生時の周波数変化を緩和するための、
 - c. **サブ秒程度の応答性能**を有すること
- 擬似慣性機能の評価方法に求められること
 - A. PCS比率が変更できる系統で、
 - B. 周波数変化の影響が評価でき、
 - C. 試作機のサブ秒程度の応答性が検証できること

	シミュレーション	実証試験	PHIL試験
\rightarrow	0	Х	0
\rightarrow	0	Х	0
\rightarrow	Х	Ο	O? → O





擬似慣性機能付きPCSのためのPHIL試験構成

Modified IEEE 9-bus system model (300 MW)





擬似慣性機能付きPCSを安定かつ十分な精度で試験可能であることを確認



Source: H. Kikusato, et al., "Verification of Power Hardware-in-the-Loop Environment for Testing Grid-Forming Inverter," Energy Reports 2023, 9 (supplement 3), 303–311.



PCS比率の増加に伴い、周波数変化が増加する従来PCS、緩和するGFL/GFM GFMは80%でも安定に動作



Source: H. Kikusato, et al., "Performance Evaluation of Grid-Following and Grid-Forming Inverters on Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems by Power Hardware-in-the-Loop Testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 381–392.



慣性定数 H はRoCoFに、 ガバナゲイン G は周波数Nadir(& RoCoF)に寄与する傾向



Source: H. Kikusato, et al., "Performance Evaluation of Grid-Following and Grid-Forming Inverters on Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems by Power Hardware-in-the-Loop Testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 381–392.

GFMの周波数安定化機能と単独運転検出機能(能動)で干渉が発生



Source: H. Kikusato, et al., "Performance Evaluation of Grid-Following and Grid-Forming Inverters on Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems by Power Hardware-in-the-Loop Testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 381–392.

AIST 💕 FREA



複数の擬似慣性機能付きPCSを組み合わせたPHIL試験



制御方式間の干渉を検証したいが、容量等が異なるPCSをどのように試験すればよいか ▼ 定格容量、定格電圧、制御パラメータが同等になるように調整



複数の擬似慣性機能付きPCSを組み合わせたPHIL試験



with Virtual Inertia Controls," Energy Reports 2023, 9 (supplement 10), 458–466.



検証した全てのPCS組合せで、周波数安定性を著しく悪化させるような干渉は 発生しなかった。組合せたPCSは各単機試験結果の中間の性能を示した。





まとめ (PHIL試験)

- PCS試作機の擬似慣性機能をPHIL試験により検証した
 - 周波数変動緩和効果:従来PCS<GFL<GFM</p>
 - GFMと単独運転検出機能(能動的方式)の両立が課題
 - 2台のPCSを並列することによる顕著な干渉なし

今後の課題

- □ プラントでの評価・IBRが系統に分散する影響を考慮した評価
- 周波数以外の安定性の評価(電圧、位相角、インバータドリブン)

230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



JET試験による保護機能との干渉の検証 擬似慣性機能付きPCSの性能評価試験



PCSの擬似慣性機能は

保護機能/試験に影響を与える可能性があり、その検証が必要

- 擬似慣性機能の特徴
 - 1秒未満の高速応答
 - ・保護機能の動作時限と被っている(cf. スマートインバータの応答は数秒~数10秒程度)
 - 系統電圧・周波数・位相変化に伴う出力変化
 - ・電流源の特性: Grid-following インバータ(GFL)、周波数変化に応答
 - ・電圧源の特性:Grid-forming インバータ(GFM)、電圧・周波数・位相変化に応答
- 保護機能に関する現行の日本の認証試験(JET試験)では、 このような特徴を持つインバータの適合性評価は考慮されていない



JET試験で系統電圧・周波数・位相が変化する試験項目を実施した。 GFLは全項目で概ね適合。GFMは多くが不適合。3つの課題を明らかにした。

#	試験項目	GFL 1	GFL 2	GFM 0	GFM 1	GFM 2
1	交流過電圧及び不足電圧試験	P *	Р	F	F	F
2	周波数上昇及び低下試験	P*	Ρ	F	F	F
3	単独運転防止試験1	P *	P *	-	F	Ρ*
4	系統電圧急変試験	Р	Р	F	Р	Р
5	系統電圧位相急変試験	Р	Ρ	Р	F	F
6	瞬時電圧低下試験(FRT試験)	P *	P *	F	F	F
7	周波数変動試験(FRT試験)	Р	Р	F	F	Р

P:適合(Pass)、F:不適合(Fail)、-:未実施 *機器構成やロジック等の軽微な修正で適合が見込める



課題1 系統電圧・周波数・位相変化時のOCRによる解列



- 不適合判定の理由
 初期条件に到達不可:#1,2
 - □ 運転継続不可:#4~7
- OCRによる解列の理由
 - GFMが持つ電圧源の特性
 - 被験体GFMの電流制限機能に制限あり
 - 設定出力が 1.0 pu



- 対策案
 - 電流制限機能を一定時間以上継続
 - 設定出力を下げる
 - 制御パラメタの変更



課題2 瞬時電圧低下からの復帰後の出力動揺



- 不適合判定の理由
 ②を満たさない
- 出力動揺の理由
 GFMが持つ電圧源の特性
- 対策案
 制御ロジックの変更
 制御パラメタの変更
 判定基準の変更
- 参考:電圧復帰後の出力動揺の判定基準
 許容:IEEE 1547/P2800、National Grid
 記載なし:EN50549

Source: H. Kikusato, et al., "Performance Analysis of Grid-Forming Inverters in Existing Conformance Testing," Energy Reports 2022, 8 (supplement 15), 73–83.



課題3 単独運転防止機能と擬似慣性機能の両立が困難

■ GFM 0は未実装、GFM 1は不適合だが周波数安定化、GFM 2は適合だが周波数不安定化



Source: H. Kikusato, et al., "Performance Analysis of Grid-Forming Inverters in Existing Conformance Testing," Energy Reports 2022, 8 (supplement 15), 73–83.



課題3 単独運転防止機能と擬似慣性機能の両立が困難

■ GFM 0は未実装、GFM 1は不適合だが周波数安定化、GFM 2は適合だが周波数不安定化



単独運転検出 有効時の PHIL試験結果

Source: H. Kikusato, et al., "Performance Analysis of Grid-Forming Inverters in Existing Conformance Testing," Energy Reports 2022, 8 (supplement 15), 73–83.



まとめ (JET試験)

- インバータの擬似慣性機能が保護機能/試験に与える影響を検証した
 JET試験の系統電圧・周波数・位相が変化する試験項目を実施
 GFLは概ね適合、GFMは多くが不適合
- GFMに関する3つの課題を明らかにした
 - 課題1:系統電圧・周波数・位相変化時のOCRによる解列
 - 課題2:瞬時電圧低下からの復帰後の出力動揺
 - □ 課題3: 単独運転防止機能と擬似慣性機能の両立が困難
- 現行の試験では、GFMのような電圧源の特性を持つインバータは考慮されていない
 連系する系統(電圧階級、大規模/MG)に合わせたGFMの機能要件の検討が必要
 - 試験手順、判定基準等の試験側の見直しも含めた議論が必要



Related Works

- 橋本潤、喜久里浩之、織原大、「次世代インバータの動向と評価技術について」、電気学会誌、143巻、4号、pp. 200-203、2023
- H. Kikusato et al., "Performance Evaluation of Grid-Following and Grid-Forming Inverters on Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems by Power Hardware-in-the-Loop Testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 381–392.
- H. Kikusato et al., "Performance Analysis of Grid-Forming Inverters in Existing Conformance Testing," Energy Reports 2022, 8 (supplement 15), 73–83.
- H. Kikusato et al., "Verification of Power Hardware-in-the-Loop Environment for Testing Grid-Forming Inverter," Energy Reports 2023, 9 (supplement 3), 303–311.
- H. Kikusato et al., "Power Hardware-in-the-Loop Testing for Multiple Inverters with Virtual Inertia Controls," Energy Report 2023, 9 (supplement 10), 458-466.
- D. Orihara et al., "Contribution of Voltage Support Function to Virtual Inertia Control Performance of Inverter-Based Resource in Frequency Stability," Energies 2021, 14, 4220.
- D. Orihara et al., "Internal Induced Voltage Modification for Current Limitation in Virtual Synchronous Machine," Energies 2022, 15, 901.
- J. Hashimoto et al., "Development of df/dt Function in Inverters for Synthetic Inertia," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 363– 371.
- J. Hashimoto et al., "Developing a Synthetic Inertia Function for Smart Inverters and Studying its Interaction with Other Functions with CHIL Testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 435–443.
- T. Takamatsu et al., "Simulation Analysis of Issues with Grid Disturbance for a Photovoltaic Powered Virtual Synchronous Machine," Energies 2022, 15, 5921.
- H. Hamada et al., "Challenges for a Reduced Inertia Power System Due to the Large-Scale," Global Energy Interconnection 2022, 5(3), 266–273.

230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



Appendix







単独運転防止試験で使用



Detailed Connection Configuration of Each Inverter Under Testing





各PCSの単独運転検出機能

	受動的方式	能動的方式		
GFL 1	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数 フィードバック方式		
GFL 2	周波数変化率方式	周波数シフト方式		
GFM 0	未実装	未実装		
GFM 1	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数 フィードバック方式		
GFM 2	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数 フィードバック方式		



Specifications of inverters

Table 2. Specifications of inverter prototypes.

Name and inverter types	GFL 1	GFL 2	GFM 0	GFM 1	GFM 2
Rated capacity	20 kVA	49.9 kVA	12 kVA	20 kVA	50 kVA
Advanced control functions	df/dt-P droop, f-P droop	df/dt-P droop, f-P droop	VSM, Q-V droop	P-f droop, Q-V droop	VSM, Q-V droop
IDM (reactive method; active method)	Voltage phase angle jump detection; Frequency feedback method with step reactive power injection	RoCoF change detection; Frequency shift method	Unimplemented	Voltage phase angle jump detection; Frequency feedback method with step reactive power injection	Voltage phase angle jump detection; Frequency feedback method with step reactive power injection
Current limiting function	w/	w/	w/	w/o	$\mathbf{W}/$
Prototype number	Prototype 1	Prototype 2	Prototype 3	Prototype 1	Prototype 4



HIL Simulation is a Flexible and Reliable Testing Method





CHIL vs. PHIL

- Both are powerful verification methods, but if we had to choose...
- CHIL is simpler to implementation
 - PHIL has interface issues
 - Suitable for development by manufactures
- PHIL is more realistic
 - CHIL does not include a real power unit
 - Suitable for evaluation by utility



Power HIL (PHIL)



230714 MG研究会 ©Kikusato, Hiroshi 2023



CHIL Testing to Develop df/dt Function



Development of df/dt Function

- A virtual inertia control of grid-following (GFL) inverter
 - Many control parameters
 - Coexist with other grid-supporting functions (frequency-watt, reactive power control, etc.)





CHIL Test Accuracy Verification





CHIL setup





Laboratory setup



Active/Reactive Power Response Matched within ±1.0%



(entire inverter response)



CHIL Setup for Parameter Sensitivity Analysis



- Synchronous generator (SG): 300 kVA, 150 kW output
- Inverter-based resource (IBR): 300 kVA, 150 kW output
- Load: 300 kW => 320 kW



Result of Parameter Sensitivity by CHIL Testing





④ Frequency-watt control activation

Others: time window, dead band, etc.

Source: J. Hashimoto, et al., "Development of df/dt Function in Inverters for Synthetic Inertia," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 363–371; J. Hashimoto, et al., "Developing a Synthetic Inertia Function for Smart Inverters and Studying its interaction with other functions with CHIL testing," Energy Reports 2023, 9 (supplement 1), 435–443.