

ESTADO DA ARTE SOBRE A APLICAÇÃO DE SUPERCAPACITORES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

André Augusto Ferreira e José Antenor Pomilio

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP

Departamento de Sistemas e Controle de Energia - Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica

CEP 13083-970 – C. P. 6101 – Campinas – SP – Brasil

e-mail: {andre, antenor}@dsce.fee.unicamp.br

Resumo - O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre a aplicação de supercapacitores. Supercapacitor é o termo usado para descrever os capacitores eletroquímicos de dupla camada. Este dispositivo de armazenamento de energia possui elevado valor de capacitância e baixa resistência série equivalente. O dispositivo é apropriado para suprir rapidamente picos elevados de corrente em situações que requerem média quantidade de energia. Geralmente são usados em sistemas híbridos, ou seja, em conjunto com baterias ou células à combustível. Deste modo, cumprem um importante papel como fonte complementar de energia, no intuito de reduzir o tempo de reposta, melhorar a estabilidade e a qualidade do sistema de suprimento. Uma extensa pesquisa bibliográfica permitiu identificar as principais aplicações relacionadas à eletrônica de potência. Após uma apresentação dos aspectos fundamentais do dispositivo, as aplicações são discutidas.

Palavras-Chave – Capacitor eletroquímico de dupla-camada, supercapacitor, ultracapacitor.

THE STATE OF THE ART ABOUT SUPERCAPACITORS APPLICATIONS IN POWER ELECTRONICS

Abstract – The main objective of this paper is to present a survey on supercapacitor. Supercapacitor is the usual term that describes the Electrochemical Double Layer Capacitors. This energy storage device has high capacitance value, low series equivalent resistance. These devices are appropriated for supplying fast and very high current demand in medium energy requirements. Generally they are employed in hybrid systems together with batteries and fuel cells. In this way, the supercapacitors have an important role as a supplementary power source to decrease the response time, improving stability, power supply quality. An extensive bibliographic research has allowed identifying the main applications related to power electronics. After a brief presentation of fundamental aspects, the applications are discussed.

Keywords – electrochemical double layer capacitor, supercapacitor, ultracapacitor.

Artigo Submetido em 23/05/2005. Primeira Revisão em 10/08/2005. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Edson H. Watanabe.

NOMENCLATURA

V_i	Tensão inicial do módulo SC.
V_f	Tensão final do módulo SC.
V	Tensão no dispositivo.
t	Intervalo de tempo em que o SC deverá suprir a carga.
P	Potência requerida pela carga.
E	Energia acumulada no dispositivo.
m	Massa do veículo.
v	Velocidade do veículo.
SC	Supercapacitor.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica pode obtida de armazenadores de duas maneiras distintas: indireta, pela conversão da energia eletroquímica, potencial, cinética ou térmica; ou de forma direta, pela energia de campos magnéticos ou elétricos.

Em dispositivos como baterias e volantes (“flywheel”) a energia é armazenada na forma eletroquímica e na forma cinética, respectivamente. Já em dispositivos como SMES (bobinas magnéticas supercondutoras) e capacitores a energia é acumulada de forma direta no campo magnético ou no campo elétrico do dispositivo, respectivamente.

Os dispositivos de conversão e de armazenamento de energia são caracterizados basicamente pela quantidade de energia que acumulam por unidade de massa (ou volume) e pela rapidez com que são capazes de transferir essa energia por unidade de massa (ou volume).

Os capacitores eletrolíticos, por exemplo, apesar da pequena quantidade de energia que acumulam, são capazes de transferir energia rapidamente, o que os torna aptos a suprir picos de potência.

Em um capacitor de placas paralelas, o acúmulo de energia se dá diretamente no campo elétrico, devido à separação entre as cargas. O valor da capacitância, que é uma grandeza que reflete a capacidade do dispositivo de armazenar energia, depende somente de parâmetros dimensionais, sendo diretamente proporcional à área das placas e inversamente proporcional à distância que as separa.

Os supercapacitores obedecem ao mesmo princípio. O valor extremamente elevado de capacitância é alcançado graças à enorme área superficial dos eletrodos e à mínima distância entre as cargas. Assim, esses dispositivos são capazes de armazenar uma quantidade de energia muito maior do que qualquer capacitor convencional de mesma massa ou volume.

A primeira geração de supercapacitores, disponível comercialmente no final da década de 70, era apropriada para produtos eletrônicos em razão da pequena tensão que as células de supercapacitor suportam (inferior a 2,5 V). Com o advento de módulos supercapacitores, foi possível empregar os supercapacitores em aplicações com tensões mais altas. Somente na década de 90 seu uso começou a se difundir, graças ao emprego do SC em veículos elétricos (EV) e em veículos elétricos híbridos (HEV) [1]. Neste tipo de aplicação, o dispositivo funciona como uma fonte de rápida transferência de energia, o que permite a otimização, compactação e melhora de desempenho do sistema de armazenamento e de conversão de energia.

O elevado custo por Watt dos supercapacitores ainda é um empecilho para uma maior utilização do dispositivo em aplicações que requerem níveis de tensão média ou elevada. No entanto, em sistemas com múltiplas fontes de energia, ou seja, em conjunto com baterias ou células a combustível, podem resultar em soluções técnicas e economicamente mais viáveis [2].

Atualmente, os supercapacitores são uma das tecnologias mais promissoras para melhorar o gerenciamento, aumentar a eficiência, o desempenho e a qualidade dos sistemas de armazenamento e de suprimento de energia elétrica.

II. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

A. Capacitor eletroquímico de dupla camada

Em 1853, Hermann Helmholtz descreveu que ao aplicar uma tensão entre dois eletrodos imersos em um fluido condutor não há circulação de corrente até que uma determinada tensão limiar seja atingida. Ao iniciar a condução ocorre a formação de gases, devido às reações químicas na superfície do eletrodo. Abaixo desta tensão limiar o dispositivo comporta-se como um capacitor [3].

Atualmente, cada eletrodo do SC é composto por uma película metálica revestida por uma camada, em geral, de carbono ativado, que possui imensa área superficial (alcançado pela elevada porosidade de seus nódulos microscópicos), condutividade elétrica, química inerte e relativo baixo custo. Entre dois eletrodos é interposto um material separador (papel, membrana ou fibra de vidro) que impede o contato eletrônico (condução de corrente) entre os eletrodos, mas permite o livre trânsito de cátions e ânions [4]. O conjunto formado pelas camadas de carbono ativado e separador é encharcado por um eletrólito altamente condutivo (aquoso ou solvente orgânico) que provê instantaneamente alta concentração de íons móveis [5]. A Fig. 1 ilustra a estrutura básica em camadas de um supercapacitor [6].

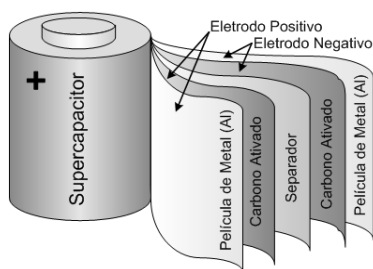


Fig. 1. Estrutura básica de camadas de um supercapacitor.

No estado carregado, cada um dos eletrodos possui cargas (do eletrodo e do eletrólito) de polaridades opostas, as quais estão muito próximas entre si (2-5 nm). Este fato, aliado à imensa área superficial do carbono ativado poroso (até 2000 m²/g), torna possível obter capacitâncias na ordem de milhares de Farads.

A Fig. 2 ilustra um SC disponível comercialmente, com capacidade de 10 F e tensão nominal de 2,3 V.



Fig. 2. Foto ilustrativa de um supercapacitor de 10F/2,3V (em comparação com bateria).

B. Processo de carga e descarga

No procedimento de carregamento, ao submeter os eletrodos do SC a uma fonte de tensão, os elétrons acumulam-se no carbono acoplado à película metálica ligada ao terminal negativo do dispositivo. No outro eletrodo há o acúmulo de cargas positivas. Sob influência do campo elétrico criado pela carga dos eletrodos, os íons provindos do eletrólito movem-se livremente, inclusive pelo material separador, em direção ao interior dos poros do carbono ativado e em sentido oposto à polaridade das cargas dos eletrodos, conforme ilustra a Fig. 3 [7].

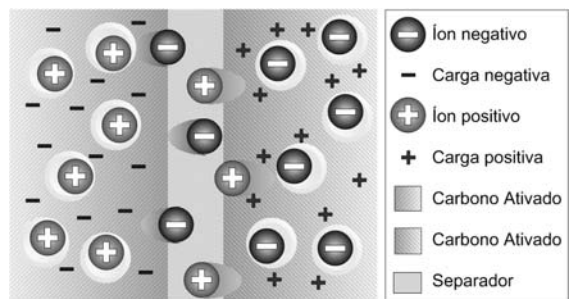


Fig. 3. Estrutura interna e distribuição de cargas em um SC.

Como o processo de carga e de descarga do dispositivo se dá pelo movimento dos íons no eletrólito, sem haver reações químicas, o SC apresenta uma resistência série equivalente (ESR) muito pequena, tornando o limite de corrente de carga e de descarga bastante elevado.

C. Modelo equivalente

Internamente, a estrutura de uma célula de supercapacitor é a de dois capacitores conectados em série via eletrólito, haja vista que em cada eletrodo existem cargas opostas muito próximas entre si. Em frequências inferiores a 1 kHz um modelo RC do SC fornece bons resultados [8]. No entanto, em frequências superiores, pode ser necessário agregar uma aparente diminuição da capacitância e da resistência série [1]. Diversos modelos têm sido propostos e estudados para representar as não idealidades do dispositivo. Todavia, a complexidade do modelo a ser adotado depende da aplicação em específico e do erro admissível na análise [3].

Uma descrição mais precisa do comportamento do dispositivo utiliza um modelo de linha de transmissão. Associado ao modelo RC simples (que descreve o dispositivo em baixa frequência), pode-se utilizar um modelo que adiciona uma linha de transmissão composta por células R (série) e C (derivação), que determina o comportamento de alta frequência, mostrado na Fig. 4. Um modelo ainda mais complexo e preciso leva a um modelo não linear de linha de transmissão [9].

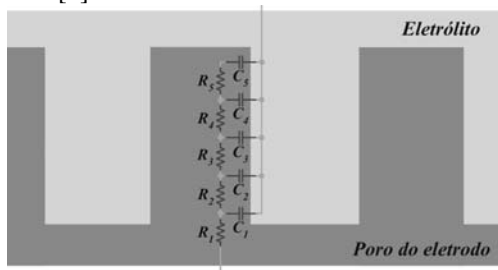


Fig. 4. Circuito equivalente para cada “poro” do eletrodo [1].

D. Densidade de Energia versus Densidade de Potência

A densidade de energia representa a quantidade de energia armazenada por unidade de massa (J/kg) ou volume (J/m^3). A densidade de potência representa a velocidade em que determinada quantidade de energia pode ser transferida pelo dispositivo por unidade de massa (W/kg) ou de volume (W/m^3). Estes dois parâmetros caracterizam os sistemas de armazenamento de energia e os dispositivos de conversão, conforme ilustra o diagrama de Ragone na Fig. 5. Observe-se que o SC preenche a lacuna que havia entre as baterias e os capacitores convencionais [1] [4] [6].

Por um lado, os capacitores eletrolíticos possuem maior densidade de potência, mas podem suprir picos de corrente somente durante poucos milissegundos. Por outro lado, as baterias apresentam a melhor relação custo e armazenamento de energia, mas absorvem e fornecem energia mais lentamente que um supercapacitor [1] [6].

Um SC com eletrólito, do tipo aquoso, apresenta uma densidade de energia típica de $3,5 Wh/kg$, enquanto que com eletrólito do tipo solvente orgânico a densidade de energia pode chegar a $18 Wh/kg$ devido à maior tensão suportável [1]. Em eletrólitos do tipo aquoso a tensão máxima que a célula pode suportar é de $1 V$, enquanto que em eletrólitos baseados em solventes orgânicos, a tensão limiar da célula é de $2,3 V$. Todavia, o eletrólito orgânico possui uma resistência série equivalente superior à do eletrólito aquoso [1] [3] [6].

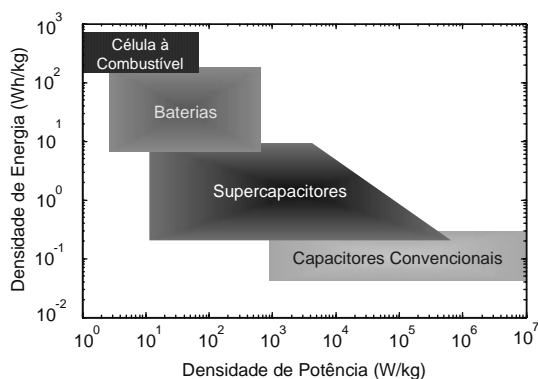


Fig. 5. Diagrama de Ragone: densidade de energia vs. potência.

E. Associação de supercapacitores

O limiar de tensão para operação segura de uma célula de supercapacitor é determinado pela composição do eletrólito. Excedido o limite haverá a eletrólise do eletrólito, ocasionando a formação de gases, que danificará o dispositivo.

Para alcançar tensões de operação mais elevadas, os SC são combinados em série. Para evitar o risco de uma ou mais células serem submetidas a uma tensão maior que o seu limiar, são empregados circuitos de balanceamento de tensão, que podem ser passivos, ativos ou uma combinação de ambos. Para a ampliação da capacitância final, as células também podem ser conectadas em paralelo [1] [6] [10].

O circuito de balanceamento passivo de tensões consiste em um resistor conectado em paralelo com os terminais de cada célula do supercapacitor, formando um divisor resistivo. O circuito de balanceamento ativo pode ser construído com um circuito eletrônico conectado em paralelo com cada célula, conforme ilustra a Fig. 6. Quando o nível de tensão da célula é maior que uma referência interna de tensão precisa, o comparador muda de estado lógico, desviando a corrente da célula [6] [10] [5].

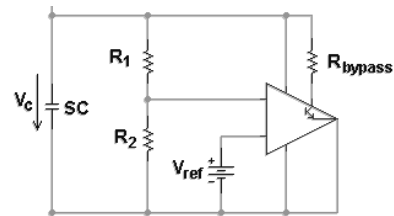


Fig. 6. Circuito ativo de balanceamento de tensões do supercapacitor.

A Fig. 7 mostra a foto de um módulo supercapacitor da empresa EPCOS, com $42 V$ de tensão nominal e capacitância de $150 F$. Este dispositivo possui circuitos de balanceamento ativo para 18 células de $2700 F$ conectadas em série. A densidade de potência do módulo é de $6,9 kW/kg$ e a densidade de energia é de $2,3 Wh/kg$. Na mesma foto, no canto inferior direito, está um capacitor eletrolítico da SIEMENS com capacitância de $3700 \mu F$ e tensão nominal de $200 V$. Observar que na base do capacitor eletrolítico está o supercapacitor de $10 F$ mostrado na Fig. 2. Notar ainda que os terminais do módulo supercapacitor estão curto-circuitados, para fins de segurança e aumento de sua vida útil do dispositivo quando desativado.



Fig. 7. Foto ilustrativa do módulo SC de $150 F/42 V$.

A associação em série destes módulos (para alcançar tensões ainda mais elevadas) não exige cuidado adicional para a equalização da tensão, uma vez que os circuitos de balanceamento individual são suficientes para também garantir a distribuição uniforme de tensão entre módulos.

III. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO

As principais características do supercapacitor são listadas abaixo [1] [2] [4] [6] [10] [11]:

- *Elevada densidade de potência* em relação às baterias, geralmente 10 vezes maior. *Baixa densidade de energia* em relação às baterias, mas até 100 vezes maior que a de um capacitor eletrolítico. Por exemplo, uma bateria típica de chumbo ácido de 42 V / 44 Ah possui uma densidade de energia de 40 Wh/kg e densidade de potência de 300 W/kg, enquanto que um módulo supercapacitor de 150 F / 42 V possui uma densidade de energia de 2,3 Wh/kg e densidade de potência de 6,9 kW/kg;
- Mecanismo de *carga e de descarga rápidos*, pois o processo é realizado pela movimentação de cargas e de íons no eletrólito, resultando em baixa resistência série equivalente, o que os torna *adequados para suprir e absorver picos de corrente*;
- *Não apresenta o efeito de memória*, ou seja, o dispositivo *pode ser carregado com quantidades randômicas de energia*, pois a energia é armazenada diretamente no campo elétrico. *O estado de carga pode ser determinado em função da tensão do dispositivo*, pois o valor da capacitância é estável;
- *Ampla tensão de operação*, alcançada em módulos pela associação em série de células de supercapacitor, e *ampla faixa de temperatura*, devido à *ausência de reações químicas* sobre os eletrodos;
- *Ciclo de vida longo*, pois o *processo de armazenamento de energia é completamente reversível*. Não excedida tensão e temperatura máximas de operação e não violado o limite de corrente, o dispositivo apresenta longa vida operacional, quase sem necessidade de manutenção.
- Quando em combinação com outras fontes de energia, como células à combustível e baterias, aumenta a vida útil destas, pois o supercapacitor irá suprir picos de corrente. Outro benefício é a redução do dimensionamento da fonte primária de energia;
- *Ambientalmente amigável*, pois é livre de materiais de risco ou tóxico. Em veículos de combustão interna, auxilia na redução de consumo de combustível (diminuição da emissão de poluentes) aproveitando a energia da frenagem do veículo na aceleração do mesmo;
- *Alto custo por Watt*, mas quando usados em combinação com outras fontes de energia podem resultar em sistemas híbridos mais eficientes e com menor custo que os não-híbridos.

IV. APLICAÇÕES

A. Produtos Eletrônicos

Devido à crescente demanda por produtos mais compactos e leves, os projetistas encontraram no SC características

adequadas para reduzir peso e volume, sem renunciar ao desempenho, à qualidade e à segurança, especialmente em produtos portáteis.

Em diversos equipamentos de Tecnologia da Informação, como computadores de mesa, “notebooks”, PDAs (ou “handheld” – Assistente Pessoal Digital), agendas eletrônicas, calculadoras programáveis, câmeras digitais de vídeo e de foto, telefones celulares, sistemas GPS, taxímetros e máquinas de café, os supercapacitores são usados para evitar a perda de informação na memória ou de configuração da BIOS em caso de falha ou substituição da fonte primária (em geral, uma bateria). Adicionalmente, suprem picos de potência em transmissões de dados sem fios, “zoom” e “flash” de câmeras, displays, aumentando a durabilidade e reduzindo o dimensionamento da bateria. A Fig. 8 ilustra dois circuitos esquemáticos para o uso do supercapacitor como fonte reserva de energia ou como proteção da carga sensível à picos de corrente [1] [12] [13].

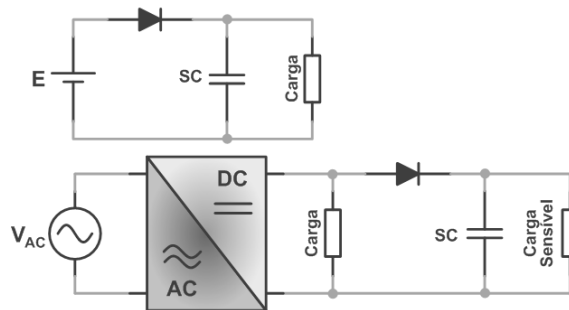


Fig. 8. Uso do supercapacitor em circuitos eletrônicos.

Em alguns circuitos eletrônicos, que requerem baixa densidade de energia, o SC é usado para substituir a bateria. Brinquedos, como aeroplanos e carros automáticos, são exemplos em que o supercapacitor, como fonte primária de energia, permite a melhora de desempenho e redução de custos do produto [1] [13].

B. Fontes renováveis de energia

A Fig. 9 ilustra o diagrama esquemático da associação do supercapacitor com bateria para compensar e estabilizar a intermitente energia gerada por fontes renováveis de energia, como geradores eólicos e geradores fotovoltaicos.

Outra vantagem é o aumento a vida útil do sistema, pois o SC evita a degradação da bateria em relação aos picos de potência e apresenta ampla faixa de temperatura e ciclo de vida longo de operação [6] [14].

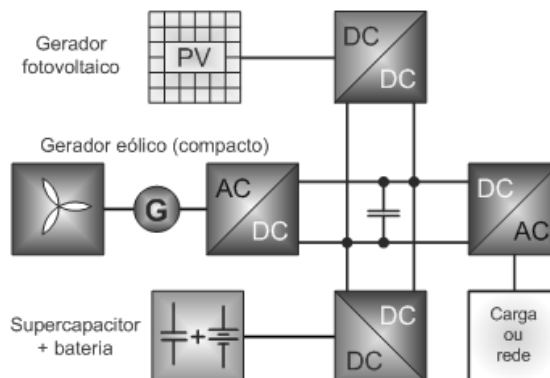


Fig. 9. Uso do SC em fontes renováveis de energia.

C. Sistemas UPS

Sistemas Ininterruptos de Energia (UPS – “Uninterruptible Power Supply”) são projetados para assumir imediatamente a carga no caso de falha da fonte primária de energia (rede elétrica), evitando perda de dados ou mau funcionamento de dispositivos. Algumas cargas sensíveis não suportam dezenas de milissegundos de interrupção de energia e baterias possuem tempo de resposta relativamente elevado. Assim, módulos supercapacitores são empregados para compensar atrasos no tempo de resposta das baterias, fornecendo a energia requisitada instantaneamente, conforme ilustra a Fig. 10 [15].

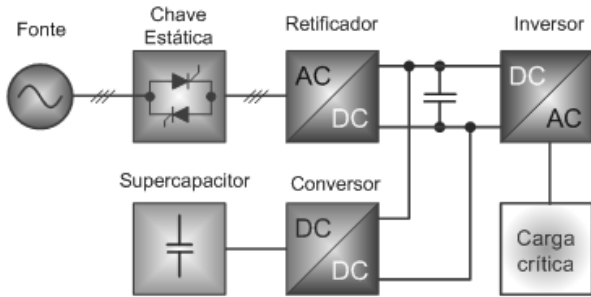


Fig. 10. Emprego do SC em sistemas UPS.

D. Sistemas Acionamento de Velocidade Variável

Máquinas sensíveis modernas são afetadas principalmente por afundamentos e interrupções de tensão, impondo significativas perdas econômicas devido paradas imprevistas em processos de produção industrial automatizados [16] [17].

Em sistemas de controle de velocidade variável (ASD – “Adjustable Speed Driver”), afundamentos de tensão podem introduzir flutuações de velocidade em motores, com grande risco de danificar o produto final. O módulo supercapacitor é empregado em compensadores para manter a tensão do “link” CC estável, ou seja, imune a afundamentos ou interrupções de curta duração. Baterias podem ser usadas para manter a disponibilidade de energia por períodos de tempo mais longos [11] [18] [19]. A Fig. 11 ilustra o diagrama esquemático do uso do SC em sistemas de acionamento de velocidade variável.

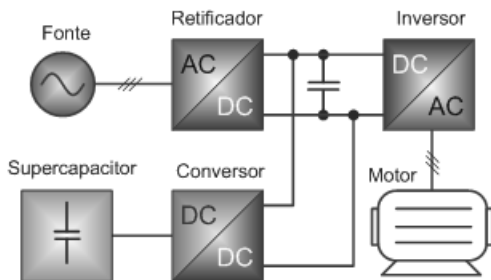


Fig. 11. Uso do SC em sistemas de acionamento de velocidade variável (ASD).

Sabendo que a energia armazenada em um capacitor (E) é dada por:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

em que,

- C é o valor da capacitância do supercapacitor;
- V é a tensão terminal do dispositivo.

é possível mostrar que a capacitância necessária para suprir uma determinada quantidade de potência (P) requerida pela carga durante um determinado período de tempo (t) é dada pela equação (2).

$$C = \frac{2tP}{|V_i^2 - V_f^2|} \quad (2)$$

em que,

- V_i é a tensão terminal inicial do módulo SC;
- V_f é a tensão terminal final do dispositivo.

E. Sistema de Condicionamento de Energia

A ampla maioria de eventos na rede elétrica é devido às variações de tensão de curta duração (VTCD), que resultam em enormes prejuízos financeiros às indústrias e ao comércio. A duração destes eventos é muito rápida (inferior a 1s), requerendo média quantidade de energia e enorme quantidade de potência. Deste modo, um sistema de condicionamento de energia que emprega um módulo supercapacitor, ilustrado na Fig. 12, é bastante adequado para aumentar a confiabilidade e a qualidade da energia suprida à carga [17] [19] [20].

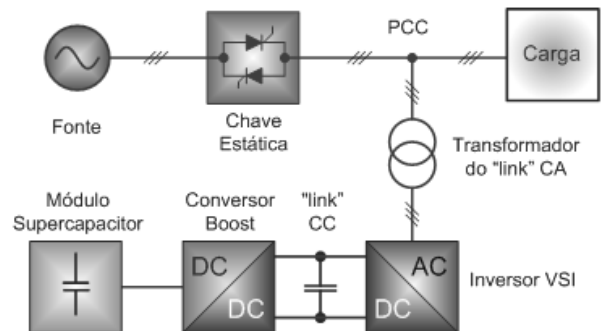


Fig. 12. Uso do SC em sistemas de condicionamento de energia.

O sistema comporta-se como um restaurador dinâmico de tensão (DVR) no caso de haver um afundamento ou interrupção de energia na rede elétrica. Na detecção de uma VTCD, a chave estática abre, ilhando a carga da rede elétrica e o dispositivo injeta potência ativa suficiente para suprir a carga durante o evento. Quando a rede elétrica funciona normalmente, o dispositivo opera como um filtro ativo “shunt”, realizando a compensação de potência reativa, redução de corrente harmônica, compensação de cargas desequilibradas e atenuação de cargas pulsantes, ou seja, compensação de cintilação luminosa (“flicker”) [20].

F. Sistemas de Transporte

Linhas de metrô, ônibus elétrico e bonde elétrico são alimentados por subestações retificadoras, geralmente conectadas a rede de distribuição com tensão média entre 500 V e 700 V. Atualmente, cresce a quantidade destes veículos com poderosas tecnologias de propulsão, tornando algumas linhas de alimentação suscetíveis a quedas de tensão resistiva. E ainda, os modernos sistemas acionamento de motores de tração AC de frequência variável são bem menos robustos que os antigos motores DC a flutuações de tensão.

Ao invés de construir novas e dispendiosas subestações retificadoras, uma promissora e eficiente solução é instalar

subestações compensadoras, baseadas em supercapacitores, para compensar quedas de tensão resistiva em pontos frágeis da rede de transporte, como finais de linha não alimentados, como ilustra a Fig. 13. Em termos de custo, a instalação de compensadores é economicamente competitiva [21].

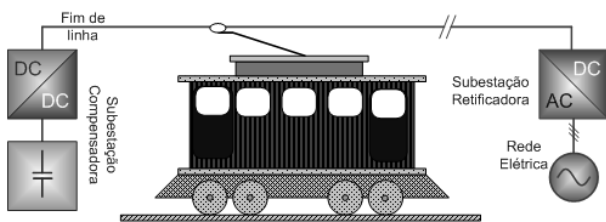


Fig. 13. Uso do SC em sistemas de transporte elétrico com subestação retificadora.

G. Veículos Automotivos

A Fig. 14 ilustra a foto de um veículo elétrico desenvolvido no projeto VEGA, pelo Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da UNICAMP, em que pretende-se incorporar módulos de supercapacitor ao sistema de suprimento.



Fig. 14. Veículo elétrico desenvolvido no projeto VEGA – cortesia do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP.

O emprego de supercapacitores em sistemas de tração elétrica tem resultado em significativas melhoras de desempenho e eficiência nos veículos elétricos (EV) e veículos elétricos híbridos (HEV). As vantagens são inúmeras, como menor dimensionamento e aumento da vida útil das baterias, economia de energia, menor poluição e frenagem regenerativa.

Nestes sistemas, uma solução apropriada é usar uma fonte primária de energia constante, como uma célula a combustível, para suprir a demanda média de consumo. Uma bateria pode ser usada para melhorar o desempenho do veículo em ambientes urbanos, em que o trânsito geralmente está congestionado. A bateria entrega o complemento de energia requerida pelo dispositivo de tração e a energia fornecida pela célula a combustível. A terceira fonte de energia é o supercapacitor, o qual é dimensionado para suprir picos de potência na aceleração e absorver a energia cinética convertida na frenagem do veículo (frenagem regenerativa). Este tipo de topologia, ilustrada na Fig. 15, permite economia de energia de até 25% [4] [22] – [25].

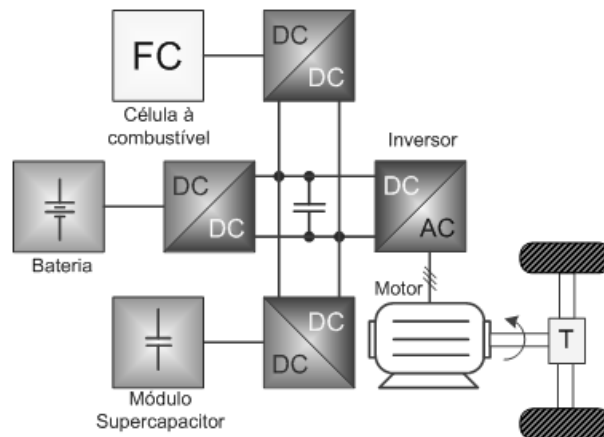


Fig. 15. Uso do SC em veículos elétricos e em veículos elétricos híbridos.

A frenagem regenerativa também pode ser portada para veículos com motor de combustão interna. Tipicamente, é possível combinar um motor diesel com o “power train” (componentes do veículo que produzem potência e a transmitem para as rodas - motor, transmissão, caixa de transmissão, eixo cardã, diferenciais, eixos e cubos de rodas). Esta topologia permite a redução do consumo de combustível e de emissão de gases tóxicos, devido ao aumento da eficiência [26] [27].

O supercapacitor pode ser dimensionado de acordo com a pior condição transitória e constante de tempo da célula a combustível ou bateria. Isto evita que a bateria ou a célula a combustível tenha de suprir altos níveis de corrente, permitindo manter a tensão do elo CC estável e aumentar o conjugado de partida [4] [28] [29]. Por outro lado, o supercapacitor pode ser dimensionado a partir do pico de potência exigida na aceleração ou pela quantidade de energia que deverá ser absorvida durante a frenagem do veículo, quando se encontra em velocidade máxima.

Normalmente o procedimento de frenagem é mais exigente, pois todo o fluxo de potência se concentra no SC.

De posse da velocidade máxima (v_{max}) de um veículo de massa (m), sabe-se a quantidade de energia acumulada no veículo (E) e que deve ser armazenada pelo SC:

$$E = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \quad (3)$$

Portanto, reescrevendo a equação (2) em termos das variáveis conhecidas, é possível mostrar que a capacitância do dispositivo deverá ser de:

$$C = \frac{2E}{|V_i^2 - V_f^2|} \quad (4)$$

Vale ressaltar que a tensão mínima (final) do dispositivo não deve ser muito baixa para que o conversor possa operar com ciclo de trabalho não muito elevado.

Outros critérios de projeto podem ser levados em conta, como o de reserva de energia para suprir falhas nas baterias, ou o de capacidade de absorção de adicional de energia em caso de declives, etc.

Por fim, deve-se verificar se o dispositivo é capaz de conciliar os valores de capacitância, tensões das células (ou módulos) e da corrente do dispositivo.

H. Máquina de combustão interna

A mesma solução do veículo elétrico híbrido pode ser adaptada para geradores de indução auto excitado acionados por máquina de combustão interna, conectada ou não à rede, como ilustra a Fig. 16.

Neste tipo de aplicação o uso de um inversor PWM em conjunto com um gerador de indução é uma interessante topologia para estabilizar tensão e frequência do barramento CA ao invés de empregar máquinas síncronas em grupos geradores acionados por motores de combustão interna [30]. Em sistemas de grande porte, o supercapacitor torna-se fundamental para manter a tensão do link CC estável e imune a transitórios bruscos e elevados de carga; enquanto a máquina de combustão interna encontra o novo ponto de operação.

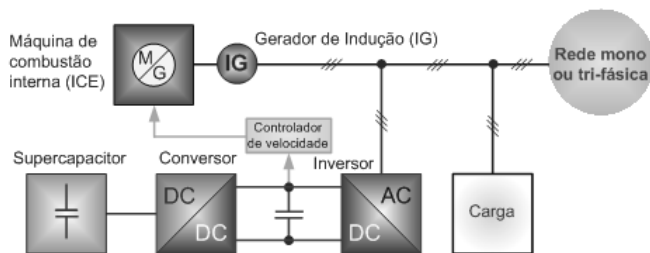


Fig. 16. Uso do SC em um gerador de indução acionado por uma máquina de combustão interna.

V. CONCLUSÕES

O supercapacitor é um dos dispositivos mais promissores de armazenamento de energia elétrica, graças às suas características de densidade de energia e de densidade de potência estarem entre os capacitores convencionais (por exemplo, os eletrolíticos) e as baterias.

Basicamente, os supercapacitores são apropriados para sistemas que requerem elevado e rápido nível de corrente por períodos de tempo relativamente longos, em comparação com os capacitores eletrolíticos.

A associação dos supercapacitores com outras fontes de energia permite otimizar e melhorar o desempenho de diversos sistemas de suprimento de energia elétrica. Associado a baterias ou células a combustível, as protege de picos elevados de corrente e permite compactar e aumentar a vida útil destes dispositivos.

Os benefícios econômicos do emprego do SC ainda não são um consenso, mesmo considerando os benefícios acima citados [27]. Todavia, é esperada uma significativa redução de custos deste dispositivo em razão do crescimento do volume de produção para os veículos, automação do processo produtivo e aumento da tensão da célula de 2,5 para 3 V [4]. Em termos de qualidade de energia, os ganhos econômicos pelo uso do supercapacitor podem ser ainda maiores se contabilizado o custo de uma parada de produção em ambientes industriais.

Em todas as aplicações, como pode ser observado, o papel do supercapacitor é o de manter a tensão do barramento CC estável [31]. Portanto, é imprescindível ter estratégias de controle para otimizar e melhorar o desempenho da coordenação de múltiplas fontes de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, entidade governamental brasileira promotora do desenvolvimento científico e tecnológico, à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo suporte financeiro a este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Kötz, M. Carlen. "Principles and applications of electrochemical capacitors", in *Electrochimica Acta*, vol. 45, nº 15-16, pp. 2483-2498, May 2000
- [2] Maxwell Technologies, "Top 10 Reasons for Using Ultracapacitors in Your System Design". Disponível em: www.maxwell.com/ultracapacitors/support/papers.html. Acesso em: 12 de março de 2005.
- [3] J. A. Pomilio, *Fontes chaveadas*, UNICAMP, publicação FEE 13/95, revisão jan. 2004. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/apostila.html>. Acesso em: 16 maio de 2005.
- [4] A. Schneuwly, B. Maher, J. Auer. "Ultracapacitors, the New Thinking in Automotive World". Disponível em: www.maxwell.com/ultracapacitors/support/papers.html. Acesso em: 12 de março de 2005.
- [5] G. Prophet. "Supercaps for supercaches". Disponível em: www.edn.com/article/CA268379.html. Acesso em: 13 de maio de 2005.
- [6] EPCOS AG, "UltraCap technology". Disponível em: www.epcos.com/inf/20/35/ds/technology.pdf. Acesso em: 12 de março de 2005.
- [7] G. Zorpette, "Super Charged", in *IEEE Spectrum*, vol. 42, nº 1, pp. 26-31, Jan. 2005.
- [8] F. Gagliardi, M. Pagano, G. Maestri, M. Martone, A. Tarantino, "Experimental Results of on-board Battery-Ultracapacitor System for Electric Vehicle Applications", in *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2002*, vol. 1, pp. 93-98, July 2002.
- [9] F. Belhachemi, S. Rael, B. Davat, "A physical based model of power electronic double-layer supercapacitors", in *Proceedings of the IEEE IAS Annual Meeting, 2000*, vol. 5, pp. 3069-3076, Oct. 2000.
- [10] Cooper Bussmann. "Aerogel Supercapacitors - Application Guidelines". Disponível em: http://www.cooperet.com/products_supercapacitors.asp. Acesso em: 12 março 2005.
- [11] J. L. Durán-Gómez, P. N. Enjeti, A. von Jouanne, "An Approach to Achieve Ride-Through of an Adjustable-Speed Drive with Flyback Converter Modules Powered by Super Capacitors", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, issue 2, pp. 514-522, March-April 2002.
- [12] A. Schneuwly, G. Sartorelli, J. Auer, B. Maher. "Ultracapacitor Applications in the Power Electronic World". Disponível em: www.maxwell.com/ultracapacitors/support/papers.html. Acesso em: 12 de março de 2005.

- [13] Cap – XX. “Digital power for the next generation of mobile devices”, Disponível em: www.cap-xx.com/. Acesso em 13 de maio de 2005.
- [14] P. P. Barker, “Ultracapacitor for Use in Power Quality and Distributed Resource Applications”, in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 316-320, July 2002.
- [15] W. Choi, P. Enjeti, J. W. Howze, “Fuel Cell Powered UPS Systems: Design Considerations”, in *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, PESC 2003, vol. 1, pp. 385-390, June 2003.
- [16] T. Sels, C. Dragu, T. van Craenenbroeck, R. Belmans, “New Energy Storage Devices for an Improved Load Managing on Distribution Level”, in *IEEE Porto Power Tech Proceedings*, vol. 4, p. 10-13, Sept. 2001.
- [17] S. M. Deckmann, A. A. Ferreira, “About Voltage Sags and Swells Analysis”, in *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, pp. 1448-148, Oct. 2002.
- [18] L. Palma, P. Enjeti, E. Aeloiza, “An Approach to Provide Ride-Through for ASD Systems with Super-Capacitors”, in *VIII IEEE International Technical Proceedings Power Electronics Congress*, CIEP 2002, pp. 182-187, Oct. 2002.
- [19] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, “Energy Storage Systems for Advanced Power Applications”, in *Proceedings of IEEE*, vol. 89, n° 12, p.p. 1744-1756, Dec. 2001.
- [20] D. Casadei, G. Grandi, C. Rossi, “A Supercapacitor-Based Power Conditioning System for Power Quality Improvement and Uninterruptible Power Supply”, in *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, ISIE 2002, vol. 4, pp. 1247-1252, July 2002.
- [21] A. Rufer, D. Hotellier, P. Barrade, “A Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation for Voltage-Compensation in Weak Transportation Networks”, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, issue 2, pp. 629-636, April 2004.
- [22] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant, H. Kahlen, “Supercapacitors for the Energy Management of Electric Vehicles”. in *Journal of Power Sources*, vol. 84, issue 2, pp. 261-269, Dec. 1999.
- [23] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, “Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle”, in *Control Engineering Practice*, vol. 13, issue 1, pp 41-53, Jan. 2005.
- [24] L. Solero, A. Lidozzi, J. A. Pomilio, “Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, APEC 2004, Nineteenth Annual IEEE, vol. 2, pp. 1145-1151, 2004.
- [25] A. Di Napoli, F. Crescimbin, F. G. Capponi, L. Solero, “Control strategy for multiple input DC-DC power converters devoted to hybrid vehicle propulsion systems”, in *Symposium on Proceedings of the 2002 IEEE International Industrial Electronics*, ISIE 2002, vol.3, pp. 1036-1041, May 2002.
- [26] A. Kongats. “About Cap-XX”. Disponível em: <http://www.cap-xx.com>. Acesso em 03 de agosto de 2004.
- [27] A. G. Simpson, G. R. Walker, “Lifecycle Costs of Ultracapacitors in Electric Vehicle Applications”, in *IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, PESC 2002, vol. 2, pp. 1015-1020, June 2002.
- [28] T.A.Nergaard, J. F. Ferrell, L. G. Leslie, Jih-Sheng Lai, “Design considerations for a 48 V fuel cell to split single phase inverter system with ultracapacitor energy storage”, in *IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, PESC 2002, vol. 4, pp. 2007-2012, June 2002.
- [29] R. E. Smith. “Ultracapacitor System Design; Optimizing Hybrid Electric Vehicles with Fuel Cell Power”. Disponível em: <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/support/papers.html>. Acesso em: 12 de março de 2005.
- [30] V. M. Pereira, J. A. Pomilio e P. A. V. Ferreira: “Dynamic Modeling and Control of an ICE-driven Induction Generator with Voltage and Frequency Regulation by PWM Three-phase Inverter”, in *7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2003*, Fortaleza – CE, 21 - 24 sept. 2003, pp. 964-969.
- [31] A. A. Ferreira, L. A. Silva, J. A. Pomilio, “A Survey on Supercapacitors Applications in the Power Electronics”, in *7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2005*, Recife – PE, “no Prelo”.

DADOS BIOGRÁFICOS

André Augusto Ferreira, nascido em 12/09/1975 em Juiz de Fora – MG é engenheiro eletricitista (2000) pela Universidade Federal de Juiz de Fora e mestre (2002) e em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

Atualmente é doutorando na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade de energia elétrica e sistemas de controle digital.

José Antenor Pomilio, é engenheiro eletricitista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua e à Terceira Universidade de Roma, ambas na Itália. Foi presidente da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP e membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society. Atualmente é editor da revista Eletrônica de Potência, e editor associado da IEEE Trans. on Power Electronics e da revista Controle & Automação. É professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, onde é docente desde 1984.

Dr. Pomilio é membro da SOBRAEP, da SBA, da SBPC e Senior Member do IEEE.