

機械・電力系統連成解析によるエンジン発電機トルク推定技術

Engine Generator Torque Estimation using Mechanical-Electrical Coupled Analysis



三橋 真人^{*1}
Masato Mitsuhashi

井川 芳克^{*2}
Yoshikatsu Ikawa

佐瀬 遼^{*2}
Ryo Sase

中北 治^{*3}
Osamu Nakakita

これまで、エンジン発電機の軸系の設計においては、エンジン本体の発生トルクと発電機の負荷トルクを個別に解析し、主に定常状態でのエンジン軸設計を行っていたが、近年の再生エネルギー増加や、電力系統の不安定化に対しては、電力系統の解析と評価も重要となってきた。本報では、エンジン発電機の機械系と電力系統を連成解析し、電力系統の過渡変化や事故発生時におけるトルク推定を行う技術について報告する。

1. はじめに

これまで、エンジン発電機の軸系の設計においては、エンジン本体の発生トルクと発電機の負荷トルクを個別に解析し、主に定常状態での軸系の設計を行っていた。軸系設計では、エンジン本体から発電機までのねじり振動計算を行い、運転範囲に共振点が無いことを確認したり、定常負荷トルクや最大負荷トルクによる静的な強度・寿命設計を行っている。

しかし、近年、再生エネルギーを大量に導入している小規模系統の増加や、発展途上国などで見られるような電力系統が影響を受けるような負荷の変動や挙動の存在が増加してきている。また、発展途上国では系統事故の発生件数も、日本国内よりも大幅に多く、電力系統の過渡変化や事故時の評価も必要となってきた。

本報では、過渡状態や事故時の軸系評価の基データとなるエンジン軸に発生するトルクを推定するため、エンジン発電機の機械系と電力系統をシミュレーションにより連成解析し、エンジン軸トルクの推定を行った内容について報告する。

2. 機械系・電力系統連成シミュレーション概要

2.1 対象製品

対象製品としては、三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)で製作しているエンジン発電機であり、180kWから15.4MWまでのラインナップを揃えている。燃料としては、ディーゼル油、もしくはガスを燃料としており、供給電力としては、周波数 50 or 60Hz、電圧は AC200V の低圧から、AC15kV の高圧まで対応している。日本国内や先進国では、ガスエンジン発電機のニーズが高いが、発展途上国などでは、ガス供給インフラが整っていない地域も多く、ディーゼルの需要も根強い。また、発展途上国では再生エネルギーの導入も増加してきており、弱い系統に、変化の大きな電源をつなぐため、系統擾乱が発生しやすい状態となっている場合もある。

本報では、海外向け 7.5~10MW 級、18 気筒ディーゼルエンジン発電機を対象とした検討結果について報告する。

*1 総合研究所電気・応用物理研究部 主席研究員

*2 ICT ソリューション本部 CIS 部

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部 主席チーム統括

2.2 シミュレーション解析モデルの概要

従来のエンジン発電機シミュレーションでは、図1のように、発電機モデルにエンジンと発電機の慣性を一体化させ、入力をエンジン出力として電圧、周波数変動を求めたり、あるいは逆に発電機で発生するトルクを入力として、エンジンの動特性シミュレーションを実施していた。

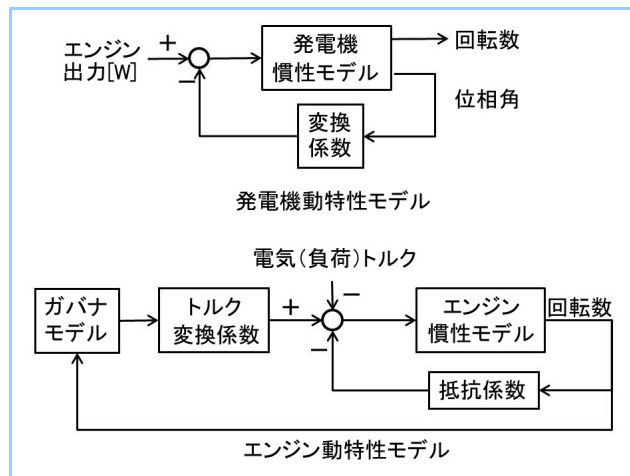


図1 一般的なシミュレーションモデルの概要

今回のシミュレーションでは、電気系で発生するトルクを随時、エンジンの負荷トルクとして与え、エンジンの動特性を求めている。図2に機械系・電力系統連成シミュレーションモデルの全体概要を示す。

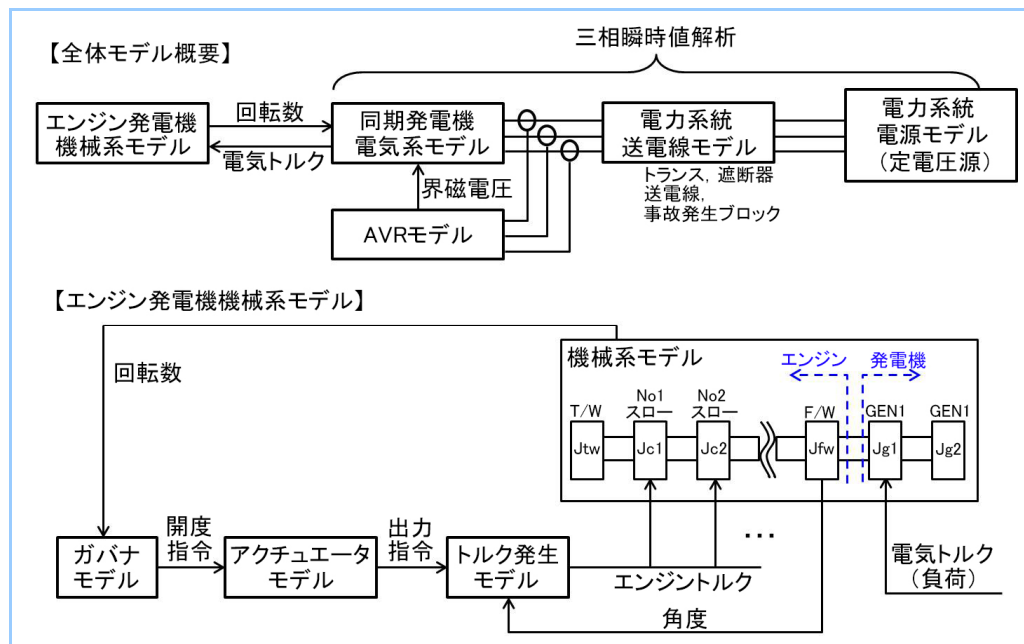


図2 機械系・電力系統連成シミュレーションモデル概要

エンジン本体、および発電機の機械系モデルはバネ・マス系で構築しており、爆発による各シリンダの発生トルク、エンジン機関の絶対減衰(エンジンの角速度に比例)、及び相対減衰(対象クランク前後の角速度の差に比例)を考慮している。また、回転数/出力を調整するガバナ、燃料を供給するアクチュエータをモデル化し、制御系の応答の影響だけでなく機械系のエンジン軸トルクの算出も可能としている。なお、電気系から機械系への入力、発電機モデルで求められる電気トルクを入力としている。

電気系モデルとしては、発電機は同期発電機モデルを採用し、過渡リアクタンスや過渡時定数等、一般的な発電機パラメータを反映している。また、電圧制御のための AVR (Automatic Voltage Regulator) もモデルに組み込んでいる。本モデルでは、過渡状態におけるエンジン軸回

転数と発電機軸回転数の差異を発生させないため、発電機モデルへの入力は回転数とし、回転数を一致させている。

発電機モデルと電力系統モデルは、遮断器、トランスを介して接続しており、電力系統モデルは、無限大母線として、定電圧源と送電線、電力負荷から構成している。一般的には背後インピーダンス等、設計条件データは入手することができるが、詳細な送電線パラメータを入手することは困難な場合が多いが。今回のケースでは、送電線距離を入手することができたため、公開されている類似送電線の距離当りの抵抗、リアクタンス値を用いて、送電線パラメータを決定している。

シミュレーション検討では、母線の定電圧源モデルのパラメータを意図的に変更し、母線の周波数変動を発生させたり、送電線途中で短絡（三相短絡、線間短絡）などの事故を発生させることで、母線に変化を与え、エンジン発電機の軸にかかるトルクを求めている。

なお、解析ツールとしては、MATLAB/Simulink SimPowerSystems⁽¹⁾を使用している。

3. シミュレーション結果

3.1 モデル検証

モデルの検証として、発電機出力端で線間短絡（二相短絡）を発生させたときの結果を図3に示す。瞬時的な電流変化としては、定格電流の約 10 倍となっており、一般的な線間短絡の文献値⁽²⁾と概ね一致しており、モデルとしても妥当であることが確認できる。また、この時のエンジン軸トルクは、定格トルクの約 7.5 倍の瞬時トルクが発生していることが分かった。

本モデルと現地記録データから、現地で発生した事象の推定と、エンジン軸トルクの推定を行った。次項にその結果を示す。

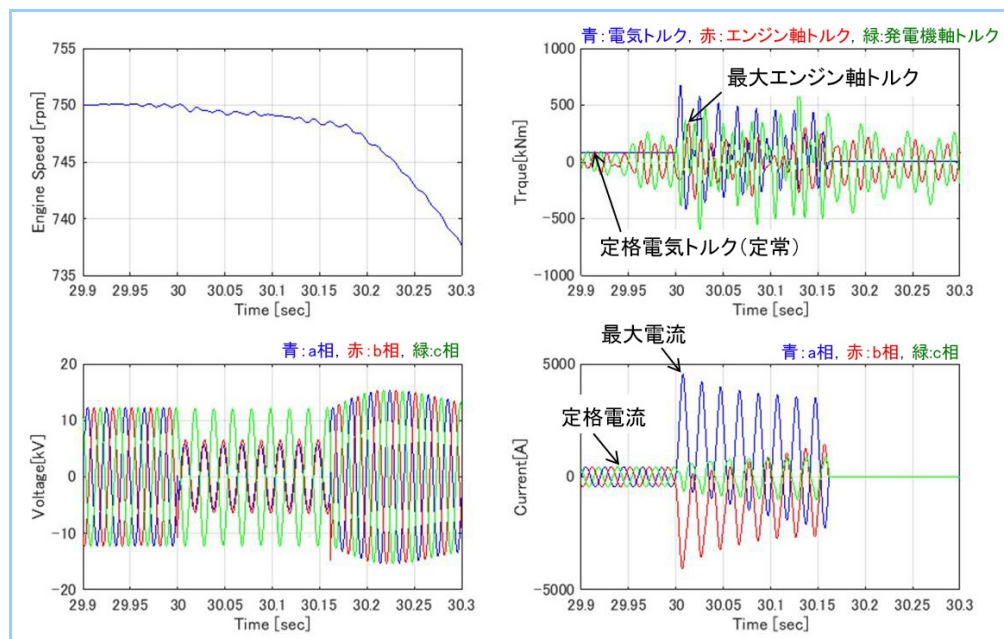


図3 シミュレーションモデル検証(線間短絡)

3.2 ケーススタディ

対象とした現地では、電力系統が二重化されておらず、かつ系統事故も多く、頻繁に停電が発生している。電力系統事故は、電力を供給しているエンジン発電機へも大きな影響を与え、エンジントラブルの原因の一つとなっている。今回のシミュレーション解析では、現地の電力系統で発生した事故の記録データ（三相電圧）をベースに、事故形態をシミュレーション上で推定、再現し、その状態における電気トルク、機械トルクを求めている。

シミュレーションの一例として、まず、図4に現地の母線系統で線間短絡が発生した時の発電機出力端三相電圧を示す。電圧の変化を確認すると、三相電圧が同位相、同電位となっていること、かつ電圧が0Vとなっていないことから、高抵抗の三相短絡事故が発生しているものと考察した。

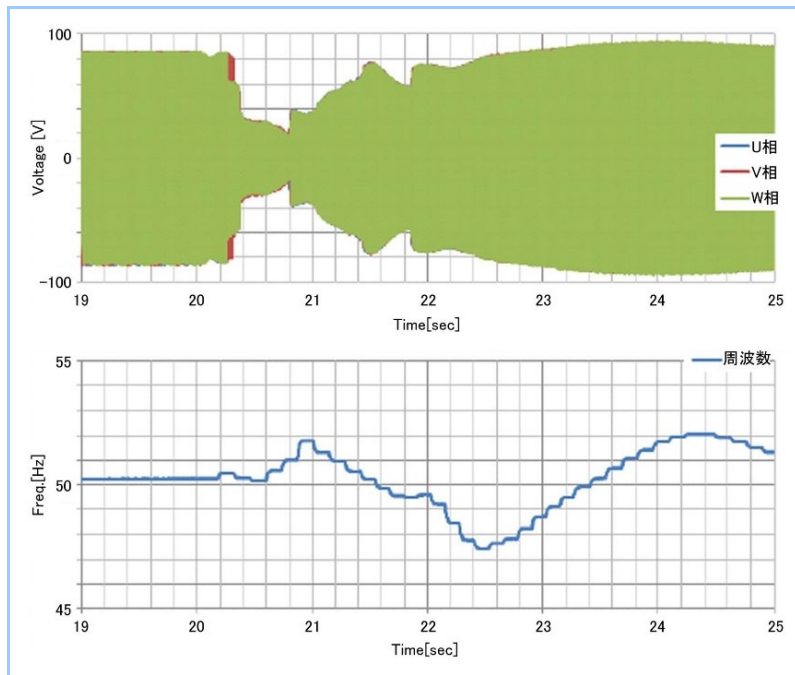


図4 現地記録事故データ(三相電圧)

図5には、現地記録データと、そのデータをシミュレーション上で再現した結果の比較を示す。シミュレーションでは、計測された線間短絡の事故データから電圧変動が一致するように事故発生モデルのパラメータを調整し、かつ事故継続時間毎にパラメータを切り替えて計算を行っている。そのため、事故パラメータ切替部で多少の相違が確認できるが、全体としては、シミュレーションで実機の線間短絡事象を再現している。

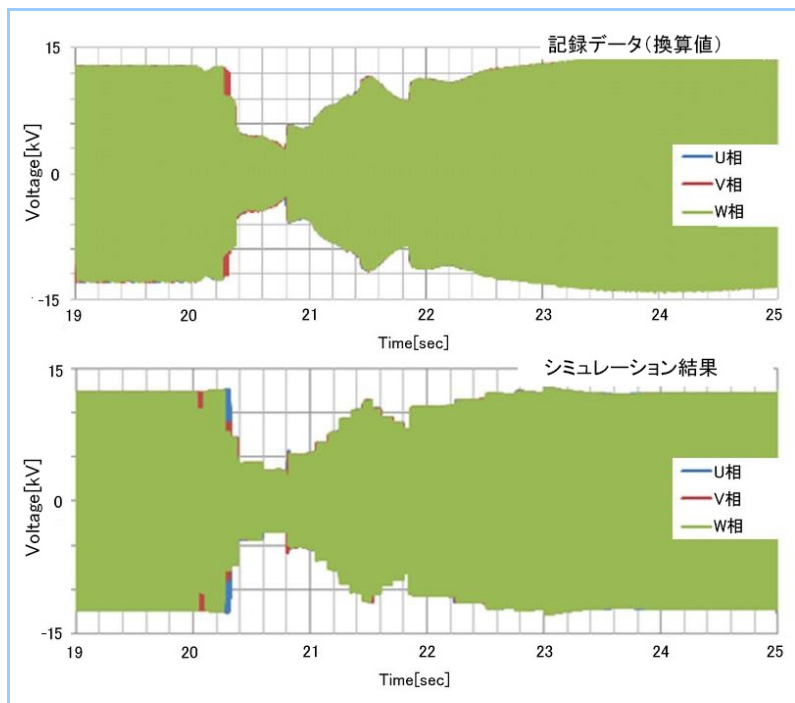


図5 現地記録データとシミュレーション結果の比較(三相電圧)

この状態における電気トルク、発電機軸トルク、エンジン軸トルクの変化を図6、図7に示す。発電機軸やエンジン軸トルクとしては、瞬時に変化する部分と、機械系や制御系の応答遅れの影響、あるいは共振点によるトルクの増幅状況を確認することができるようになり、瞬間的に定常トルクの約4倍のトルクが発生する様子も確認できるようになった。

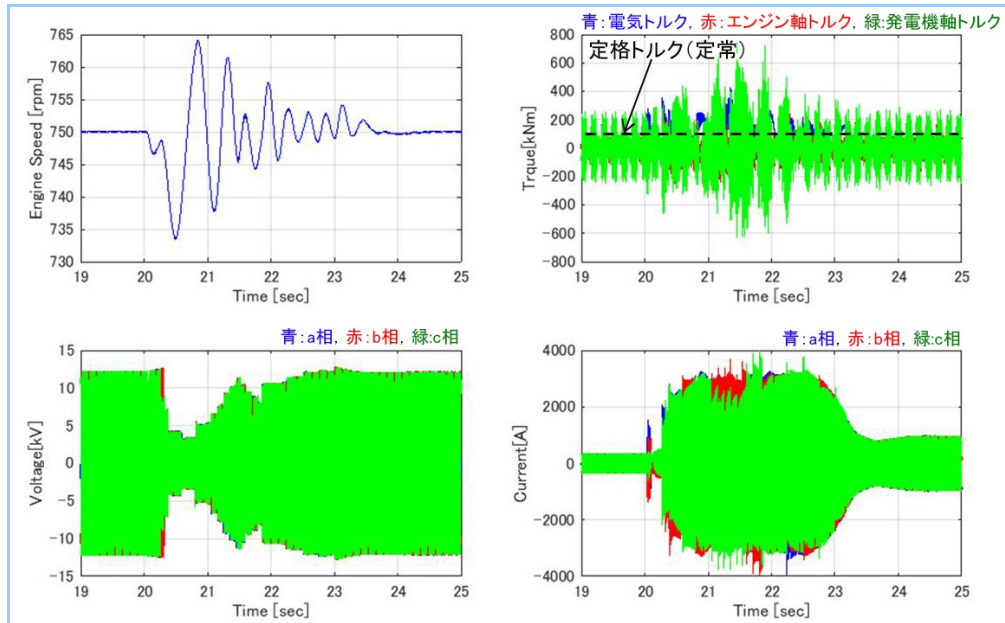


図6 シミュレーションによる推定トルク

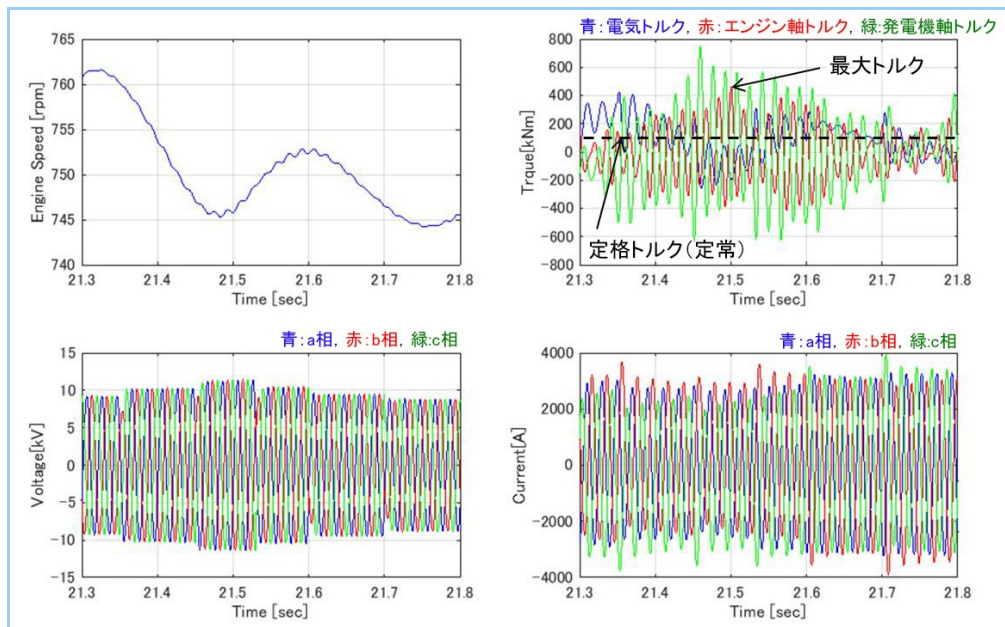


図7 シミュレーションによる推定トルク(拡大図)

4. まとめ

機械系と電力系統を連成させたシミュレーションにより、過渡状態におけるエンジン発電機軸トルクの推定を可能とした。今回、一例として紹介したトルクは、エンジンと発電機を接続するフライホイール部でのねじりトルクと発電機軸トルクであるが、さらなるエンジン発電機のモデル詳細化と電力系統の連成解析により、エンジン内部のより詳細な部位のトルクも評価可能となる。また、過渡状態のシミュレーションであることから、制御系のチューニングにも適用可能であり、機械系と制御系の両面から過渡的な部分も定量評価できるものとなる。

今回のシミュレーションモデルを基に、今後、電力系統での変動事象の要因推定や、それによるエンジン発電機への影響を定量評価し、更なる製品信頼性の向上に努める。

参考文献

- (1) Math Works 社の数値解析ソフト
- (2) 庄山悦彦, 古山昌之, 大容量タービン発電機の運転特性, 日立評論, 第34巻, 4号. Vol54, (1972), p31,
- (3) 新田目倅造 電力系統技術計算の基礎, 電気書籍, 第1版, (1996)
- (4) 新田目倅造 電力系統技術計算の応用, 電気書籍, 第1版, (1997)