

Conversor DC/DC para Interligação de Armazenamento e Produção de Energia com Origem em Fontes Renováveis

Fernando Miguel Soares Mamede dos Santos^(*), Sérgio Manuel Ângelo da Cruz^(**), Humberto Manuel Matos Jorge^(**)

^(*) Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Lamego do Instituto Superior Politécnico de Viseu

^(**) Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

fsantos@estgl.ipv.pt, smacruz@deec.uc.pt, hjorge@deec.uc.pt

Área Científica - CT 9

Resumo

O trabalho de investigação aqui reportado tem como objectivo último a integração de diferentes módulos de produção e armazenamento de energia, com várias cargas eléctricas, por intermédio de um barramento DC, estando este interligado com a rede eléctrica de forma a otimizar, do ponto de vista económico, as trocas de energia entre esta e tal barramento.

Em concreto, este trabalho de investigação centra-se nos conversores de potência necessários à interligação dos diferentes módulos produtores e de armazenamento de energia eléctrica ao barramento. De forma a compatibilizar os equipamentos de diferentes fabricantes, com diferentes tensões de funcionamento, torna-se necessário implementar conversores DC/DC que permitam a ligação destes ao barramento DC, com elevado rendimento e possibilitando a gestão da energia eléctrica fornecida/pedida por cada módulo.

Este artigo expõe o dimensionamento e explica o funcionamento dos conversores DC/DC que serão usados no sistema laboratorial implementado para o efeito. Após o bom dimensionamento destes será possível interligar o barramento DC à rede, através de um rectificador PWM, sendo possível gerir de forma eficiente o fluxo de energia entre o barramento DC e a rede de distribuição de energia eléctrica. A partir desse ponto pode ser feita uma análise económica do mercado da energia e do impacto destes sistemas no diagrama de carga da rede.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, produção de electricidade com origem em fontes de energia renovável, regulador de carga, supercondensadores, mercado da energia, unidade inteligente de controlo, veículo eléctrico, V2G (vehicle to grid).

Introdução

As soluções para reduzir a factura energética do consumidor e do país em geral centram-se em duas vertentes: por um lado, na melhoria da eficiência energética e, por outro, no incremento da exploração de novas fontes de energia renováveis. Neste último caso surge um novo problema que tem a ver com o facto de grande parte dessas fontes não serem despacháveis. A resposta pode residir nos sistemas capazes de armazenar a energia de modo a que os recursos possam ser aproveitados quando estão disponíveis, para se poder consumir a energia armazenada consoante as necessidades temporais.

De forma a promover a necessária eficiência energética e qualidade de energia, quanto mais próximo o armazenamento estiver das cargas consumidoras melhor, significando menos perdas no transporte e distribuição da energia eléctrica, bem como no aumento da fiabilidade do sistema eléctrico.

Um outro aspecto positivo que advém da acumulação da energia junto à carga consumidora é poder tornar os consumidores também fornecedores de energia, sendo parte activa no investimento necessário para a mudança de uma economia energética baseada em carbono, para uma economia energética baseada nos electrões (1).

Neste contexto surge a necessidade de se desenvolverem módulos de armazenamento de energia, destinados ao utilizador final de baixa tensão. Estes módulos podem ser integrados com outros (de produção, conversão, etc) com diferentes tecnologias e diferentes fabricantes.

Uma questão que se levanta, é se deve ser usado um sistema AC ou DC, para interligar os diferentes módulos das unidades de armazenamento e de produção de energia.

Usar localmente um barramento baseado em tensão DC apresenta vantagens, quer em termos de eficiência energética, quer em termos de qualidade de energia (acabam as preocupações com a energia reactiva e factor de potência, bem como com os harmónicos) (2).

Com base nesta perspectiva do uso de um barramento DC para interligar os diferentes módulos levanta-se uma outra questão: *Como interligar os diferentes módulos de forma segura e eficiente, de maneira a reduzirem-se ao mínimo as correntes de circulação entre eles?*

Os trabalhos de investigação realizados nesta área até ao momento, na sua grande maioria, respondem ao problema usando redes AC e com soluções específicas para este tipo de redes.

A técnica de modulação mais utilizada nos conversores de potência usados em redes AC é a técnica por modulação de largura de impulso (PWM - “Pulse With Modulation”), que permite obter uma tensão de saída do lado AC controlável em amplitude e frequência, com uma forma de onda próxima da sinusoidal.

De forma análoga, numa rede DC pode aplicar-se uma metodologia semelhante, recorrendo à variação do ciclo de trabalho (“duty-cycle”) dos semicondutores constituintes dos conversores de potência que convertem uma tensão contínua de um dado valor, noutra tensão contínua de valor distinto do primeiro. O controlo dos conversores de potência dos diferentes módulos pode ser realizado individualmente, mas de forma cooperativa de modo a manter constante o valor médio da tensão do barramento DC (estabelecendo um valor de referência para esta tensão) mesmo na presença de variações súbitas do nível de carga do barramento (2),(3).

O objectivo principal deste trabalho é pois o desenho e dimensionamento dos conversores DC/DC usados para interligar os diferentes módulos ao barramento DC, tal como pode ser observado na Figura 1. Numa fase posterior, tais conversores serão construídos no laboratório por forma a obter-se um protótipo funcional de todo o sistema.

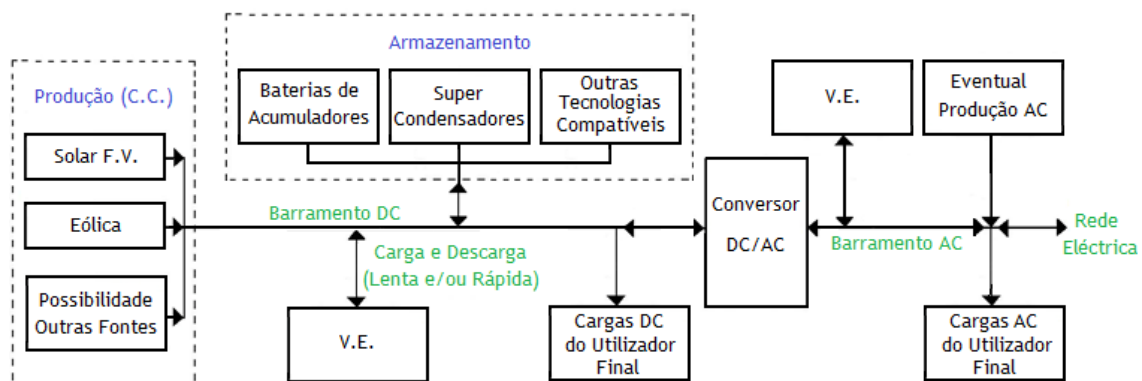


Figura 1 - Constituição do sistema com armazenamento de energia.

Interligação dos diferentes módulos

Pretende-se que o sistema a construir seja modular, podendo o consumidor optar pela aquisição de diferentes módulos consoante as diferentes especificações pretendidas e a quantidade de energia requerida.

Os painéis fotovoltaicos e a(s) turbina(s) eólica(s) serão interligados ao barramento DC por intermédio de conversores de potência AC/DC e DC/DC, respectivamente. Quanto aos módulos de armazenamento de energia, serão usadas baterias e supercondensadores, sendo estes também interligados ao barramento DC por intermédio de conversores DC/DC. Por sua vez o barramento DC será interligado à rede de energia elétrica por intermédio de um conversor DC/AC (rectificador PWM).

Quando os painéis solares e a turbina eólica não produzirem energia suficiente para suprir as necessidades energéticas das cargas, a energia em falta será retirada dos módulos de armazenamento.

O armazenamento é feito primordialmente em baterias, mas tendo em consideração o número limitado de cargas/descargas que estas suportam e a sua vida útil, também se irá recorrer a um módulo de supercondensadores, que lidam melhor com variações abruptas do nível de carga do barramento DC e além disso também podem vir a permitir a esta unidade o carregamento / descarregamento rápido de veículos eléctricos (V.E.) (4).

Além do estudo do funcionamento do sistema, resultante das acções de controlo dos diferentes módulos (em termos de correntes, tensões e rendimentos) e optimização global em termos de cargas do utilizador final, pretende-se também que o sistema possa funcionar de forma eficiente com a rede. Este terá capacidade para receber e fornecer energia à rede, podendo esta vir directamente dos módulos de produção de energia ou dos módulos de armazenamento.

Em caso de falha da rede eléctrica, outro dos objectivos do sistema aqui em desenvolvimento é o de continuar a fornecer energia às cargas críticas da instalação do utilizador final e eventualmente prestar auxílio à rede (pode actuar em conjunto com outros sistemas semelhantes).

Cada módulo tem uma unidade inteligente de controlo que funciona de forma cooperativa com as unidades inteligentes dos outros módulos de modo a fazerem toda a gestão da energia, tendo capacidade para aceitar pedidos/ordens da rede eléctrica (DC ou AC), incluindo a ligação optimizada dos veículos eléctricos. Estes tanto podem ser ligados ao barramento A.C., como ao barramento DC.

Um outro módulo de monitorização poderá vir a permitir o deslastre de cargas não críticas, nomeadamente em situações de insuficiência energética, quer seja por falta de produção, falta de energia nos módulos de armazenamento ou ausência da rede eléctrica externa fornecedora da energia AC.

Actualmente em Portugal todas as entidades que disponham de um contrato de compra de electricidade em baixa tensão podem ser produtoras de energia eléctrica por intermédio de unidades de microprodução, utilizando recursos renováveis como energia primária. Estes produtores têm dois regimes remuneratórios para entregarem a energia à rede pública. O regime geral, que pode ser aplicado à generalidade das unidades de microprodução e o regime bonificado, para unidades de microprodução com potência de ligação até 3,68 kW que usam fontes de energia renováveis (solar, eólica, hídrica e biomassa).

Partindo do estudo detalhado do sistema e dos dados obtidos, em termos de performance, pretende-se fazer ainda uma análise da rentabilidade económica em ambiente liberalizado de mercado e numa perspectiva de existência de preços em tempo real (5).

Na secção seguinte será abordada a escolha da topologia dos conversores DC/DC a utilizar, bem como o seu desenho e dimensionamento.

Desenho e Dimensionamento dos Conversores DC/DC

Este trabalho, encontra-se a ser desenvolvido no Laboratório de Investigação de Sistemas Electromecânicos no âmbito do Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Têm sido efectuados um conjunto de estudos teóricos, relativos à modelação de todo o sistema em ambiente Matlab/Simulink, assim como alguns testes laboratoriais preliminares. Neste contexto encontra-se já desenvolvido o modelo matemático e respectiva implementação prática do rectificar PWM que será usado na interligação do barramento DC à rede eléctrica. Este conversor, será aquele responsável pelo controlo da tensão do barramento DC, que terá 48 V. Valor de tensão normalmente usada nas aplicações objecto do projecto, uma vez que esse nível irá permitir ter potências suficientes em jogo, sem contudo haver muito elevados valores de corrente. É o que se passa por exemplo nos veículos eléctricos.

Como os níveis de tensão de saída dos painéis fotovoltaicos e módulos de armazenamento de energia são distintos de 48 V, tornou-se fundamental o projecto e construção dos conversores DC/DC.

O conversor DC/DC que interliga os painéis fotovoltaicos admite uma tensão de entrada compreendida entre 5,4 V e 80 V, apresentando à sua saída os 48 V requeridos pelo barramento DC.

Os conversores DC/DC que interligam o barramento DC às baterias e supercondensadores deverão ser capazes de realizar a operação inversa, convertendo a tensão do barramento DC de 48 V para outros valores de tensão compreendidos entre 5,4 V e 80 V.

Dentro das possíveis topologias de conversores DC/DC comutados encontram-se como principais as seguintes: “Buck Converter” (Conversor Redutor), “Boost Converter” (Conversor Elevador), “Buck-Boost Converter” (Conversor Redutor-Elevador), “Flyback Converter” (Conversor com Realimentação), “Single Transistor Forward Converter” (Conversor Directo de um Transistor), “Two-Transistor Forward Converter” (Conversor Directo com dois Transistores), “Half-Bridge Push-Pull Converter” (Conversor de Meia Ponte em “Push-Pull”), “Full-Bridge Push-Pull Converter” (Conversor em Ponte Completa em “Push-Pull”) (6).

Das várias configurações de conversor, aquela que se adapta melhor ao objectivo do trabalho é o “Flyback Converter” porque é um conversor que permite aumentar e diminuir a tensão de entrada do conversor de acordo com o pretendido, funciona em malha fechada (ajustando a entrada para a diferença entre o valor de referência e o que representa a saída) e proporciona um isolamento eléctrico entre a entrada e a saída, que é condição exigida para funcionar com a rede eléctrica.

Após um conjunto de investigações e cálculos de dimensionamento teóricos, o ponto de partida para a implementação de um conversor com os requisitos anteriores e para serem realizados uma série de ensaios práticos é o circuito apresentado na figura seguinte.

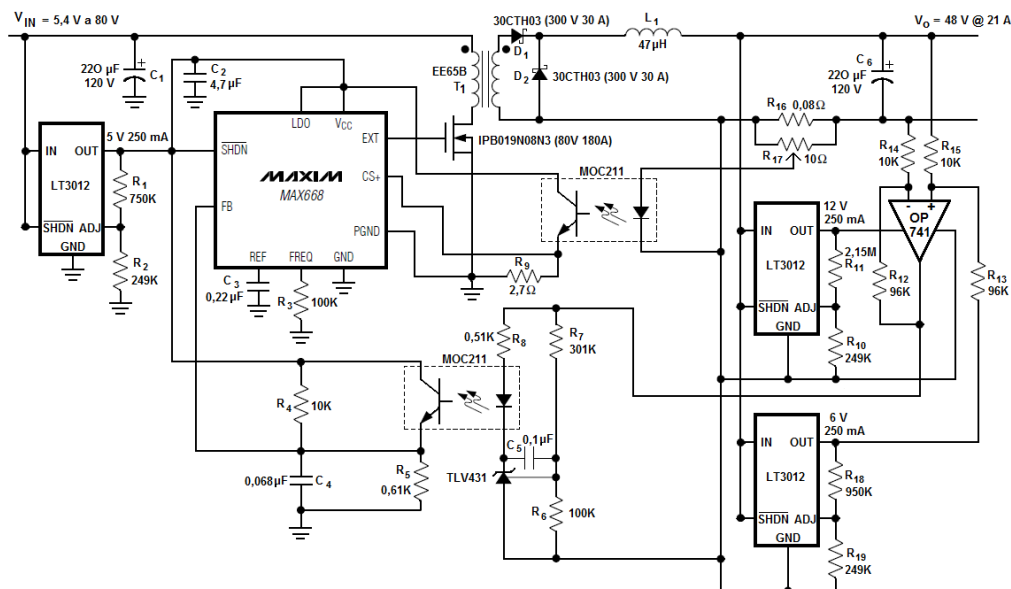


Figura 2 - Conversor DC/DC do tipo “Flyback”.

LT3012

O LT3012 tem como função alimentar todos os circuitos integrados. É um regulador de tensão, que permite estabilizar a tensão na sua saída. O valor da tensão de saída é ajustado através do correcto dimensionamento das resistências que lhe estão acopladas. A título de exemplo, para a obtenção de 5 V na sua saída, o valor da resistência R_2 deverá ser menor que 250 K Ω (página nº 9 da folha de especificações do LT3012). Escolhendo 249 K Ω para R_2 e sabendo que $I_{ADJ} = 30$ nA (página nº 9 da folha de especificações do LT3012) virá (7):

$$V_{OUT} = 1,24 \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + I_{ADJ} \times R_1 \Leftrightarrow 5 = 1,24 \times \left(1 + \frac{R_1}{249 \times 10^3}\right) + 30 \times 10^{-9} \times R_1$$

$$R_1 = 750511 \Omega \Leftrightarrow R_1 \approx 750 K\Omega$$

Dimensionamento do Transformador

O transformador é um componente crítico de um conversor DC/DC. No caso em estudo, este transformador foi projectado de modo a que o conversor DC/DC apresente à sua saída uma tensão próxima de 48 V e seja capaz de fornecer uma corrente de 21 A.

Em carga, entre o transformador e a saída haverá quedas de tensão na Resistência R_{16} e no díodo rectificador D_1 (30CTH03).

- Em R_{16} :

$$R_{16} = \frac{V_{R16}}{I_o} \Leftrightarrow 0,08 = \frac{V_{R16}}{21} \Leftrightarrow V_{R16} = 1,68 V$$

- Em D_1 : de acordo com o observado na curva característica do díodo a queda de tensão directa é da ordem de 1,2 V (8).

Por conseguinte, a tensão teórica na saída do transformador à plena carga deverá ser:

$$V_{o_{transf}} = V_{R16} + V_{D1} + V_o \Leftrightarrow V_{o_{transf}} = 1,68 + 1,2 + 48 \Leftrightarrow V_{o_{transf}} = 50,88 V$$

Sendo assim:

Tabela 1- Dados a ter em consideração para o dimensionamento do transformador.

$V_{IN_{Min}} = 5,4 V$	$V_{O_{transf}} = 50,88 V$
$V_{IN_{Max}} = 80 V$	$I_o = 21 A$

Com estes dados usando o software PowerEsim (disponível em: <http://www.poweresim.com/>), escolheu-se o transformador, de maneira a obter-se uma solução disponível no mercado.

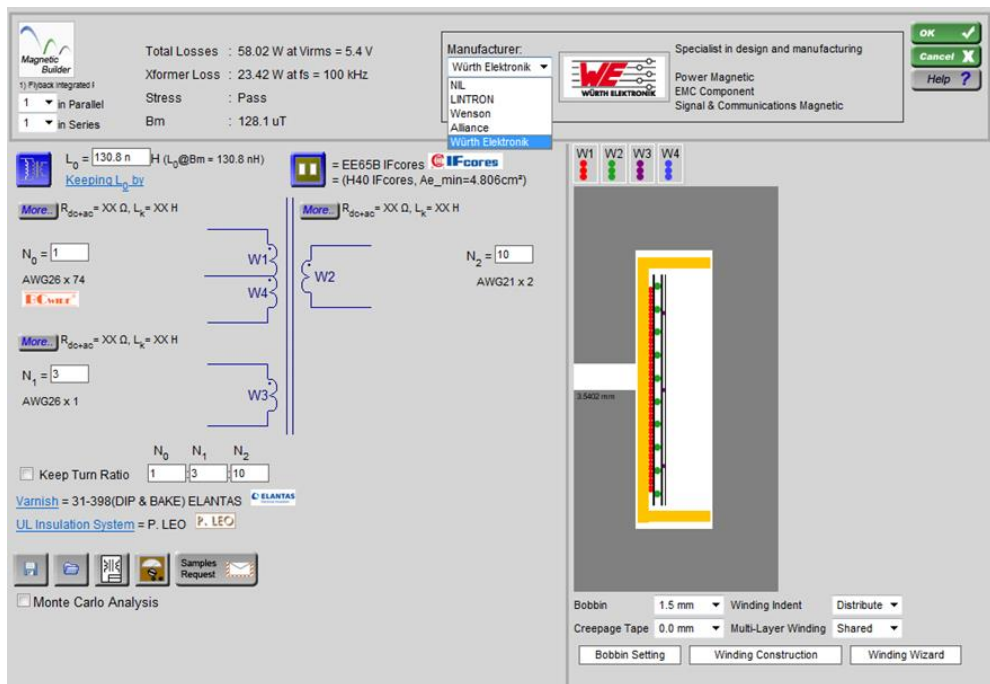


Figura 3 - Painel relativo ao dimensionamento do transformador usando o software PowerEsim.

A utilização deste software permite evitar o dimensionamento manual do transformador, embora este também tenha sido feito, confirmando os resultados obtidos com o uso deste software. O transformador que foi recomendado pelo software (EE65B), apresenta então as seguintes características:

- Número de espiras do enrolamento primário: 1; Número de espiras do enrolamento secundário: 10.
- Material do núcleo: Ferrite ($B_m = 128,1 \mu\text{T}$).
- Perdas totais: 58,08 W @ $V_i = 5,4 \text{ V}$.

Dimensionamento da resistência R_9

Na página 2 do manual do Max 668 é fornecido o valor máximo absoluto do parâmetro da tensão entre CS+ e GND, que se situa entre -0,3 V e 6 V. Também nessa folha, da tabela de características eléctricas, se tem como corrente de entrada em CS+ o valor máximo e típico respectivamente de 1 e 0,2 μA (9).

Consultada a aplicação da folha 17, figura 7 com a resistência sensor de 0,1 Ω estima-se que o respectivo valor de tensão seja de 40 mV. Respeitando esta ordem de grandeza e admitindo que a corrente de emissor do optoacoplador se possa aproximar dos 15 mA, atribui-se à resistência sensora de R_9 o valor próximo 2,7 Ω , a fim de respeitar a tensão atrás referida entre CS+ e GND.

Dimensionamento da resistência R_{16}

Nas características do optoacoplador, pode ver-se que o limite máximo ideal de tensão de alimentação é 1,6 V (10). Usando uma resistência de valor 0,08 Ω ou próximo, com a carga máxima tem-se uma tensão disponível de:

$$0,08 \Omega \times 21 A = 1,68 V$$

Este valor de tensão teórico será afinado no trimer (R_{17}) para o valor real da aplicação do MOC211 e da resistência R_9 por forma a identificar a máxima corrente (21 A).

A potência da resistência foi dimensionada, com a corrente máxima que a percorre, ou seja aproximadamente igual a 36 W.

Das diferentes resistências nominais existentes comercialmente, optou-se por 4 resistências de 10 W em paralelo de 0,33 Ω .

Ganho do Amplificador Diferencial

O amplificador diferencial teve como objectivo permitir a leitura e o acondicionamento da tensão de saída.

A figura 4 mostra o amplificador diferencial, enquanto circuito subtrator.

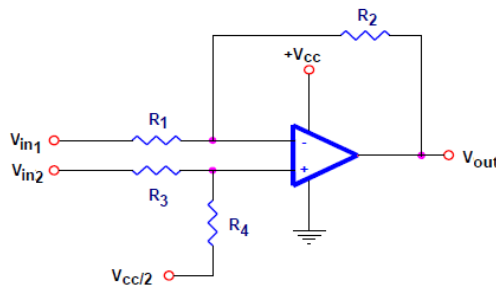


Figura 4 - Circuito subtrator.

Relação teórica neste circuito:

$$R_1 = R_3 \text{ e } R_2 = R_4$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{in2} - V_{in1})$$

No circuito projectado:

$$R_{14} = R_{15} \text{ e } R_{12} = R_{13}$$

$$V_{out} = \frac{R_{12}}{R_{14}} (V_{in2} - V_{in1}) \Leftrightarrow 5 = \frac{R_{12}}{R_{14}} (48 - 0) \Leftrightarrow R_{14} = 9,6 R_{12}$$

Considerando $R_{14} = R_{15} = 10 \text{ K}\Omega$, então $R_{12} = R_{13} = 97 \text{ K}\Omega$

Max668

O Max668 destina-se a implementar a função PWM.

Tem a capacidade de controlar o valor de tensão na saída EXT, através da variação do valor da tensão na entrada FB. Tem ainda a capacidade para controlo do valor da corrente na saída EXT, através da variação do valor da tensão na entrada CS+ (9).

Nesta topologia a característica principal é a existência de um caminho de realimentação de tensão única com uma largura de pulso de modelação, realizada por comparação do sinal de erro de tensão com uma forma de onda de rampa constante (11).

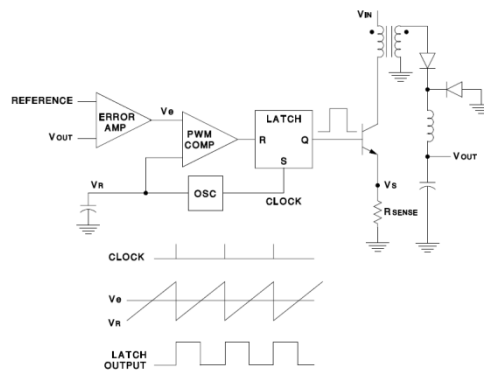


Figura 5 - Modo de Controlo da Tensão do conversor DC/DC.

No modo de controlo de corrente, da combinação do impulso de um relógio com o comparador PWM no trinco é gerada uma largura de impulso. Essa largura de impulso resulta do sinal de erro do valor da tensão de referência com a tensão na saída numa indutância, comparado com a tensão representativa do sensor de corrente (12).

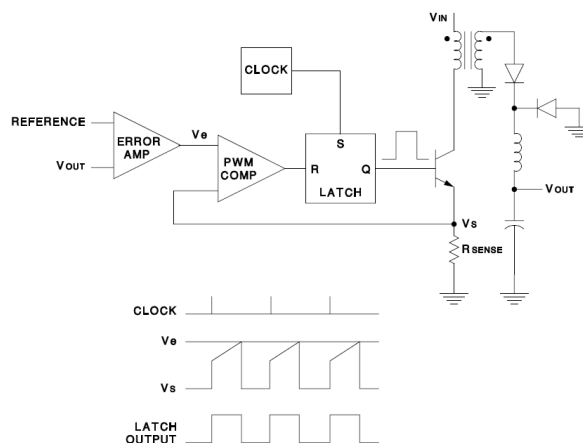


Figura 6 - Modo de Controlo da Corrente no conversor DC/DC.

Verifica-se desta análise que o controlo de corrente engloba em si, também o controlo de tensão (Vout permite o controlo de tensão e Vs o controlo de corrente).

Conclusão

Pelo exposto anteriormente, conclui-se que recorrendo à tecnologia “Flyback Integrated PWM DC-DC” é perfeitamente possível dimensionar e pensar em construir um conversor DC-DC capaz de compatibilizar equipamentos de diferentes fabricantes com diversas tensões de funcionamento (o apresentado anteriormente aceita qualquer tensão de 5,4 V a 80 V). Como estas conversões permitem o controlo total de tensão e corrente na sua saída são indicados para a gestão energética na rede.

Feito este estudo é possível passar-se à fase de simulação computacional em ambiente Matlab/Simulink, bem como aos testes práticos de funcionamento e ajuste do conversor. Posteriormente poderá ser implementado todo o sistema, tal como foi descrito anteriormente e poderão ser realizadas análises económicas do mercado da energia, bem como a investigação dos impactos que este tipo de sistemas pode causar no diagrama de carga da rede.

Foi assim dado um passo importante para se alcançar a interligação e controlo dos equipamentos DC de diferentes fabricantes, passando a ser possível a gestão energética da rede DC, bem como de todo o sistema.

Referências

- (1) “Technology and Applied R&D Needs for Electrical Energy Storage” Resource Document for the Workshop on Basic Research Needs for Electrical Energy Storage, Office of Energy (DOE), (2007).
- (2) Ito, Y. ; Yang, Z.; Akagi, H.: “A Control Method for Small-Scale DC Power Systems Including Distributed Generators” Electrical Engineering in Japan, Vol. 167 n° 2 (2009), pp. 86-93.
- (3) Mantovanelli, P.; Barbi, I.: “A New Current-Fed, Isolated PWM DC-DC Converter” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11 n° 3 (1996), ISSN 0885-8994, pp. 431-438.
- (4) Ribeiro, P. F.; Johnson, B.K.; Crow, M. L.; Arsoy, A; Liu, Y.: “Energy Storage Systems for Advanced Power Application” Proceedings of the IEEE, Vol 89 n°12 (2001), ISSN 0018-019/01, pp. 1744-1756.
- (5) Altowati, A.; Zener, K.; Koivo, H.: “Modeling and Control Design of Paralleled DC-DC Switching Converters” International Conference on Communication, Computer and Power, ISSN 1813-419X, pp. 231-236.
- (6) R. A. Mack. Demystifying Switching Power Supplies, Elsevier, Inc. ISBN 0-7506-7445-8, 2005.
- (7) “LT3012, 250 mA, 4 V to 80 V, Low Dropout, Micropower Linear Regulator” Linear Technology Corporation, Mipitas, (2005).
- (8) “30CTH03” International Rectifier, Bulletin PD-20770 rev B, (2006). [Online]. Available: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/30cth03.pdf>
- (9) “Max668, Max669, 1,8 V to 28 V Input, PWM Step-Up Controllers in µMax” Maxim, Sunnyvale, (2002). [Online]. Available: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX668-MAX669.pdf>
- (10) “Small Outline Optoisolators, MOC211, MOC212, MOC213” Fairchild Semiconductor, (2000). [Online]. Available: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/MOC211-M.pdf>

(11) Mammano, R.: “Switching Power Supply Topology, Voltage Mode Vs. Current Mode”
Unitrode Corporation, Design Note 62, (1994).

(12) L. Arnedo: “System Level Black-Box Models for DC-DC Converters”, PhD Thesis, Virginia
Polytechnic Institute and State University, Blacksbug, Virginia, USA, Sept. 2008.