

機械的エネルギー貯蔵

— 電力貯蔵システムへの応用 —

Mechanical Energy Storage

— Application for Electric Power Storage System —

山本 将人*・牧 正一**

Masato Yamamoto Masakazu Maki

1. はじめに

機械的エネルギー貯蔵には、回転エネルギーを利用したフライホイール、圧力エネルギーを利用した圧縮空気、位置エネルギーを利用した揚水などがある。これらの原理はよく知られており、実用化の検討が種々行われてきた。今回は、特に電力貯蔵を目的とした大規模な機械的エネルギー貯蔵システムを中心に述べる。

2. フライホイールによるエネルギー貯蔵

2.1 原理

フライホイールによるエネルギー貯蔵は、回転体の運動エネルギーを利用して行う。回転体に保有されるエネルギー U [J] は、回転体の慣性モーメントを I [kg・m²]、回転体の角速度を ω [Rad/s] とすると次式で与えられる。

$$U = I\omega^2/2$$

これから解るように、エネルギーの貯蔵能力を大きくするには、慣性モーメントを大きくするか、角速度を大きくすればよく、特に角速度は2乗で効くため有効である。しかし、回転数も上げると回転体に作用する遠心力による応力が大きくなり、素材の強度限界に達すると破壊にいたるので、これがフライホイールのエネルギー貯蔵量の限界となる。薄肉リング状のロータを例にとって示せば次のとおりである。

まず、薄肉リングの慣性モーメント I は、ロータの重量 W 、重力の加速度を g とすると次式で表わせ

$$I = WR^2/g$$

これを用いると角速度 ω で回転する場合の保有エネルギーは次式で表わせる。

$$U = WR^2\omega^2/2g$$

一方、薄肉リングのロータでは、破壊限界の角速度 ω_{\max} は、ロータの素材の許容応力を σ_{\max} 、密度を ρ 、半径を R とすると次式で表わせる。

$$\omega_{\max} = \sqrt{\sigma_{\max}/\rho R^2}$$

したがって、最大保有エネルギー U_{\max} は次のようになる。

$$U_{\max} = W\sigma_{\max}/2\rho g$$

比重量 r ($=\rho g$) を使えば

$$U_{\max} = W\sigma_{\max}/2r$$

と表わせる。

ここで、 σ_{\max}/r は、単位重量あたりの強度を表わし、比強度と呼ばれるものでロータ素材としての適・不適の指標となっている。

比強度の面からは、ロータ素材としてカーボン繊維やガラス繊維などで強化したプラスチック(FRP)が有利と考えられている。

2.2 システムの構成 (図-1)

大容量の電力用システムは、次の主要機器から構成されている。

(1) 入出力装置

入出力装置は、発電電動機と周波数変換器などから構成される。発電電動機は、ロータを加速してエネルギーを貯蔵するときには電動機として運転され、ロータが規定の回転数に達すればクラッチによりロータから分離される。発電時には、あらかじめ発電電動機の回転数をロータの回転数にあわせてからクラッチを入れて発電する。これらエネルギーの出し入れ時にはロータの回転数が変化するが、電力系統

* 東京電力㈱技術開発研究所技術調査課課長

〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

** 東京電力㈱技術開発研究所技術調査課副長

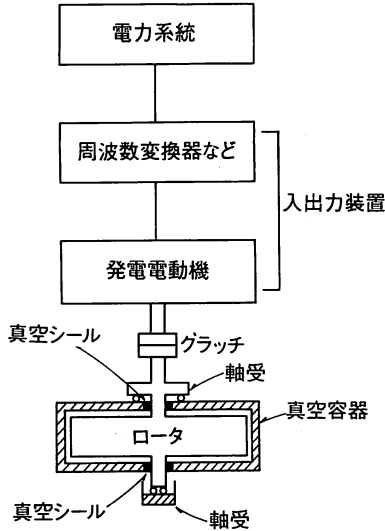


図-1 電力用フライホイール貯蔵システムの構成

側では周波数等を一定に保つことが必要とされる。このため、発電電動機と周波数変換器の組合せなど種々の方法が検討されている。(図-2)

(2) ロータおよび真空容器など

ロータを大気中で回転させると空気の粘性抵抗によって損失を生じるため、ロータは真空容器に収納する。ロータの軸が真空容器を貫通する部分には、軸の回転による摩擦損失の少ない真空シールが必要である。

また、高速回転をするロータを支えるため、入出力時の広範囲の回転数変化に対応でき、損失の少ない軸受が必要である。

2.3 システムの例

東京電力㈱は、三菱重工㈱および三菱電機㈱と共同で100MWhプラントの概念設計を行った。この100MWhプラント(概念設計)の概要は、次のとおりである。

なお、ロータの材質は、現状では引張強さ、形状加工などの面から、低合金鋼を採用している。

〔ロータ〕 最大貯蔵エネルギー

1,300kWh × 6台 × 17組

運転回転数 1,100～3,300rpm

回転円板外径 3m

回転円板高さ 3m

材質 低合金鋼

軸シール

フロティングリングシール方式

〔軸受〕 上部 磁気軸受

下部 機械式軸受

〔発電電動機〕 誘導電動機

〔周波数変換装置〕

電力系統側 他励式インバータ

発電電動機側 自励式インバータ

2.4 システムの特徴と課題

フライホイールによる貯蔵方式は、揚水、圧縮空気のような大容量の貯蔵にはむかないが、設置場所の制約が少なく負荷端に分散配置できるなどの特徴をもっている。

また、今回は電力用として大容量、長時間貯蔵のシステムを中心に述べてきたが、自動車、電車用の小容量のシステムの研究も進んでいる。

電力用については、まだ基礎研究の段階であり、高強度大型ロータの開発、システムの最適設計等の研究が今後必要である。

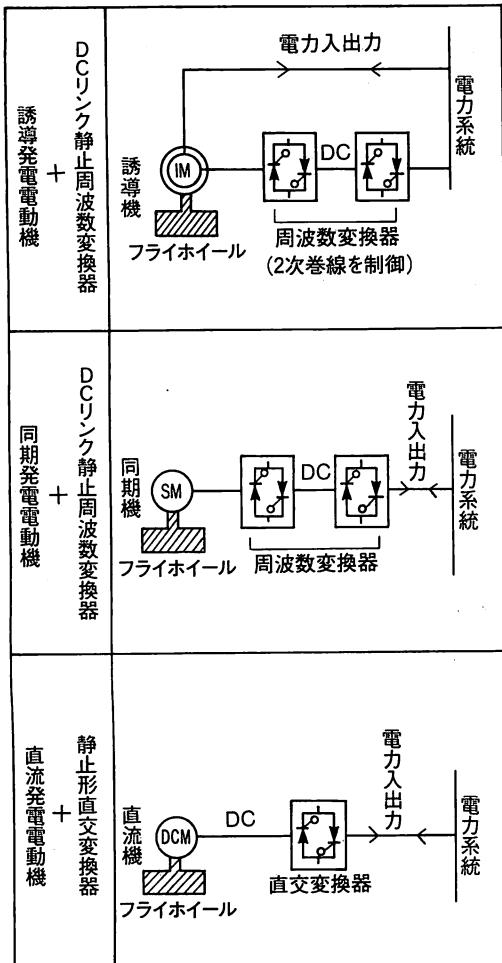


図-2 入出力装置の例

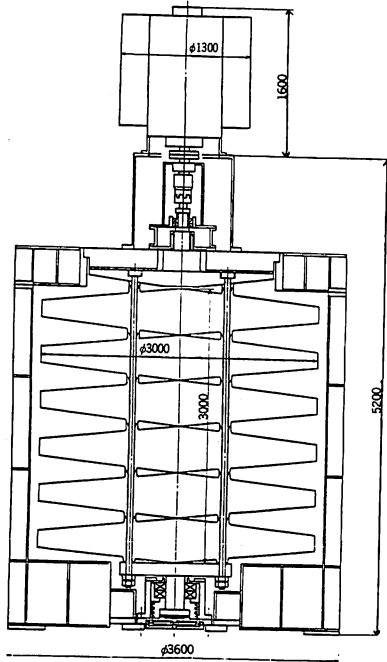


図-3 1,300kWh フライホイール概念図

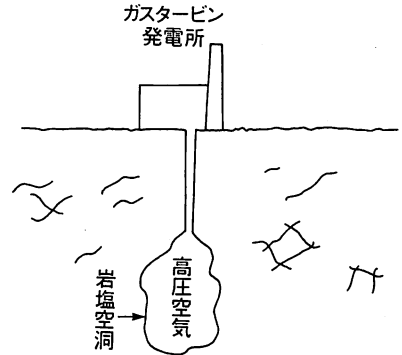


図-4 定容型貯蔵方式

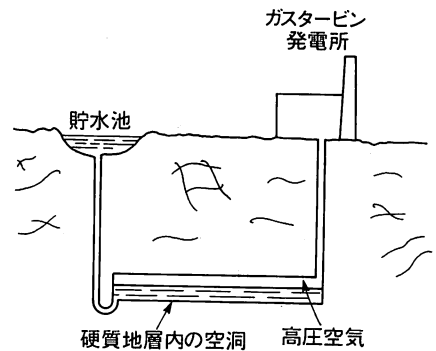


図-5 定圧型貯蔵方式

3. 圧縮空気によるエネルギー貯蔵

3.1 原理および方式

圧縮空気によるエネルギー貯蔵は、空気を圧縮した形で蓄えることによって行う。空気に保有されるエネルギー U (J) は、圧力を P (Pa)、体積を V (m³) とすると次式で与えられる。

$$U = PV$$

出し入れできるエネルギー ΔU は、

$$\Delta U = P \cdot \Delta V + \Delta P \cdot V$$

となる。これから解るように、定容貯蔵 ($\Delta V = 0$) と定圧貯蔵 ($\Delta P = 0$) が考えられる。実際に圧縮空気を貯蔵する場所としては、地下の空洞や海底タンクなどが考えられる。

(1) 定容型貯蔵方式 (図-4)

地下の岩塩層などを掘削して貯蔵槽としたり、適当な空洞があればこれを利用して高圧空気を単純に貯蔵するもので、圧縮時と放出時において空気の圧力は大きく変化する。

(2) 定圧型貯蔵方式 (図-5)

地下の硬質地層に空洞を作り、これと地上の貯水池あるいは湖などを結び空洞内に水を導く。この水圧を利用して空洞空気の圧力をほぼ一定に保つ。したがって、貯蔵圧力は貯水池などから空洞までの深さによって定まり、例えば、深さ 500 m であれば

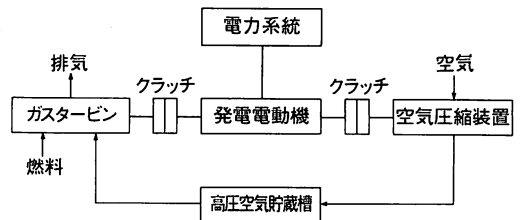


図-6 圧縮空気貯蔵発電システムの構成

50kg/cm²となる。この方式では、地上の貯水池等が必要とするが、空洞の容積は定圧型貯蔵方式に比べ小さくてすむ。また、天然ガスなどの存在していた部分を利用したり、海底タンクを設置したりする方法も考えられている。

3.2 システムの構成 (図-6)

圧縮空気による貯蔵は、ガスタービン発電システムと組み合わせて使用される。この圧縮空気貯蔵発電システムは、次の主要機器から構成される。

(1) 発電電動機

空気を圧縮して貯蔵するときには、電動機として運転して圧縮機を駆動する。発電時には、発電機として運転される。

(2) 空気圧縮装置

低圧圧縮機、高圧圧縮機などの組み合わせにより空気を数十気圧まで圧縮し貯蔵槽へ送り込む。

(3) 高圧空気貯蔵槽

数十気圧に圧縮した空気を貯蔵する。

(4) ガスタービン

貯蔵槽から供給された高圧空気中で天然ガスなどの燃料を燃焼して動力を得、発電機を駆動する。

なお、通常の高圧タービンでは、高圧タービンの圧縮器とタービンが一体となっており、タービン出力で圧縮器を駆動するが、この場合は分離されている。

(5) その他

空気を圧縮するときには、圧縮熱により空気の温度が上昇するが、高温のまま貯蔵すると熱応力や所要容積の点で不利となるため、圧縮熱を除去することが考えられる。これには単に冷却して熱を廃棄する方法と、空気流通路に蓄熱器を設けて貯蔵時に空気の顕熱を吸収し、放出時にはこの熱で空気を加熱する方法が考えられている。

3.3 システムの例

ヨーロッパには地下に岩塩層などの硬質な地層が多く、各国で高圧空気貯蔵発電システムが検討されている。西ドイツではすでにフントルフ発電所が圧力変動型空気貯蔵方式による世界で初めての高圧空気貯蔵発電所として、1978年に完成している。

フントルフ発電所の概要は次のとおりである。(図-7)

[空気貯蔵空洞]

深さ 600~800m
容積 150,000m³×2
地質 岩塩層
貯蔵圧力 約70kg/cm²

[圧縮機] 所要電力 60MW (2段圧縮)

[発電機] 出力 290MW

[運転サイクル]

圧縮 8時間/日
放出 2時間/日

[ガスタービン]

高圧タービン入口温度 538℃
低圧タービン入口温度 816℃
燃料 天然ガス
空気流量 約4000kg/秒

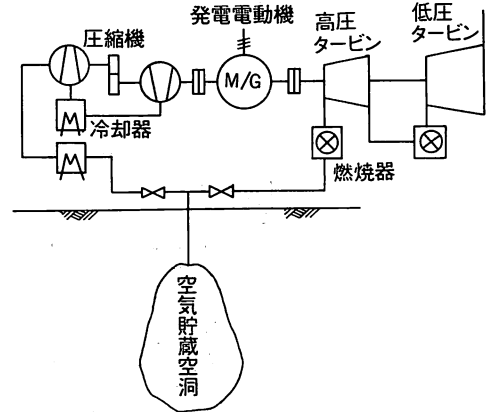


図-7 フントルフ発電所のシステム構成

3.4 システムの特徴と課題

圧縮空気による貯蔵方式は、比較的大容量の貯蔵が可能である、燃焼器などの熱機器が含まれているので負荷応答性は若干悪い等の特徴を持っている。

欧米においては、高圧空気の貯蔵場所として岩塩層を利用することが考えられているが、我国では岩塩層が存在しないため、高圧空気を封じ込める空洞を経済的に確保することが課題となっている。大規模空洞の掘削については、大きな問題はないと思われるが、高圧空気を貯蔵するための気密性確保に関しては未開発の分野である。

4. 揚水によるエネルギー貯蔵

4.1 原理および方式

揚水によるエネルギー貯蔵は、くみ上げた水の位置エネルギーを利用して行う。くみ上げられた水のエネルギー U (J) は、くみ上げた水の重さを M (kg)、くみ上げた高さを H (m)、重力の加速度を g (m/s²) とすると次式で与えられる。

$$U = gMH$$

あるいは、くみ上げられた水のエネルギー E (kWh) は、くみ上げた水の量を Q (m³)、くみ上げた高さを H (m)、重力の加速度を g (m/s²) とすると次式で与えられる。

$$E = gQH/3,600$$

これから解るように、エネルギーの貯蔵能力を大きくするには、揚程を大きくするか、くみ上げる水の量を大きくすればよい。最近の揚水発電所は、建設コストを下げるために高揚程化を目指している。

揚水によるエネルギー貯蔵のためには、くみ上げた水を貯蔵するための上部池とくみ上げるための水を貯

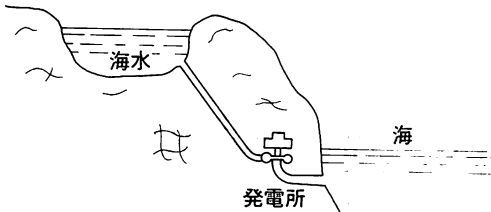


図-8 海水揚水発電所

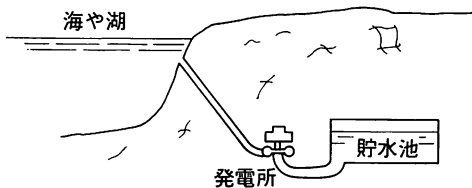


図-9 地下揚水発電所

蔵する下部池が必要である。通常の揚水発電所は、自然の湖沼を利用するなどして上部池および下部池をそれぞれ設けているが、次のような方式も研究されている。

(1) 海水揚水発電所 (図-8)

下部池として海を利用し、海岸近くの標高の高い地点に上部池を設けて揚水発電を行う。この方式は、下部池構築費が不要である、適当な上部池が得られれば大容量の揚水発電所が建設できるなどの利点がある。一方、海水に対する機器、構造物の腐蝕対策、海棲生物の付着防止、上池周辺の塩害対策などの研究開発課題がある。

(2) 地下揚水発電所 (図-9)

発電所と下部池を地下深く設け、上部池は自然の湖や海を利用して揚水発電を行う。この方式は、地上面の地形や環境などの制約が少ないなどの利点がある。一方、揚水と発電の繰返しに耐える強固な地盤が必要であり、海水を利用する場合には、海水揚水と同様の研究開発課題がある。

4.2 システムの構成 (図-10)

上部池および下部池のほか、揚水発電所を構成する主なものは次のとおりである。

(1) ポンプ水車

発電時には、水車として発電機を駆動し、揚水時には、逆方向に回転させポンプとして下部池から上部池へ水をくみ上げる。フランシス形ポンプ水車を用いることが多い。

(2) 発電電動機

発電時には、発電機として発電を行うが、揚水時

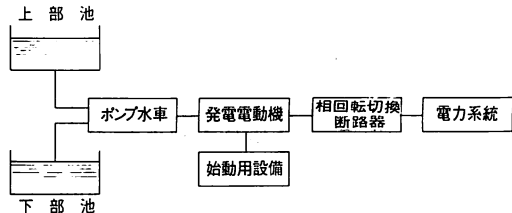


図-10 揚水発電所のシステム構成

には回転方向を相回転切換断路器によって逆にし、電動機としてポンプ水車を駆動する。

(3) 始動用設備

発電電動機の始動方式には、制動巻線始動方式(全電圧始動方式、低減電圧始動方式)、同期始動方式、サイリスタ始動方式などがあるが、全電圧始動方式以外は付属始動装置が必要となる。

4.3 システムの例

揚水発電所はこれまで数多く建設されているが、最近東京電力㈱が群馬県に建設した玉原発電所の概要を次に示す。

〔上池有効容量〕	13,000 × 10 ³ m ³
〔下池有効容量〕	35,890 × 10 ³ m ³
〔使用水量〕	最大 276 m ³ /s
〔有効落差〕	最大 518 m
〔揚水量〕	基準 184 m ³ /s
〔揚程〕	基準 554 m
〔ポンプ水車〕	形式 立軸フランシス形
〔発電電動機〕	形式 全閉内冷形三相同期
	容量 335,000 kVA × 4 台
	(現在 2 台運開)
〔始動方式〕	サイリスタ始動方式および同期始動方式

4.4 システムの特徴

揚水発電所はすでに長い歴史をもっており、技術的には完成されたものであるが、今後の技術開発としては、さらに高落差、大容量化が進められていくものと考えられる。単段の高落差大容量ポンプ水車では落差 800m、ユニット容量 45kW 級を指向している。さらに高揚程のポンプ水車としては、多段ポンプ水車も考えられている。

また、揚水発電所は大容量電力貯蔵設備として我国で実用化されている唯一のものであり、総合効率 70% 程度、継続発電時間数時間、建設コスト kW 当り十数万円等の数値は、各方面で進められている電力貯蔵の技術開発の目標となるものであろう。