

パワーエレクトロニクス製品群の高信頼性を実現： 電力機器実機と機械モデルの接続シミュレーション -PHILS-

Achieving High Reliability of Power Electronics Products: Power Hardware-in-the-Loop Simulation



渡辺 和樹^{*1}
Kazuki Watanabe

石黒 絢也^{*1}
Shunya Ishiguro

飯田 亮^{*1}
Ryo Iida

三橋 真人^{*2}
Masato Mitsuhashi

大矢 巧^{*3}
Takumi Oya

機械システムの電化と電力システムの脱炭素化において、パワーエレクトロニクスの活用が重要である。進展するパワー半導体技術や電力変換技術を既存システムに適用するときは、電気・制御・機械の連成を含む複雑な相互作用の検証が課題となる。三菱重工グループは、電力機器の実機とモデル化した機械システムを接続した環境を構築し、システム統合検証を行うための汎用的な PHILS (Power Hardware-in-the-Loop Simulation) 技術を開発した。500kW 級テストベンチで数百 Hz までの事象を評価可能とし、実機とモデルの相互作用を検証できる。製品システム開発の効率化と信頼性向上を図り、多様な製品群への適用を進めている。

1. はじめに

現代の電力システムにおいて、パワーエレクトロニクスは電力の高効率かつ高品質な変換と制御を実現する基盤技術として不可欠である。昨今の災害の激甚化と、インフラ設備のレジリエンス向上を求める声を背景に、分散電源の導入拡大とこれに対応する電力変換技術が必要となっている。その中で、三菱重工業株式会社(以下、当社)が提供する、エンジン発電機などの機械システムと組み合わせた電力制御技術は、機械メーカーとしての当社の強みを活かすことで、柔軟かつ安定的な電力供給に重要な役割を果たす。

例えば、PCS (Power Conditioning System) をエンジン発電機と組み合わせると、互いの特性が相互作用し、電力品質の指標である系統電圧や系統周波数の動的挙動に影響を及ぼす。こうした相互作用を正確に把握し、適切に制御することが電力供給の信頼性向上に繋がる。

相互作用を考慮すべき具体例として、仮想同期発電機 (Virtual Synchronous Generator 以下、VSG) 制御が挙げられる。VSG は同期発電機を模倣した制御を PCS に実装することで、系統の動的安定性に貢献する技術である。しかし、その効果を最大限に引き出すには、原動機を含む既存の電源システムとの相互作用を含めた総合的な評価と検証が必要である。

電力機器間で生じる複雑な相互作用を評価する手段として、当社では PHILS (Power Hardware-in-the-Loop Simulation) を活用する。PHILS はモデル化されたシステムと実機を組み合わせ検証を行う手法である。実機をあたかも実システムに接続したかのような環境で検証できる点が特徴である。当社は、同技術で先行する米フロリダ州立大学 Center for Advanced Power Systems と 2019 年より共同研究を進め、機械システムや電力機器のモデリング、PHILS について相互に知見を深めてきた。これまでに複数の学会発表を通じて研究成果を公表している^{(1), (2)}。

本報では、ガスエンジンと蓄電池、再生可能エネルギーを組み合わせた分散電源システム商品 EBLOX⁽³⁾の開発において PHILS を適用した事例を紹介する。なお、本試験は、2023 年に当社総

*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部

*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席研究員

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エンジン技術部 主席技師

合研究所名古屋地区に開設した電化システム検証センター”PE-Lab”で実施したものである。

2. PHILS: Power Hardware-in-the-Loop Simulation

(1) PHILS とは

HILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) は従来、航空・宇宙、自動車の ECU (Electronic Control Unit) 等の制御器のシステム検証に用いられてきた。図 1 に HILS の類型を示す。筆者らは、制御器の検証に用いる従来の CHILS (Controller Hardware-in-the-Loop Simulation) と区別し、電力機器のシステム検証手法として PHILS を位置付けている。

PHILS では、リアルタイムシミュレータの計算結果を基に、実電力を扱えるパワーアンプを介して実機に電流を注入したり電圧を印加したりする。また、実機の挙動をリアルタイムシミュレータにフィードバックすることで、電力境界における動作を実機と連携して評価できる。

PHILS の最大の価値は、機械・制御系と電気的現象が複雑に絡み合う動的挙動を、実機を交えて評価できる点にある。シミュレーションで設計した電気的挙動が、実際の機器においても同様に実現可能かを現実的な環境で検証できる。また、PHILS は、当社のお客様と共に開発を進める際の有効な手段である。お客様が将来的に導入を検討するシステム仕様を仮想環境上に実装でき、先行開発した実機がお客様の想定するシステムや環境内でどのように振る舞うかを事前に評価できる。従って、開発初期段階からお客様との仕様調整や最適化を進めることが可能となる。

このように、PHILS はモデルベース開発の文脈と、お客様との協働・共創の両方の意味において重要な役割を果たす。

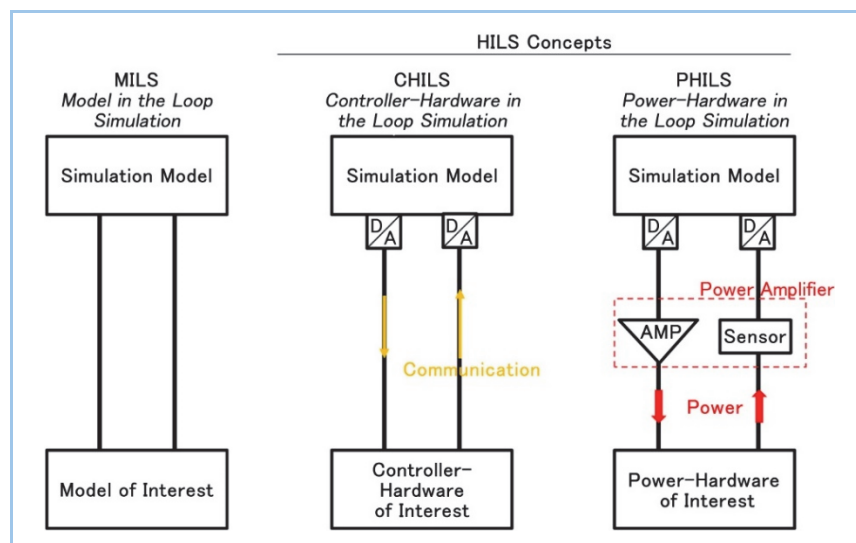


図1 HILS の類型

(2) PHILS に用いる設備

PHILS の環境構築には、リアルタイムシミュレータとパワーアンプを用いる。

リアルタイムシミュレータは実時間と同じ速度で演算を行う計算機である。当社は原動機や機械システムの挙動解析や実機事象の豊富な経験を蓄積し、その特性や限界を踏まえた動特性モデルを保有する。これらをリアルタイムシミュレータ上で再現し、実機の動作評価に活用している。

パワーアンプは広帯域の出力が可能な試験用電源であり、リアルタイムシミュレータからの指令を電圧または電流として実機の供試体に入力する。また、供試体の挙動を計測し、リアルタイムシミュレータへフィードバックする役割を果たす。

当社は複数のリアルタイムシミュレータとパワーアンプを保有しているが、本報では OPAL 社製 OP4512 のリアルタイムシミュレータと、株式会社高砂製作所製 RZ-X2-100K (直流)、

Chroma 社製 EN61800(交流)のパワーアンプを活用した事例を紹介する。

3. 検証対象システム

本報で紹介する検証対象は、図 2 に示すエンジン発電機セットと蓄電池付き PCS が負荷に給電する自立型給電システムである。エンジン発電機セット、電力負荷、蓄電池をリアルタイムシミュレータに実装し、PCS は実機である。エンジン発電機セットは、周波数を調整するガバナ制御と電圧を制御する AVR を有し、発電機の動特性も考慮した。PCS は電流源型 VSG 制御を搭載する。

電流源型 VSG では、PCS 接続点の電圧位相と VSG 内部で計算される電圧位相に差が生じると、目標電力が増加するよう制御される。系統電圧の形成はエンジン発電機が担い、電流源型 VSG はエンジン発電機の回転数変動や電圧変動の挙動をサポートする役割を果たす。

オフグリッドや自立給電システムでは、VSG の挙動が自系統内の原動機特性に強く依存するため、原動機と VSG の組み合わせた特性を考慮した評価が不可欠である。負荷特性やシステム構成はお客様ごとに異なり、対象となるエンジン発電機セットも多岐にわたるため、すべての組合せを実機で開発段階に検証するのは現実的でない。実地試験で初めて特性が明らかになることは設計プロセスとして好ましくなく、設計変更や追加コストのリスクを高める。よって、早期に多様な組合せを効率的に評価できる手法が求められる。

そこで、PHILS を活用し、開発中の VSG 搭載 PCS を実機とし、組み合わせるエンジン発電機等はモデルとする手法が、フロントローディングの観点で効果的なアプローチとなる。

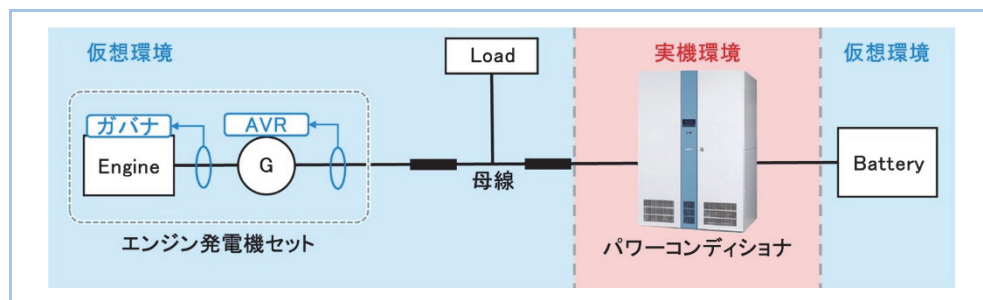


図2 検証対象システム

4. インターフェースアルゴリズム

モデルと実機を閉ループ化するための制御ロジック・通信トポロジをインターフェースアルゴリズム (Interface Algorithm: IA) と呼ぶ。IA には多様な方式が提案されているが⁽⁴⁾、本報で用いる事例にはダンピングインピーダンス法 (Damping Impedance Method 以下、DIM) を用いた。

DIM の概要を図 3 及び表 1 に示す。なお、PCS の直流側の図示は割愛している。DIM の基本的動作としては、モデル内で演算した連系点電圧をパワーアンプの指示値とし、逆に、パワーアンプ端子に流れた電流をモデルへフィードバックするものである。パワーアンプ端で計測した電圧もフィードバックされるが、その感度は図 3 中のダンピングインピーダンス Z^* に依存する。

PHILS はシミュレーションモデルと連動した電気試験であり、モデルの異常挙動による計算の発散や停止時には安全に試験を中断する必要がある。異常検知は電圧振動や電流の上下限で行い、検出時には閉ループを解除し、パワーアンプが定常電圧を出すよう制御している。

PHILS を用いたシステム検証においては、閉ループ環境の妥当性を確認することが重要である。具体的には、実機とモデルが閉ループを形成した場合に、どの周波数帯域まで妥当な検証が可能であるかを評価する必要がある。

今回構築した PHILS の閉ループ周波数応答特性を図 4 に示す。図 4 には、事前に伝達関数から算出した理論値 (Theoretical Calc.)、PHILS 環境を模擬したモデルに摂動解析を適用して得られた特性 (Simulated PHILS)、及び実際の PHILS 環境で測定した特性 (Actual PHILS) をプロッ

トしている。図 4 に示すように、電源の基本周波数 (50Hz/60Hz) に対しては約 0.1% の精度で検証が可能であり、約 600Hz までは -1dB 以内での検証が可能である。また、ゲイン特性が約 200Hz まで減衰していないことから、実効値レベルでの検証は可能であるが、瞬時値レベルでの評価は限定的となる。

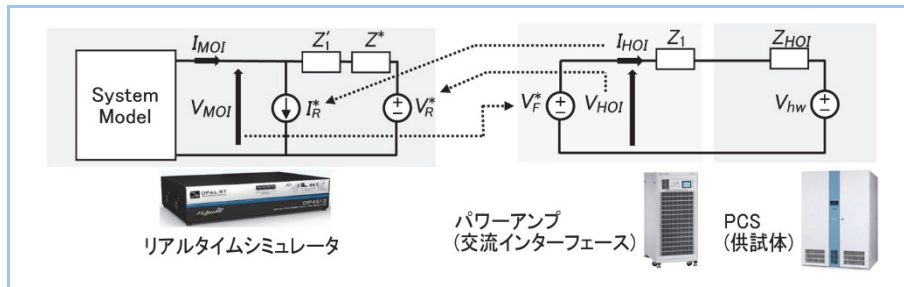


図3 インターフェースアルゴリズム

表1 Interface Algorithm -記号の説明

区分	記号	説明
PCS (供試体)	V_{hw}	PCS (供試体) が生成する電圧
	Z_{HOI}	供試体の端子に付帯するフィルタ等のインピーダンス
パワーアンプ	Z_1	パワーアンプの端子に存在する寄生インピーダンス
	V_F^*	パワーアンプが生成する電圧 (リアルタイムシミュレータからの指示を受けて決定)
	V_{HOI}	パワーアンプの端子電圧
	I_{HOI}	パワーアンプと PCS の間に流れる電圧
リアルタイム シミュレータ	V_{MOI}	PCS が接続する点の電圧 (パワーアンプの電圧指令値となる)
	I_{MOI}	PCS の接続点から PCS に流れる電流
	V_R^*	モデル側の境界電圧 (パワーアンプの端子電圧からフィードバックされる)
	I_R^*	モデル側の境界電流 (パワーアンプの端子電流からフィードバックされる)
	Z_1'	リンキングインピーダンスと呼ばれるものであり、 $Z_1=Z_1'$ となるように設定する
	Z^*	ダンピングインピーダンスと呼ばれるものであり、 $Z^*=Z_{HOI}$ となるように設定する

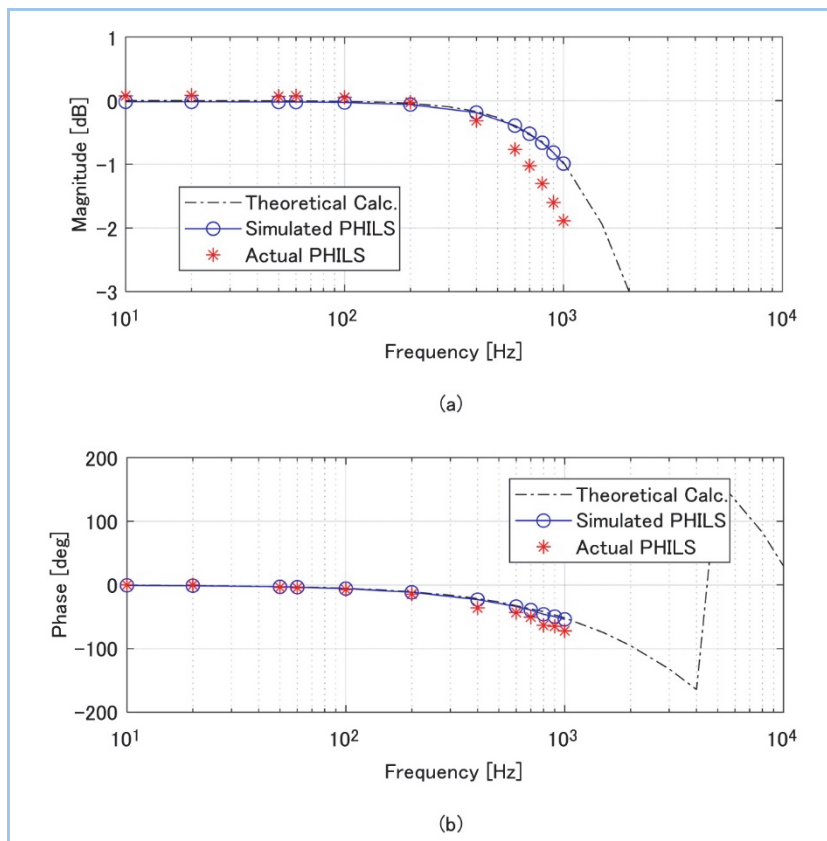


図4 PHILS の精度評価

5. PHILS 統合試験

構築した PHILS 環境を用いて電流源型 VSG を検証した。本報ではその一例として、(1)負荷投入、(2)制御パラメータ調整の試験ケースを紹介する。

(1) 負荷投入試験

PHILS 統合試験結果を図 5 に示す。図 2 に示した PHILS 構成において、投入する負荷のレベルをガスエンジン発電機の定格に対して 10%、20%、30%、50%とした。負荷投入後、発電機が電力を背負い周波数が低下する。周波数低下に伴い、PCS は出力を増大している。これは、電流源型 VSG の内部電圧位相と、発電機の電圧位相との間の位相差が開いたため、電流源型 VSG としては出力増大の指示を出したためである。

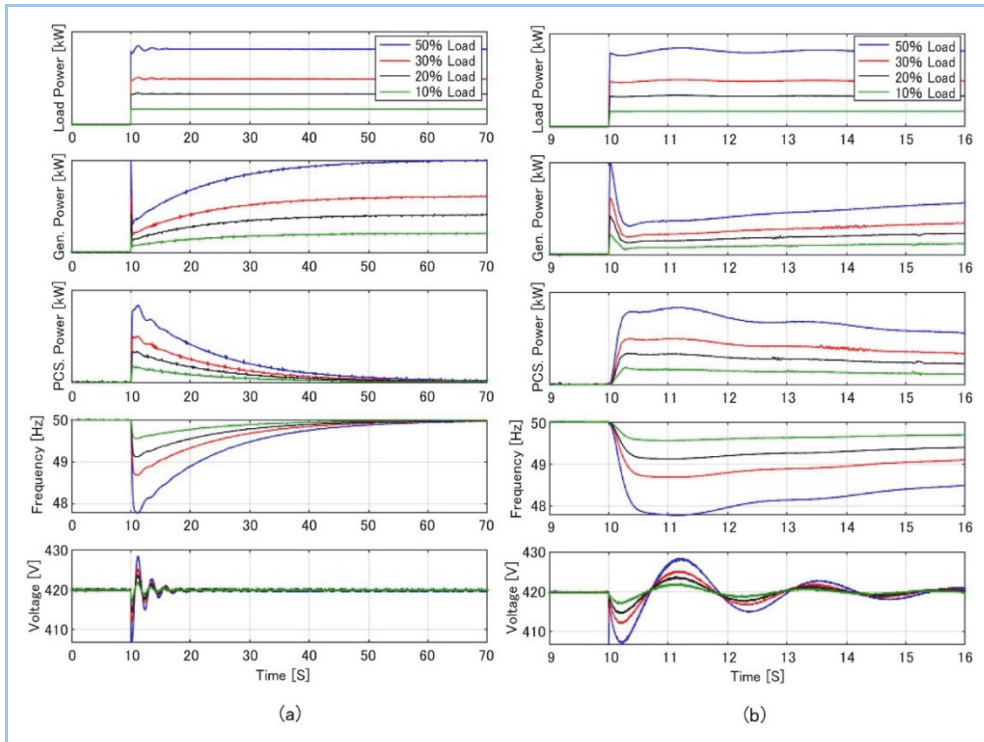


図5 PHILS 統合テスト(a:負荷投入試験, b:時系列拡大図)

(2) 制御パラメータ調整

負荷投入時のガスエンジン発電機との組合せ応動特性をみながら、実機に搭載した電流源型 VSG の仮想インピーダンスをパラメータ検討した結果を図 6 に示す。仮想インピーダンス X を小さくすることで、周波数変動に対して PCS は感度高く出力応答し、結果として最低周波数は改善している。しかし、PCS の応答量を大きくしすぎると、ガスエンジン発電機に電力が逆流し、AVR のダイオードが破損する等の事象が考えられるため、注意が必要である。

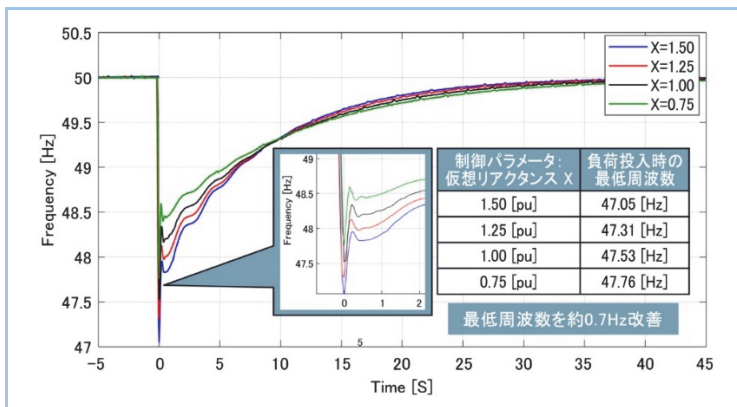


図6 PHILS 統合テストを用いた VSG 制御パラメータの調整

6. まとめ

本報では、PHILS を活用した電流源型 VSG 搭載 PCS のシステム統合検証事例を紹介した。実機とモデルの複雑な相互作用を高精度に評価できることを示し、負荷投入試験や制御調整でシステム安定性向上に寄与する有効な手法であると確認した。民生から防衛製品まで幅広く適用可能な共通基盤技術として強化し、多様な製品群への展開を推進している。今後も本技術を基盤技術として位置付け、機械システムの電化と電力システムの脱炭素化に貢献する。

謝辞

本報で紹介した供試体の試作に際し、株式会社三社電機製作所の皆様にご協力を賜り、厚く御礼申し上げます。また、リアルタイムシミュレータのセットアップについて、株式会社 NEAT 代表取締役 加藤雄高様に貴重なご助言をいただき、深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Kazuki Watanabe et al., Power Hardware-in-the-Loop Simulation to Verify Protection Coordination for DC Microgrid, 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference
- (2) Shunya Ishiguro et al., Using Power Hardware-in-the-Loop Simulation to Explore Uninterrupted Power Service of a Converter for Microgrid, 2024 Annual Conference of the IEEE
- (3) 田中政之ほか, 分散電源時代に向けたトリプルハイブリッド発電システムの実証“EBLOX”“COORDY”の開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.2 (2019)
- (4) Michael Steurer et al., IEEE Recommended Practice for Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation-Based Testing of Electric Power Apparatus and Controls, IEEE Std 2004-2025