

電流源形モータエミュレータに要求される電流応答の実機検証

学生員 田中 元粹 正員 渡辺 大貴 上級会員 伊東 淳一

(長岡技術科学大学)

Experimental Verification of Current Response Required for Current Source Type Motor Emulator

Gensui Tanaka, Student Member, Hiroki Watanabe, Member, Jun-ichi Itoh, Senior-member
(Nagaoka University of Technology)

This paper focuses on stability issues in inverter test system using a current source type motor emulator. Current source type motor emulator cause control instability due to interference with the current control of the inverter under test. This paper experimentally verifies the current control bandwidth required for the current source type motor emulator to prevent interference between the current controls of both the current source type motor emulator and the inverter under test. The experimental results indicate that interference among current controls is prevented by setting the current control bandwidth of the current source type motor emulator to four times the current control bandwidth of the inverter under test. In addition, comparison of the analytical results shows that the current detection delay affects the stability.

キーワード：電流源形モータエミュレータ，電流応答，安定性

Keywords : Current source type motor emulator, Current response, Stability

1. はじめに

モータ駆動技術の開発をモータベンチのような実負荷を用いて行うには、駆動対象モータや負荷モータ、負荷モータ駆動用インバータ、カップリングなど多くの機器が必要であるため試験コストが高くなる。さらに、EV用モータに代表される高速、高出力密度などの特徴を持つ特殊仕様モータの駆動技術開発は、設計開発要素が大きく開発に時間を要する駆動対象モータが試験に必要なため、駆動技術を含むインバータの開発期間も長期化する懸念がある。そのため、試験にかかるコストと時間を削減できる新たな試験方法が求められている⁽¹⁾。

実負荷を用いずに試験を行う方法として、モータエミュレータの導入が進められている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。モータエミュレータは電力変換器によりモータの挙動を模擬することでモータ負荷を実現できるため、駆動インバータとそのコントローラ、制御系の試験を実負荷を用いることなく実施できる。

モータエミュレータは電圧源形⁽²⁾⁽³⁾と電流源形⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾の2種類に大別される。中でも電流源形モータエミュレータはモータ負荷としての精度や汎用性の高さからモータ駆動用インバータの試験に適していると考えられる。しかし、電流源形モータエミュレータの制御は、被試験インバータに実装

されている電流制御との干渉により不安定化する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この電流制御器間の干渉は、電流源形モータエミュレータの電流制御帯域を被試験インバータの電流制御帯域よりも十分高く設計することで防止できる。一方、電流源形モータエミュレータの電流制御帯域を十分に高くするためにはパワーデバイスやコントローラに高い性能が要求される。

そこで著者らは、これまでに電流源形モータエミュレータの不安定化を防止するために必要な電流制御帯域に着目し、電流源形モータエミュレータに必要な電流制御帯域について、解析とシミュレーションにより検討してきた⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。しかし、これまで実機による妥当性の検証はされていない。

本論文では実機にて電流源形モータエミュレータを使用したインバータ試験システムを構築し、電流源形モータエミュレータの安定性と電流制御帯域の関係について実験的に検証する。さらに、これまで解析とシミュレーションにより検討した結果と比較し、妥当性を検証する。

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。電流源形モータエミュレータはカップリングインダクタとPWM整流器で構成され、カップリングインダクタの他方が被試験インバータに接続さ

れる。コントローラは被試験インバータの出力電圧と相電流を検出する。被試験インバータの出力電圧とモータモデルから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電流を模擬し、モータ負荷を実現する。

本論文では模擬対象を埋込磁石同期電動機(IPMSM)とし、モータモデルとして(1)式で表される状態方程式をオイラー法にて DSP に実装する。

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega_{re} \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_{re} \frac{L_q}{L_d} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{v_q}{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_{re} \psi_m}{L_q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i_{dq} は dq 軸電流、 v_{dq} は dq 軸電圧、 R は固定子巻線抵抗、 L_{dq} は dq 軸インダクタンス、 ω_{re} は回転子電気角周波数、 ψ_m は永久磁石の鎖交磁束数、 P は微分演算子である。また、仮想的なモータの回転数や位相情報、出力トルク T_{out} は(2)、(3)式によって電流源形モータエミュレータのコントローラ内で算出され、位相情報は被試験インバータのコントローラに送られる。

$$T_{out} = p\{\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\} \dots\dots\dots (2)$$

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

ここで、 p は極対数、 J は慣性モーメント、 T_L は負荷トルクである。

3. 理論的な安定限界

図 2 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ブロック図を示す。図 2 に示すように、電流源形モータエミュレータの電流制御ループは、被試験インバータの電流制御ループの内部に存在する。そのため、2つの電流制御帯域が近いときに電流制御間で干渉が発生し、システムが不安定に陥る。この干渉を防止するためには、電流源形モータエミュレータの電流制御帯域を被試験インバータの電流制御帯域よりも高く設計する必要がある。

図 3 に被試験インバータの電流制御帯域に対して電流源形モータエミュレータに要求される電流制御帯域を示す。なお、図 3(a)はシステムに遅れの要素のない理想的モデルにおける解析結果、図 3(b)は PWM 出力部に電圧指令更新による 1 サンプル遅れを一時遅れ系として挿入したモデルにおける解析結果である。図 3 において被試験インバータの電流制御帯域が 500Hz のとき、理想モデルにおいて電流源形モータエミュレータに要求される電流制御帯域は 1033 Hz であり、被試験インバータの電流制御帯域の約 2.1 倍である。一方、遅れを考慮したモデルにおいて要求される電流制御帯域は 1277 Hz であり、被試験インバータの電流制御帯域の約 2.6 倍となる。これは、遅れ要素により極が不安定方向に推移するためである。従って、電流源形モータエミュレータへの要求帯域はシステム内の遅れ要素により増加する。

しかし、これまでの検討は電圧指令の更新による 1 サンプル遅れを一次遅れ系で模擬した連続系モデルでの解析に

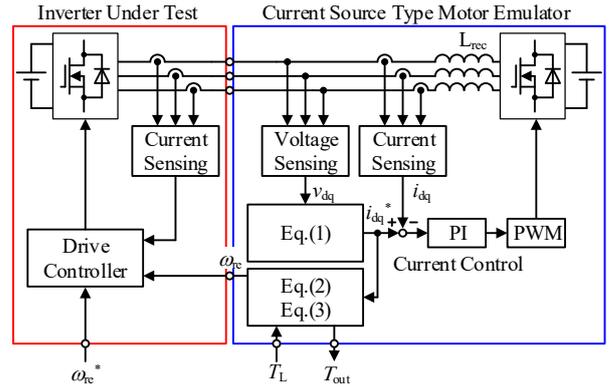


Fig.1 System configuration diagram of inverter test system using current source type motor emulator.

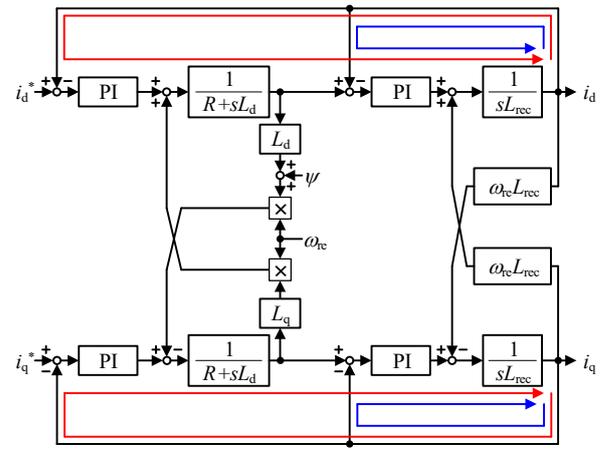


Fig.2 Block diagram of inverter test system using current source type motor emulator.

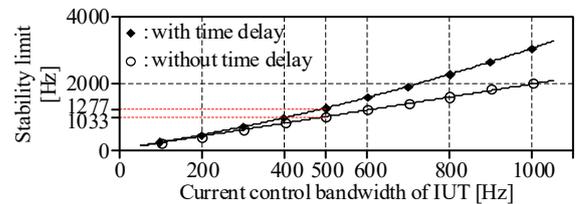


Fig.3 Stability limit when the current control bandwidth of IUT varied from 100 Hz to 1000 Hz⁽⁹⁾.

留まっている。そのため電流検出等の遅れを考慮しきれていない。そこで、実機にて得られた安定限界とこれまでの理論検討結果を比較することにより未考慮の遅れ要素の所在を明らかにし、安定性に影響する要素を特定する。

4. 実機検証

4.1 実機構成 図 4 に実験構成、表 1 に本論文で模擬対象とする IPMSM のモータパラメータ、表 2 に実験条件を示す。被試験インバータのコントローラにはベクトル制御を実装する。このとき、d 軸電流指令はゼロとし、q 軸電流指令値はトルク指令より決定している。電流源形モータエミュレータのコントローラにはモータモデルとカップリングインダクタに対する電流制御を実装している。また、カップリングインダクタの dq 軸上での干渉を取り除くためのフィードフォワード補償を適用する。

実際の電流源形モータエミュレータでは被試験インバータの出力電圧を検出する。しかし、PWM 電圧の検出には高サンプリングの A/D 変換器による検出や LPF の挿入によるスイッチング成分を除去する必要がある。そこで、被試験インバータの D/A 変換器において電圧指令値をアナログ値に変換し、モータエミュレータの A/D 変換器で再度デジタル値に変換することで指令値を授受している。さらに、モータの位相情報は、電流源形モータエミュレータのコントローラ内で算出する仮想的なモータ回転速度を積分することで得られるのこぎり波を電圧指令値の授受と同様に、電流源形モータエミュレータの D/A 変換器でアナログ出力し、被試験インバータ A/D 変換器を用いて授受している。

〈4・2〉 実験結果 図 5 に仮想モータを加減速したときの波形を示す。このとき、 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクで 500 r/min から 2000 r/min に加速し、 $-3\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクで 2000 r/min から 500 r/min に減速するようにトルク指令を与えている。また、被試験インバータの電流制御帯域を 500 Hz 、電流源形モータエミュレータの電流制御帯域を 3000 Hz としている。図 5 に示すように、 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルク指令を与えたときに正の q 軸電流が流れて加速していき、 $-3\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルク指令を与えたときに負の q 軸電流が流れて減速していることが分かる。また、回転数の変化に応じて位相の傾きが変化し、電流の周波数に反映できている。以上より、被試験インバータでトルク制御を行ったときの動作を確認した。

図 6 に $3\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクステップ指令を与えたときの波形を示す。このとき、被試験インバータの電流制御帯域は 500 Hz としている。図 6 より電流源形モータエミュレータの電流制御帯域が高いほど、トルク応答のオーバーシュート及び電流ひずみが少ないことが分かる。よって、モータの模擬精度は電流源形モータエミュレータの電流制御帯域を上げることで向上させることができる。また、図 6(b) ではトルク応答に振動が発生しているものの減少傾向にあるが、図 6(c) では持続的に振動が残存している。さらに、三相電流波形ひずみも大きく、モータ電流及びトルクを再現できていないことがわかる。従って、本実機検証における安定限界は $2000\text{ Hz}\sim 2050\text{ Hz}$ の間であり、被試験インバータの電流制御帯域の約 4 倍である。しかし、この結果にはこれまでの理論検討結果との差異が存在する。そこで、次節にてその差異の要因について考察する。

〈4・3〉 理論検討との比較 図 7 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に遅れを挿入したシミュレーションモデルを示す。シミュレーションでは図 4 の構成を連続系で実装し、以下の 2 つの部分に遅れ要素を挿入した。

- ①PI の出力(電圧指令の更新による遅れを想定)
- ②電流フィードバック(電流検出による遅れを想定)

なお、被試験インバータと電流源形エミュレータはスイッチング周波数が異なるため、それぞれのサンプリング時間による遅れを追加している。

表 3 に遅れ要素を挿入した際の安定限界を示す。ここで、

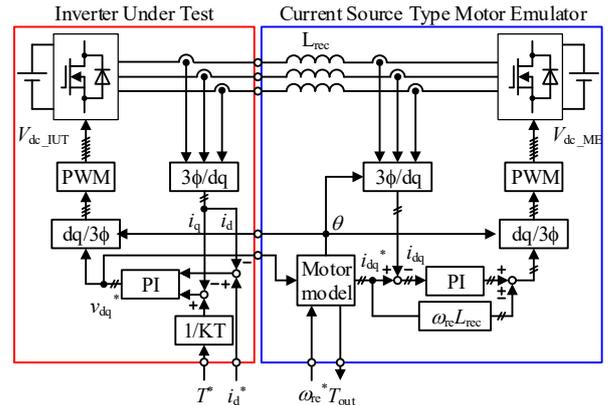


Fig.4 Configuration of experiment.

Table 1 Motor parameters of target IPMSM.

Parameter	Symbol	Value
Output power	P_n	3.7 kW
Maximum speed	ω_n	7200 r/min
Output torque	T_n	4.91 N·m
Pole pairs	p	2
Winding resistance	R	116 mΩ
d-axis inductance	L_d	2.59 mH
q-axis inductance	L_q	3.63 mH
flux linkage of permanent magnet	Ψ_m	0.0905 Wb
Moment of inertia	J	$30 \times 10^{-4}\text{ N}\cdot\text{m}$

Table 2 Experimental conditions.

Parameter	Symbol	Value
DC link voltage of IUT	V_{dc_IUT}	280 V
DC link voltage of ME	V_{dc_ME}	320 V
Coupling inductor	L_{rec}	1.73 mH
Current control bandwidth of IUT	f_{c_IUT}	500 Hz
Switching frequency of IUT	f_{sw_IUT}	10 kHz
Switching frequency of ME	f_{sw_ME}	40 kHz

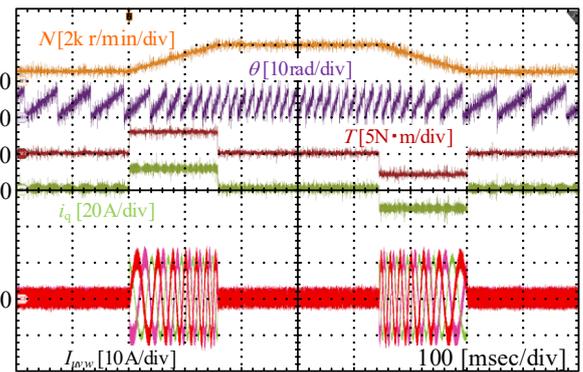


Fig.5 Waveform during acceleration and deceleration.

実験から得られた安定限界は 2050 Hz としている。遅れ要素のない連続系では安定限界となる電流源形モータエミュレータの電流制御帯域は、実験から得られた安定限界よりも低い 991 Hz であり、誤差は 51.6% である。そこへ、これまでの解析と同様に PWM 出力部に遅れを挿入した場合の安定限界は、実験から得られた安定限界よりも低い 1501 Hz であり、誤差率は 26.8% である。従って、これまでの解析では未考慮の遅れ要素があることが分かる。そこで、電流検出部

分に遅れを挿入すると誤差率は 16.4%と減少する。このとき、シミュレーションから得られた安定限界は実験から得られた安定限界よりも高い 2386Hz である。ただし、実験では損失が発生しダンピングとして作用するため、実験から得られた安定限界の方が低くなるのが考えられる。従って、これまでの解析で検討できていなかった主な遅れ要素は検出の遅れである。

5. まとめ

本論文では、実機にて電流源形モータエミュレータを使用したインバータ試験システムを構築し、電流源形モータエミュレータの安定性と電流制御帯域の関係について実験的に検証した。実験の結果、電流源形モータエミュレータには被試験インバータの電流制御帯域の約 4 倍となった。本結果を理論的に必要な電流制御帯域と比較しその差異について検討した。結果、実機では回路損失がダンピングとして

作用するため 16.4%の誤差があるが、電流検出の遅れが安定性に影響していることを確認した。

今後は、電流源形モータエミュレータのモータ模擬性能の向上を目的として、高速電流応答化について検討する予定である。

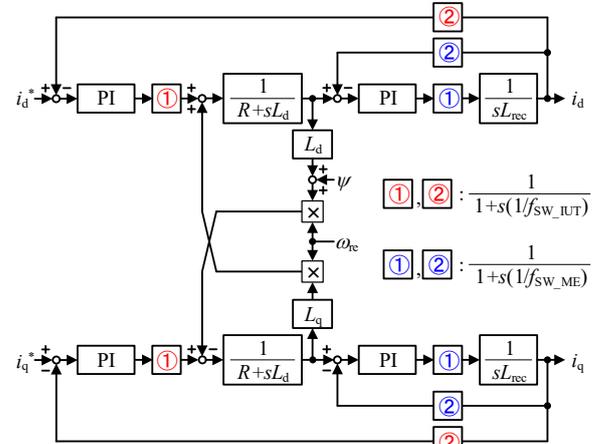


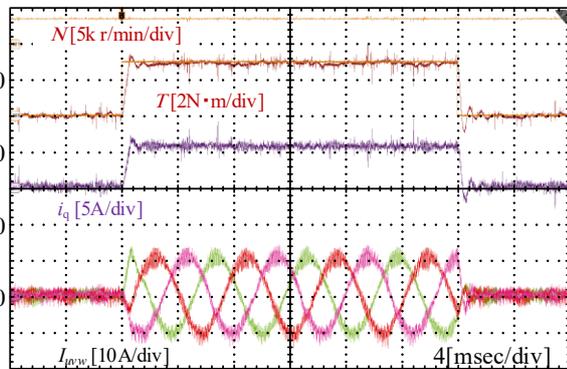
Fig.7 Simulation model with time delay.

Table.3 Relationship between delay time and stability limit

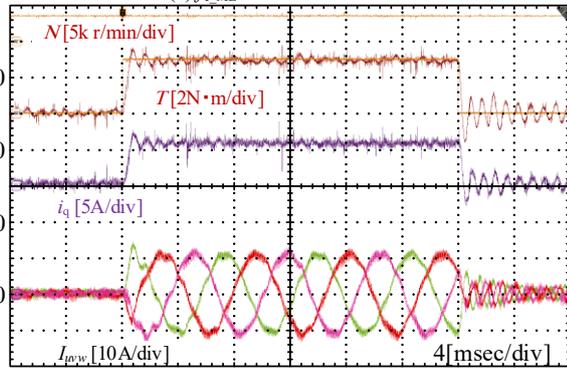
condition	Stability limit	Error
Without delay	993 Hz	51.6%
With PWM delay ①	1501 Hz	26.8%
With PWM and detection delay ① and ②	2386 Hz	16.4%

文 献

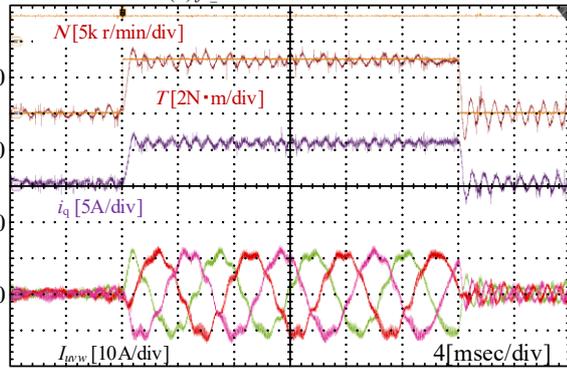
- (1) Konstantin Etzold, Timm Fahrbach, Serge Klein, Rene Scheer, Daniel Guse, Marc Klawitter, Stefan Pischinger, and Jakob Andert, "Function Development With an Electric-Machine-in-the-Loop Setup: A Case Study", in IEEE Transaction on Transportation Electrification, vol. 5, No. 4, December, 2019, pp. 1419–1429.
- (2) K. Saito and H. Akagi, "A Real-Time Emulator of a Medium-Voltage High-Speed Induction Motor Loaded With a Centrifugal Compressor", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4821–4833, September/October 2019.
- (3) Kenichiro Saito, and Hirofumi Akagi, "A Real-Time Real-Power Emulator for a Medium-Voltage High-Speed Electrical Drive: Discussion on Mechanical Vibrations", in IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 57, No. 2, March/April 2021.
- (4) Nimananda Sharma, Georgios Mademlis, Yujing Liu, and Junfei Tang, "Evaluation of Operating Range of a Machine Emulator for a Back-to-Back Power-Hardware-in-the-Loop Test Bench", in IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 69, No. 10, October 2022.
- (5) K. S. Amitkumar, R. Sudharshan Kaarhik, and Pragasen Pillay, "A Versatile Power-Hardware-in-the-Loop-Based Emulator for Rapid Testing of Transportation Electric Drives", in IEEE Transaction on Transportation Electrification, vol. 4, no. 4, December 2018.
- (6) Lei Zhu, Dong Jiang, Ronghai Qu, Leon M. Tolbert, and Qiao Li, "Design of Power Hardware-in-the-Loop Simulations for Integrated Starter-Generator Systems," in IEEE Transaction on Transportation Electrification, vol. 5, no. 1, March 2019.
- (7) 田中 元幹, 三浦 克樹, 安田 匠, 伊東 淳一, "電流源形モータエミュレータの電流制御帯域の設計法", 2022 年産業応用部門大会, Y-69, 2022.
- (8) 田中 元幹, 三浦 克樹, 伊東 淳一, "電流源形モータエミュレータに要求される電流応答の明確化", 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, SPC-23-043, MD-23-043, 2023.
- (9) Gensui Tanaka, Katsuki Miura, Keita Ohata, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh, and Ikuya Sato, "Analysis of Current Control Bandwidth in Current Source Type Motor Emulator", in 11th International Conference on Power Electronics (ICPE2023-ECCE Asia), pp. 1080-1087, 2023.



(a) f_{c_ME} is set to 3000Hz



(b) f_{c_ME} is set to 2050Hz



(c) f_{c_ME} is set to 2000Hz

Fig.6 Waveform of torque step response.