70 MW級低速応型超電導発電機の電気特性

正員	前田 進	(三菱電機)
	増永 顕	(三菱電機)
正員	鈴木 一市	(三菱電機)
正員	上田 明紀	(三菱電機)
正員	米谷 晴之	(三菱電機)
正員	下畑 賢司	(三菱電機)
正員	平尾 俊樹	(Super-GM)

Electrical Performance of Slow Response Excitation Type Superconducting Generator
 Susumu Maeda, Ken Masunaga, Kazuichi Suzuki, Akinori Ueda, Haruyuki Kometani, Kenji Shimohata
 (Mitsubishi Electric Corporation)
 Toshiki Hirao
 (Super-GM)

Abstract

Superconducting generators have many advantages such as increasing generation efficiency, improving power system stability and reducing size and weight in comparison with conventional generators. In Japan, 70MW class superconducting generators (model machine) are being developed. Manufacture of "70MW class slow response excitation type rotor" started in 1992 and factory tests were conducted in 1996. Succeeding to the factory tests, the rotor was combined to the stator with air gap windings in the verification test facility (in Osaka power station) and verification tests were conducted in 1998. Satisfactory results which represent the advantages and the reliability of superconducting generators were obtained.

In this paper, test results of electrical characteristics of 70MW model generator such as "electrical constants" and "No load open/short circuit characteristics" are discussed. Evaluation by 3D magnetic analysis are also described. The main results are summarized below.

- The synchronous reactance (X_d) was 0.42 p.u. which is 1/4 ~ 1/5 of conventional generators. X_d can be analyzed precisely by 3D magnetic field analysis which is now taken into account for the effect of the armature end windings on electrical characteristics.
- X_d which is originated in "double layer damper system" was separated clearly from 3-phase sudden short circuit test. These reactances can be analyzed by quasi-3D analysis considering the boundary condition of rotor surface.
- By means of these magnetic analyses, fundamental design methods considering the end windings were established. These are applicable to the design of "200MW class pilot superconducting generator".

キーワード：超電導発電機、ロータ、超電導導体、リアクタンス、三次元磁界解析)
 (superconducting-generator, rotor, superconductor, reactance, three dimensional field analysis)

1. まえがき

界磁巻線を超電導化した超電導発電機は、効率向上、電力システムの安定性向上といった利点があり、研究開発が行われている。現在日本では、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として1988年度からの12年計画により、200 MW級パイロット機の設計・製作に必要な技術開発を目的とした「70 MW級モデル発電機」(以下、70 MW級機と略記)の開発が進められている⁽¹⁾。

この計画において、筆者らは低速応型機の開発を担当しており、要素技術開発⁽²⁾及び70 MW級機ロータ

の縮長型である「ロータ部分モデル」⁽³⁾の成果を反映して70 MW級機ロータの設計・製作を進め、1996年度には工場での回転励磁試験を実施した⁽⁴⁾。

また、1998年3月から9月にかけてステータと組合せた現地実証試験を超電導組合試験センター(関西電力(株)大阪発電所内)で実施した。超電導発電機としての基本特性検証試験、世界最大の79.7 MWの発電試験、世界最長の1500時間の連続運転試験、三相突発短絡試験を実施する等、試験は成功裏に終了した⁽⁵⁾。

本論文は、電気基本特性である「無負荷飽和/三相

短絡特性」、「発電機定数」に関する70MW級機の実測結果、解析による評価について報告するものである。

- 70MW級機は以下に示す構造上の特徴を有する。
- ①空心構造を適用（ロータ軸材に非磁性材料を使用、ステータには鉄心歯部のない空隙巻線を使用）。
 - ②かご型常温ダンパと円筒型低温ダンパからなる2重ダンパ構成を適用。
 - ③70MW級機は200MW級パイロット機の同径縮長型として設計されているため、電機子巻線直線部が短く、相対的に巻線端部長が長い。
- ①～③の構造上の特徴に対応して、超電導発電機は以下の特性を有しており、これらの把握と定量評価が開発の主要課題の一つである。

- (1)同期リアクタンスが現用機の1/4～1/5に減少（構造上の特徴①に対応）
- (2)リアクタンスに次次過渡成分 (X_d'' , X_q'') が存在（②に対応）
- (3)電機子巻線端部が発電機特性、定数に与える影響が大（③に対応）

70MW級機では、無負荷飽和／三相短絡特性試験の他、負荷遮断試験を含む5種類の定数計測試験を実施している。筆者らは(1)～(3)の点に留意し、実測結果に対する解析評価を行った。

無負荷飽和／三相短絡特性、及びこれから求める同期リアクタンスに関しては、ロータの回転を考慮した三次元線形非定常磁界解析⁽⁶⁾を実施して、磁界分布を含む評価を行った。三次元解析を実施することで従来の二次元解析では困難であった電機子巻線端部が電気特性に与える影響を考慮できるようになった。

過渡リアクタンスに関しては、三相突発短絡試験で短絡電流の次次過渡、次過渡、過渡成分を分離でき、対応するリアクタンスを求めることが出来た。現状の解析技術ではダンパの導電率を考慮して発電機全体をモデル化した三次元解析を実施するのは困難であることから擬似三次元解析⁽⁷⁾を適用し、ロータ表面に境界条件を設定することで渦電流の効果を考慮してリアク

タンスを解析した。

解析の結果、無負荷／三相短絡特性、リアクタンスを正確に算出可能との結果が得られた。電機子巻線の端部発電効果を考慮した超電導発電機的设计手法を確立できたと考える。この手法は、次期開発目標である200MWパイロット機的设计にも適用可能である。

2. 70MW級機の仕様と超電導ロータの構成

(1) 発電機定格と主要材料

70MW級低速応型モデル機の主要仕様とロータの使用材料を表1に示す。

表1 70MW級機の主要仕様
Table 1. Specifications of 70MW class model generator

発電機 定格	容量 (MVA)	83
	出力 (MW)	75
	電圧 (kV)	10
	電流 (A)	4792
	力率 (p. u)	0.9
	回転速度 (rpm)	3600
ロータ 形状・ 材質	外径 (mm)	890
	軸受間距離 (mm)	4900
	巻線取付軸	A286
	常温ダンパサポート	A286
	常温ダンパバー／短絡環 低温ダンパ	銅 アルミ合金

(2) 低速応型70MW級機ロータの特徴

70MW級機ロータの断面図を図1に示す。ロータは超電導界磁巻線を液体ヘリウムで極低温に冷却するため、真空断熱層を設けた多重円筒構造である。ロータダンパは、室温のかご型常温ダンパと100K程度の低温ダンパを設ける、いわゆる二重ダンパ構成としている。常温ダンパは、支持円筒材外周のスロット内に設置されたダンパ導体とロータ端部の短絡環とで、かご型の完全全長ダンパを形成している。ダンパをロータの表面に配置することで、冷却が良くなり、逆相耐量の点で有利である。

図1 70MW級機ロータの断面図
Fig.1. Cross sectional views of 70MW class model rotor

3. 現地実証試験の結果

電気特性の試験方法と得られた結果を表2に示す。

表2 検証試験と評価項目
Table 2. Verification test items

試験項目	評価する電気特性
①無負荷飽和／ 三相短絡特性試験	・電気基本特性 ・同期リアクタンス (X_d)
②ダルトン・ カメロン法	・次次過渡リアクタンス (X_d'' , X_q'') ・逆相リアクタンス (X_2)
③ダンパ試験	・同期、逆相リアクタンス (X_d , X_2)
④単相短絡試験	・逆相リアクタンス (X_2)
⑤三相突発短絡 試験	・d軸過渡リアクタンス (X_d' , X_d'' , X_d''') ・過渡時定数 (T_d' , T_d'' , T_d''' , T_a)
⑥直軸 負荷遮断試験	・d軸リアクタンス、時定数

3. 1 無負荷飽和特性、三相短絡特性試験

3. 1. 1 試験結果

無負荷飽和特性試験では定格電圧10kVの120%まで励磁したが、磁気飽和は認められなかった(図2)。定格電圧時の界磁電流実測値 $I_m=2165A$ に対し、三相短絡特性試験での定格電流4792A時の界磁電流実測値は $I_p=919A$ であった。両者から同期リアクタンス (X_d) は、0.42p.u と求まる。現用機の 1/4~1/5 の値が得られたことで、超電導発電機の特徴である空心構造のリアクタンスに与える効果を確認した。

図2 無負荷飽和／三相短絡特性

Fig.2. No load open/short circuit characteristics

3. 1. 2 試験結果の解析との対比

三次元磁界解析⁶⁾を行い試験結果を評価した。解析モデルの仕様を表3に、モデル(磁束密度分布解析結果をあわせて表示)を図3に示す。解析では電機子巻

線端部及び鞍型の界磁巻線形状を正確にモデル化した。

表3 解析モデルの仕様
Table 3. Specifications of 3-D field analysis

節点数／ 要素数	293,845／518,589
解析方法	・線形(鉄心の透磁率一定)非定常解析 ・ロータの回転を考慮 ・タイムステップ:20分割／サイクル
解析 モデル	・電機子磁界と回転子は同期して回転するためダンパ、巻線取付軸はモデル化せず ・周期境界条件を用いて1極分を解析

図3 無負荷電圧発生時の発電機内磁界分布

Fig.3. Field distribution in 70MW model generator

(1) ロータ中央部の磁束密度

巻線取付軸の軸方向中央の磁極部に設置したホール素子(図1参照)により、無負荷電圧発生時、負荷運転時に磁束密度計測を行った。無負荷電圧発生時の磁束密度実測結果と解析結果を併せて図4に示す。

図4 磁束密度計測結果(無負荷電圧発生時)

Fig.4. Flux density at no load open circuit

解析値と実測結果が良く一致していることから、界磁巻線が発生する磁界に対して本モデルで精度良く解析できることを確認した。次に界磁磁界と電機子磁界の合成磁界で表される負荷時について磁束密度の実測と解析を比較した(表4)。計算した負荷条件は、定格負荷点近傍(出力 83MVA, 0.96pf, 10kV, 4792A)であり、合成条件を図5に示す。出力条件、内部相差角、力率角には、何れも実測値を使用した。合成磁界についても本モデルで精度良く解析できることが確認できた。

表4 負荷時の巻線取付軸磁束密度
Table 4. Flux density at load condition

	実測値	解析値
磁束密度	2.44T	2.43T

図5 負荷の合成条件

Fig.5. Composition of rotor and stator flux

(2) 無負荷飽和／三相短絡特性(同期リアクタンス)

70 MW級機は電機子鉄心長が約1.5mと電機子巻線端部長(両側で約2m)より短く、電機子巻線端部での発電効果の影響が大きい。二次元解析では、正確な特性評価を行うのが困難であったが、三次元解析により巻線端部形状を正確に考慮することで、無負荷飽和、三相短絡特性とも実測値とほぼ一致する結果が得られた(図2)。解析結果から求めた同期リアクタンスは0.43(p.u)とほぼ実測結果と一致した(表5)。

表5 界磁電流及び同期リアクタンス

Table 5. Measured results of synchronous reactance

	無負荷飽和時 (定格 10kV)	三相短絡時 (定格 4792A)	同期リアクタンス
実測値	2165 (A)	919 (A)	0.42 (p. u)
解析値	2178 (A)	939 (A)	0.43 (p. u)

3. 2 過渡時のリアクタンス

70 MW機のリアクタンス、時定数を測定するため、表6の②～⑥の試験を実施した。表には試験法と試験時の発電機内の磁界分布との関連を示す。

表6 試験方法と磁界分布

Table 6. Measurements of reactances

試験項目	試験方法	磁束分布概念図	備考
②ダルトン・カメロン法 (JEC114)	・ 電機子巻線の一相に、外部電源から単相 60Hz 電圧を印加 ・ ロータは静止		電機子磁界とロータ間のすべり 1.0 (60Hz) (電機子磁界定在波)
③ダンパ試験	・ 電機子巻線に外部電源から三相電圧を印加し 60Hz 回転磁界を形成 ・ ロータの回転を変化させてすべりを与える		電機子磁界とロータ間のすべり 0~2.0 (0~120Hz)
④単相短絡試験 (JEC114)	・ 電機子巻線を単相短絡結線して、逆相電流を流し逆相磁界を発生 ・ ロータは 60Hz で電機子磁界と反対方向に回転させてすべりを与える		電機子磁界とロータ間のすべり 2.0 (120Hz)
⑤三相突発短絡試験 (JEC114)	・ 定格電圧の 15%電圧から三相突発短絡する ・ 電機子電流の変化から定数を算出		電機子交流磁界とロータ間すべり 0 電機子直流磁界とロータ間すべり 1.0 (60Hz)
⑥直軸負荷遮断試験	・ 電機子電流が、ほぼ直軸のみの負荷条件から負荷遮断 ・ 端子電圧の変化から定数を算出		電機子交流磁界とロータ間すべり 0

← : 電機子から発生する磁界の回転方向を示す

← : ロータの回転方向を示す

3.2.1 試験結果

(1) ダルトン・カメロン法

定在波電機子磁界に対するリアクタンスを計測した(表7)。磁界変化が60Hzであり、電機子磁界はほぼ常温ダンパで遮蔽されるため、 X_d'' 、 X_q'' 、 X_2 に対応する磁界分布と同等である。 $X_d''=X_q''$ と突極性のないことを確認した。

表7 ダルトン・カメロン法の試験結果

Table 7. Measurement of X_d'' , X_q'' , X_2

	X_d''	X_q''	X_2
リアクタンス (p.u.)	0.18	0.18	0.18

(2) ダンパ試験

界磁回路オープン状態で、電機子磁界とロータ間にすべり0~2.0(0~120Hz)を与えた条件でリアクタンスを計測した。すべりとリアクタンスの関係を図6に示す。すべり0(0Hz)の場合は、電機子磁界はロータを貫通して流れ、磁界分布は X_d に対応する分布と同等である。すべり2.0(120Hz)の条件では X_2 が図6のように求まる。

図6 ダンパ試験結果(リアクタンス)

Fig.6. relationship between slip and reactance

(3) 単相短絡試験

逆相磁界に対する X_2 を計測した(表8)。 $X_2=0.17$ p.u.と、ダルトンカメロン法、ダンパ試験結果と同等の結果が得られた。

表8 単相短絡試験の試験結果

Table 8. measurement of X_2

電機子短絡電流 (A)	開放相電圧 (V)	界磁電流 (A)	逆相リアクタンス X_2 (p.u.)
700	253	110	0.17

(4) 三相突発短絡試験

三相突発短絡試験時の端子電圧、短絡電流と界磁電流の実測結果を図7に示す。短絡電流変化から過渡リアクタンス(X_d' , X_d'' , X_d''')、過渡時定数(T_d' , T_d'' , T_d''')を求めた結果を図8に示す。2重ダンパに起因する二次過渡電流成分を分離でき、対応するリアクタンス、時定数が得られた。

(5) 負荷遮断試験結果

電機子電流がほぼ直軸成分のみの負荷条件から負荷遮断を行い、端子電圧の減衰波形から、図8と同様の解析を行いd軸のリアクタンス(X_d , X_d' , X_d'' , X_d''')、および時定数(T_d' , T_d'' , T_d''')を求めた。リアクタンス実測値は $X_d=0.41$, $X_d'=0.32$, $X_d''=0.25$, $X_d'''=0.19$ p.u.であった。

図7 三相突発短絡時の電流波形

Fig.7. Short circuit current wave form

図8 突発短絡電流波形からリアクタンスの算出

Fig.8. Analysis of short circuit current waveform

(6) 試験結果のまとめ

①～⑥の試験により、定数計測を実施した結果を表9にまとめて示す。超電導発電機には突極性がないことが確認されているため、表示はd軸の定数のみとした。

3.2.2 解析との対比

現状の解析技術では、ダンパの導電率を考慮して発電機全体をモデル化した三次元解析を行うことは困難であることから、巻線の起磁力をカレントシートで表現した擬似三次元解析⁽⁷⁾を適用した。本解析においては、電機子巻線の直線部、端部の起磁力をカレントシートで表現し、その分布を高調波まで展開することで起磁力分布を正確に考慮した三次元解析を実施した。解析では、式(1)の磁界の基礎微分方程式を数値計算することで求めている。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \quad \cdots \cdots \text{式(1)}$$

v : スカラポテンシャル $v = u \cos(n\omega t - \theta)$ A T
 u : 2次元ポテンシャル

回転子表面に第2種境界 ($\partial V / \partial n = 0$) を設定することで、非同期磁界により回転子表面に誘導される渦電流の影響を考慮した。X_d^{'''}の解析では常温ダンパ表面に境界を設定した。ポテンシャル分布解析結果を図9に示す。電機子巻線に定格電流 (I_R) を通電した場合の磁界分布から電機子巻線鎖交磁束量 (Φ_R) を求め、式(2)により電機子巻線の誘起電圧 (V_{Si}) を求めた。式(3)により定格電圧 (V_R) との比から、リアクタンスを算出した。

$$V_{Si} = k \cdot n \cdot \omega \cdot \Phi_R \quad (\text{V}) \quad \cdots \cdots \text{式(2)}$$

k : 係数 n : 実効ターン数
 ω : 角速度 Φ_R : コイル鎖交磁束量

$$X = \frac{V_{Si}}{\sqrt{3} I_R} \cdot \frac{V_R}{\sqrt{3} I_R} = \frac{V_{Si}}{V_R} \quad (\text{p.u.}) \quad \cdots \cdots \text{式(3)}$$

X_d^{'''}解析値は 0.17p.u.と実測値とほぼ一致しており、発電機端部を考慮した過渡リアクタンスの解析が精度よく行えることを確認した。表9には磁界が低温ダンパ、界磁巻線で遮蔽されるとして求めたリアクタンス (X_d[']、X_d^{''}) を併せて示す。

図9 70MW超電導発電機の磁界解析結果
Fig.9. Potential distribution by quasi-3D analysis

4. まとめ

70MW級低速応型超電導発電機の無負荷飽和／短絡特性、リアクタンスに関し、以下の結論が得られた。

- (1) 70MW級機の無負荷飽和特性／短絡特性を計測し同期リアクタンスを求めた結果、0.42p.uと現用機の1/4～1/5に低減しており、超電導発電機の空心構造がリアクタンスに与える効果を確認した。
- (2) 発電機機内の磁束密度分布、無負荷飽和／短絡特性、同期リアクタンスともに電機子巻線の端部を考慮した三次元解析で正確に求まることを示した。
- (3) 二重ダンパに起因する次次過渡リアクタンスを三相突発短絡試験、負荷遮断試験から求めることができた。
- (4) リアクタンスの過渡成分 (X_d[']、X_d^{''}、X_d^{'''}) は、巻線の起磁力をカレントシートで表現した擬似三次元解析により、渦電流の影響を回転子表面の境界条件を設定して考慮することで算出できることを示した。

表9 70MW級機リアクタンス (実測と解析の対比)

Table.9. Measured and analyzed reactance of 70MW model generator

項目		リアクタンス (p. u)				
		X _d	X _d [']	X _d ^{''}	X _d ^{'''}	X ₂
実証試験結果	無負荷飽和特性試験 三相短絡特性試験	0.42	—	—	—	—
	ダルトン・カメロン法	—	—	—	0.18	0.18
	ダンパ試験	0.42	—	—	—	0.17
	単相短絡法	—	—	—	—	0.17
	三相突発短絡試験	—	0.34	0.23	0.18	—
	直軸負荷遮断試験	0.41	0.32	0.25	0.19	—
	解析結果	0.43	0.32	0.26	0.17	

- (5) (2)、(4)が精度良く解析できることを確認できたことから、電機子巻線の端部発電効果を考慮した超電導発電機の基本設計技術を確立できたと考える。
これらの解析技術は、次期開発である、200MWパイロット機の基本設計に適用していく方針である。

本研究は、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託により実施したものである。

（平成11年3月5日受付）

参考文献

- (1) 井上他「70MW級超電導発電機の開発・実証試験の状況」, 平成9年度電気学会超電導応用電力機器・回転機合同研究会, ASC-97-25, RM-97-38
- (2) 前田進、泉昭文、上田明紀、阪部茂一、米谷晴之、野村達衛、田中正昭:「超電導発電機のかご形ダンパ構造の実験研究」 電学論B, 111巻4号, 平成3年
- (3) 上田明紀、平尾俊樹、小林俊、吉村秀人、中村幸夫:「超電導発電機のロータ部分モデルの回転中のクエンチ特性」電気学会研究資料 RM-92-144, SA-92-81
- (4) 平尾俊樹、鈴木一市、上田明紀、小寺滋男、下畑賢司、吉村秀人、豊田勝義:「70MW級低速度型超電導発電機のロータの回転励磁試験」電気学会研究会資料 ASC97-27, RM-97-40
- (5) 平尾俊樹、草深浩、今井義博、渋谷正豊、上田明紀、鈴木一市、前田進、塩原亮一:「70MW級高電流密度型超電導発電機の基本特性」電気学会研究会資料 ASC-98-21, RM-98-35
- (6) 米谷晴之:「タービン発電機の巻線端部に働く電磁力の三次元解析」電気学会研究会資料 SA-96-24, RM-96-74
- (7) 野村達衛:「発電機端部の固定子巻線に働く電磁力」三菱電機技報 vol. 46, No. 10, 1972

前田 進 (正員) 1952年10月1日生。1977年

北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。電力・産業システム事業所に勤務。主としてタービン発電機、超電導発電機的设计・開発に従事。1998年日本電機工業会電機工業技術功績者会長賞受賞。

増永 顕

1971年8月17日生。1996年横浜国立大学大学院工学研究科生産工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。電力・産業システム事業所に勤務。タービン発電機、超電導発電機的设计・開発に従事。

鈴木 一市

(正員) 1952年1月14日生。1976年名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。電力・産業システム事業所に勤務。主としてタービン発電機、超電導発電機的设计・開発に従事。1998年日本電機工業会電機工業技術功績者会長賞受賞。

上田 明紀

(正員) 1948年2月6日生。1972年東京大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。電力・産業システム事業所に勤務。主としてタービン発電機、超電導発電機的设计・開発に従事。1998年電気学会進歩賞受賞。日本機械学会会員。

米谷 晴之

(正員) 1964年3月3日生。1989年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。先端技術総合研究所に勤務。主として電磁機器、超電導応用機器の電磁解析の研究に従事。1998年電気学会論文発表賞受賞。IEEE会員。

下畑 賢司

(正員) 1962年5月18日生。1987年大阪大学大学院理学研究科物理専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。先端技術総合研究所に勤務。主として超電導マグネットの開発に従事。低温工学学会会員。

平尾 俊樹

(正員) 1955年1月4日生。1979年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。電力・産業システム事業所に勤務。主としてタービン発電機、超電導発電機の開発に従事。1997年超電導関連機器材料技術研究組合に出向、現在に至る。