1. 電力応用について

キーワード

超電導, 電力機器, 電力系統, 環境

仁 田 旦 三

東京大学

植 田 清 隆

電力中央研究所, 九州大学

1. はじめに

超電導に関する特集号にあたって, その電力応用について概観する。まず, 電力分野の動向から超電導技術への期待を述べた後, 技術の現状について簡単にふれ, 結びとして今後の展望について私見を述べる。

2. 電力系統から見た超電導技術への期待

2.1 電力分野の動向

近世まで人類の消費エネルギーは, 地球全体のエネルギーから比べればわずかで, 消費によって生じる廃棄物は生活環境を一時的汚染するにとどめることができた。このためのエネルギー資源は, 水力, 風力, 木炭, 馬や牛の力など再生可能なエネルギーであった。18世紀のイギリスで起こった産業革命は蒸気機関や発電機, モータの発明により石炭を中心とした多量エネルギー消費社会を出現した。これと同時に大気汚染や水汚染などの環境問題が起こった。

20世紀前半はこの産業革命が世界各国に広がり, エネルギー資源の確保などの理由から二度も世界大戦が引き起こされた。戦争が終結した直後は工場や都市は破壊され水力, 木炭, 馬, 牛などが活用され空も海も川もきれいになった。第二次世界大戦後, 20世紀後半の日本の産業復興を支えたのが発電機, モータ, 変圧器, 送電線, ケーブルを含む電力発送配電網と原子力・火力, 水力の発電技術である。電気はその利便性やクリーン性により, 急速な発展を遂げ, 現在の日本では消費エネルギーの約40%を電気が占めるまでになった。一方, 火力発電や自動車, 鉄道, 航空など物資輸送, 工場生産, IPPや熱併給型のマイクロガスタービンが話題となっている。また電力設備は組立加工や材料技術の進歩により運転信頼度が大幅に向上し, 保守定検義務も大幅に緩和された。今後のIPPやマイクロタービンの本格的な導入が進むに従って, エネルギー分野でもダウンサイジングと省エネ技術の必要性が高まるものと思われる。

2.2 超電導電力技術の特徴

超電導現象は石油産業が普及始めた1911年に発見された。今日までの約90年間その実用を目指しさまざまな研究がなされ, 成果に幾度もノーベル賞が与えられた。12年前の高温超電導体の発見はその実用化に大きな期待がかけられた。電力分野では省エネを目的に新材料の実用化研究に多くの研究資源が投入された。数多くの材料の製法とまだ研究段階の超電導体を用いてケーブル, 限流器, SMES, 発電機, モータ, 変圧器が試作された。材料と応用の同時進行型の開発研究が世界的規模でなされた理由としては, (1)機器のコンパクト化, (2)発送電システム電圧階級の簡素化, (3)新機能の創出, (4)機器特性の改善(電気抵抗, 冷却材, 磁気シールドなど)が挙げられる。以下にこれらの超電導の地球環境改善に対する寄与要因を述べる。

(1) 機器のコンパクト化

超電導電力機器は, 現用の銅と鉄で構成される機械に比べて, 電流密度と磁束密度を高くすることにより形状を小型化できる。直接水冷却した銅線が約1 kA/cm²の最大電流密度であるが, 現在市販されているビスマス超電導線は20 kA/cm²を, また開発中のイットリウム薄膜線は1,000 kA/cm²の高い電流密度を達成している。発電機や変圧器で用いられるけい素鋼板は約2 Tで磁気飽和し, それ以上の磁束密度を得るためには巨大な空心マグネットか超電導マグネットになる。

この小型化は, 機器構成材料の使用量を減少し省資源を図り, 製作限界と単機容量の増加によるスケールメリット, 設置面積の縮小, 運搬設置の簡素化が実現できる。

(2) 発送電システム電圧階級の簡素化

電力機器は, 産業革命以来鉄と銅により構成され, スケールメリットと性能向上面から, まず冷却方法の改善による電流密度を増加し, 次いで絶縁材料の改善による高電圧化によって大容量化が実現されてきた。これに対して超電導機器では, 電流密度の飛躍的な向上により, 現用機に比べ低電圧のシステムと機器で大容量の発電や送電が可能となる。現在の送電線は, 送電容量に合わせて500, 275, 154, 66 kVと多階層で, これに結合する電力機器も発電機は10~30 kV, 変圧器, 送電線, ケーブルで66~500 kVと多様な電圧階級で運転されて電力システムを複雑化している。

Applied Superconductivity to Power System Apparatuses.
By Tanzo Nitta (The University of Tokyo) & Kiyotaka Uyeda
(Central Research Institute of Electric Power Industry, Kyushu University).

発電機とケーブルに超電導を適用することにより、例えば送電階級最低電圧の 66 kV に統一し、8.8 kA 流す発電機電機子巻線と超電導ケーブルを作れば 100 万 kW の送電システムを簡単に形成することができ、将来の都市近郊の電源からの大容量高密度送電システムを単純化する。

特に、ケーブル埋設路の小型化や変圧器の省略はコストダウン効果とともに送電設備の建設資源の節約による地球環境改善効果が期待できる。

(3) 新機能の創出

現在の電力機器は、鉄、銅、アルミからなる近代文明の成果の一つで、100 年以上の技術革新の結果、経済的にも機能的にも完成されたものとなっている。これに対して、超電導電力機器はその電流や磁束の動作点を大幅に増加できるので、その特徴を生かした設計自由度が高く、これまでの機械では実現できなかった新機能を創生することができる。その一つが地球環境改善を考慮した超電導電力機器である。

変換器と冷凍システムの損失のみで 90% 以上の高効率電気貯蔵ができる SMES や、現用器では遮断が難しい 10 万 A 級の大電流限流器 SFCL、現用発電機の 20% 程度まで減少する同期インピーダンスで電力輸送限界を約 1.5 倍向上できる超電導発電機 SCG、摩擦ロスのない超電導磁気ベアリングとフライホイール電力貯蔵 SFWS などが実現する。これら SMES、SFCL、SCG、SFWS と大電流超電導ケーブルを結合することにより、送電設備を大幅に簡素化することで地球環境改善効果が期待できる。

(4) 機器特性の改善

(i) 電気抵抗損失の減少 超電導は電気抵抗が極小化し、大電流を流してもジュール損が減少して小型で大容量の電力機器を実現する。これと同時に運転中の電気抵抗損がなくなり運転効率が上昇する。現用機器 100 万 kW の電気機械の損失を 1% 減少できれば 1 万 kW の節約となる。現在の日本の全発電設備約 200 GW である。これまで試作された実用規模の超電導発電機の試験結果から約 0.5% 向上が期待できる。

(ii) 寒剤 超電導電力機器の冷却には液体ヘリウムや液体窒素などの寒剤が必要である。この冷却は、超電導機器の現用機器に対する弱点でもあるが、一方、現用機では温度上昇による機器の信頼度が問題となることを考えると、超電導機器ではそのような信頼度上の問題から回避されたとの長所としてとらえることもできる。また、特に液体窒素は資源的な制約もなく、材料コストが少なく冷凍システムによる損失も小さい。現在の電力機器で油冷却が適用されている変圧器では、防火対策や使用後処理など環境対応策が必要となるが、液体窒素はそれらの処理が簡単である。例えば、欧米において超電導変圧器開発が行われている理由にこのオイルレス化が挙げられる。

(iii) マイスナー磁気遮へい 電気の環境影響として、送電線や電気機器から出る電磁界の生物影響がある。今後は大電流や高周波電流を扱う電力機器はこの磁気遮へ

いを効果的に行うことが求められる。この遮へいにはけい素鋼板などの高透磁率体遮へい、銅板などの定抵抗体渦電流遮へい、超電導によるマイスナー磁気遮へいがある。ケーブルの負荷電流による自己磁界、発電機、変圧器の漏れ磁界は至近距離で 500 ガウス程度である。このような低磁界にはマイスナー遮へいが最も効果的と考えられるが、単機能としてこれを電気機器に適用することは経済的でない。超電導電力機器は冷却を共有しマイスナー遮へいが容易に実現できる。

2.3 超電導電力技術の地球環境への寄与

化石燃料は地球進化の歴史の中で、それぞれの時代に存在した大気中の二酸化炭素を 40 億年の間で固定化したものである。地球創生時の原始大気は酸素ゼロで 90% 以上が二酸化炭素であったが、現在では 0.3% まで減少している。現在の化石燃料消費は、地球が数十億年かけて貯えた生命体にかげがえのない酸素を、人類が数百年という短期間で使いつくし二酸化炭素として大気に返してしまうことである。これに伴い地球上の貴重な鉱物資源も大量に採掘され、このための森林伐採が広範囲にわたり、相乗影響して熱帯雨林が消失し続けている。幾代も何百年もかけて貯えた財産を一代で使い果たしてしまうのに似ている。人類がこの難局を切り抜け持続できたとして後世の人が振り返ってみると、19 から 20 世紀という一瞬の自然資源と化石エネルギー資源の大量消失時代が存在したと認識するであろう。

産業活動の規模と地球環境の関係を分かりやすく表しているのが各国の二酸化炭素排出量である。これを国別に見ると、アメリカの 23%、ロシアの 16%、中国の 12% に次いで日本の 5%、ドイツの 4% となっており、日本の産業活動の規模が分かる。更に日本では工場などの産業部門が 40%、自動車・航空・船舶などの運輸部門が 20%、家庭や事務所の民生部門が 25% と三部門だけで 85% を占めている。これに引き続いて精油所や発電所などのエネルギー転換部門は 7% 弱である。

産業革命以降膨張し続けてきたエネルギー大量消費と地球環境破壊の悪循環を断ちきるため、エネルギー技術分野ではエネルギー消費量が少なく現用機器より大きな効果が得られるシステムを導入し、エネルギー消費の増分を負にすることが必要である。これには超電導電力機器を実現し、効率向上によるエネルギー消費の抑制とともに、その構築に必要な資源を少なくできる超電導電力システムを実現することが期待される。

このように、地球環境からも高い導入効果が期待できる超電導電力システムを実用化するためには、現用のケーブル、発電機、モータ、変圧器に競合できる電力機器や新機能の SMES、限流器を実現することである。そのためには、各機器の設計方法の確立、周辺技術の確立、要素技術の確立、安価で特性の良い超電導線材などが不可欠である。

3. 開発の現状

本特集号の論文が開発の最先端を示していることになるが、開発の現状について、概観する。

日本においては、国家プロジェクトして、通産省工業技術院ニューサンシャイン計画のもとで、(1)界磁超電導発電機(昭和63~平成11年)、(2)高温超電導フライホイール電力貯蔵(平成7~11年)、(3)交流超電導電力機器(平成10年~)の電力機器応用への研究と、(4)超電導応用基盤技術研究(平成10~14年)が進められてきた。また、(5)超電導磁気電力貯蔵に関しては(平成3~10年)資源エネルギー庁のもとで研究開発が行われた。このように日本は世界をリードする位置にいる。また、民間・大学でも上記の研究とそれ以外(超電導ケーブル、限流器、超電導変圧器など)が盛んに行われてきた。(1)に関しては、20万kW級超電導発電機の設計・製作に必要な要素技術開発のための7万kW級モデル機を設計・製作し、長時間運転を含む各種試験を成功裡に終了した。また、系統連系試験として調相機運転にも成功した。(2)については、超電導軸受けとフライホイールの開発を行い、0.5kWhの小型モデル試験を行っている。(3)では、交流機器開発のための基礎研究を行い、今後の研究指針を示した。(4)は、酸化物超電導材料の製造に関する研究であり、長尺化を含む特性向上が研究課題である。(5)に関しては、100kWh/20MWの電力貯蔵装置に必要な要素技術開発を行い、その1/12の超電導マグネットを試作し、試験を行った。民間・大学における研究でも、超電導発電機の系統連系発電試験、超電導エネルギー貯蔵装置の各種特性試験と系統連系試験、超電導モデルケーブルの試作と特性試験、超電導変圧器の試作と特性試験、超電導限流器試作と特性試験等々の数多くの成果をあげてきている。

金属系と高温酸化物系の超電導のどちらかを採用するかは基本的な問題であり、また、いずれの機器が実用化に近いかということも関心のあところである。界磁超電導発電機と電力貯蔵は金属系でも成立が期待されており、実用化に近い(アメリカでは容量の小さい電力貯蔵装置が実用化されている)。変圧器、ケーブルは酸化物超電導で実用化が期待されている。

国外では、アメリカ、ヨーロッパ各国で、やはり上記の機種について、主として酸化物超電導を応用した国家プロジェクトが進められている。特に、アメリカにおける超電導ケーブル(120m, 2.4kA, 24kV)はデトロイトで敷設される予定であること、ABB社が超電導変圧器(630kVA, 18.7kV/420V)の実配電系統における長期試験中であることなどが注目されている。

以上のように、超電導電力機器開発も着実に進歩してきており、夢であった実用化が間近なものが出現してきた。

今後の更なる発展が期待される。

4. むすび

電力分野の課題から超電導への期待、技術の現状を概観した。超電導電力機器は電力系統において、さまざまな特長があり、その実現に大いに期待したいところである。以上に述べたことに加え、次の二つのことを結びの文章に加えたい。

その一つは、高温超電導バルク応用である。現在も永久磁石のようにその磁束保持能力を利用した磁気軸受け、各種モータなどへの応用研究が盛んに行われてきている。しかし、このバルクはまさに高温超電導体で初めて発揮できる能力であり、この新しい応用に大いに期待したい。

もう一つは、現在考えられる電力への応用と超電導技術応用とのマッチングで超電導電力機器が評価されている。しかし、超電導技術ならびにその応用技術が進歩した今、まさに超電導応用と電力系統の新しい融合が必要であると考える。すなわち、単に超電導応用機器を電力系統へ導入するだけでなく、それをうまく利用する技術(超電導ソフトウェア)に期待したい。これを行うことで、システム全体の高性能化が図られ、それぞれ機器の省エネルギーなどの特長のみならず、システム全体の特長が生じれば、現在考えられている効果をはるかに凌駕する効果が得られる。例えば、超電導発電機の適切配置による高性能化、超電導エネルギー貯蔵装置による系統運転状態把握、限流器の設置による系統設計・運用の簡素化など、すでに進められている研究もあるが、超電導機器の特性を熟知した新しい展開に期待したい。

(平成11年8月3日受付)

仁 田 旦 三 (正員) 1972年京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修了。同年京都大学工学部助手、1980年同助教授。1996年4月東京大学工学系研究科教授、現在に至る。工学博士。この間、回路網理論、グラフ理論の応用、超電導応用機器の設計・利用法などの研究に従事。1996年電気学会論文賞受賞。低温学会会員。

植 田 清 隆 (正員) 1965年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程(電力工学)修了。同年(財)電力中央研究所入所。同所首席研究員、理事待遇とともに九州大学総合理工学研究科客員教授。工学博士。この間、同期機の過渡現象、電磁界解析、電力系統の安定度に関する研究に従事。低温学会会員。