発電機・電動機の歴史と今後の展望

正員 田里 誠* 正員 長野 進**
正員 雨森 史郎*** 正員 阿曾 俊幸**

History of Rotating Machine Development and Foresight

Makoto Tari*, Member, Susumu Nagano**, Member, Shiro Amemori***, Member, Toshiyuki Aso**, Member

The history of electrical rotating machines such as generators and motors in Japan is around one hundred years. At early stage, all machines were imported from foreign countries, but now domestic industries introduce new concept of machines and are leading these kinds of technology. Reviewing of history and development and foresight seems meaningful for further development..

キーワード：歴史，回転電機，開発

Keywords：history, electrical rotating machine, development

1. まえがき

機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機，電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電動機と，エネルギー変換装置としては逆方向であるが，これらには共通の歴史と技術の進展がある。両者とも明治初期に欧米からの輸入機器により実用が始まり，大正年間に国産化が始まった。戦時中の技術孤立化により欧米に大きく遅れをとったが，戦後，輸入技術を咀嚼して行く中で自主技術力を付け，現在ではわが国で生まれ，そして世界をリードする特徴ある技術も数多くある。今後，この確立された地位を維持し，さらに発展さす上で約 100 年の歴史を概観し，また，そこに残されている研究課題を整理して展望することは意義深いことである。本紙では，タービン発電機，水車発電機，そして電動機についてそれぞれの歴史と最近の技術動向，および今後の展望について述べる。

2. タービン発電機

タービン発電機は高速回転機であるため，回転子径は軸材強度により，鉄心長は振動により制約を受ける。単機容量の増大は，これらの制約を材料・振動技術の進歩とあい

まって冷却方式の改良進歩，すなわち電気装荷，磁気装荷を増すことにより克服しながら進められてきた。

換言すれば，タービン発電機の大容量化は冷却技術の進歩と言っても過言ではない⁽¹⁾。

1953 年に冷却性能に優れた水素ガスが初めて採用され，その後ガス圧の上昇および 1959 年に導入された回転子コイル直接冷却の適用により回転子の設計は大幅に改良され，さらに 1965 年に水冷却固定子コイルが導入されてから大容量化は飛躍的に進んだ。

〈2・1〉 空気冷却タービン発電機 わが国で最初に営業用火力発電所が出現したのは 1887 年といわれるが，本格的に電力用タービン発電機が製作されたのは 1917 年 4 極 12.5MVA が最初といえる。2 極機として最初の大形機は 1933 年製の 22.5MVA-3,600min⁻¹ であり，これは当時の世界的記録品であった。

空気冷却タービン発電機の時代は，第二次世界大戦をはさんで，1951 年に電力会社の再編成が行われた後まで続く。

〈2・2〉 水素冷却タービン発電機 水素ガスが冷却効果に優れ通風摩擦抵抗の小さい冷却媒体である特徴を生かして，1953 年に最初の水素冷却機として 55MVA 級機が製作され，1957 年に初めて 100MVA を超える 160MVA-3,000min⁻¹ が製作された。これらは間接冷却方式を採用している。

間接冷却方式はコイル導体を対地絶縁を介して冷却するため，構造は簡単であるが，ガス圧上昇に伴う冷却向上効果が小さかった。

その後，回転子コイルを直接冷却する方式が開発され，単機容量の飛躍的な増大を可能にした。国産最初の直接冷却

* 〒212-0052 川崎市幸区古市場 2-93
2-93, Furuichiba, Saiwai-ku, Kawasaki 212-0052

** (株)東芝 社会・電力システム社 京浜事業所
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
Keihin Product Operation, Toshiba Corporation
2-4, Suehiro-chou, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

*** 東芝三菱電機産業システム (株) 回転機システム事業部
〒108-0073 東京都港区三田 3-13-16
Rotating Machinery System Division, Toshiba Mitsubishi
Electric Industrial System Corporation
3-13-16, Mita, Minato-ku, Tokyo 108-0073

機として 1959 年に $208.696\text{MVA}-3,600\text{min}^{-1}$ が製作された。

現在では、回転子コイル直接冷却方式が一般的に採用されている。

水素ガス圧力は導入当初 4.9kPa でその後上昇し、現在は 520kPa まで実用されている。

1962 年には水主火従から火主水従に転じ発電設備規模とタービン発電機の単機容量は急伸した。

〈2・3〉 水冷却タービン発電機 さらに技術開発が進んで 1965 年には固定子水冷却第 1 号機である 442MVA が中部電力(株)知多火力向け 1 号機に完成した。

固定子コイルを中空素線で構成し、電導度を制御した冷却水で導体内部から直接冷却する方式で、水の代りに油を使用する場合もあった。

また、導体に隣接して設けた通風ダクトに水素ガスを流し冷却する方式もある。

最近は中空素線と中実素線を組合せ、冷却効果を確保しつつ損失を抑えた設計が一般的である。

このような経過を経て、固定子・回転子の直接冷却が大容量機の一般的な冷却方式となり、さらにガス圧増加などが加わって 1973 年に中部電力(株)知多火力 4 号機向けに $800\text{MVA}-3,600\text{min}^{-1}$ が完成した。

2001 年に中部電力(株)碧南火力 4 号機向けに $1,120\text{MVA}-3,600\text{min}^{-1}$ が完成し 2 極単機として国産最大容量機となった。これは世界最大級である⁽²⁾。

タービン発電機単機容量の変遷および $1,120\text{MVA}$ 機をそれぞれ図 1、図 2 に示す。

〈2・4〉 タービン発電機の最近の技術動向

〈2・4・1〉 ニーズの多様化と冷却方式 以上、大容量化の歴史的な変遷を冷却方式別に述べてきた。まさに冷却技術の進歩が大容量化に大きく寄与してきたことを示している。近年は、エネルギーを取り巻く環境の変化およびプラントの計画から廃棄までを視野に入れたライフサイクルコストの考え方により原動機が多様化して 2 軸のクロスコンパウンド形や多軸のコンバインドサイクル形も出現し、運用方法の変化に対応し簡素な構造で運転・保守の簡易化を図る傾向にある。

すなわち、水直接冷却方式から水素冷却方式へ、あるいは水素冷却方式から空気冷却方式として補機装置を省き運転ならびに保守の簡易化を図っている。

また、既設機においては、リハビリを行って長寿命化・高性能化する傾向にある。発電機構成部品の中でコイル絶縁は起動・停止や負荷変化の影響を直接受け劣化しやすいので、コイルの巻替により長寿命化するとともに出力増大、高効率化も図っている。これらの目的に、従来絶縁の特性を確保しつつ熱伝導率を改善した高熱伝導絶縁 (HTC 絶縁) を適用する効果は大きい⁽³⁾。

〈2・4・2〉 コイル絶縁 固定子コイル絶縁は、高電圧、長尺、電氣的・機械的ストレスが大きいなど、厳しい使用条件下にある。

初期の頃は、アスファルトコンパウンド絶縁を採用して

図 1 タービン発電機単機容量の変遷

Fig. 1. Growth in turbine generator output.

図 2 中部電力(株)碧南火力 4 号 $1,120\text{MVA}$ 発電機

Fig. 2. $1,120\text{MVA}$ generator for Chuden Hekinan.

いたが、1960 年代以降は予め絶縁テープにレジンを含浸しテーピング後にモールド硬化させるレジンリッチ絶縁方式、また 1980 年代以降はドライマイカをテーピング後に低粘度レジンを真空加圧含浸し特殊成型金具を用い加熱硬化させる真空加圧含浸方式も開発され、耐熱クラスも B から F に移行した。なお、耐熱クラスの種類、実用化時期はメーカーにより異なる場合がある。

高電圧化に伴うコロナ発生防止対策として、コロナ防止テープやペイントを効果的に使用している。

回転子コイル絶縁は、使用電圧は低い、高速回転による強大な遠心力に耐える十分な機械的強度が要求される。

初期においては、マイカシート主体の絶縁を使用していたが、直接冷却の採用に伴って通風パスの形成が必要になり、機械的強度に優れたガラス基材合成樹脂積層品を使用するようになった。

3. 水車発電機

水車発電機とは、水の位置エネルギーを機械動力に変換する水車によって駆動される発電方式に使用される発電機

の総称である。

近年はダムに貯水し、その水の落差を利用するダム式発電所が一般的であるが、これは水の多目的利用（洪水防止、上水、工業用水、農業用水源等の利用）に沿うため、世界各地で活用されている。

〈3・1〉 発電専用水車発電機 世界における水車発電機の歴史は非常に古く、1878年にフランスで始まったと言われているが、詳細については良く判かってはいない。

一方、日本における事業用発電機の初号機は1891年に製作された80kW－500Vの直流機で、この発電機は琵琶湖疎水を利用した関西電力(株)旧蹴上発電所に納められた輸入品であった。

その後、同発電所には合計19台が設置されたが、その内8台目(1895年)に据付運転された15号機(60kW－2,000Vの一般動力用電源)が国産第1号である。

自家用発電機はさらに数年遡るようであるが、記録が確かでない。

その後、電力需要が戦争を含む日本経済の状況で変化はあったものの、大局的には大幅に増大したため、発電機も台数増加では対応できず、単機容量の増大化および発電機電圧の高電圧化が迫られた。

昭和初期までは主として海外からの技術導入によって、その後は研究開発による国内メーカーの自主技術によって、電力市場の要求に応じてきた。

その結果、日本は第二次世界大戦後に新鋭火力が導入され始めるまでの電源構成は、長い間水主火従であった。

また、その間の顕著な実績は、第二次世界大戦前に製作されたものでは、現在の北朝鮮と中国の国境に位置する鴨緑江の水豊発電所に納入された1940年製の当時世界最大容量100MVA－16.5kV水車発電機5台(3台は50/60Hz機)である⁽⁴⁾。

特に、第二次世界大戦後は、需要の増大に応えるために大規模ダム式発電所が次々に建設され、発電機も記録的な大容量機や高速機が開発・設計・製造された。その中の代表的な機械としては、電源開発(株)奥只見発電所納入の133MVA－15.4kV(1959年製)があり、長い間最大容量機として位置していた。

その後、先進国では需要の急増には対応できず大部分は大容量の火力・原子力に頼っているが、水資源の豊富な国々においては現在でも水力発電を中心としている国もある。

世界の大河川には、数百万kWを超える水力発電所が多くあり、その中でも単機容量700MVA以上の低速大容量機が10台以上設置されている発電所が4箇所もある。

また、現在建設中の中国・三峡発電所には840MVA－20kVが最終32台設置される(総発電所出力;2千万kW超)予定である。

発電専用水車発電機の単機容量の推移を図3に示す。

水車発電機は、機器の特徴として大容量・低速度機が多く、回転子に大きな慣性モーメントが必要であるため構造的に大口径、短尺となり、固定子鉄心スロット数を多く選

図3 発電専用水車発電機単機容量の推移

Fig. 3. Tendency of hydro-generator capacity.

ぶことができるので並列回路数を大きく取ることが可能であることから、単機容量が増大しても発電機電圧は比較的低い。

〈3・2〉 揚水用発電電動機 前節で述べた様に、近年先進国では急速でかつ多量の電力需要に対応できず、大容量の火力・原子力発電を中心とした火主水従となっている。しかし、電力系統を経済的に運用するためには、全電力設備の10～20%は水力発電(揚水発電を含む)とすることが理想と言われており、最近ではこれを揚水発電で補う傾向にある。

これは、水力発電は治水を兼ねたほぼ無公害な発電方式という特徴の他に、始動停止が容易、急激な負荷変動に対応可能、保守が容易等の長所があるからである。

世界では、可逆回転形の揚水発電が1931年にイタリアやドイツで初採用されている。

日本では1959年に四国電力(株)大森川発電所14MVA－11kVが採用されて以来、ダムおよび発電所建設コスト低減のため急速に高速・大容量化した。

その様な背景から揚水用発電電動機の技術は、世界的に見て日本が牽引し発達したと言える。

1969年には、当時世界最大容量の発電電動機となる関西電力(株)喜撰山発電所250MVA－16.5kVが製作され、その後も日本が発電電動機の技術開発をリードし1999年には世界最大機である東京電力(株)葛野川発電所475MVA－18kVを製作している⁽⁵⁾。

〈3・3〉 可変速発電電動機 1980年代後半に日本では、電源構成に占める原子力発電の比率が高まり、負荷調整運転する火力発電所が増加し、系統の周波数調整(AFC)容量を確保することが難しくなったことから、揚水時に水車の回転速度を変化させ入力調整を行なう新しい技術が開発された。

この可変速技術の特徴は、従来の直流励磁方式に代え低周波の交流励磁を行なうことにより系統との同期を保ちながら水車の回転速度をある一定範囲内で自由に变化させることである。

したがって、発電電動機の回転子は従来の突極形から固定子巻線と同様な巻線形になり、印加電圧も従来の数百 V から数千 V の高電圧になる。

このため、回転子側にも高電圧巻線を配置する必要があるコネクタ装置や回転子巻線・鉄心の構造が通常突極形と大きく異なる。

世界初の可変速揚水発電システムは 1990 年に東京電力(株)矢木沢発電所 85MVA-13.8kV (二次電圧 4.8kV) -130 ~156min⁻¹ に採用され、実用化した⁶⁾。

その後、現在まで日本では計 7 機が可変速機として運用されており、今後も可変速発電電動機の建設が計画されている。

発電電動機および可変速発電電動機を図 4 に示す。

〈3・4〉 水車発電機の最近の技術動向 水車発電機は、当初の直流機の数 kW に始まり、社会のニーズに伴い 100 年の年月をかけ 800MVA まで大容量化されてきた。

この間、発電機の固定子コイル絶縁には耐コロナ特性の優れたマイカ(雲母)をテープ状にしたマイカ絶縁テープを主材とし、アスファルトコンパウンドから合成レジンへと改良されていった。

一方、絶縁層表面のコロナ防止は初期のアスベスト材から現在は特性の優れたペイントやテープ状の材料へと改良され使用されている。

今後は、さらなる高ストレス化や高温化に伴う材料の開発およびコイル固定方式を含めたシステムとしての最適化

が望まれる。

また、前述した様に水車発電機は主として空気冷却方式が採用されている。今日まで、大容量化に伴い使用材料の高性能化による低損失化、解析技術の向上、および通風経路・風量の最適化を実施してきた。したがって、今後も絶縁システムや高性能材料開発と連携したさらなる冷却方式の最適化が課題となる。

4. 電動機

実用的な電動機の誕生から 100 余年が経ち、その間に市場ニーズと技術進歩に応じて数多くの種類の電動機が開発され、今日の動力機関の中で最も重要な位置を占めるようになった。本章では、産業機械の主動力源である誘導電動機を中心に、電動機技術の変遷と最近の動向について概説する。

〈4・1〉 電動機の歴史と製品群 電動機の原理を最初に示したのは、1821 年に M.Faraday が永久磁石の磁束と電流の相互作用を巧みに回転力に変えた実験装置であると言われている。その後、1888 年に N.Tesla が二相で回転磁界を発生させた誘導電動機を開発し、これが今日の主流となっている三相かご形誘導電動機につながっている。

わが国の誘導電動機の今日までの流れを見ると、大きくは大容量化、高速化、コンパクト化、および多様化の 4 つに分けられる。

〈4・1・1〉 大容量化 1895 年製作の 25HP に始まり、現在 27MW (1976 年製) まで大容量化している。また、高電圧化も同時に進み、特に海外向けでは数 MW 級機に 11kV や 13.8kV が多く適用されている。なお、近年の傾向として、単機容量を増加せずに多数台に分割し、システム制御による効率的な運転を目指すことが多くなっている。

〈4・1・2〉 高速化 1941 年に送風機用 2 極-3,000HP を製作して高速大容量化の先鞭をつけた。その後、高速化と大容量化が共にコンパクト化と高効率化に直接つながることからも高速化が進展し、現在は 2 極および 4 極機で 10 ~20MW 級のものが多く製作されている。さらに、超高速機として 3.5MW-7,900min⁻¹ や塊状ロータの 3.3MW-11,430min⁻¹ のが 1980 年代に実用化されており、今後制御を含め大きなトータルメリットが確保できるようになると急速な適用拡大が見込まれる。

〈4・1・3〉 コンパクト化 冷却性能向上、高耐熱クラスの絶縁、磁性楔を含む高性能磁性材料の適用などによってコンパクト化が達成される。また、使用材料の軽量化が銅損と鉄損の低減につながるため、これらが相乗効果として発揮され、上記の 25HP の例では約 100 年で質量が 1/7、発生損失が 1/2 に低減されている。

〈4・1・4〉 多様化 電動機は、多種多様な使われ方および環境での使用が要求される。これらに対し、可変速システム用電動機、原子力炉内蔵型再循環用インターナルポンプ用電動機⁸⁾、宇宙ロボットアーム駆動用電動機など数多くの機種が製作され、それぞれ固有の技術的課題を解決し

図 4 可変速発電電動機比較鳥瞰図

Fig. 4. Comparison of generator-motor and generator.

図5 連続冷間圧延機駆動用誘導電動機群
6,000kW 他

Fig. 5. 6,000kW induction motors for cold mills.

て長期運転のための信頼性を確保している。

特に、可変速システム用電動機については、直流機システムから同期機または誘導機を用いた交流可変速システムへの移行があげられる。特に、鉄鋼や紙プラント向けのようにな多数台の電動機が並列に配置されて高精度の速度制御が必要となる場合でも、大容量化や低慣性化、さらに保守性の面での優位性から交流可変速化が盛んに行われている(図5参照)。

図6に、最近の電動機技術の動向も含めて電動機における主な変遷を示した。

〈4・2〉 電動機の最近の技術動向

〈4・2・1〉 材料技術との融合 電動機は、導電材料と磁性材料、またそれらを介在している絶縁材料の特性によって性能が大きく左右される。したがって、新しい材料の開発と、それを電動機に適用する技術の進歩が大きな性能向上につながると共に、新しい分野の開拓にもつながられる。

このような開発事例として、コンパクト化と高効率化を同時に実現できる電動機として注目を集めている永久磁石(PM)電動機があげられる。これは従来のSm系に対して高性能・低価格であるNd系が80年代初期に開発されたことが契機となっている。現在、Nd系磁石の最大エネルギー積は開発当初の約1.6倍の55MGOeに及び、弱点とされた耐熱性についても改良が加えられて、特に高耐熱性が要求されるような電気自動車駆動用にも適用されている。また、数MWに及ぶ大容量機分野でも船舶駆動用やギアレスの低速風力発電用として製品化が進んでいる⁹⁾。

〈4・2・2〉 設計・解析技術の動向 最近の計算機環境の進歩と解析ソフトの充実には目覚ましいものがあり、電動機の各種要素技術に関する詳細な解析および設計手法が研究部門や設計・製造技術部門において盛んに活用されている。

電動機における主な解析対象は、通風冷却、応力・強度、電磁界、振動、および騒音などであり、これらの解析技術

Year	1950	1975	2000
General transition	Trend toward increase of output power per unit		
	▼25HP IM First IM product in domestic (1895)	▼70MW SM	▼27MW IM
	High speed motors		
	▼2pole-3000HP IM (1941)	▼2pole-10~20 MW class	▼Super high speed motors (3MW-10000 min ⁻¹ class)
High voltage Insulation systems	Variable speed (VVVF) in AC motors		
	▼Application for Rolling mills & Paper mills		
	▼Medium and large sized permanent magnet motors		
	Energy saving & Resources saving		
Magnetic materials	Vacumm impregnation with asphalt compound in each coil		
	Prepreg with epoxy resin		
	Vacumm-Pressurized Impregnation (VPI) with epoxy resin together with stator core		
	Development of non-directional electrical sheet		
Standard series in Induction Motor	▼Wide use of ferrite permanent magnet		
	▼Development of Sm-Co permanent magnet		
	▼Development of Nd-Fe-B permanent magnet		
	▼Insulation A class in low voltage		
	▼Insulation E class in low voltage		
	▼Insulation B class in high voltage		
	▼Insulation F class in high voltage		
	▼Application of ball bearings in general purpose motors		
	▼Wide use of aluminium die-cast rotor		
	▼Development of Aluminium frame series		

図6 電動機の主な変遷

Fig. 6. Main transition in electric motors.

が単独または複合して進化することによって電動機の高信頼性、コンパクト化などが図られる。

最近の解析手法としては、通風冷却解析における流体解析や3D-FEM熱伝導解析、さらに電磁界解析における回路網解析式と連成した三次元解析などがあげられる。

特に、電気系と機械系の統合CAEシステム構築の一例として固定子コイルエンド部の振動解析がある。2極大容量タービン発電機に始まり今では中形電動機にも適用されている。解析モデルの自動生成から3D電磁力分布解析、振動、および応力解析を行い、モデルによる疲労強度の検証結果と合わせて合理的な固定子コイルエンド部支持構造を決定し信頼性の向上を図っている。

〈4・2・3〉 制御システム技術との融合 境界分野の技術と深く関連し合いながら進展する技術の一つに制御システム適用技術がある。

インバータ駆動時の留意事項として、従来は高調波による損失増加や振動トルクの発生などがあげられたが、最近の高速スイッチング素子のIGBTなどを用いた高キャリア周波数や多レベル化が時間高調波の低減につながり、低振動トルクや低損失、低磁気音化が図られるようになった。しかし、その一方では軸電流やインバータサージ電圧に対する考慮がより必要となっており、インバータおよび電動機、負荷機を含めたシステム全体の観点から技術的な検討を行って対策を決定している¹⁰⁾。

制御と解析の技術が関連し合う事例として、サイクロコ

図7 電動機エネルギー密度の変遷（例）

Fig. 7. Growth of energy density in electric motor.

ンバータで制御される鉄鋼圧延システムの軸系ねじり振動解析があり、フィードバック回路の電気系と連成した解析が構築されて軸材料疲労強度データの充実とともにシステム全体の最適化が行われている。

〈4・2・4〉 エネルギー密度の推移 電流と磁束の密度に相当する電気比装荷(AC) [A/m]と磁気比装荷(Bg) [Wb/m² = V・s/m²]との積はエネルギー密度[J/m³]を表しており、前項までにあげた電動機技術の成果を評価するための指標となる。

電気比装荷はコイルの温度上昇と密接な関係があり、冷却性能の向上、絶縁の高耐熱クラス化、絶縁の電界強度を高めることによるスロット内占積率向上などによって増大できる。一方、磁気比装荷は力率や空隙不平衡やスロットリップルによる電磁振動などと密接な関係があり、磁性楔の適用や低騒音化技術の向上によって増大できる。図7にエネルギー密度の変遷の例を示したが、エネルギー密度が大幅に増加している箇所では、上に述べたような性能向上の技術が大きく寄与している。

5. 歴史に学ぶ

筆者の一人は35年間タービン発電機の設計に関わってきた。入社当時は日本経済の第二次高度成長期に当たり電力の伸びも著しく、発電機の単機容量も500MVA, 625MVA, 670MVA, 800MVAと毎年のように最大容量機が製作されていた時期であった。海外との技術提携をベースに国産化していたものが、契約した発電機に関する資料一式は入手したもののなぜそのような設計になるのかの背景についての情報までは入手できなかった。ノウハウは学んでいたがノウハウの取得までには至らなかった。そこで、設計法

の確立・自主技術化を目指し核となる要素技術である絶縁方式、磁束分布・損失分布、冷却方式等の研究開発を並行して行った時期でもあった。それでもトラブルが発生すると、対応に苦慮するとともに導入技術からの延長の怖さを十分に思い知ったものである。しかしながら、設計とワークマンシップの総合結果として現われる品質向上に関しては独自の技術を盛込んで優位性を確立した事例もある。例えば、回転子巻線組立ショップの防塵施設化や、材料・加工・組立・バランス調整の総合技術で決まる回転子軸振動低減技術などがある。

その後、原動機と発電機が1軸で構成されるタンデム・コンパウンドから2軸のクロス・コンパウンド、多軸のコンパインドサイクルが出現し発電装置原動機の出力は増加したものの、発電機の単機容量は増加しなかったが2001年中部電力碧南火力4号機で単機容量1,120MVA-1,000MWを実現した。これは、大容量化に必要な技術課題を自主技術により解決して達成したものである。

最近では社会全体の環境問題重視から、かつて冷媒を空気から水素さらに水を使用することにより大容量化を実現した経緯に対して、同じ出力で冷媒を水から水素、水素から空気にして補機を簡素化して運転・保守の容易性を目指す動きもある。

他方、電動機の筆者もほぼ同年の経験を持つが、本誌では電動機については中容量以上の産業用を中心に述べてきたが、その歴史を振り返るとき、大きな流れとして「コンパクト化」と「多様化」の二つがあげられる。コンパクト化は使用されている材料の進歩に深い関わりを持ち、多様化に対してはパワーエレクトロニクス技術の進歩など、電動機を取り巻く環境の変化に伴って多種多様の電動機が製作されてきた。いずれも周辺技術と電動機固有の技術との融合によって達成されてきている。

このような流れの中で、「信頼性確保」と低騒音・高効率化などの「環境保護」が重要なファクターとして加わり、これらに向けた取り組みが継続して行われてきた。とくに、「信頼性確保」については、最近の多様化に伴ってシステムが複雑化しているため、多方面から検討を加えて信頼性を向上させることが重要となってきた。また、製作時のみならず長期運転中における診断技術の向上によって適切な延命化処置を施すことも重要となっている。

今後とも電動機に要求される事項は、ますます高度化・多様化されることは明らかであり、これらに対して今まで以上の対応が必要になるものと考えられる。

一方、他の筆者の一人は21年間水車発電機の設計に関わってきた。1980年代には、既に単機容量800MVA級の水車発電機の製作も終了し、国内の新規開発地点数も減少傾向にある時代であった。

その後は、早くから自主技術により社会の要求に応えてきた高い独自の要素技術と進歩したパワーエレクトロニクス技術を融合させ、世界に先駆け可変速揚水発電技術を世に送り出した事例もある。

最近、タービン発電機同様社会全体の環境問題重視や電力自由化を背景として小水力発電の見直し等が起こっている。

今後は上述のような動向の多様化に対応できるように、ますます自主技術を磨く必要があると考える。

6. 回転機の今後の展望

以上述べたように、回転機は冷却技術、材料技術、絶縁技術および解析技術の急速な進歩により大容量化、高効率化、コンパクト化ならびに高運転性能化などのユーザからの多様な要求に応えてきた。

これらの歴史的経緯、技術の流れを踏まえ、今後一層強まる環境などの社会的要求も含め、さらなる技術対応力の向上が望まれる。

以下に今後の技術について、その展望を述べる。

〈6・1〉 超電導発電機・電動機 超電導発電機は、現用機と比べ高効率化、小型・軽量化、低同期リアクタンス化による系統安定度の向上、逆相耐量の向上、および進相容量の増大などの多くの利点があり、さらに大容量化対応技術として期待され研究・開発が行われている。

超電導界磁巻線を使用するため磁界レベルが高くなるので、固定子は鉄心ティースレスとなり空隙巻線が採用される。すなわち、固定子巻線は絶縁材料により支持・固定されるので、本質的に高電圧化の大きな可能性を持っている⁽¹¹⁾。

一方、超電導電動機は、海外において船舶の主推進用として界磁コイルに高温超電導線を用いた 5.0MW・230min⁻¹の同期電動機が製作されている。今後、小形軽量化と高効率化の効果がより発揮できるような用途に適用が進む可能性がある。

〈6・2〉 高電圧発電機 現在の発電所のシステムは、高圧あるいは超高圧の送電系統に対し発電機端子電圧を昇圧用変圧器により昇圧し接続しているが、この昇圧用変圧器と発電機を一体化した高電圧発電機 (POWERFORMER™) が欧州にて実用化された。

この発電機の初採用はボルヘス (PORJUS) 発電所向け 11MVA-45kV 機で、固定子巻線として従来の導体にマイカ絶縁したコイルに代わり電力ケーブルを使用している⁽¹²⁾。

一体化による部品点数およびスペース削減のメリットはあるが、落雷を含む系統事故時の保護の検討が必要であり、今後は発電システムとしての総合評価を実施し方向性が検討される。

〈6・3〉 可変速技術 パワエレクトロニクス技術の長足の進歩や、高速度デジタル制御技術の進歩によって、今まで単一の回転数で運転されていた回転電機を可変速運転する技術が現れた。

その典型的な事例が上述した可変速揚水であるが、今後はパワエレ素子を含めた制御性の向上や安定性・高電圧化・システム最適化が課題となる。

また、近年自然エネルギー利用の視点から風力発電が大

容量化・ファーム化している。大容量風力発電では、風力特有の電力変動と系統連携の観点より可変速揚水発電機と同様の二次励磁方式の発電機となるため、今後のこの分野における技術の進歩が伺える。

〈6・4〉 分散型電源用発電機 需要地側で電源を設置して発電する分散型電源の普及が進展している。その中で、風力発電は再生可能エネルギーを利用した方式において主流の位置を占めている。適用する発電機の種類は多岐に亘っているが、特に 1MW を超える大容量機に対しては、可変速発電電動機と同一の二次励磁方式の巻線形機が主流となってきた。本方式はインバータ容量が他の方式の 1/2～1/3 と大幅に低減できるため経済性に優れ、今後ともこの傾向が進むものとする。風力発電は、単機容量増大による発電単価の低減や各種電力貯蔵装置を用いた有効な電力安定化システムの開発などにより、将来的にも導入が進展して行くものとする。

一方、20～100kW で 6 万～12 万 min⁻¹ の超高速マイクロガスタービンで駆動される永久磁石発電機が小形軽量と高メンテナンス性などの特長を生かして小規模の商業施設向けに適用が始まっている。今後、システム全体の低価格化と高効率化が進むことによって適用増加が見込まれる。

〈6・5〉 高効率電動機 近年の環境保護や省エネルギー化の動きを背景に、工場電力消費量の約 70% を占めている電動機に対して高効率化の気運が高まっている。この中で、2000 年に JIS が発行され、高効率かご形電動機を使用する場合の効率値が規定された。しかし、その普及は充分でなく、今後、節電効果の評価見直しや省エネルギーの要求がより高まることによって高効率電動機の適用が増加するものとする。

一方、高効率化と小形軽量化を同時に実現できる永久磁石電動機を速度制御するシステムが大幅な高効率を達成できるものとして期待されている。また、商用電源で始動および運転できる自己始動形永久磁石電動機も経済性の優れたシステムとして、同期引き入れが比較的容易であるポンプなどの低慣性負荷に多く適用されて行くものとする。

7. 結 び

発電機および電動機の約 100 年の歴史を振り返り最近の技術動向をまとめ、さらには今後の展望を試みた。ここに挙げた技術課題とその将来展望が、これら回転機分野に直接的に関わる研究者・技術者および周辺技術などのサポート技術に関わる人たちの一助になれば幸甚である。

(平成 15 年 10 月 20 日受付, 平成 16 年 4 月 16 日再受付)

文 献

- (1) M.Tari and I.Yoshida: "Historical Review of Turbine Generators in Japan", The Papers of Technical Meeting, IEE Japan, HEE-93-17 (1993-9)
- (2) H.Ito, T.Otaka, and K.Miyaike: "Successful Manufacturing of World's Largest Tandem 1,000MW Turbine Generator", Toshiba

- Rev.*, Vol.56, No.6, pp.21-24 (2001-6)
- (3) M.Tari, K.Yoshida, S.Sekito, H.Hatano, R.Brütch, and A.Lutz : "Impacts on Turbine Generator Design by the Application of Increased Thermal Conducting Stator Insulation", *CIGRE Session 2002*, No.11-105, Paris (2002)
 - (4) N.Hashiguchi : "100000kVA Vertical Waterwheel Generator", *Shibaura Rev.*, Vol.19, No.9, pp.339-348 (1940-9)
 - (5) J.Fujita, T.Anan, and S.Okazaki : "The 250MVA / 250MW Generator-Motor for Kisenyama Power Station, Kansai Electric Power Co. -The Largest Unit of the Kind in the World -", *Toshiba Rev.*, Vol.24, No.5, pp.618-624 (1969-5)
 - (6) T.Nakamura, H .Hasegawa, S.Fujiki, and S .Furuya : "Variable Speed Pumped Storage Power System of Tokyo Electric Power Company Yagisawa Power Station", *T.IEE Japan*, Vol.111-B, No.6, pp.583- 586 (1991-6)
 - (7) 田島正明・後藤久雄・増田博之・山元 寛・江頭英明 : 「ターボコンプレッサ用大容量超高速可変速電動機システム」, 三菱電機技報, Vol.64, No.11, pp.34-39 (1990)
 - (8) 熊谷幹夫・雨森史郎・斎藤健彦 : 「高性能・大容量インターナルポンプの開発」, 東芝レビュー, Vol.43, No.1, pp.23-26 (1988)
 - (9) 雨森史郎 : 「永久磁石とともに向上するモータの性能」, 電学誌, Vol.113, No.9, pp.775-779 (1993-9)
 - (10) NEMA Standards Publication : Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems (2001)
 - (11) 低温工学協会編 : 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社 (1993-11)
 - (12) Mats Leijon : Powerformer™ - a Radically New Rotating Machine, *ABB Rev.*, No.2, pp.21-26 (1998-2)

田 里 誠

(正員) 1939年7月15日生。1963年3月京都大学電気工学科卒業。同年(株)東京芝浦電気(現, 東芝)入社。主として回転機の開発・設計に従事。2002年同社退職。現在, 新潟大学, 東京電機大学非常勤講師。

長 野 進

(正員) 1947年1月22日生。1969年5月東京大学電気工学科卒業。同年(株)東京芝浦電気(現, 東芝)入社。現在, 主としてタービン発電機の開発・設計に従事。

雨 森 史 郎

(正員) 1946年9月22日生。1969年3月熊本大学電気工学科卒業。同年(株)東京芝浦電気(現, 東芝)入社。2003年より東芝三菱電機産業システム(株)回転機システム事業部に所属。現在, 主として電動機の開発・設計に従事。

阿 曾 俊 幸

(正員) 1959年5月25日生。1982年3月新潟大学電気工学科卒業。同年(株)東京芝浦電気(現, 東芝)入社。現在, 主として水車発電機の開発・設計に従事