

# 発電電動機の高速・大容量化への挑戦

Challenging the Realization of High-Speed, Large-Capacity Generator-Motors

西島 令宰  
N. Nishijima

吉田 勝彦  
K. Yoshida

蜂谷 秀行  
H. Hachiya

特集  
II

近年、発電電動機は高速・大容量化の傾向が著しい。高速・大容量機的设计・製作にあたっては、通風冷却性能の改善や軸系安定度の向上、さらには大荷重スラスト軸受の開発や絶縁性能の向上が不可欠となる。当社は、新たな解析技術や多くの実績と経験により蓄積された豊富な技術を駆使して、このような種々の課題に挑戦し解決して、多くの発電電動機を製作している。

ここでは、信頼性の高い高速・大容量発電電動機を実現するに至った当社の解析技術や開発実績と、最近注目を浴びている可変速発電電動機における当社の特長について紹介する。

Recently, the unit capacity and rotation speed of generator-motors have become larger and higher, respectively. The improvement of design characteristics such as the ventilation and cooling system, the stability of the shaft system, thrust bearings capable of accommodating heavier loads, and the insulation system are therefore indispensable.

This paper describes the main features of recent technical progress made in the field of generator-motors. Toshiba has designed and installed many high-speed, large-capacity generator-motors by applying the latest technologies.

## 1 まえがき

わが国では、大容量火力・原子力発電所の建設増加に伴い、効率的な電力系統の運用のために揚水発電所の必要性が重視され、各地で建設が進められている。そして、揚水発電所の経済性実現のため、単機出力の大容量化と高速化の傾向が顕著である。

当社は、こうした状況に応じ、高速・大容量の発電電動機を次々と製作・納入している。これらの発電電動機は過去の豊富な設計・製作技術を駆使するとともに、新しい解析技術を用いて技術的課題を解決して製作したものである。そして、さらなる高速・大容量化に向けて開発・研究を進めている。

また、最近では揚水運転時の周波数調整機能や高効率発電運転機能を持ち、電力系統の安定度向上に寄与する可変速揚水発電システムが注目されており、大容量可変速発電電動機が実現してきている。

ここでは、これら高速・大容量発電電動機の最新技術の概要を紹介する。

## 2 技術動向

表1に同期発電電動機および可変速発電電動機の最近の当社の製作実績を示す。これからも明らかなように、発電電動機は高速・大容量機が多い。

現在、一般に発電電動機の空冷限界容量  $Q$  (MVA) は次

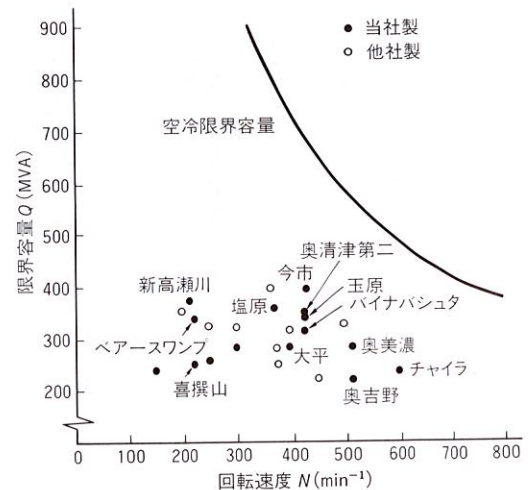


図1. 発電電動機の空冷限界容量 発電電動機は高速・大容量化の傾向にある。

Maximum air cooling capacity of generator-motor

式で表現できる。

$$Q = 3.0 \times 10^5 / N \quad (1)$$

ここで、 $N$ ：定格回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )

この空冷限界容量と製作実績を図1に示す。

高速・大容量発電電動機には図2に示す現象や影響が現われるため、これらの解決のための技術的課題として、基本構造、通風冷却、スラスト軸受、絶縁システムの検討が不可欠となる。

表1. 当社製大容量発電電動機の最近の製作実績 (100 MVA 以上)

Large-capacity generator-motors manufactured by Toshiba (100 MVA or more)

注文主	発電所名	台数	出力		回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	極数	電圧 (kV)	周波数 (Hz)	製作年	始動方式
			発電機(MVA)	電動機(MW)						
(同期発電電動機)										
東京電力(株)	今市	3	390	361	429	14	15.4	50	1986	サイリスタ始動, 同期始動
東京電力(株)	新高瀬川	2	367	367 MVA	214	28	18	50	1977	直結電動機始動
東京電力(株)	玉原	2	335	335 MVA	429	14	13.2	50	1981	サイリスタ始動, 同期始動
東京電力(株)	塩原	2	335	310	375	16	16.5	50	1992	サイリスタ始動, 同期始動
USA, NEP	ベアースワンプ	2	333	415,000 HP	225	32	13.8	60	1972	直結電動機始動
ユーゴスラビア	バイナバシュタ	2	315	310	429	14	11	50	1976	同期始動
中部電力(株)	奥美濃	2	279	271	514	14	13.2	60	1994	サイリスタ始動, 同期始動
九州電力(株)	大平	1	265	277	400	18	11	60	1974	直結電動機始動
ブルガリア	チャイラ	4	235	224	600	10	19	50	1985	サイリスタ始動, 同期始動
関西電力(株)	奥吉野	6	220	214	514	14	11	60	1976	サイリスタ始動
中部電力(株)	奥矢作第一	3	117	118	300	24	14.4	60	1979	制動巻線始動
(可変速発電電動機)										
東京電力(株)	塩原	1	360	360	375 $\pm$ 8%	16	16.5	50	1993	自己始動(二次励磁)
電源開発(株)	奥清津第二	1	345	340	429 $\pm$ 5%	14	16.5	50	1994	自己始動(二次励磁)

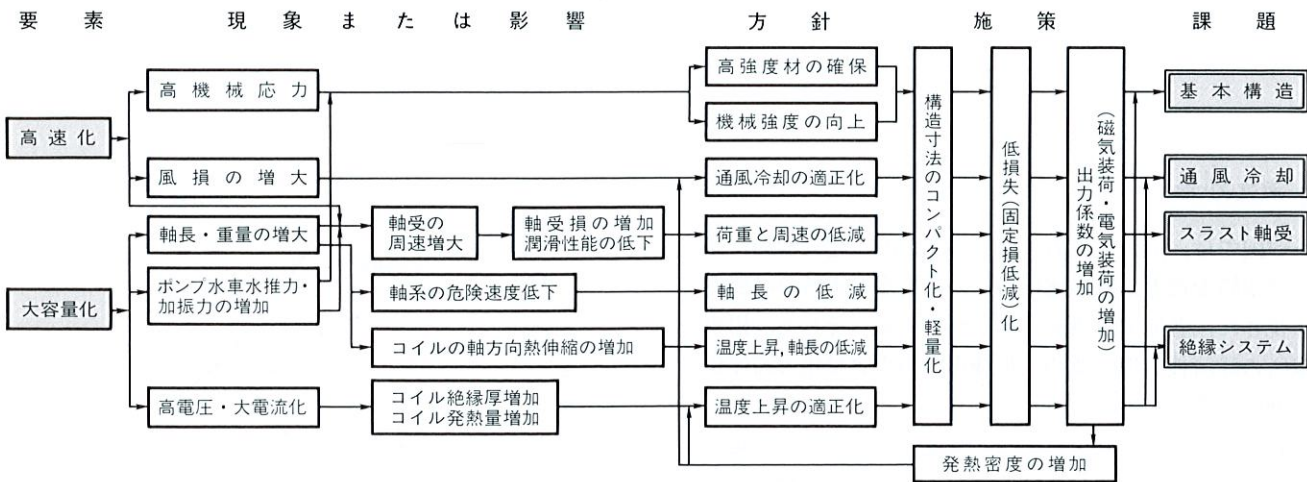


図2. 高速・大容量発電電動機の技術的課題 技術的課題解決のためには、基本構造、通風冷却、スラスト軸受、絶縁システムの検討が不可欠である。

Technical problems to be solved related to high-speed, large-capacity generator-motors

### 3 最近の設計・解析技術

#### 3.1 通風冷却

発電電動機の大容量化で固定子および回転子の通風冷却は設計上の重要なポイントである。発電電動機では両回転方向にファン作用をもち、かつ鉄心積厚全長にわたり均一な冷却が行われることに留意しなければならない。このため、次のような通風方式を採用している。

- (1) 電動ファンによる強制通風方式
- (2) ラジアル通風方式(リムダクトによる自己通風方式)

電動ファンによる通風方式は通風上の制約をほとんど受けられないため、従来から採用されている方式である。一方、

ラジアル通風方式は従来から発電専用機に採用されてきた方式であるが、別電源やファン動力を必要としないために信頼性が高く保守の面で有利であり、また、固定子鉄心積厚全長にわたり均一な冷却が行えるという特長があるため、最近では大型の発電電動機でも採用されている方式である。

当社は、ラジアル通風方式の採用拡大のため通風の解析技術の向上に加えて通風方式の改良を行い、モデル試験により検証している。

これらの開発では、実機での測定結果と解析結果およびモデル試験結果を比較して精度の確認を行いラジアル通風方式の適用拡大を図っている。この成果から、500 MVA-500  $\text{min}^{-1}$ 級の発電電動機にもラジアル通風方式を適用できる見

通しを得ている。

### 3.2 構造

発電電動機の高速・大容量化では、回転子周速の増大による回転子の発生応力増大と、ガイド軸受スパンの増大による軸系の一次危険速度の低下に注意を払わなければならない。

回転子の発生応力増大に対しては、発生応力を受ける断面面積が大きく強度的に有利な厚鋼板積層リム（リングリム）を採用し、対処している。また、軸系の一次危険速度の低下に対しては上部ブラケットアームと基礎との間に防振ステーを設け、かつ、下部ブラケットの剛性を高くして軸方向の剛性を高めることで危険速度を高めている。

これらの高速・大容量発電電動機の技術課題に対しては、構造解析技術や振動解析技術の進歩により軸系および軸受の最適設計が行えるようになったことが解決に向けて大きく寄与している。

### 3.3 スラスト軸受

発電電動機の高速・大容量化に伴い、スラスト軸受も高速・大荷重スラスト軸受の開発が求められる。特に、発電電動機は電力需要に応じて急速かつ頻繁な始動・停止が行われるため、スラスト軸受にはきわめて過酷な運転条件下での高性能軸受特性と電力安定供給のための高い信頼性が要求される。

当社では、発電電動機の効率向上とスラスト軸受の設計寸法精度の確保、軸受パッドの過大な熱・弾性変形防止の観点から、スラスト軸受パッドの平均面圧を高め、軸受の小型・低損失化の研究を進めてきた。すでに開発された新技術として二層スラスト軸受、直接水冷却スラスト軸受があるが、最近では新素材スラスト軸受を開発し、実機商用運転で良好な成果を得ている。新素材スラスト軸受（図3）は、小型・低損失化が達成でき、かつ長寿命という特長があり、将来は高速・大容量発電電動機への適用も期待される。

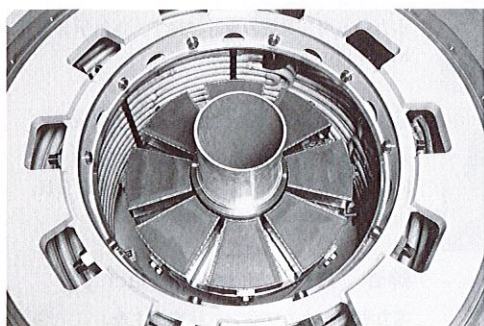


図3. 新素材スラスト軸受 新素材スラスト軸受はオイルリフト装置が不要で、軸受の小型・低損失化が図れるという特長がある。

Thrust bearing made of new material

高速・大容量発電電動機用スラスト軸受を設計する際の留意点を次に示す。

- (1) 両回転方向に適用可能な軸受パッド形状と支持構造の最適化
- (2) 油槽内潤滑油流れ回路網に基づく軸受パッド周りの冷却条件の最適化
- (3) 急速かつ頻繁な始動・停止運転と急速な負荷変動下での動的安定度

これらはスラスト軸受性能を左右するパッドのすべり面形状を決める重要な条件である。パッド形状と支持構造はすべり面の凹型弾性変形に、パッド周りの冷却条件はすべり面の凸型熱変形におのおの影響を与えることから、互いに相殺し適度な凸型のすべり面形状を確保することが重要である。特に(3)項の過渡的運転でのパッドの熱・弾性変形量を精度よく把握し、広い運転範囲で軸受の高性能と高安定化を図ることが必要となる。

当社標準方式の複数コイルスプリングによるパッドの多点弾性支持構造は、上記留意点を実現するためにきわめて合理的な構造であることを、実荷重3,000tのスラスト軸受装置による検証試験と解析シミュレーションにより確認している。図4に示すように、スラスト軸受の特性解析は、軸受の流体潤滑解析とパッドの熱変形解析の両方を同時に行う複合解析となることから、当社では解析手法を自主開発し、計算値が実測値と高い精度で一致することを確認している。さらに、(3)項に関してはより解析精度の向上を図るために、ダイナミックスラスト軸受装置による開発研究を進めている。

発電電動機の高速・大荷重スラスト軸受は攪拌(かくはん)損失が増大するため膨大な軸受損失を伴うことから、軸受油槽内潤滑油の冷却が重要である。最近では、油槽内に冷却管を内蔵する自己潤滑油自蔵式に代わって、油冷却器と電動ポンプを軸受油槽外部に設置する強制循環方式を採用している。この方式は、従来の主軸回転部を利用した自己

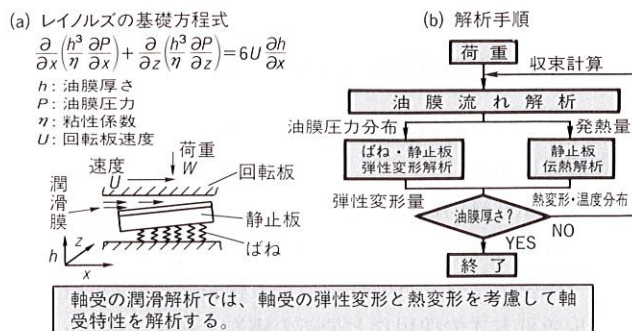


図4. 軸受流体潤滑の解析手順 軸受の弾性変形と熱変形を考慮して軸受特性を解析している。

Analysis procedure for bearing lubrication

ポンプ方式に比較し、ポンプ効率に優れ、かつ軸受周りの小型化が可能で、軸受損失を低減できるという特長がある。

### 3.4 絶縁システム

発電電動機の高速・大容量化は、絶縁システムにも多くの高機能を要求する。例えば、大容量化は定格電圧の上昇を伴うことから、固定子絶縁の電気性能を高める必要がある。当社の発電電動機は、エポキシレジンリッチ方式のトスリッチ絶縁を標準採用しているが、開発以来これらの要求を満たすための改良を重ねている。現在では、エポキシ接着剤やコイル製造法などの改良によって、ほとんどの高電圧巻線に対応できるようになっており、絶縁層内の電界制御や、巻線スロット部および端部の表面電位分布制御などの技術と併せて信頼性の向上に貢献している。

一方、高速化は遠心力の増大を伴うことから、回転子絶縁の機械性能を高める必要がある。巻線に働く遠心力が大きい高速回転子では、無機系材料と組み合わせたターン絶縁によって、圧潰強度（局所的な圧力に対向する強度）を高めている。また、発電電動機では頻繁な始動・停止運転を余儀なくされるが、高速回転子では特にコイル長が長くなる傾向にあるので、熱伸縮に起因した疲労劣化を考慮した寿命設計がなされている。

可変速発電電動機では、回転子にも固定子同様の三相分布巻線が採用されるので、遠心力に対してスロット外部の巻線端を支持する必要がある。当社の回転子巻線端部の支持固定にはU形の締結ボルトを用いたUボルト支持方式を採用している。この方式は、支持部の絶縁層に高い応力が作用せず、かつ冷却効果が高いという特長がある。また、高電圧の交流で励磁されることから、回転子巻線にも放電劣化に対する配慮が必要であり、固定子巻線と同じくエポキシマイカ絶縁を採用している。Uボルト周りについては、電界解析とモックアップ試験によって十分な絶縁強度を確認している。回転子の集電装置は、構造上高電圧大電流の充電部が露出するので、コレクタリング絶縁の放電対策や、異相間のバリア絶縁などにくふうを凝らし、十分な絶縁強度を確保している。

## 4 高速・大容量発電電動機的设计例

ここに述べた技術課題およびその解決策を反映した設計例を図5に示す。

図5は400MVA-500min<sup>-1</sup>級の同期発電電動機であり、本機的设计では、リングリムの採用による回転子強度の確保、一体型ブラケットの採用による軸系安定度の向上、ラジアル通風方式の採用など最新の構造、通風・冷却・振動解析技術を活用した諸施策により最適設計を行っている。

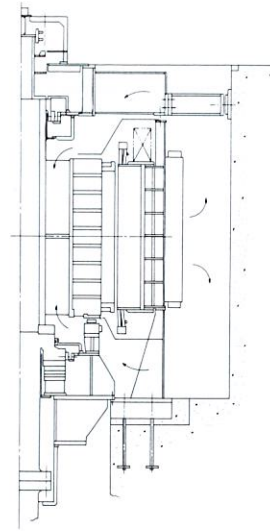


図5. 400MVA-500min<sup>-1</sup>級発電電動機的设计例 最新の解析技術を活用した諸施策により最適設計を行っている。

Example of 400MVA-500min<sup>-1</sup>-class generator-motor

## 5 あとがき

発電電動機は、時代の要求に応じて高速・大容量化の一途をたどっており、それに伴う技術的諸問題は、新しい解析技術や多くの経験と実績から蓄積された技術力により解決している。これにより表1に示すような多くの製作実績があり、当社の技術はこの分野で世界のトップレベルにある。

当社は、今後も実績の積重ねと技術開発を行い、発電電動機のよりいっそうの性能向上と信頼性向上、および経済性向上に努める所存である。

## 文献

- (1) 大島正規, 他: 大容量発電電動機・水車発電機の技術動向, 東芝レビュー, 43, 12, pp.974-977 (1988)
- (2) 木村嘉昭, 他: 高電圧回転子コイル用トスリッチ絶縁, 東芝レビュー, 30, 9, pp.646-649 (1975)



西島 令宰 Noritada Nishijima

京浜事業所発電機部主査。  
水力発電用発電機的设计に従事。電気学会会員。  
Keihin Product Operations



吉田 勝彦 Katsuhiko Yoshida

重電技術研究所 化学・絶縁技術開発部主査。  
回転機絶縁の開発研究に従事。電気学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



蜂谷 秀行 Hideyuki Hachiya

電力事業部水力プラント技術部主査。  
水力発電プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。  
電気学会会員。  
Power Systems Div.