産業用エネルギー蓄積装置

- 正員 石津成一 (鉄道総合技術研究所)
 非会員 内田 榮市 (古河電池(株)産業機器事業部)
 正員 大森 憲一郎 (日本原子力研究所)
 正員 嶋田 隆一 (東京工業大学)
 正員 高橋 勲 (長岡技術科学大学)
 正員 田中 一彦 (三菱電機(株)名古屋製作所)
 正員 谷本 光生 (新日本製鉄(株)エレクトロニクス研究所)
 正員 地福 順人 ((株)日立製作所 日立工場)
 正員 八星 文昭 (関西電力(株)総合技術研究所)

1. まえがき

単にエネルギー蓄積装置と言うと各種のパターンが考えられるが、ここではまず最近の電力受給形態に対応してますます注目を集めつつある、比較的短時間での電気エネルギーとの可逆性をもつエネルギー蓄積装置に焦点をあてることにした。

電気エネルギー蓄積装置の目的としては、供給電力の変動、中断に対応した負荷電力の確保とロードレベリング(負荷平準化)が挙げられる。

前者の代表例は無停電電源装置用であり、そのほかに太陽電池などの間欠発電装置用や電力系統と切離して使用される負荷に対する電気エネルギー蓄積装置も対象となる。一方、後者については電力供給側においても絶えざる検討が進められているが、需要者側においても経済的な観点からの検討が進められている。

本稿では、産業用というテーマにしたことで紙面の都合もあり、まず第2章に無停電電源装置用蓄電池とフライホールを、第3章にロードレベリングの実施例を、第4章にエネルギー蓄積装置の効果の検討を、第

5章にロードレベリングのニーズの代表例を示した。

各項目ともそれぞれの専門家、検討当事者の執筆によるものであり、多少論述に違いが見られるかも知れないが、その背景も併せて御参照いただければ幸いである。(地福順人)

2. 無停電電源装置のエネルギー源の現状

2.1 蓄電池

2.1.1 蓄電池の種類 直流電源装置や交流無停電電源装置用として、現在一般に広く使用されている蓄電池には、鉛蓄電池とアルカリ蓄電池がある。ここでは、鉛蓄電池とアルカリ蓄電池の概念について解説する。

(1) 鉛蓄電池 鉛蓄電池は正極活物質に二酸化鉛、負極活物質に海绵状鉛、電解液に希硫酸を用いた蓄電池であり、アルカリ蓄電池に比べ経済性の優れた

図1 据置鉛蓄電池の種類

Energy Storage Systems for Industrial Applications. By Seiichi Ishizu, Member (Railway Technical Research Institute), Eiichi Uchida, Non-member (Furukawa Battery Co.), Kenichiro Ōmori, Member (Japan Atomic Energy Research Institute), Ryūichi Shimada, Member (Tokyo Institute of Technology), Isao Takahashi, Member (Nagaoka University of Technology), Kazuhiko Tanaka, Member (Mitsubishi Electric Co.), Mitsuo Tanimoto, Member (Nippon Steel Co.), Yoritō Jifuku Member (Hitachi Ltd.) & Humiaki Yatsuboshi, Member (Kansai Electric Power Co.).

蓄電池である。

鉛蓄電池の種類には、自動車をはじめ各種の蓄電池があるが、直流電源装置や交流無停電電源装置に用いられるのは、据置鉛蓄電池であり、その種類を図1に示す。

そのほかに、小容量無停電電源装置には小形シール鉛蓄電池（M形）が用いられている。

（2）アルカリ蓄電池 アルカリ蓄電池は電解液にアルカリ性水溶液を使用する蓄電池の総称であるが、一般には正極活物質にニッケル、負極活物質にカドミウムを用いたニッケル・カドミウム蓄電池のことを言う。

アルカリ蓄電池は鉛蓄電池に比べ価格は高いが、高率放電、低温時の放電特性に優れ、設置スペースも小さくて済む場合もある。また、耐用年数も15年と長い。

アルカリ蓄電池には、形状が乾電池と同様な円筒密閉形ニッケル・カドミウム蓄電池（ニカド電池）などもあるが、無停電電源装置などに使用されるのはまれであるので、本稿からは割愛する。

2.1.2 最近の技術動向

据置用蓄電池は過去に様々な技術改良が重ねられてきたが、これらは小形、軽量、高性能を目的としたものであった。

このうち、小形、軽量については、昭和30年代前半から同40年代後半にかけて電槽材質にガラスやエポナイトに変えて合成樹脂を採用したことが大きく寄与している。また、昭和40年代後半における静止形無停電電源装置の発展に伴って短時間の放電特性（高率放電特性）に優れた蓄電池の要求が顕在化し、この要求にそった高性能蓄電池が開発されてきた。

更に、昭和40年代後半からは保守性、特に蓄電池の保守のなかで大きなウェイトを占める補水作業の簡略化に関する技術として、自動補水装置や補助電極式、触媒せん式シール形蓄電池などが相次いで商品化されてきた。最近では、このシール化技術を一步進めた形の蓄電池として、負極吸収式のシール形蓄電池が全盛を迎えようとしている。

ここでは、これらの代表として触媒せん式および負極吸収式シール形蓄電池について解説する。

（1）触媒せん式シール形蓄電池 蓄電池を充電すると、その末期に電解液中の水分が水素ガスと酸素ガスに分解され、蓄電池外に放出される。このため、定期的に水（精製水）を補充してやる必要がある。この水分の消耗を少なくし、補水周期の延長を図るために開発されたのが触媒せんである。

図2 負極吸収式電池の密閉化原理

触媒せんは蓄電池の排気口部に取付け、蓄電池より発生した水素ガスと酸素ガスを白金系触媒を用いて再結合させ、再び水として蓄電池内に還流するものである。この触媒せんを用いることにより、6箇月ないし1年であった補水周期を3年ないし5年に延長することが可能となった。

（2）負極吸収式シール形蓄電池 触媒せん式ではまだ完全に無補水ではなく、補水周期が延長されただけであり、電解液比重の測定など電解液に関する点検が必要であったが、負極吸収式では蓄電池の寿命期間中補水を全く不要とすることが可能となった。

負極吸収式の原理を図2に示す。同図に示すように、充電の末期に正極で発生する酸素ガスを負極に導き、吸収、消失させると共に負極板の一部を放電状態として、負極板からの水素ガス発生も抑えるものである。この作用を十分に行わせるためには、正極で発生する酸素ガスが負極に到達しやすくするため、隔離板にガスの透過しやすい材質を選定すること、電解液の量を必要最少限とし、余剰液が出ないようにすることが重要となる。また、蓄電池の自己放電は水素ガス発生反応であるため、極板格子には自己放電の起きにくい材質を選定することも必要である。

この方式の蓄電池は当初ポータブル電気機器用として、比較的容量の小さい（25 Ah 以下）“小形シール鉛蓄電池”として開発されたものであるが、その後の技術進歩により、昭和58年には30～100 AhのHSE形が、また昭和61年には50～3,000 AhのMSE形が商品化され、日本蓄電池工業会規格SBA 3018にも規定されるようになった。

この蓄電池では、その寿命期間中全く補水が必要なく、電解液比重の測定や液面の管理なども不要となった。更に自己放電を極少に抑えることにより、従来定期的に行っていた均等充電も不要とすることができた。

図 3 負極吸収式蓄電池の外観

図 3 に負極吸収式蓄電池の外観を示す。

2.1.3 新形電池

前述のように、エネルギー蓄積用として使用されている蓄電池は、鉛蓄電池およびアルカリ蓄電池であるが、これは安定した品質、高度の信頼性および適度の経済性を有するものである。

しかし、より一層の小形・軽量化が望まれており、新種の蓄電池が各方面で研究されている。現在、国内で研究・開発されている主な新形電池を表 1 に示す。

(内田榮市)

2.2 高速小形フライホイールエネルギー貯蔵装置の開発

現在、一般に用いられている蓄電池式無停電電源装置の蓄電池および充電装置をフライホイールおよび高周波インバータに置き換えた構成^{(1)~(3)}のフライホイール式無停電電源装置は、フライホイールの特長を最大限に利用することによって新しい利点を打出そうとするものである。

フライホイールは蓄電池に比べると、放電時間が短いという弱点はあるものの^{(4)~(5)}、2 秒以下の瞬停が圧倒的に多い我が国の停電事情から言えば、余裕をみても停電補償時間は 1 分もあれば十分と考えられるので、むしろフライホイールの特長を生かしメンテナンスの不要な、またバッテリーのように周囲温度の変化あるいは充電電流の大きさなどによって著しく寿命が劣化することなく半永久的な使用に耐え、しかも小形軽量の無停電電源装置の実現が市場⁽⁶⁾ニーズにそっていると考え、その実用化に取組んでいる。パワーエレクトロニクス技術・材料技術・高速回転技術・真空技術を集大成した総合的な技術によって、フライホイール式無停電電源装置は既に実現可能な状況にある。本稿では、この核となるフライホイールの構造・特長・開発のポイントなどを通じて開発の現状について述べる。

表 1 現在開発中の主な新形電池

電池の種類	活 物 質		電 解 液	備 考
	正 極	負 極		
ニッケル・亜鉛	NiOOH	Zn	KOH(水溶液)	電気自動車用
ニッケル・鉄	NiOOH	Fe	KOH(水溶液)	電気自動車用
銀・亜鉛	Ag ₂ O	Zn	KOH(水溶液)	
銀・亜鉛	AgO	Zn	KOH(水溶液)	
亜鉛・空気	O ₂	Zn	KOH(水溶液)	電気自動車用
鉄・空気	O ₂	Fe	KOH(水溶液)	
亜鉛・塩素	Cl ₂	Zn	ZnCl ₂ (水溶液)	電力貯蔵用
亜鉛・臭素	Br ₂	Zn	ZnBr ₂ + HBr	電力貯蔵用
ナトリウム・硫黄	S, Na ₂ S _x	Na	BAI ₂ O ₃ (固体)	電力貯蔵用
レドックス・フロー	Fe ³⁺	Cr ³⁺	HCl(水溶液)	電力貯蔵用
銀・水素	Ag ₂ O	H ₂	KOH(水溶液)	
ニッケル・水素	NiOOH	H ₂	KOH(水溶液)	
マンガン・水素	YMnO ₂	H(Ti/Ki)	KOH(水溶液)	
リチウム・硫化鉄	FeS ₂	Li/Al	LiCl/KCl	リチウム二次電池
リチウム・二硫化チタン	TiS ₂	Li/Al	LiPF ₆ +4Me +DiOX	リチウム二次電池
リチウム・カーボン	活性炭	ウッド合金	LiClO ₄ +Pc	リチウム二次電池
リチウム・二硫化モリブデン	MoS ₂	Li		リチウム二次電池
リチウム・二硫化マンガン	MnO ₂ 系	Li/Al	LiClO ₄ +Pc	リチウム二次電池
リチウム・(酸化バナジウム)	V ₂ O ₅ , P ₂ O ₅			リチウム二次電池
リチウム・高分子ポリマ	PAnなど	Li/Al	Li塩+Pc	リチウム二次電池

2.2.1 フライホイールの構造

図 4 にフライホイールの構造断面を示す。ケーシングによって構成された真空容器の中央部にフライホイール、かご形回転子、ピボット軸などを一体化したロータを立形に配置し、この外周部にプロテクタリング、内部に発電電動機固定子がそれぞれすき間をおいてセットされている。図 5 に試験機の外観写真を

図 4 フライホイール構造断面図

図 5 試験機の外観

示す。

(1) 軸受機構 ロータ上部を支えるタッチダウン軸受はニードルベアリングと回転軸から構成され若干のすき間を設けて組立てられる。このため、ロータが停止しているときや始動時は回転軸とニードルベアリングは接触状態にあるが、ロータの回転が次第に上がっていくにつれて接触しながらもこまの才差運動の原理によってロータは直立しようとする。直立状態になると回転軸とニードルベアリングは離れ非接触となる。ロータ重量を下部で支えるピボット軸受は回転軸部分と軸受部分から構成され、高分子量の潤滑油中に浸漬された構造となっている。回転軸の先端には浅いらせん状溝を表面に刻んだ半球状の鋼球が溶接されている。軸受部分には鋼球の受け部と側面に振動吸収用 O リングの溝が設けてある。下部と座との間はスラストベアリングで支えられ、共振点通過時に回転軸上にかかる力を吸収するために、直角方向の自由な動きを可能としている。回転軸先端の鋼球は発電電動機固定子鉄心の中央部に配置され、ロータの回転が電磁力の影響によって不安定にならないようになっている。

(2) 発電電動機 発電電動機は高速回転に適した外転形誘導機の形式をとっている。固定子鉄心は高周波用ケイ素鋼板を使用して鉄損の低減化を図り、回転子鉄心との空けき長は励磁電流を押えるために極めて狭くなっている。巻線は真空中での放電を防ぐために、特殊な絶縁ワニスが真空含浸されている。

2.2.2 フライホイール開発のポイント

フライホイール式無停電電源装置の原理は、フライホイールの貯蔵する運動エネルギーを効率良くインバータによって定電圧定周波数の電力に変換して使用するものである。すなわち、フライホイールとかご形回転子からなる一体構造のロータを高周波インバータによって誘導電動機として定格回転まで徐々に加速し、定格回転に達した後はその回転を維持するために、真空中でのピボット軸受の損失の分だけを補うわずかな電力を加える。

電力を取出すときには誘導機を発電機として使用し、フライホイールに貯蔵された運動エネルギーを再び電気エネルギーに変換して取出す。このように、フライホイールはエネルギー貯蔵の役割を担って毎分 10,000 回転を超える高速で回転し続け、しかも損失を低減するために機構的にかつ電気的に工夫されている。以下、開発のポイントについて述べる。

(1) フライホイールの設計 角速度 ω で回転するフライホイールに貯えられる運動エネルギー E は、フライホイールの慣性モーメントを I とすれば $E = 1/2 \cdot I \omega^2$ で与えられるので、エネルギー貯蔵容量を大きくするためにフライホイールは慣性モーメント I を大きくするように設計する。また重量の軽量化を図ることも必要であるので、具体的にはフライホイールは外周側に質量をもった扁平形釣鐘形状が有利となる。エネルギーはまた角速度 ω の二乗に比例するため回転数を大きくすることが効果的であるが、一方、回転数の二乗と直径の大きさに比例した遠心力による応力が生じ、形状によっては応力集中が起るため高い遠心応力場での使用に耐えねばならず、従ってフライホイールの形状は回転数にも大きく関係し、同時に材料定数に対してもからむことになる。ことに安全性を強く要求されるフライホイールにとって、材料は引張り強度と同時に疲労強度を考慮したじん性値の大きい材料を選定することが必要である。このようにフライホイールは回転数・材料・形状が互いにかみ合い、それらの適切な選定と同時に材料欠陥検出能力、安定率とのバランスのうえに決定される。

(2) ロータ振動系の設計 ロータが安定して回転するために、ロータ重心回りの垂直方向の慣性モー

メントを大きく、水平方向の慣性モーメントを小さく、かつロータ支点と重心までの距離を短くするようにロータの寸法を決定している。また、ロータ回転中の振動系については一次共振回転数をできるだけ低く押えるか、または逆に使用回転数範囲の上限値を超えた点に取るようにする。直立するまでの振動吸収および共振回転通過に対して振動吸収機構を設けている。

(3) 機械的損失の低減化 フライホイールの機械損失を低減すると共に長寿命化を図るためにピボット軸受を使用している。フライホイールが回転するとピボット軸の鋼球表面に刻まれたらせん状の溝に沿って潤滑油が巻込まれながら内部へ送られ、内部では行き止りのため大きな圧力を発生し、鋼球を上部へ浮上させるほどになり、軸受と鋼球は非接触となる。このように、フライホイールは潤滑油上に完全に浮いた状態となるので、機械損失は僅少となる。潤滑油温度と鋼球サイズによって浮上回転数、浮上量、機械的損失が変わるので、潤滑油温度を構造と冷却状態から求め、ロータ重量を考慮しつつ最適鋼球サイズを決定する。

(4) 電氣的損失の低減化 発電電動機の電氣的損失を低減するために固定子鉄心に高周波用電気鋼板を選定し、固定子および回転子鉄心の空けき長を小さくして励磁電流を下げるようにしている。また定常回転時のフライホイールは空転状態であるので、誘導電動機に加える電圧を回転維持のために必要最小限に絞り、鉄損などの電氣的損失の低減を図る。

(5) 風損の低減化 ロータが高速回転するとき空気との摩擦による風損は大きくなるので、容器内を真空にする必要があるが、実験的には0.1 Torr 以下にすれば風損は無視できるほど小さくなることが確認されている。真空を作り出すためには、ロータリー式真空ポンプなどいろいろな方式があるが、チタンゲッタによる静止タイプの真空方法はロータリー式真空ポンプに比べ省スペース、無騒音、長寿命という点で画期的な真空方式であるので注目される。

2.2.3 むすび

かつての MG 装置に代表されるフライホイールの応用はむしろ古い技術であるが、著者らが産学協同の体制で開発中のフライホイールは最新のエレクトロニクス制御技術、材料技術によって小形軽量でしかも無騒音、無公害のエネルギー貯蔵手段として再び生まれ変わりつつある。本稿では、この開発現状について紹介したが、新素材の開発、エレクトロニクス技術の進歩と共に今後この分野は大きく変貌を遂げていくと思われる。静止器時代においても、回転機技術はエレクト

ロニクス技術との結合によってむしろ静止器より優れた、いわゆるハイテク技術への発展の可能性さえ秘めている。フライホイール技術がハイテク技術として発展し、更に省資源、無公害、安全に対する社会の真の要請に応えられるように、いっそう技術開発を進めていかねばならないと考える。際限なく広がっていくコンピュータ化社会を支えるために、新しいタイプのフライホイール式無停電電源装置が社会の真のニーズに応えた商品となるように尽力したいと考えている。

(田中一彦, 八星文昭, 高橋 勲)

3. 核融合実験装置用大形フライホイール

3.1 JT-60 トロイダル磁界コイル電源⁽⁷⁾

臨界プラズマ試験装置「JT-60」の電源設備の一つであるトロイダル磁界コイル電源は、JT-60 本体のトロイダル磁界コイルに 8 GJ のエネルギーを供給することによりプラズマの閉じ込めに必要な磁界を発生させる。また、このトロイダル磁界コイルは高周波繰返しの間欠運転を行う大電流・大電力のパルス状負荷である。そのため、このコイルに供給すべき全エネルギーを商用電力系統から直接受電したならば、周波数変動あるいは電圧変動といった受電系統に与える影響が非常に大きくなる。そこで、この問題を解決するため、受電制約条件の許す限度まで直接受電する方法でまかない、不足する分を発電機でまかなうというシステムが設計された。すなわち、JT-60 トロイダル磁界コイル電源は、図 6 に示すように、商用電力系統(275 kV)から直接受電する系統電力系電源とフライホイール付電動発電機を備えた MG 電力系電源とで構成されている。また、10 分間隔で繰返される JT-60 の標準的な負荷パターンは図 7 に示すとおりであり、負荷変動は 160 MW 以内に抑えられている。

図 6 JT-60 トロイダル磁界コイル電源

図 7 JT-60 負荷電力総合パターン

フライホイール付電動発電機は、所要のエネルギーを回転エネルギーとしてフライホイールに蓄積し、必要時に電気エネルギーとして放出するので、電力系統側からみて負荷が平滑化されるという利点がある。

3.2 4 GJ フライホイール付電動発電機⁽⁸⁾⁽⁹⁾

発電機が放出すべきエネルギーは、負荷に必要なエネルギーと発電中の損失エネルギーの和であり、最大 4 GJ となる。このエネルギーを補うために要求されるはずみ車効果 (GD^2) は非常に大きく、発電機自身の回転子だけではまかないきれないので、約 650 t ものフライホイールが発電機に直結されている。発電機の断面を図 8 に示す。

フライホイールの仕様および概要は次のとおりである。

(1) 仕様

(a) 外径	6,600 mm	(中実)
(b) 軸方向長	2,400 mm	
(c) 重量	約 650 t	
(d) 分割数	軸方向 6 分割	
(e) はずみ車効果	$14,600 \text{ t} \cdot \text{m}^2$	

(2) 材料・構造 フライホイールの材料は、その製造性および実積の点から炭素鋼鍛造品 (SF-60) を使用しており、円板の形状は高頻度の繰返し運転による疲労の問題を考慮して、応力の小さい中実円板とした。また、製作・輸送・組立上の理由から一体構造とはせずに、軸方向に 6 分割している。

(3) 結合方法 6 枚の円板は通しボルト (両ねじボルト) 16 本によってディスタンスピースとスラストカラーに結合されている。ボルトの位置は円板の応力を高くしない範囲で内径側に配置し、ボルト自身の遠心力による曲げ応力を小さくした。

また、6 枚の円板相互間には全周で 8 本のトルクピンが打っており、円板間のトルク伝達を行い、フライホイール最下面とスラストカラー間にはずれを抑える

図 8 フライホイール付電動発電機 (215 MVA) 断面図

ため、移動止め金具が取付けられている。

なお、通しボルトのナット部および移動止め金具部には、各々風損低減用のカバーが設置されている。

3.3 運転実績

昭和 60 年 4 月から現在に至るまで、JT-60 の実験が継続されているが、このフライホイール付電動発電機も核融合実験装置の一部としてその重要な役割を担っている。これまで、起動停止の運転サイクルは約 460 回、エネルギー充放電回数は 10,000 回を超え、積算運転時間は約 5,000 時間にも及ぶが、支障なく良好に運転されている。

(1) 軸振動 フライホイールを含めると総重量が約 1,000 t にもなる回転子は、フライホイールの周速が音速の約 60% に達するほどの高速で回転する。しかし、試運転時に綿密なバランス調整を繰返した結果、運転時の軸振動値は各部とも 0.1 mm 以下で管理値の $1/4 \sim 1/5$ となり、非常に良好である。また、発電機起動時あるいは再加速時の軸振動データも極めて再現性が良く、毎回ほぼ一定した軌跡を描く。

(2) 運転効率 通電に必要なエネルギーを前もって回転エネルギーとして備え、通電時に再び電気エネルギーに変換して放出するという運転を周期的に繰返すが、発電機入力エネルギーに対する発電機出力エネルギー、言い換えるならば、発電機の運転効率として、約 60% という値が得られた。

なお、定格回転数（600 rpm）における発電機の主な損失は次のとおりである。

(a) スラスト摺動面損失	700 kW
(b) スラストかくはん損失	800 kW
(c) ガイド軸受損失	700 kW
(d) 発電機風損	1,800 kW
(e) フライホイール風損	840 kW
(f) 鉄損	700 kW

運転効率の向上を目指すには機械損の低減を図る必要があるが、MG ピット内の減圧あるいはヘリウムガスなどの封入による風損の低減、または磁気吸引あるいは磁気浮上などによる軸受摩擦損の低減が考えられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

3.4 オーバホール

JT-60 電源設備にはエネルギー蓄積装置として利用している発電機が合計 3 基設置されているが、試験調整運転などを含めると、それらの運転期間はほぼ 5 年にも及ぶ。そこで、本年 11 月以降の JT-60 実験停止期間（1 年余）を利用して、それらの発電機を順次分解点検する予定となっている。トロイダル磁界コイル電源の 4 GJ フライホイール付電動発電機に関しては、平成 2 年 6 月下旬より、フライホイールの探傷試験なども含み、約 4 箇月間にわたる分解点検が行われる。（大森憲一郎）

4. 産業用エネルギー蓄積装置の効果

これらのエネルギー新技術には、期待される効果と設置するコストおよび運転維持コストが見合っていないなければならない。エネルギー蓄積装置をその観点で見てもよい。

4.1 エネルギー蓄積装置の効率

小規模なパソコン用無停電電源装置から核融合装置用の大きなものまで種々実用化されてきたが、そもそもエネルギー蓄積装置の性能はどのように性格づけられるのであろうかを考察する。エネルギー蓄積装置の性能としては、①蓄積エネルギー量、②エネルギー蓄積時定数、③維持電力、④電気エネルギーとの変換効率、⑤最大出力、⑥蓄積エネルギー密度などについて考慮する必要がある。

このなかで、②のエネルギー蓄積時定数 τ_s は蓄積しているエネルギー総量を損失（すなわち、エネルギー損失とシステムの維持電力との和）で割ったもので時間の単位となるので、時定数、減衰時定数とも呼ばれる。これは運転コストと直接関係するエネルギー蓄積効率を決める量である。このなかで、最大の関心はシステムの維持電力とエネルギー効率の二つである。

P_{in} : ドレンポンプ電力、 P_c : 水漏れ(エネルギー損失)
 P_{out} : 出力、 P_{in} : 入力、 η_{in} 、 η_{out} : 効率

図 9 エネルギー蓄積装置の概念

エネルギー蓄積を水に例えて考えると図 9 のようなアナロジーが成り立つ。無停電電源、パルス負荷用エネルギー蓄積装置のいずれも同じ扱いができる。無停電では P_{in} の間欠性の対処としてエネルギー蓄積を設け、定常な P_{out} を蓄積量のある限り確保している。パルス負荷用では逆に P_{out} の間欠性を貯水おけの蓄積によって定常的な P_{in} にしている。蓄積装置には水漏れがあり、時間が経つとエネルギーを失う。また、システムの維持のためにドレンポンプの電力が必要である。蓄積装置のエネルギー効率は入力エネルギーに対する出力エネルギーとの比である。出力エネルギーを E と定義すると

$$E = \int_0^T P_{out} dt \dots\dots\dots (1)$$

であり、蓄積エネルギーを E_s とすると η_e は

$$\eta_e = \frac{\eta_{in}}{\eta_{out}^{-1} + \frac{T E_s}{\tau_s E}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで η_{in} : 電力から蓄積装置への効率、

η_{out} : 蓄積装置から電力への効率

各種のエネルギー蓄積装置の効率は前式によって性格が明確になる。重要なファクタとして η_{in} 、 η_{out} 、エネルギー蓄積体と電気との変換効率がある。これが低ければエネルギー蓄積効率は高くできない。分子の第 2 項は連続運転の無停電電源では出力 P_{out} と維持電力+損失の比と言うことになるが、パルス負荷用では蓄積時定数と運転周期 T との比となる。すなわち、昼夜との電力需要の平準化に用いる場合、この周期は 24 時間であるから、この時定数は 24 時間より十分長い必要がある。産業用のエネルギー蓄積装置の場合は周期が数分程度のものが多いと考えられるため、フライホイールのような蓄積時定数の短いものでも十分な効率が期待できる。第 3 章で紹介した JT-60 のフライホイールは 1,600 秒の蓄積時定数をもち、鉄鋼用のように負荷変動 100 秒周期では 95% を超える効率になるとの試算もある⁽¹²⁾。

4.2 エネルギー蓄積装置の導入の効果

無停電電源については、その負荷が停電によりどのような損害を被るかにより導入の判断がなされる。エネルギー効率についても維持電力と挿入損失により決まるが、日本のように停電が少ないと導入は頻度との掛け算になる。システムの信頼性を金額で評価することになりたいへん難しいが、計算機に代表される高度な電気エネルギーの利用には、それに対応する高品質な電力が要求されてもよい。無停電電源装置を付加することは高品質な電力を得るために必要な電気料金と考えるべきである。

パルス負荷のピークカットの目的でエネルギー蓄積装置を使用する場合がある。負荷パターンを簡単な形に規格化して、完全ロードレベリングした場合の効果について考察する。図10に示すような負荷パターン(最大 P_{out} とその持続時間 T_d および周期 T)を平準化するためにロードレベリング装置を使用する。その出力エネルギー E と入力エネルギーは次のようである。

$$\text{出力エネルギー} = E = P_{out} T_d \cdots \cdots (3)$$

$$\text{入力エネルギー} = E / \eta_e \cdots \cdots (4)$$

この入力エネルギーを1周期間平均して入力することから入力パワー P_{in} は

$$\begin{aligned} \text{入力パワー } P_{in} &= P_{out} \cdot T_d / (T \eta_e) \\ &= P_{out} \cdot d / \eta_e \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

ここで $T_d/T = d$ として、デューティー比とする。入力パワーと出力パワーのピークとの比を α と定義すると

$$\alpha = P_{out} / P_{in} \cdots \cdots (6)$$

電力系統からのピーク容量が $1/\alpha$ になることでレベリングの効果度として考えられる。上式より

$$\alpha = \eta_e \cdot T / T_d = \eta_e / d \cdots \cdots (7)$$

である。エネルギー効率が高いほど、デューティー比が小さいほど効果度が大きい。

ここで、最も簡単な本システムの導入効果について試算してみたい。電気料金はピーク電力で決まる契約

図10 パルス負荷パターン

電気料金 (A) と積算電気料金、すなわちエネルギーで決まる従量電気料金 (B) とからなるとする。ここで、レベリングの効果より契約量は A/α になり、そして従量料金は B/η_e となる。

$$\gamma = (A/\alpha + B/\eta_e) / (A + B) < 1 \cdots \cdots (8)$$

γ が1以下、これが導入効果である。これに電力システムの建設コスト、耐用年数を勘案して本システムの導入を進める必要がある。(嶋田隆一)

5. 産業用パルス大電力電源のニーズ

5.1 鉄鋼圧延・電気炉への適用

5.1.1 背景

(1) グローバルな背景 産業を成立させているインフラストラクチャには、(文化的、社会的、経済的などのソフト面を除けば)情報系とエネルギー系とがある。

エネルギー系には、蒸気・水・ガス・石油・石炭などと電力があるが、電力系以外はすべて系内に十分な蓄積をもった系である。電力系のみが、例外的にFlow(流れ)とStock(蓄積)の関係が極めてアンバランスな系なのである。このことは、電気の最大の長所である瞬時的応答能力と裏腹の関係にある電気の本質的弱点なのである(もう一つの長所はクリーンという所にある)。

各系のStock/Flow・Ratioは、「蒸気：数分以上、ガス：数時間以上、水：数日以上、石油・石炭：数日～数十日」であり、それらの値はかなり自由に設計できるが、電気のそれは「秒」以下であり、かつ設計の自由度もない。

そのうえ、電力系統はフローの変動(=負荷変動)に対する追従能力も遅く、水力発電の場合1分前後、汽力発電の場合数分から数十分に及ぶ。このため、短周期の負荷変動(数分程度以下)には対処し得ず、系の回転エネルギーの放出(すなわち、周波数変化)によって対処しているのが現状である。

一方、産業設備は本質的に瞬時に近い起動・停止やその他の急しゅんな負荷変動を伴うものである。負荷変動はすべて電力系統にとってじょう乱要素・不安定化原因となり得るものである。

負荷変動の許容値は、そのものの諸量(大きさ・持続時間・急しゅん度など)と系統側の容量・耐量や保証品質との関係によって決まり一概に言えないが、一般的には系統に属する発電機総容量の数(2～5)%とされている。

この値は、日本のように国全体が一系統を構成し発

電機総容量1億kWを超えるような国では、十分に大きな値であり、かなり巨大なプラントを建設しない限り問題とならないが、低開発諸国（国連資料によれば、200万kW以下、大きくて500万kWまでがほとんど）にとっては工業化への最大のネックとなっている。

電力系統へ高効率に電気を貯蔵し、かつ自由に出し入れできる装置（短周期負荷変動吸収装置、以下、本章では $\Delta P_{\text{Compensator}}$ と略記）を組み込むことができれば、電気の本質的弱点であるStock/Flow・Ratioを自由に変更でき、負荷追従能力も思いどおりに与えることができるようになり、その結果、負荷変動許容量を幾らでも拡大することができる。

（2）国内的背景 日本国内においては、沖縄などの島嶼群を除き、上記のようなインフラストラクチャがらみの問題は少ないが、パルスの負荷変動を繰返すようなプラント（例えば、電気炉・圧延機）の場合、自家発電設備によって需要電力のすべてを賄おうとしても、負荷急減時の逆送・負荷急増時の買電問題が起り、実質的な自家発電設備の建設のメリットを見いだせず、その建設をあきらめ、高い電力代（買電/自家発電価格比 ≈ 2 ）を払って操業しているのが実情である。

瞬時的立上り・立下りを伴う負荷のパターンを $\Delta P_{\text{Compensator}}$ を用いることによって、台形状のパターンに変更することができれば、自家発電電力による100%操業が可能となるわけであるから、電気炉製鉄のコスト・メリットは計り知れないほどに大きなものとなる。

5.1.2 導入効果

図11に大規模工業プラントの一例として、鉄鋼の熱間圧延機の負荷パターンを示す。

（1）グローバルな効果 熱間圧延機の場合、500MJ程度の有効エネルギー蓄積量をもつ $\Delta P_{\text{Compensator}}$ があれば、負荷変動を完全に補償し実質的に一定負荷とすることができる（本例は、比較的軽負荷の場合を示す、最大値はこの約二倍）。

年産600万tクラスの鉄鋼一貫製鉄所を、実質的に電力系統にとって無害なものとするのに要する $\Delta P_{\text{Compensator}}$ の規模は2~3MWhである。

この規模は揚水発電所の千分の一以下の規模であり、新形のエネルギー蓄積装置（ $\Delta P_{\text{Compensator}}$ 装置）開発の第一ステップとしては、手ごろな規模である。

日本のODA援助が年百億ドルを超えようとする今日、その大半は低開発国の産業育成に使われている。十分な国際競争力のある産業を育成するうえで、それらの国の電力系統の弱さは致命的な隘路となっている。

小規模・高効率かつメンテナンスに手間のかからない $\Delta P_{\text{Compensator}}$ 装置が提供されるならば、これらの隘路は一気に解消される。

そうなれば、低開発諸国や日本の離島・へき地にとって大いなる福音であるのみならず、プラント輸出に伴う国内産業の活発化によって受ける潜在的利益も計り知れない。

（2）国内的効果 図12は、1チャージ50tの電気炉の負荷パターンのおおよその目安を示す。

この電気炉の負荷を一定にするために必要なエネル

図11 鉄鋼圧延機の負荷パターン

図 12 電気炉の負荷パターン

方形→台形パターンへ

図 13 電気炉の負荷パターンの修正

ギー貯蔵量 (E_{ST}) は、概略、

$$P_{AV} = \frac{50 \text{ MW} \times 50 \text{ min}}{70 \text{ min}} = 35.7 \text{ MW}$$

$$E_{ST} = 35.7 \text{ MW} \times 20 \text{ min}$$

$$= 11.9 \text{ MWh} = 42.9 \text{ GJ}$$

このエネルギー貯蔵規模はかなり大きく、すぐに実用化できる規模ではないので、さしあたっては、図 13 に示すように、方形的な負荷パターンを台形的なものに変更し、自家発電機で追従できるようにすれば、買電-自家発電コスト差によって、二～三年のうちに建設費を償却できるものと思われる。

また、このような小規模なエネルギー蓄積装置が電力系統上に配置されれば、電力系統を他のエネルギー系インフラトラックチャ並に、冗長度の高い Stock/Flow・Ratio の大きい系に変更し得るのであるから、電力系統の安定化の面で、国内電力業界・需要者側双方にとっても、その利益は巨大なものとなるであろう。

5.1.3 構成

図 14 に、工業プラントの代表例として製鉄所を挙げ、産業用エネルギー蓄積装置 ($\Delta P_{\text{Compensator}}$ 装置) の概念を示す。

製鉄所は通常の運転を行い、最大生産能力を発揮できるように自由に運転させる。すなわち、自由に負荷変動を発生させるような運転を行う。 $\Delta P_{\text{Compensator}}$ は製鉄所の発生する負荷変動 (ΔP) (ΔQ) のうち、(火力) 発電所・既存電力系統の追従し得ない速さの変動 (周期: 15～30 分以下) を吸収し、発電所・既存電力系統は、上記以上の長周期の変動に対処した運転を行う。

このような運転を行えば、既存電力系統と製鉄所・

図 14 産業用エネルギー蓄積装置概念図

発電所・ $\Delta P_{\text{Compensator}}$ の三設備群との間の連携線の潮流は、常に望ましい値以内に保たれ、既存電力系統は、製鉄所の発生する負荷変動の影響を受けなくなる。

このことを極論すれば、既存電力系統のない無人島のようなところでも、 $\Delta P_{\text{Compensator}}$ 的機能をもつ設備が実現すれば、工業プラントを立地し得ることを意味している。

このような $\Delta P_{\text{Compensator}}$ 装置が開発されれば、その潜在的ニーズは計り知れないほどに大きなものとなることが予想されるし、顕在的ニーズもまた大きい。

このニーズを満たす技術として、既に原研 JT-60 で有効エネルギー充放出力 4 GJ を超すものが開発されている。より一層の効率化と低価格化を切望するのである。(谷本光生)

5.2 磁気浮上式鉄道への適用

(1) 電気鉄道におけるニーズ エネルギー蓄積装置の電気鉄道への適用に関しては、1910 年ごろ、イタリア国鉄の Mont Cenis 線で約 1,000 HP を 1 分間 (約 44 kJ に相当) 供給した例がある⁽¹³⁾。この時代は水力発電所を中心とした電力系統が現在ほど十分な体力がなく、代表的な変動負荷である電鉄負荷の平準化のため、フライホイール式の蓄勢装置が設置され、また導入のための提案が積極的であったと考えられる。

我が国においても電力回生車として、より経済的な界磁チョップ車の開発・導入に伴い、京浜急行の瀬戸変電所において昭和 56 年から、フライホイール式の電車線電力蓄勢装置 (54 MJ) が設置、試験され、その有用性が実証されている⁽¹⁴⁾。ただし、この例は電力回生車の十分配備された通勤線区の閑散時において、電力回生時の回生失効を低減する目的で開発されたものであり、電力系統との直接の関係はないと考えてよからう。

大都市通勤線区においては、朝夕の高密度運転など

図 15 受電点から見た電鉄負荷の電力特性のイメージ

図 16 磁気浮上式鉄道のき電系統 (一例)

による輸送力の増強や冷房車両の増備によって、電気鉄道の負荷変動はますます大きなものとなり、その面からのピークカット対策や廉価な深夜電力の有効活用という点から、電気鉄道のエネルギー蓄積装置の必要性は今後増大してくるであろう。この場合には、蓄積時間が比較的長く、蓄積容量の相当大きなエネルギー蓄積装置が必要となり、この種の実用化はエネルギー貯蔵技術の進ちょくいかんにかかっていると言える⁽¹⁵⁾。

一方、長距離・大容量の磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道と呼ぶ）の場合には、従来の電鉄負荷と異なる特徴がある。すなわち、一列車負荷の最大電力が新幹線列車のその倍程度となること、また受電点において負荷側に存在する移動負荷の数が、地上一次のシステムの性格上限定されることの二点である。従って、従来の電鉄負荷と比較し、その負荷特性は電力変動(ΔP)とその変化速度($\Delta P/\Delta t$)が、図 15 のように大きなものとなるため⁽¹⁶⁾、充放電の応答が速く、かつ必要十分なエネルギーをもったエネルギー蓄積装置、すなわちパルス的な大電力電源の適用は、浮上式鉄道の高品質化への有効な手段の一つと考えられる。

(2) 浮上式鉄道の負荷特性と蓄積装置適用の目的
図 16 に示すように、き電区間に進入、あるいはそこから進出する列車に対して、運転上の制御を特に構じないものとすれば、受電点における一列車の電力変

動幅 ΔP はリニアモータの最大出力に相当する場合がある。このパターンが列車の運行間隔ごとに繰返されるため、比較的短時間の周期で負荷変動が発生することになる。このような特性に対する蓄積装置適用の目的は次の三点に集約できる。

まず、実際の走行においては、ある電力変換制御所（以下、電力変換所と呼ぶ）管内の各列車が必ずしも最大出力を要求するわけではなく、最大負荷を想定した電力設備では、高い利用効率を期待できないことになる。従って、負荷の競合が発生した場合にのみ、蓄積装置の適用によってピークカットが可能ならば、受電点までの送電容量の低減や電圧変動の抑制にも効果的と考えられる。逆に言えば、電源の強固でない地域においても、列車に必要な出力を供給することができ、運行上の制約条件の軽減にもつながることになる。

次に、受電点における使用電力の急しゅんな増減は、系統側にとって特に原子力発電をベースとした系統にとっては、技術的にも、経済的にも、一般的に有利な条件とはならないであろう。浮上式鉄道の受電点における必要な電力がどの程度になるかは、その線区の到達時分や電力設備のレイアウト、列車群制御の方法などによって大きく異なるものである。しかしながら、少なくとも将来の輸送容量のシステムアップを考慮すれば、電力変動の変化率の緩和に関するハード的な方策の一つとして、蓄積装置適用の可能性は十分考えられる。

また浮上式鉄道では、列車の軽量化が図られるものの走行速度が高いため、列車あたりの運動エネルギーは大きく、特に下りこう配区間で安定した十分な減速力を得るためには、電力回生による制動が有効で効率的である。この場合、電源側にそれを戻すと長大編成による高密度運転においては、その回生電力の質と量が今後の課題となるであろうし、また電源の停電時において確実なブレーキ力を確保するための方法としても、蓄積装置の適用は有効と思われる。

(3) 実用化のための課題
超高速・大量輸送システムにおいて、その重要なサブシステムの一つとなる蓄積装置には、浮上式鉄道の負荷特性に合致する仕様を満足し、かつ高度な信頼性と安全性が要求されることはもちろんのこと、その最適設計のための電源側との協調や浮上式鉄道に適した設備の分散化、あるいは集中化の適切な度合など、トータルシステム的な観点からの事前の分析が必要不可欠であろう。

従って、浮上式鉄道への適用のためには、エネルギー貯蔵や入出力のための電力変換などのエネルギー蓄

積装置の本体技術に加えて電圧変動，周波数変動，そして系統安定化などに関する電力系統技術，また浮上式鉄道技術を中心とした広い意味での電気鉄道技術がそれぞれ相互に連携を深めつつ，最適なパルス大電力電源システムを構築していく必要がある。

昭和 39 年に開業した東海道新幹線は，当初，東京-新大阪間を 4 時間で結び，12 両編成によるひかり・こだまそれぞれ 1 時間あたり 1 本（1-1 ダイヤという）のサービスからスタートした。四半世紀を経た今日では，コムトラックなどの技術開発により，高密度運転と保安度の向上を両立させつつ，同区間を 2 時間 49 分にまで短縮し，16 両編成による 7-4 ダイヤへと大きく成長したが，なおその機能の一層の充実が極めて早急に望まれている。

浮上式鉄道においても同様に，その誕生期，成長期，成熟期があり，質・量の両面からより良いシステムに脱皮させていくにあたって，パルス大電力電源システムのニーズが今後増大してくるであろう。その際，実用化のための重要な課題の一つは，運営経費を含めたパルス大電力電源システムの低廉化であり，このシステムを導入することによる電力設備費の低減や，列車運行上の保安度の向上などとの十分な対比が肝要であると思われる。（石津成一）

6. あとがき

以上，産業用エネルギー蓄積装置について，現状と各種ニーズを含めて解説した。

本企画においては当初 SMES (Super-conducting Maganet Enesgy Storage) とその応用についても解説の対象にすることを考えたが，今回は時期尚早とし

て次の機会に送ることとした。

このような電気エネルギー蓄積装置は，電力供給系統全体としても，今後ますます重要性を増し，検討が続けられていくものと考えられることから，またいずれ紹介の機会が回ってくることを期待して，今回の特集解説を終ることとする。（地福順人）

文 献

- (1) 安東・中野・高橋：「高効率単相コンバータ」，昭 62 電気関係学会北陸支部連大
- (2) 安東・高橋・田中：「高効率フライホイールエネルギー貯蔵システム」，電気学会電力技術研資(昭 63)
- (3) 安東・高橋・田中・八星：「高効率フライホイールエネルギー貯蔵システム」，昭 63 電気学会関西支部連大
- (4) 齊藤：「瞬時電圧低下の影響」，昭 63 電気学会産業応用部門全大
- (5) 大浦・松田：「電圧が瞬時に低下したときの影響と対策」，電学誌，109，304（平成 4）
- (6) 地福：「無停電電源（UPS）システムの現状総論」，昭 63 電気学会産業応用部門全大
- (7) 松川，他：「JT-60 トロイダル磁場コイル電源システム」，昭 59 電気学会全大，No. 55
- (8) 嶋田，他：「核融合電源用フライホイール発電機」，昭 59 同上，No. 57
- (9) 松川，他：「JT-60 トロイダル磁場コイル電流の制御方式」，昭 60 同上，No. 59
- (10) 大森，他：「JT-60 トロイダル磁場コイル電源用フライホイール付発電機の運転効率」，昭 60 プラズマ・核融合学会全大
- (11) 大森，他：「核融合実験装置 JT-60 用 4 GJ フライホイール付電動発電機」，電気学会電力技術研資（昭 61）
- (12) 嶋田・谷本・大森・松川：「核融合電源用フライホイール付電動発電機の短周期ロードレベリング装置への適用」，平成電気学会全大，No. 1505
- (13) E. P. Burch：Electric Traction for Pailway Trains (1911)
- (14) 丸山：「フライホイール式電車線電力蓄勢システムとその運転実績」，電気学会電気鉄道研資，RAT-83-6（昭 63）
- (15) 神本：「電力貯蔵技術」，電学誌，108，515（昭 63-6）
- (16) 尾関：「交通・運輸業の立場から」，同上，108，554（昭 63-6）