

Carvalho, A. ; Marques, B. & Apura, P. (1997). Flywheel -" A Bateria Electromecânica". *Millenium*, 8

FLYWHEEL -" A BATERIA ELECTROMECAÂNICA"

António Manuel Santos Carvalho *

Bruno Filipe Marques **

Paulo Fernando da Costa Apura ***

* Eng^o Téc. Empresa Hidrobeira

** Eng^o Téc. do Dep. Eng^a Electrotécnica da ESTV

*** Eng^o Téc. do Dep. de Informática da ESTV

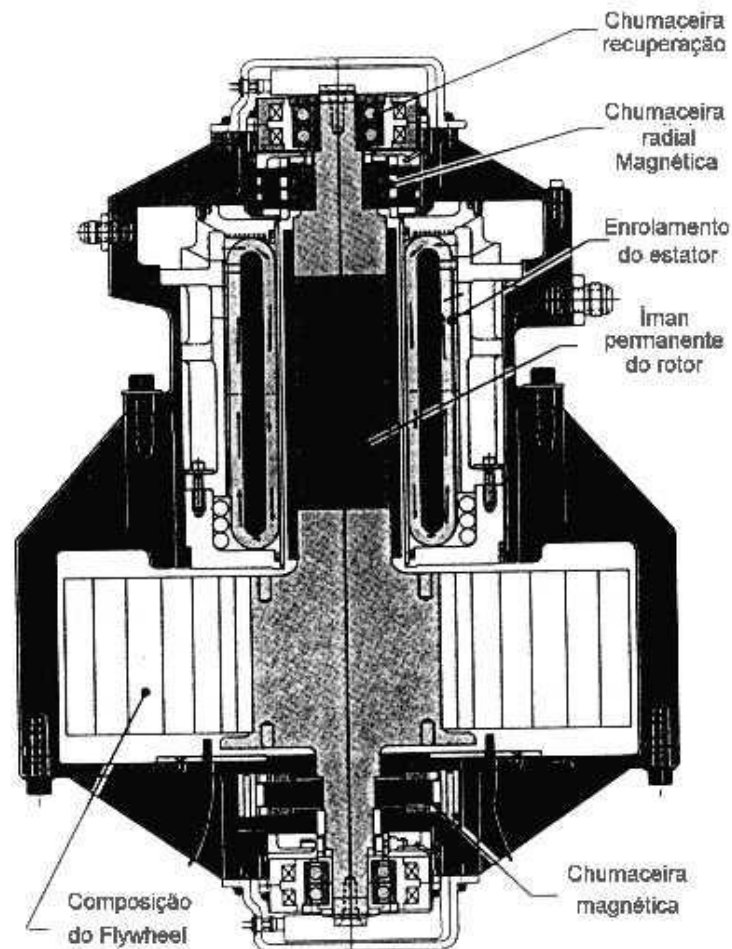


Figura 1 - Corte esquemático de uma "Flywheel"

Sobre este estudo

Desde sempre, o homem necessitou de fontes energéticas. Uma vez que essas fontes não estão sempre disponíveis, existe a necessidade de armazenar a energia para utilização posterior. Isso passa-se com os seres vivos que, alimentando-se, conservam a energia dos alimentos sob a forma de compostos químicos no próprio organismo.

Com o desenvolvimento da civilização tornou-se óbvio o armazenamento de várias formas de energia.

No caso de um painel solar, só se produz energia durante as horas do dia. Mas o homem também vive de noite, necessitando também de energia eléctrica. Torna-se então clara a necessidade de armazenar a energia produzida durante o dia, muitas vezes em excesso, pois nem sequer é utilizada.

Agora o homem debate-se com o problema de armazenar a energia de uma forma rápida, eficaz, e que não seja prejudicial ao ambiente.

Poder-se-ia utilizar um condensador, mas para o armazenamento de uma quantidade de energia satisfatória, como seja a necessária para movimentar um automóvel, o volume ocupado por ele seria demasiado grande para ser colocado dentro do veículo.

Hoje em dia utilizam-se acumuladores químicos bastante eficazes, embora a sua razão densidade de energia por unidade de peso esteja longe dos objectivos pretendidos. Além disso, mostram-se agressivos ao meio ambiente devido às substâncias que os compõem (zinco, chumbo, cádmio, mercúrio, ácidos, bases,...) e também perdem a sua carga ao longo do tempo (mesmo sem estarem em utilização).

Para resolver estes inconvenientes o homem começa a pensar em novas soluções, que talvez até já conheça desde os primórdios da sua existência, mas que por falta de iniciativa não se atreveu a desenvolvê-las.

É assim que nasce a "Flywheel", à qual tivemos o prazer de chamar "Bateria Electromecânica" em português e à qual dedicamos o nosso trabalho.

Mas do que trata este assunto de "flywheel"?

Bom, quem souber o que é uma roda facilmente se aperceberá do que se trata ¼ mais uma aplicação de um dos maiores inventos do homem!

O principio de funcionamento é muito simples: trata-se de colocar basicamente uma roda ("volante") a girar em situações em que não esteja sujeita a qualquer força de atrito ou a qualquer outra acção exterior. É uma forma extremamente simples de armazenar energia mecânica.

Facilmente se converte energia mecânica em energia eléctrica e vice-versa, utilizando um simples motor eléctrico (ou gerador).

Desde que o homem inventou a roda, utiliza este princípio inconscientemente. Imprimindo à roda movimento, esta desloca-se aproveitando a energia da sua inércia, muito melhor do que se se fizesse deslizar um cubo pelo chão! Até mesmo nos moínhos de vento o princípio é aproveitado pela mó. Em alguns carrinhos de brincar, impulsionando às rodas do carro um movimento de rotação que é mantido

por uma massa inercial colocada no eixo que liga as duas rodas e lhes permite rodar por mais tempo, o carrinho desloca-se num percurso maior.

Esta forma de armazenar energia parece ser ideal, uma vez que já se conseguem capacidades de armazenamento enormes e em que não existem os conhecidos problemas ambientais.

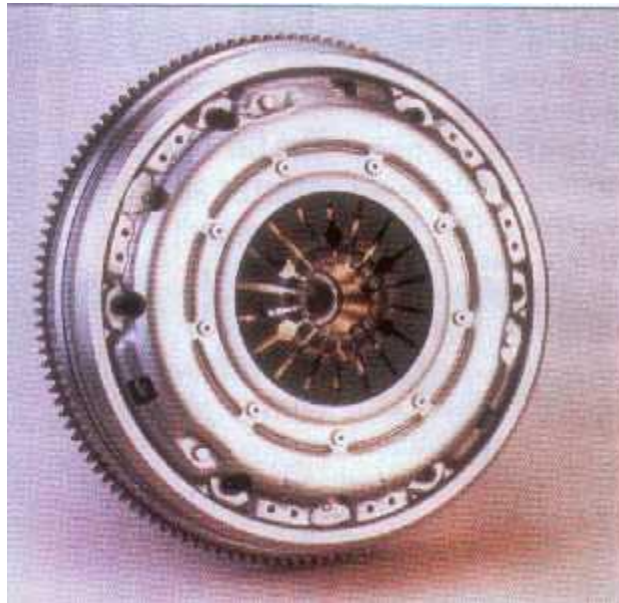


Figura 2 - Exemplo de uma "Flywheel"

Mas, O que é afinal a "Flywheel" ?

"Flywheel" - é um vocábulo inglês que à letra querera dizer roda que voa. Até há uns tempos atrás este "vocábulo" referia-se a "grandes" rodas pesadas que faziam, e ainda fazem, parte de algumas máquinas rotativas, e que têm a função de "guardar" e regular a rotação destas (motores) de forma a trabalharem a uma velocidade controlada (sem sobressaltos). Não é por acaso que aquando da Revolução Industrial (com máquinas a vapor) muitas das máquinas tinham rodas "gigantescas", que no fundo eram "Flywheel's".

Resumindo, uma "Flywheel" é uma roda feita de um material pesado (aço, fibras de carbono especial, etc.) que tem a função de "armazenar" e controlar uma certa quantidade de movimento (Energia Cinética).



Figura 3 - Perfil de uma "Flywheel"

Como se verifica, o conceito não é novo. Porquê, então, esta nova "onda" de «"Flywheel" para cá e para lá»? Na verdade, não se deveria falar em "Flywheel", mas sim em "Charging Flywheel". — Outro palavrão inglês! — direis vós. Traduzindo... Esta é a "Flywheel" da "moda" e trata-se de uma tecnologia de ponta que se baseia num "novo" conceito de "armazenamento" de energia eléctrica através de "baterias" electro-mecânicas. — Como?!?... Baterias Mecânicas? - pergunta-se. Para abreviar passar-se-á a chamar "Flywheel's" às "Charging Flywheel's".

Como já foi atrás referido, a "Flywheel" é uma roda pesada que gira sobre um eixo e tem a particularidade de "armazenar" (até um certo limite) esse seu movimento de rotação. Aproveitando esse seu movimento, "quase perpétuo", podemos "cortar" um campo magnético e assim induzir uma força electromotriz, f.e.m. essa que será tanto maior quanto maior for a velocidade da "Flywheel". Percebe-se agora o conceito de bateria? Pensamos que será evidente!

Energia Eléctrica vs Energia Mecânica

Como se poderá concluir do já exposto, existe uma relação intrínseca entre Energia Eléctrica e Mecânica neste novo dispositivo. Esta relação particular é bidireccional.

Conservação da Energia

A "Flywheel" é um "aparelho" que está a revolucionar o mundo das novas tecnologias devido a um facto muito simples e, no entanto, muito importante: é sabido, pelas Leis da Física, que um corpo tende a

manter o seu estado de movimento, isto é, se está parado, fica parado, se está em movimento (movimento uniforme), fica em movimento uniforme até que alguma força haja em contrário. E há muitas. Por exemplo, as forças de atrito. No entanto, a "Flywheel" tem a particularidade de manter o seu movimento por muito tempo, e daí a sua grande importância. Tem, por conseguinte, a particularidade de "Conservar a Sua Energia".

Constituição

Pelo até agora dito, poderá pensar-se que a "Flywheel" é um aparelho que tem uma roda "enorme" a rodar ligada a um dínamo. Bem, nem por isso! Estamos à porta do Séc. XXI e, como sabem, cada vez mais se consegue miniaturizar os aparelhos ("quase ao limite dos átomos").

Basicamente, esta bateria é constituída por uma roda que tem um diâmetro de aproximadamente 28 cm por aproximadamente 7 cm de espessura com um "buraco" no meio para um eixo. Esta roda pesa aproximadamente 30 Kg. Esta gira numa caixa de "alumínio" a uma velocidade de 100.000 r.p.m. Existem também acopladas um conjunto de bobinas "alojadas" na roda e eixo responsáveis pela magnetização dos mesmos eixo e roda. O conjunto pesa no total aproximadamente 50 Kg. É de referir que a "Flywheel" gira no vácuo sobre um eixo no qual não toca devido a chumaceiras magnéticas.

Devido a atingirem-se velocidades muito grandes, a "roda" é feita de material à base de fibras de carbono, "último grito em tecnologia de materiais", que diminuem o risco de destruição da "Flywheel" devido às forças centrífugas. Com estas fibras consegue-se ter uma maior densidade para um menor volume de espaço (miniaturização) e aumentar a resistência à desintegração. (Estas são características de um dos fabricantes).

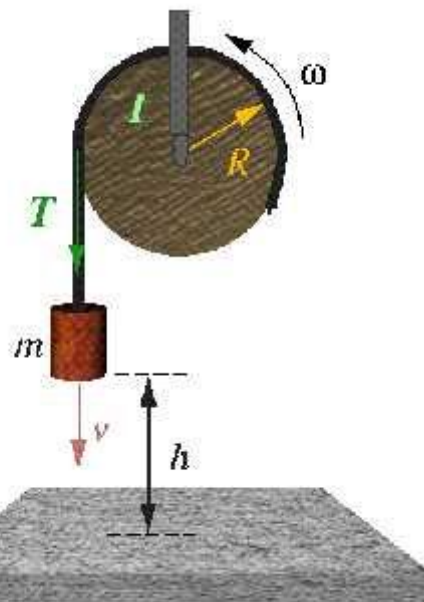
Esta é uma descrição sumária que será, pensamos nós, complementada com esquemas elucidativos.

Far-se-á também uma breve descrição da física envolvida no princípio da "Flywheel".



Figura 4- Constituintes de um Protótipo de uma "Flywheel"

Demonstração da Conservação de Energia



Se deixarmos cair uma massa m , de modo a fazer rodar um disco (roldana), e esta percorrer uma distância h , (como o mostrado na figura), podemos calcular a velocidade angular ω que o disco ("wheel") adquirirá.

Vamos, para tal, partir do princípio de que:

$m = 2 \text{ Kg}$; $I = 1 \text{ Kg.m}^2$; $h = 1 \text{ m}$; e $R = 3,6 \text{ cm}$, em que m é a massa do disco; I é a sua massa inercial; h a altura; R o raio do disco.

Assim, inicialmente à altura h , a energia inicial da roda é-nos dada por:

$$E_i = E_p = mgh$$

Finalmente, quando a altura se anula (toma o valor zero), a energia final é dada por:

$$E_f = E_{C_{trans}} + E_{C_{rot}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 .$$

Podemos, então, concluir que $v = \omega R$, uma vez que a massa e o disco estão interligados.

Diz-nos ainda o princípio da conservação de energia que:

$$\frac{1}{2} m (\omega R)^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 = mgh$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} (mR^2 + I) \omega^2 = mgh$$

$$\Leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{2mgh}{mR^2 + I}} \approx 6,25 s^{-1}$$

De onde se pode concluir que o período (**T**) da rotação do disco é dado por:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \approx 1,005 s$$

Pela lei da conservação da energia, o disco teria tendência em continuar a rodar. Sendo assim, a massa **m** voltaria a subir até atingir de novo altura máxima (**h**). Se não existir atrito, o disco permanecerá em movimento constante com o período **T**, e indefinidamente, baseando-se o funcionamento da "Flywheel" neste princípio.

Desenho da "Flywheel"

Sendo:

D E, variação de energia

I, momento de inércia da massa da "flywheel"

$$= \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega}$$

K_a, coeficiente de flutuação da velocidade ,

onde ω_1 , ω_2 e ω representam, respectivamente, a velocidade máxima, a velocidade mínima e a velocidade média

K, raio de rotação da "flywheel"

D_o, D, diâmetro exterior e diâmetro médio do aro;

h, espessura do aro;

v, velocidade média aro;

w, peso do aro da "flywheel";

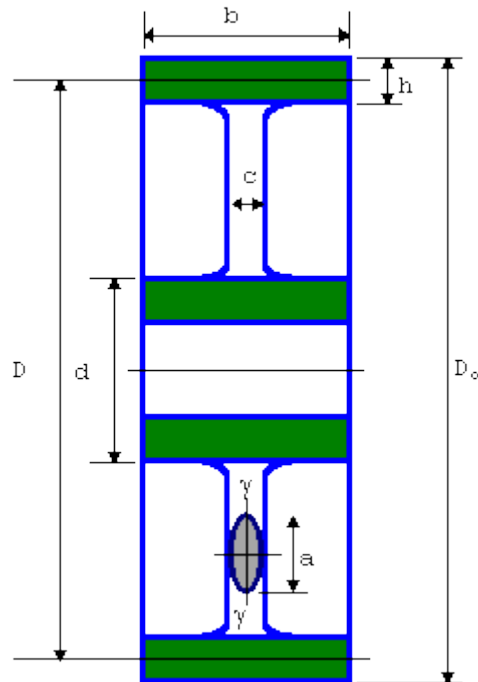
b, largura da "flywheel";

g, Peso específico;

n, número de braços - 6, 8 ou 10;

M_t, binário transmitido;

T₁, T₂, tensões nas correias.



Variação da energia (cálculos para alguns tipos de "Flywheel")

$$\Delta E = I \cdot k_a \cdot \omega^2 \text{ (fórmula geral)}$$

Para o aro da "flywheel"

$$k^2 = \frac{D_o^2 + (D_o - 2h)^2}{8}$$

e quando h é pequeno, $k^2 \cong D^2/4$

Para o disco da "flywheel"

$$k^2 \cong D_o^2/8$$

$$v = \pi \cdot D \cdot N$$

Para "FlyWheel" com massa inercial constante

$v < 1500$ m/min para uma potência Hp (horse power) < 100

$v < 2000$ m/min para uma potência Hp(horse power) > 100

Para "Flywheel" típicos em aço

$v = 3000 - 4000 \text{ m/min}$

$$\omega = \pi \cdot D \cdot b \cdot h \cdot \gamma$$

$$b/h = 0,65 - 2$$

Para a roldana da "flywheel"

b deve ser 3 a 5 cm superior à correia

Esforços no aro

Tensão devida à força centrífuga

$$\sigma_1 = \frac{\gamma \cdot v^2}{g}$$

Tensão devida à resistência do material

$$\sigma_2 = \frac{\pi^2 \cdot v^2 \cdot D \cdot \gamma}{n^2 \cdot g \cdot h}$$

De onde se pode concluir que os esforços nos são dados por:

$$\sigma_{\text{total}} = \frac{3}{4} \sigma_1 + \frac{1}{4} \sigma_2 \leq 350 \text{ Kg}f / \text{cm}^2, \text{ para massas inerciais constantes;}$$

$$\sigma_1 < 65 \text{ Kg}f / \text{cm}^2, \text{ para massas inerciais constantes;}$$

$$\sigma_1 < 280 \text{ Kg}f / \text{cm}^2, \text{ para aço;}$$

Esforços nas extremidades do braço

Tensão devida à resistência do material

$$\sigma_{b1} = \frac{M_t (D - d)}{n \cdot Z_{rr} \cdot D}$$

- Para massas inerciais constantes:

$$\sigma_{b1} < 130 \text{Kg} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_{b1} < 65 \text{Kg} / \text{cm}^2 \text{ (para cargas elevadas)}$$

Secção do braço

$$a = \sqrt[3]{\frac{64 \cdot Z_{FF}}{\pi}}, \text{ com } c = a/2$$

Problemas de Construção

Atrito

Um dos principais problemas de construção da flywheel é o atrito.

Para que o disco da flywheel fique a girar indefinidamente será necessário que não exista qualquer tipo de força que contrarie o seu movimento.

Para reduzir o atrito a um valor nulo é necessário que o volante gire livremente no espaço, onde existe vácuo, e sem contacto entre outras peças.

A melhor forma de o conseguir seria colocar o volante no interior de um compartimento estanque onde se faz vácuo. O volante rodaria com o seu veio em "levitação" magnética com a ajuda de modernas chumaceiras magnéticas. Desta forma consegue-se que não haja contacto com outras peças e, teoricamente, o atrito seria zero.

Choques Mecânicos Exteriores

No caso da flywheel ser colocada num automóvel esta vai ser sujeita a vibrações causadas por irregularidades da estrada e pela turbulência do ar devidas ao movimento do veículo.

O sistema da flywheel deverá ser capaz de absorver as cargas dinâmicas originadas. Geralmente as cargas transitórias devem ser isoladas do rotor (volante) por amortecedores e sistemas elastoméricos. Se assim não for o veio que roda em levitação magnética irá tocar, por vezes, na parte fixa, causando atrito e, logo, perda de energia.

Resistência à Força Centrífuga

Para que haja rentabilidade é necessário que o volante rode a enormes velocidades ($\gg 100000$ r.p.m.). Isto provoca enormes forças centrífugas. Já se provou que o volante de aço apenas suporta até 60000 r.p.m.. Logo, ter-se-á que utilizar materiais com enorme resistência mecânica.

As fibras de carbono apenas 3,6 vezes mais fortes que o aço armazenam 17 vezes mais energia. Actualmente já existem fibras de carbono 9 vezes mais resistentes que o aço.

Correntes de Foucault

Devido à presença de chumaceiras magnéticas facilmente surgem correntes induzidas nos materiais condutores (que constituem a flywheel) que se deslocam relativamente aos campos magnéticos. Estas correntes provocam perdas por aquecimento. Como tal, serão necessários certos cuidados de construção para minimizar as correntes de Foucault.

Efeito Giroscópico

Devido à presença de um volante rodando a enormes velocidades dentro de um contentor, este último tende a rodar no mesmo sentido (efeito giroscópico). Este efeito pode trazer instabilidade ao veículo que o transporta; por isso terá de ser minimizado.

Para tal sugere-se que sejam montados dois volantes a girarem em sentidos contrários para que se possa anular o efeito.

Materiais Magnéticos

Para se produzir energia eléctrica é necessário, além da fonte de energia mecânica, um campo magnético. Sabe-se que os materiais magnetizados perdem o seu magnetismo se forem sujeitos a um

choque mecânico intenso. Rodando a enormes velocidades, os materiais que armazenam um campo magnético facilmente o podem perder.

Fazem-se estudos para encontrar materiais que suportem enormes velocidades e que podem comportar um campo magnético que não seja alterado pela velocidade de rotação.

Metas Alcançadas

Densidade de Energia Por Unidade de Peso

- 4 vezes superior à de baterias tipo chumbo/ácido

Perdas/rendimento

- rendimento de 96%

Velocidade do volante

- 200.000 r.p.m.

Materiais

- O Aço só permite até 60000 r.p.m.

- As Fibras de carbono (grandes resistências mecânicas): 9 vezes superior ao aço.

Choques mecânicos

Utilização de chumaceiras magnéticas activas que respondem aos choques da estrada colocando energia nos electroímans, mesmo no momento anterior ao toque entre as partes de apoio.

As chumaceiras activas necessitam de electrónica "rápida", uma vez que os sensores verificarão a posição do eixo várias vezes por segundo. Um processador deve tratar este tipo de informação mais rápido do que os sensores a enviam. O processador Pentium dos anos 1990 mostra-se ideal para este tipo de aplicações. Sensores de posição tipo laser também serão utilizados.

Tempo de carga

10 a 20 minutos é o tempo que se gasta a fazer uma carga completa da flywheel (bastante próximo do tempo que leva a encher o depósito de gasolina de um automóvel).

Vantagens

Ambientais

Os materiais que constituem a flywheel são de longe muito menos prejudiciais do que os das actuais fontes de armazenamento de energia.

Por vezes as centrais de produção de energia eléctrica produzem energia que não está a ser consumida (caso das centrais termoeléctricas nas horas de vazio); essa energia poderia ser armazenada pela flywheel, aumentando o rendimento das centrais e reduzindo as emissões poluentes para a atmosfera.

Económicas

Na distribuição de energia eléctrica os condutores nem sempre estão a ser utilizados com uma carga de 100%. Nas horas em que conduzem menos energia poder-se-ia aproveitar para transportar energia para uma flywheel a jusante da distribuição. Assim o condutor estaria a ser utilizado com máxima rentabilidade 24 horas por dia podendo-se mesmo reduzir a secção dos condutores empregues pois a flywheel compensaria com a carga de energia adicional quando tal fosse necessário.

As indústrias poderiam armazenar energia durante o período da noite, quando esta é mais barata, e utilizá-la depois durante o dia.

Aproveitamento energético de outras fontes de energia

Aproveitamento total das fontes de energia alternativas, armazenando toda a energia por estas produzida para utilização posterior.

Simplicidade

É um dispositivo de construção simples, de fácil compreensão e com um princípio de funcionamento rudimentar.

Custos de produção

Dispositivo que apresenta custos de produção relativamente baixos devido à sua simplicidade e à natureza dos materiais utilizados.

Fiabilidade

Devido ao facto de não existirem peças em contacto a sua durabilidade é bastante elevada. Devido à natureza da sua construção e à tecnologia aplicada torna-se um aparelho de alta robustez.

Tempo de carga

Em comparação com outros dispositivos de armazenamento de energia eléctrica este tem um tempo de carga muito baixo (10 a 20 min.), especialmente quando se faz a comparação com os dispositivos químicos (8 a 10 horas).

Capacidade

Para o volume e peso de uma unidade de armazenamento químico tipo chumbo/ácido conseguem-se densidades de carga 4 vezes superiores.

Desvantagens

Pouca resistência a choques mecânicos intensos

As chumaceiras magnéticas necessitam de equipamentos de controlo adicionais de alta precisão e rapidez (sensores Laser e processadores Pentium) para controlar as vibrações e oscilações provocadas por choques mecânicos.

Tensão à saída com grandes variações de amplitude

A tensão produzida pela flywheel provém de um gerador síncrono. A tensão é directamente proporcional à velocidade, que varia com a quantidade de carga presente na flywheel. Como a carga varia, varia também a velocidade implicando, assim, a variação da amplitude de tensão.

Variação da frequência da tensão produzida

Pela mesma razão anterior, a frequência da tensão produzida também varia num longo espectro de frequências (desde as dezenas às centenas de KHz).

Campos de Aplicação

Face a tudo o que se tem dito, os campos de aplicação das "Flywheel's" são imensos, a começar pela substituição das baterias químicas, obtendo-se, assim, ganhos de rendimento e durabilidade enormes. Analisemos, então, algumas aplicações:

Instalações de Emergência

Nos tempos que correm, os grupos de emergência são alimentados, normalmente, por grupos geradores eléctricos com motores a diesel. Estes grupos demoram aproximadamente 30 segundos (os melhores) a restabelecer a energia. Existem grupos de apenas 8 "Flywheel's" que em alguns milésimos de segundo põem à disposição 1 MW de Potência, o suficiente para que um computador mantenha os seus dados, para que os sistemas críticos de hospitais fiquem seguros de anomalias se houver falhas de energia salvando-se, assim, muitas vidas. Impressionante?!... Como se pode observar, trata-se de um sonho do Homem tornado realidade, baseado em princípios conhecidos há séculos;

Instalações Industriais

É sabido que em instalações industriais existem geralmente perdas de energia, normais durante a laboração das mesmas. Assim sendo, pensa-se utilizar (e já se utilizam) as "Flywheel's" para armazenar "essas perdas" bem como também para armazenar energia em horas de vazio (energia mais barata) para depois fornecer aquando da necessidade de grandes "quantidades" (picos ou pontas) de energia pedidas.

Centrais de Produção de Energia Eléctrica

O que se disse no ponto anterior também é válido neste ponto. Estabelecendo "Flywheel's" em pontos "estratégicos" das linhas de alimentação, estas vão carregando nas horas de vazio (intensidades de corrente menores), pondo ao dispor milhares de MW nas horas de ponta sem sobrecarregar as linhas e diminuindo, assim, as perdas por efeito de Joule, porque a corrente que flui nas linhas de transporte é necessariamente menor. Assim sendo, podem-se projectar linhas de transporte para grandes distâncias com secção inferior diminuindo assim significativamente o custo destas.

Automóveis

Este é um campo que esteve sempre em foco em termos de armazenamento de energia com vista ao aumento de autonomia dos veículos, como é fácil de compreender.

Neste ramo tem-se em perspectiva dois tipos de veículos: os híbridos e os electricamente puros.

Entende-se como veículo híbrido um veículo que "consome", pelo menos, dois tipos de energia armazenada (normalmente combustíveis fósseis e seus derivados, gasolina, gasóleo, gás, etc. e energia eléctrica).

Um veículo puro é aquele que utiliza um só tipo de energia (é o mais vulgar). No presente, ter um veículo "completamente" eléctrico era ideal para a diminuição da poluição.

Veículos Híbridos:

Neste tipo de veículos pensa-se "substituir" as baterias químicas por "Flywheel's" para aumento de potência no arranque de motores a combustível fóssil, com maior eficiência, aumentando-lhes assim a potência. Em princípio, estas "Flywheel's" são "modestas". Servem também, e principalmente em cidade, para fornecer energia com vista à diminuição da poluição e conseqüentemente aumentar, para melhor, a relação gasto de combustível/quilómetros andados. Estas serão já de construção "menos modesta".

Veículos "Eléctricos Puros"

Como se pode depreender, estes veículos são integralmente eléctricos e a sua fonte de energia são as "Flywheel's". São veículos que não provocam poluição atmosférica e que simplificam, em muito, a mecânica dos mesmos. Pode-se, por exemplo, aplicar motores eléctricos a cada uma das rodas (isto porque os motores eléctricos são de mais fácil construção, muito mais pequenos e baratos) aumentando assim o rendimento porque as perdas de transmissão diminuem.

Perspectivas de Futuro

Os veículos puros são os veículos com perspectivas mais agradáveis e nos quais muitas empresas investem milhões de dólares. No entanto, há ainda algum caminho a percorrer devido a dificuldades, já

por nós atrás citadas. A aplicação de "Flywheel" leva a que sejam tomadas em conta medidas de segurança, pois estão em jogo vidas e bens.

Medidas de Segurança

As "Flywheel's", também chamadas de baterias electromecânicas, recebem energia eléctrica de um motor/gerador, armazenam-na como energia cinética (mecânica) num disco (roda) rotativo, e "devolvem-na" ao motor/gerador sempre que precisa como energia eléctrica. As "Flywheel's" têm níveis de energia eléctrica e mecânica muito elevados e, por isso, têm que se ter em conta questões de segurança relativamente às mesmas no seu projecto. Contudo, questões de ambiente não se põem, uma vez que as "Flywheel's" não emitem radiações ou resíduos que afectem o meio ambiente. Nesse aspecto são benignas.

Medidas de Segurança Mecânica

A energia que se liberta aquando de uma falha (mecânica) de uma "Flywheel" é enorme. A energia no rotor duma "Flywheel" de 1 kWh é capaz de levantar um veículo de tamanho médio a mais de 30 metros de altura. É por isso que se deverá ter um cuidado especial no desenvolvimento e construção do "contentor" da "Flywheel". Em termos mecânicos, temos que ter em atenção os seguintes aspectos:

- Ejecção de fragmentos do rotor quando o contentor quebra durante o seu funcionamento ou acidente com o veículo que a transporta;
- O efeito giroscópico da "Flywheel" pode fazer com que o veículo capote numa manobra de viragem;
- O mau estado dos pisos afecta o bom funcionamento das "Flywheel's".

Medidas de Segurança Eléctrica

Devido a necessidades de grandes potências para "Flywheel's" em veículos automóveis (20 - 40 kW), a tensão necessária é usualmente alta (300 - 500 volts). Devido a estes valores corre-se o risco de existirem choques eléctricos que podem causar graves danos a quem directa ou indirectamente trabalhar com elas se estas forem mal desenvolvidas.

Vamos então abordar as medidas de segurança que se deve ter em conta para o desenvolvimento de uma "Flywheel" a aplicar num veículo.

Em Termos Mecânicos

Contenção do Rotor. O rotor deve ser "contido" durante o funcionamento e durante um acidente. Para evitar situações com eventuais falhas do rotor em altas rotações este deve ser contido num "contentor" que não deve estar separado da sua estrutura de montagem. Dependendo do tipo de material utilizado na feitura da "roda" (aço ou fibras à base de carbono) assim a composição do contentor varia. "Flywheel's" de rotores compostos serão as que, em princípio, irão ser utilizadas na indústria automóvel porque a sua densidade de energia é superior à densidade de energia dos rotores de aço. Devido a esse facto, os contentores irão também ser construídos à base de materiais compostos, e que trás também a vantagem de diminuir o peso destes.

O momento angular total dum disco em rotação não é alterado quando se desintegra (rebenta). Este momento é transferido para a estrutura do contentor pelo impacto dos fragmentos. O impulso angular pode rachar o material que constitui o contentor causando a abertura e permitindo, assim, a ejeção dos fragmentos do rotor a grandes velocidades. Como estratégia, pode-se utilizar um contentor interno (para suporte da desintegração) que não está ligado ao contentor principal, mas que é livre de rodar a um impulso angular provocado pelos fragmentos desintegrados.

Em suma, a desintegração do rotor pode causar graves danos e um mau projecto pode provocar desastres catastróficos. Por isso, devem ser feitos bastantes testes e simulações de funcionamento de "Flywheel's" a grandes velocidades e a variados ângulos de inclinação, testando assim a resistência do material do contentor à abertura de fendas.

Efeito Giroscópico. Este é outro aspecto a ter em conta na segurança das "Flywheel's". A magnitude do momento giroscópico é proporcional ao produto do momento angular da "Flywheel" e da taxa de rotação do eixo. O "centro" da "Flywheel", "raios" (se existirem), e chumaceiras devem estar de tal forma posicionados de forma a resistirem ao momento giroscópico associadas às manobras do veículo. O contentor deverá ser suficientemente firme para minimizar a deflexão do rotor, e suficientemente forte para providenciar a quebra do rotor por fadiga deste. O eixo de rotação da "Flywheel" deve ser orientado numa direcção transversal e a direcção de rotação deve ser escolhida de modo a anular os momentos giroscópicos, que podem provocar a instabilidade do veículo.

Absorção de Choques Mecânicos. Como é evidente, nem todos os caminhos são auto-estradas. Alguns são verdadeiros caminhos de "cabras", pelo que é necessário prever este aspecto e providenciar amortecedores (de choques) para absorção de cargas dinâmicas dos caminhos referidos.

Pelo atrás exposto, a maior preocupação dos construtores é o contentor da "Flywheel".

Em Termos Eléctricos:

Quanto a este aspecto, deve ser implementada uma boa massa eléctrica da "Flywheel"; os bornes de alta tensão não devem ser acedidos com facilidade pelas pessoas; devem ser implementados sistemas de protecção eléctrica contra eventuais acidentes eléctricos (choques, curto-circuito, etc....).

Circuitos de Electrónica Adicional

Variação dos Valores de Tensão à Saída da "Flywheel"

Devido à elevada potência requerida pelas "Flywheel's", nomeadamente em aplicações automotivas (20-40 Kw), a tensão necessitada é usualmente elevada (300-500 Volts).

Consequentemente, esta alta tensão pode ser uma "arma perigosa" e pode causar choques eléctricos a condutores, passageiros, serviços pessoais e equipamento de emergência se o sistema for mal projectado e/ou mal desenvolvido.

Para resolver tal problema, utilizam-se normalmente filtros de acoplamento contínuo, que não são mais do que filtros activos similares a tantos outros.

A sua diferença fundamental reside na sua topologia, a qual emprega apenas 50% dos componentes utilizados nos filtros convencionais.

Avaliação de um filtro de acoplamento contínuo em sistemas de tracção AC

Particularmente, vamo-nos referir a este filtro (embora sumariamente) quando é utilizado um sistema "Flywheel" em máquinas de tracção AC.

Ele não é mais do que um "Buffer" entre a alimentação à entrada do sistema, que é muito instável, devido a uma alimentação monofásica, e a tensão constante à sua saída. Com alguma facilidade, ele

pode funcionar como filtro de corrente em altas frequências transmitidas no acoplamento contínuo devido aos harmónicos existentes nas linhas de tensão.

Juntamente com as suas vantagens, podemos mencionar a possibilidade de se utilizar o mesmo tipo de filtro para diferentes frequências nas linhas. Surgem ainda problemas devido a ressonâncias entre os diferentes constituintes do acoplamento contínuo que podem ser também reduzidos por este tipo de filtro.

Para melhorar o seu funcionamento foi introduzida ainda uma nova aproximação no controlo do filtro controlando a sua corrente de indução (que é um "sinal" muito instável) através de um controlador de tolerância de bandas. Assim, consegue-se obter um sistema linear e, obviamente, com melhores características. Desta forma, a frequência de comutação é reduzida cerca de 30 %, quando comparada com o controlo de um simples filtro indutor de corrente.

Os estudos em como escolher os parâmetros para os sistemas; as relações entre a tensão máxima de ripple no acoplamento contínuo; a indutância do filtro; a banda de tolerância e a corrente máxima induzida pelo filtro foram efectuados através de simulações por computador.

O grande "contra" da utilização deste filtro reside na elevada corrente que causa grandes perdas.

Outro problema causado com o nível de corrente é encontrar mecanismos que façam uma boa utilização desta à frequência de comutação escolhida.

Algumas Curiosidades:

A "Flywheel" em veículos eléctricos híbridos (HEV)

A equação que "rege" o armazenamento de energia num sistema com "flywheel" é

$$\text{Energia Armazenada} = 0,5 \cdot I \cdot \omega^2$$

onde I ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$) é o momento de inércia do sistema e ω (rad/s) a velocidade angular da "flywheel".

A energia típica armazenada pelas "Flywheel", e utilizada em aplicações automotivas, varia entre os 0,5 kWh e os 2,0 kWh.

Esta quantidade de energia armazenada é relativamente pequena quando comparada com aquela que é armazenada por outros dispositivos como as baterias. No entanto, a energia de um sistema utilizando "Flywheel" pode ser libertada num período de tempo relativamente pequeno.

A energia dissipada por um sistema com "Flywheel" pode ser calculada segundo a equação:

$$\text{Potência (w)} = (\text{Energia Armazenada}_{(\text{Joules})}) / (\text{Tempo de Dissipação da Energia}_{(\text{s})})$$

A Tabela 1 mostra a potência libertada quando a energia armazenada numa "flywheel" de 1,0 kWh é dissipada ao longo de diferentes períodos de tempo.

Tempo necessário para dissipar energia (s)	Potência (kW)
0,001	3.600.000
0,01	360.000
0,1	36.000
1	3.600
5	720

Tabela 1

Mesmo que o sistema pare em 5 segundos, a quantidade de Potência gerada, 720kW, pode causar estragos elevados na caixa que envolve a "flywheel" e o próprio veículo, antes que seja dissipada.

A energia cinética de um veículo é determinada por:

$$E_c = 0,5.m.v^2$$

onde m é a massa (Kg) do veículo e v (m/s) a sua velocidade.

Um veículo de 2000 Kg deve viajar a cerca de 134,2 mph para que consiga igualar a energia armazenada num sistema com "Flywheel" de 1,0 kWh. Esta é quantidade de energia necessitada para levantar a mais de 100 pés do chão um veículo de 2000 Kg.

Chumaceiras Magnéticas

A chumaceira magnética tem como princípio de funcionamento o da levitação magnética. A vantagem destas chumaceiras, está no facto de não existir contacto físico entre a peça fixa e a móvel e, logo, o atrito será muito próximo de zero.

A chumaceira magnética consiste, basicamente, num rotor levitado por um campo magnético. Esse campo magnético é controlado por uma realimentação constituída por sensores de efeito de Hall ou, mais recentemente, por sensores Laser.

Amplificadores de corrente controlam a força em cada uma das direcções (X e Y) no interior da chumaceira, e que actuam sobre o rotor. Disto resulta um sistema instável de quatro entradas e quatro saídas a ser controlado.

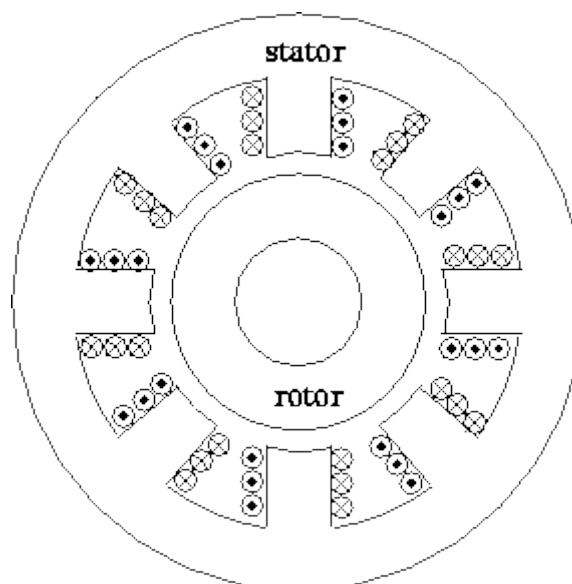


Figura 7 - Exemplo típico de uma chumaceira magnética

Pode-se observar pelas figuras seguintes (Figura 8 e Figura 9) o arranjo típico da chumaceira e a sua equivalência do circuito magnético ao circuito eléctrico:

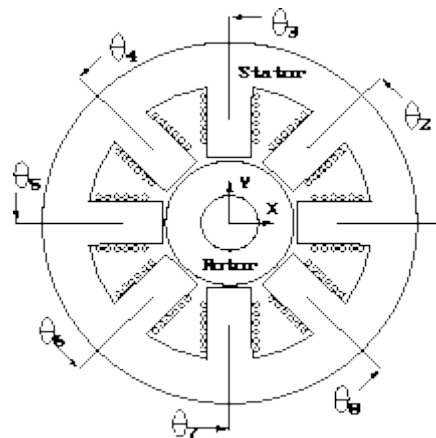


Figura 8

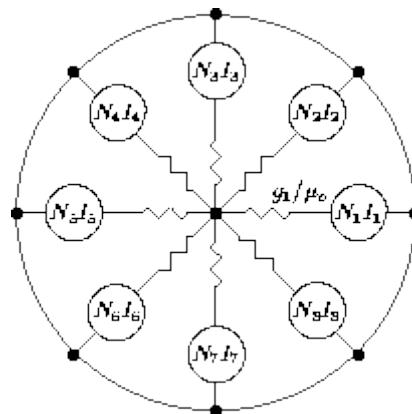


Figura 9

Conclusão

Neste momento, pode-se tomar como certa, a revolução que a "flywheel" está a causar, principalmente em aplicações industriais e de emergência, onde disponibiliza grandes quantidades de energia em fracções de tempo.

Assim, a tecnologia utilizada numa "flywheel", para situações estáticas, como as referidas no parágrafo anterior, não é crítica. O maior problema que se prende com esta tecnologia é fazer com que a "flywheel" suporte eventuais choques e esforços mecânicos devidos a deslocações no "espaço", como é o caso de um veículo.

Neste sentido, a grande área de investigação no domínio da construção de sistemas para armazenamento de energia prende-se com a procura e desenvolvimento de novos materiais e com a implementação de sistemas com tecnologia de ponta que tornem as "Flywheel's" móveis e seguras.

Por fim, outro aspecto a salientar é a constante procura de novos materiais que permitam elevar ainda mais a velocidade do rotor de uma "flywheel" aumentando, assim, a sua capacidade energética.

Bibliografia:

IEEE SPECTRUM, Janeiro 1994 - Publicação do Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

IEEE SPECTRUM, Julho 1995 - Publicação do Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

IEEE SPECTRUM, Setembro 1995 - Publicação do Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

GLOBAL design news - News and Applications For Design Engineers, Janeiro/Fevereiro 1995 - Publicação "CAHNERS"

Outra Documentação Possível de Consultar

A secção seguinte indica locais na **Internet** onde poderá ser consultada documentação adicional (em formato "electrónico") para aprofundar ainda mais o objecto deste trabalho:

<http://www.ecs.umass.edu:80>

<http://www.ee.ekc.kth.se>

<http://www.loner.cesr.uiuc.edu>

<http://www.jetinetics.com/whatfly.htm>

<http://www.prn.branch.com>

<http://www.ornl.gov>

<http://www.ibg.uv.se/elektromagnum>

<http://www.sbir.gsfc.nasa.gov>

<http://www.proffa.cc.tut.fi>

<http://www.uta.com>

Os autores deste trabalho reservam o direito de nele efectuar qualquer alteração sem aviso prévio após a sua edição.

A inclusão dos estudos dos autores em aplicações não académicas é da inteira responsabilidade do leitor, estando contudo dependente de autorização.

Os autores deste estudo são alunos do CESE em Eng^a Electrotécnica da ESTV