

ブラシレス励磁タービン発電機の高速応答化実証

Verification on Brushless Excitation Turbine Generator with Improved Response Ratio and High Initial Response

野本 義弘

平松 大典

上村 洋市

■ NOMOTO Yoshihiro

■ HIRAMATSU Daisuke

■ UEMURA Yoichi

タービン発電機は、電力系統過渡安定度向上のため高速励磁応答が求められる。ブラシレス励磁方式と比較して、サイリスタ励磁方式は高速応答性を容易に実現できるため、中容量機(300 MVA級)以上にはサイリスタ励磁方式を適用してきた。一方ブラシレス励磁方式は、運転保守が容易であることから、特に海外では、中容量機以上においても市場ニーズがある。

東芝は、ブラシレス励磁方式の適用範囲を拡大するため、励磁装置諸条件の改善を行い、400 MVA級ブラシレス励磁タービン発電機による励磁応答性検証試験を実施し、サイリスタ励磁方式と同等なブラシレス励磁方式の高速応答化を実証した。

High-response excitation is required in turbine generators to improve the transient stability of the electric power system. The static excitation system has been applied to medium-capacity generators (300 MVA class) due to the higher excitation response of this system compared with that of the brushless excitation system. However, a strong need also exists for application of the brushless excitation system to generators of larger than medium capacity, especially in the international market, in order to facilitate operation and maintenance.

To expand the range of applicability of the brushless excitation system so as to satisfy the requirements of electric power systems, Toshiba has developed technologies for brushless excitation turbine generators to improve the response ratio and realize a high initial response. We have conducted excitation response tests using a 400 MVA-class generator and a brushless excitation system, and confirmed that the brushless excitation system achieves high response characteristics equivalent to those of the static excitation system.

1 まえがき

近年、電力系統過渡安定度向上のため、タービン発電機に対し、励磁系電圧速度度(Response Ratio) 2.0以上かつ高速応励磁(High Initial Response)の励磁系応答が要求されている。サイリスタ励磁方式の場合は、整流器の電圧位相制御により発電機界磁電圧を変えるため、励磁系電圧応答時間は0.05秒程度まで高速化が可能であり、多くの納入実績がある。これに対してブラシレス励磁方式の場合は、交流励磁機を介して発電機界磁に電圧を加えるため、高速励磁応答性を実現するためには交流励磁機及び励磁制御系の設計に配慮が必要となる。

一方、保守の容易性などからブラシレス励磁方式に対するニーズも高く、サイリスタ励磁方式と同等な高速励磁応答性を持つブラシレス励磁方式が望まれている。これより、ブラシレス励磁装置の諸条件を改善するとともに、高速応答化を確認するため、2012年3月に東芝京浜事業所で400 MVA級タービン発電機とブラシレス励磁装置による励磁応答性検証試験を実施した。ここに、そのブラシレス励磁タービン発電機の高速応答化実証試験の概要について述べる。

2 ブラシレス励磁方式の特徴

ブラシレス励磁方式は、主軸に取り付けられた回転電機子形の交流励磁機と回転整流器から成り、スリップリングを使用しない。交流励磁機の励磁源は、図1(a)のように主機直結の永久磁石発電機(PMG)から得るものが多い。PMGから得た出力は自動電圧調整器(AVR)で調整され、回転電機子形交流励磁機を励磁する。更に交流励磁機の交流出力を、回転整流器で直流に変換し、交流発電機の界磁巻線を励磁する方式である。

タービン発電機の界磁、回転整流器、及び交流励磁機の電機子は同一軸上にあり、電気的に接続されている。ブラシや、コレクタリングなどの摺動(しゅうどう)接触部がないため、カーボンダストの清掃や、ブラシ交換などの必要がなく、保守が容易な励磁方式である。回転整流回路は、一般的に三相全波整流を採用している。ブラシレス励磁方式とサイリスタ励磁方式の比較を表1に示す。

3 励磁応答性について

励磁系の応答性を評価するにあたり、二つの指標がある。

- (1) 励磁系電圧速度度(Response Ratio)
- (2) 高速応励磁(High Initial Response)

以下にそれぞれの定義について述べる。

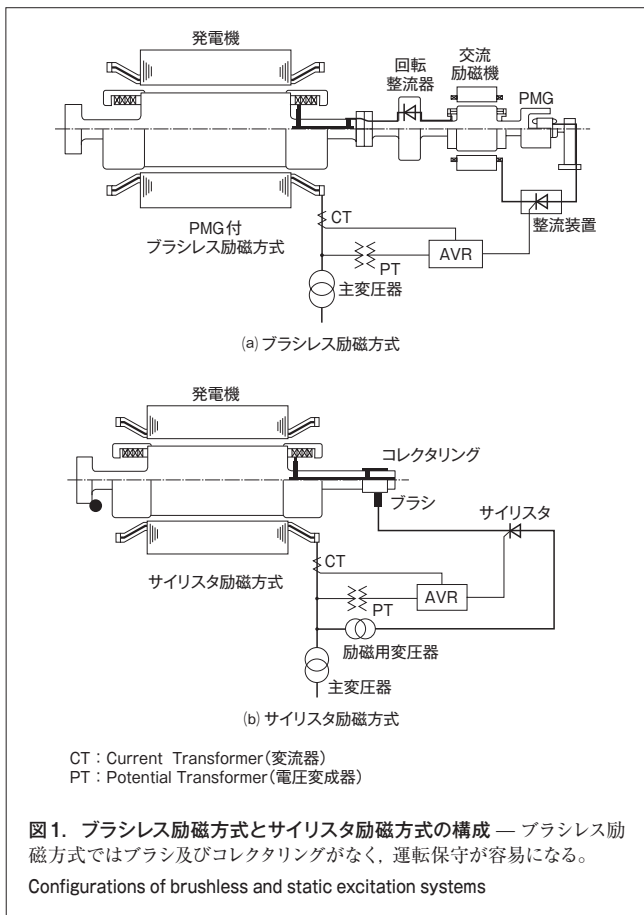


表1. ブラシレス励磁方式とサイリスタ励磁方式の比較
Comparison of brushless and static excitation systems

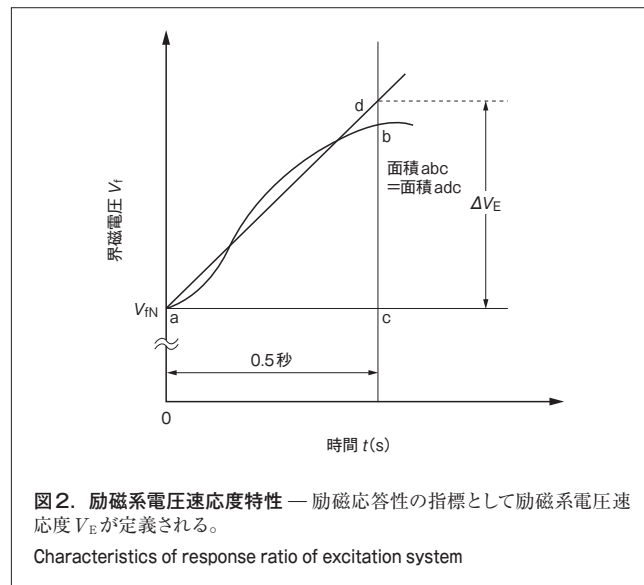
種類	特徴
ブラシレス励磁方式	<ul style="list-style-type: none"> • ブラシが不要で保守が容易。 • 励磁変圧器、サイリスタ整流器、界磁遮断器、及び大電流励磁バスダクトが不要。 • PMG電源の場合は、発電機主回路故障時においても励磁電源は確保される。 • 励磁応答度に励磁機の影響を受ける。
サイリスタ励磁方式	<ul style="list-style-type: none"> • ブラシが必要。 • 励磁変圧器、サイリスタ整流器、界磁遮断器、及び大電流励磁バスダクトが必要。 • 主回路故障時に励磁源に影響を受ける。 • 励磁速応性に優れている。

3.1 励磁系電圧速度度 (Response Ratio)

JEC 2130 (電気規格調査会規格2130)-2000 第3編 励磁装置8.3項によれば、励磁系電圧速度度 V_E とは、発電機本体が定格負荷状態において発電機の端子電圧が突然大きく低下すると等価な変化を自動電圧調整装置に与えたとき、次式で定義されている (図2)。

$$V_E = \frac{0.5 \text{ 秒間に得られる励磁装置の等価電圧変化の割合 (V/s)}}{\text{定格負荷状況における電圧 } V_{IN} \text{ (V)}}$$

$$= \frac{\Delta V_E}{0.5 \times V_{IN}} \quad (\text{s}^{-1})$$

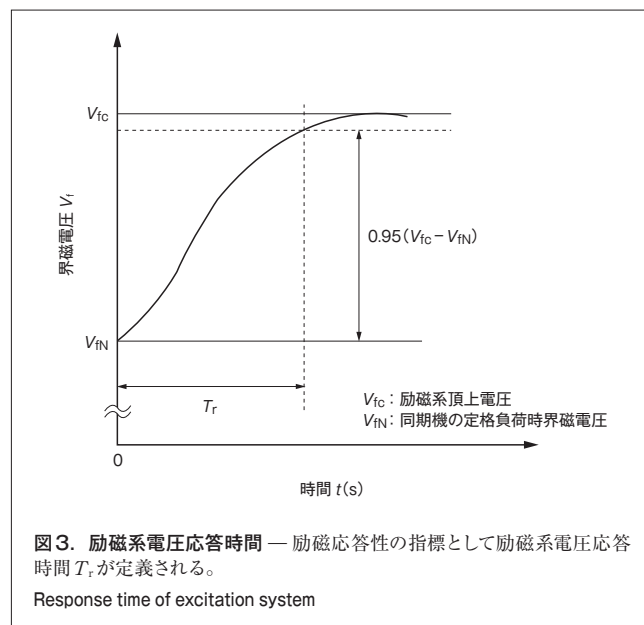


3.2 高速応励磁 (High Initial Response)

高速応励磁とは、以下に示す励磁系電圧応答時間 (Response Time) によって定義される。

JEC 2130-2000 第3編 励磁装置8.6項によれば、励磁系電圧応答時間 T_r は、発電機が定格負荷状態において、励磁装置出力電圧が励磁系頂上電圧に十分に達するだけの変化を生ずると等価な変動を自動電圧調整装置に与え、その変化を与えた瞬間から励磁装置出力電圧が励磁系頂上電圧と定格界磁電圧との差の95%まで増加するのに要した時間と定義されている (図3)。

高速応励磁 (High Initial Response) とは、この T_r が0.1秒以下のことをいう (IEEE 421.1 (電気電子技術者協会規格421.1): 2007 3.45に記載)。



4 ブラシレス励磁タービン発電機

対象としたブラシレス励磁機は、高速応答化に対応した構造を採用している(図4)。400 MVA級タービン発電機と組合せ試験を実施し、励磁応答特性を測定した。検証試験を行ったタービン発電機とブラシレス励磁機の定格仕様を表2に示す。

5 励磁応答性の評価

4章で述べた400 MVA級ブラシレス励磁タービン発電機についてEMTP (Electromagnetic Transients Program) 詳細モデルに基づいたシミュレーションを行い、励磁応答性評価を行った。その評価結果を図5に示す。

図5から、Response Ratioを算出した結果、その値は2.8となり、高速励磁応答であるResponse Ratio 2.0以上の要求を十分満足することを確認した。また、High Initial Responseについても、頂上電圧(1.6 pu)に対して、頂上電圧の95%に到達するまでの励磁系電圧応答時間 T_r が0.1秒以下であることがわかった。

これらの結果から、この400 MVA級ブラシレス励磁タービン発電機は、高速励磁応答(Response Ratio 2.0以上、High

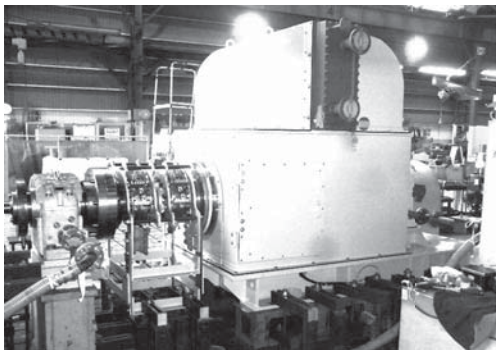
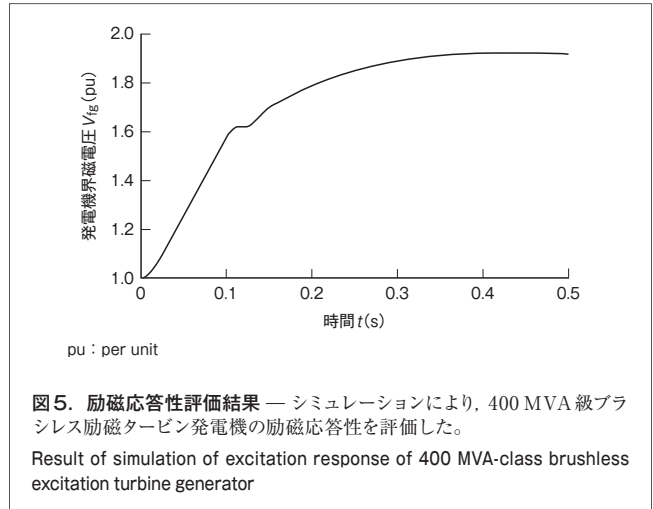


図4. ブラシレス励磁機の工場試験景観 — 400 MVA級タービン発電機用ブラシレス励磁機単体実験を実施した。
Brushless AC exciter for 400 MVA-class turbine generator undergoing shop test

表2. ブラシレス励磁タービン発電機仕様

Main specifications of brushless excitation turbine generator

項目	仕様	
	発電機	励磁機
容量	400 MVA級	1,520 kVA
定格電圧	21 kV	470 V
定格周波数 (Hz)	60	240
極数	2	8
回転数 (min ⁻¹)	3,600	3,600
冷却方式	水素間接冷却	空気間接冷却



Initial Response) の要求仕様を満足することを確認した。

更に励磁応答性評価に用いたシミュレーションの妥当性検証のため、400 MVA級タービン発電機とブラシレス励磁装置による組合せ実機検証試験を、2012年3月に当社京浜事業所で実施した。

発電機無負荷 (OPEN) 状態で、発電機電圧 V_g を50%から100%に変化させたときの界磁諸量を測定した。また、発電機短絡 (SHORT) 状態で、発電機電流 I_g を50%から100%に変化させたときの界磁諸量も測定した。検証試験景観写真と検証試験回路をそれぞれ図6と図7に示す。

400 MVA級ブラシレス励磁タービン発電機による励磁応答性検証試験結果とシミュレーション結果の一例を図8に示す。検証試験結果から、発電機のOPEN及びSHORT試験ともに、発電機界磁電圧・電流波形がシミュレーション結果と相違ないことを確認できた。

これらの結果から、励磁応答性評価を実施したシミュレーションの妥当性を実機試験により実証した。

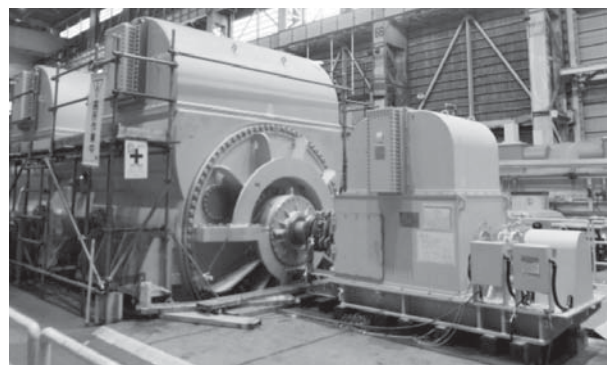
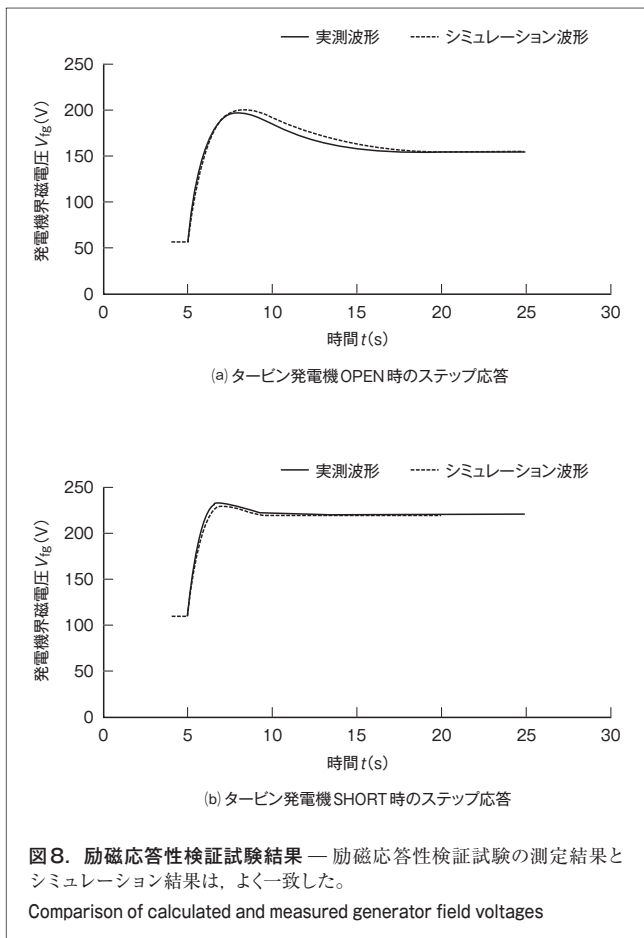
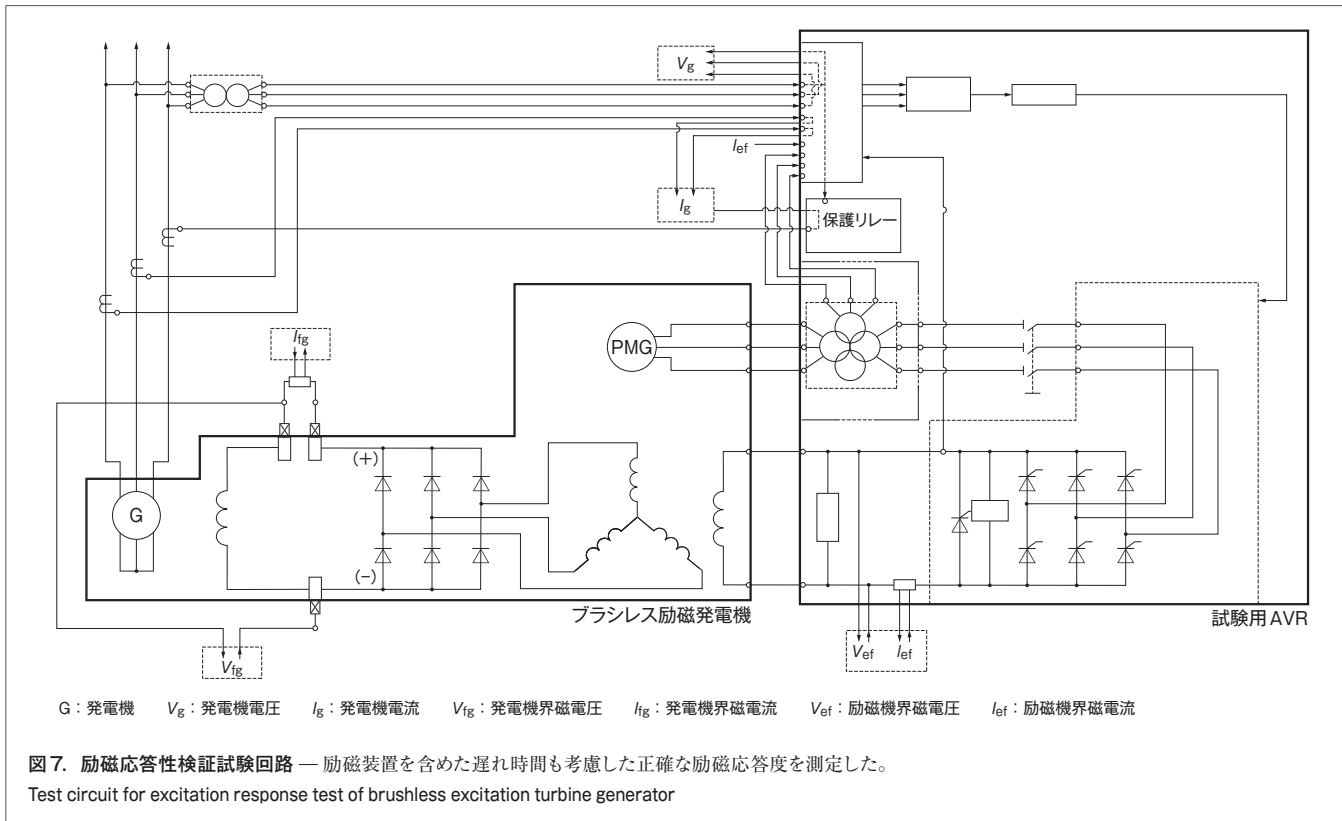


図6. 400 MVA級ブラシレス励磁タービン発電機の工場試験景観 — 2012年3月に当社京浜事業所で400 MVA級タービン発電機とブラシレス励磁装置を組み合わせ、励磁応答性検証試験を実施した。
400 MVA-class brushless excitation turbine generator undergoing shop test



6 あとがき

今回、励磁応答性検証試験を実施し、ブラシレス励磁タービン発電機が高速励磁応答 (Response Ratio 2.0 以上, High Initial Response) を満足することを確認した。

今後顧客ニーズに合わせて、既に多くの納入実績のあるサイリスタ励磁方式とともに、高速応答ブラシレス励磁タービン発電機を提供し、ブラシレス励磁方式の適用範囲拡大を図りたい。



野本 義弘 NOMOTO Yoshihiro

電力システム社 火力・水力事業部 火力電機技術部主務。
火力発電所の電機システムエンジニアリング・改良保全業務に従事。電気学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



平松 大典 HIRAMATSU Daisuke, Ph.D.

電力システム社 京浜事業所 発電機部参事, 博士 (工学)。
タービン発電機的设计・開発に従事。電気学会会員。技術士 (電気電子部門, 総合技術監理部門)。
Keihin Product Operations



上村 洋市 UEMURA Yoichi

電力システム社 火力・水力事業部 火力電機技術部主務。
火力発電所の電機システムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.