



https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2020

## Estudo de um equalizador de tensão empregando o conversor Forward operando em condução descontínua

# Study of a voltage equalizer base on Forward converter operating in discontinuous conduction mode

## **RESUMO**

Este artigo tem o objetivo de estudar um equalizador de tensão para baterias em série, baseado no conversor CC-CC isolado Forward, operando no modo de condução descontínuo (MCD). O artigo apresenta a análise de operação do conversor, como também resultados de simulação numérica para comprovar a operação do conversor Forward como equalizador de tensão. Nesta aplicação, o conversor irá operar em malha aberta, ou seja, com uma razão cíclica fixa e imposta. A equalização de tensão ocorrerá por uma característica natural do conversor em encontrar um ponto de operação estável. O auto balanço das tensões de saída do conversor levará a tensões de saída exatamente iguais se os secundários forem perfeitamente simétricos. Na prática, diferenças paramétricas, como no número de espiras, podem levar a tensões de saída ligeiramente diferentes, sendo que se tal diferença não comprometa a operação como equalizador de tensão, este mecanismo de controle é suficiente.

#### PALAVRAS-CHAVE: Baterias de lítio, Equalizador de tensão, Conversor Forward, MCD.

#### ABSTRACT

This paper aims to study a voltage equalizer for batteries connected in series, based on the isolated dc-dc Forward converter, operating in discontinuous conduction mode (DCM). The paper presents the analysis of operation of the converter, as well as results of numerical simulation to prove the operation of the Forward converter as a voltage equalizer. In this application, the converter will operate in open loop, that is, with a fixed and imposed duty cycle. Voltage equalization will occur due to the natural characteristic of the converter in finding a stable operating point. The self-balancing of the converter's output voltages will lead to exactly equal output voltages if the secondary sides are perfectly symmetrical. In practice, parametric differences, such as in the number of turns, can lead to slightly different output voltages, and if this difference does not compromise the operation as a voltage equalizer, this control mechanism is sufficient.

**KEYWORDS:** Lithium batteries, Voltage equalizer, Forward converter, DCM.





## Lucas Alessi Madalozo

lucas.madalozo@hotmail.com Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Carlos Henrique Illa Font illafont@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020. Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.







## INTRODUÇÃO

As baterias de lítio apresentam vantagens significativas, como maior densidade de potência, maior densidade de energia, excelente retenção de carga, desempenho muito bom em baixas temperaturas, elevado número de ciclos de carga e elevada profundidade de descarga. Como desvantagens, têm-se: maior custo, carregador de bateria mais complexo, necessidade de monitoramento individual de cada célula e necessidade de sistema de equalização de tensão (LINDEN, 2010).

Quando associadas em série, estas podem ser carregadas com diferentes níveis de carga mesmo que a corrente que circule por elas, proveniente do carregador de baterias, seja de mesma intensidade. Dessa forma, as baterias podem apresentar níveis de tensões diferentes.

Esta diferença de carga e, consequentemente, de tensão é oriunda das variações paramétricas do processo construtivo de cada bateria (por exemplo, do valor da resistência interna), do gradiente de temperatura nos processos de carga e de descarga e do envelhecimento (degradação). É importante destacar que várias tecnologias de baterias apresentam este comportamento, contudo, é mais crítico nas baterias de lítio.

Pode-se encontrar diversos métodos para equalizar a tensão nas baterias, divididos em métodos passivos e métodos ativos. Os métodos passivos são baseados na conexão de uma resistência em paralelo com cada bateria. A desvantagem deste método é que ele é muito dissipativo, gera calor e diminui o rendimento de todo o sistema. Já os métodos ativos empregam elementos semicondutores e são classificados em dissipativos e não dissipativos. Os métodos ativos não dissipativos são os mais empregados em aplicações de potências mais elevadas. Eles têm as vantagens de não possuírem resistores para dissipação da energia elétrica proveniente do desequilíbrio, possuir transistores que operam como interruptores e poder equilibrar as células tanto na carga como na descarga da bateria (KETZER, 2013; WHITE, 2013; RAMAN, 2014; RUI, 2015).

Este artigo apresenta o estudo de um equalizador de tensão para baterias em série, baseado no conversor CC-CC isolado Forward, operando no modo de condução descontínuo (MCD).

#### ANÁLISE DO CONVERSOR FORWARD COMO EQUALIZADOR DE TENSÃO

Nesta aplicação, o conversor Forward irá operar em malha aberta, ou seja, com uma razão cíclica fixa e imposta. A equalização de tensão ocorrerá por uma característica natural do conversor em encontrar um ponto de operação estável.

Para que exista o auto equilíbrio ou auto balanço, o conversor precisa operar no MCD. Assim, ao se observar a característica de saída deste conversor em MCD, verifica-se que existe um decaimento da tensão com o aumento da corrente, de forma natural. Isso confere ao conversor a habilidade de encontrar um novo ponto de operação, sem alterar a razão cíclica (PAGLIOSA, 2018).

Para estudar o conversor Forward como equalizador de tensão, utiliza-se a representação mostrada na Figura 1, para duas baterias conectadas em série. A fonte de tensão V<sub>in</sub> representa a tensão equivalente de um carregador de bateria,





enquanto as baterias são representadas simplificadamente pelas fontes V<sub>bat1</sub> e V<sub>bat2</sub>. O transformador é representado pelo símbolo de um transformador ideal com um enrolamento primário, dois enrolamentos secundários e um enrolamento de desmagnetização, conectado ao primário como habitualmente é realizado para o conversor Forward.

Na operação como equalizador de tensão, tem-se dois períodos de operação distintos, como representado na Figura 2. No primeiro período, denominado de desbalanceado, as tensões nas baterias estão desbalanceadas e o conversor Forward atuará no sentido de realizar o equilíbrio destas tensões (período balanceado). Destaca-se que o conversor Forward deve operar em MCD tanto no período desbalanceado quanto no período balanceado.

Figura 1 – Conversor CC-CC Forward aplicado na equalização de tensão de duas baterias



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 2 - Tensões de saída (nas baterias) para os períodos balanceado e desbalanceado



Fonte: Autoria própria (2020).

No modo descontínuo de condução, o conversor Forward pode apresentar quatro ou cinco etapas de operação (caso se considere um transformador ideal, o conversor Forward irá apresentar três ou quatro etapas de operação).

As etapas de operação estão apresentadas a partir da Figura 3, sendo que para o período desbalanceado, o conversor terá cinco etapas de operação (etapas 1, 2, 3, 4 e 5) e para o período balanceado, o conversor terá quatro etapas de operação (etapas 1, 2, 3 e 5). A descrição das etapas é dada por:

<u>Primeira etapa (Figura 3 a)):</u> esta etapa de operação tem início quando o interruptor S entra em condução. Os diodos de desmagnetização e de roda-livre de ambos os secundários se encontram bloqueados e os diodos retificadores entram em condução. A fonte de tensão V<sub>in</sub> transfere energia para a indutância magnetizante do transformador, para os indutores de saída de cada secundário e para as baterias. As correntes nos indutores de saída crescem em rampa, desde zero até um valor máximo.





<u>Segunda etapa (Figura 3 b))</u>: esta etapa inicia quando o interruptor S é comandado a bloquear. No primário, o diodo de desmagnetização entra em condução e a energia previamente armazenada na indutância magnetizante é transferida para a fonte Vin. No secundário, os diodos retificadores bloqueiam e os diodos de roda livre entram em condução, transferindo a energia previamente armazenada nos indutores de saída para as baterias. As correntes nos indutores de saída decrescem em rampa. Ao se considerar a condição de baterias desbalanceadas, onde a tensão de V<sub>bat2</sub> é menor que V<sub>bat1</sub>, por exemplo, a corrente no diodo D<sub>rl-2</sub> terá maior intensidade, transferindo mais energia para esta bateria e, aumentando a tensão de saída V<sub>bat2</sub>.

<u>Terceira etapa (Figura 3 c))</u>: esta etapa de operação inicia quando a corrente na indutância magnetizante chega a zero, bloqueando o diodo de desmagnetização  $D_d$ . No secundário, os diodos de roda livre permanecem em condução e as correntes nos indutores de saída continuam decrescendo em rampa. Quando a corrente em um ou em ambos os indutores de saída chegar a zero, esta etapa é finalizada.

<u>Quarta etapa (Figura 3 d))</u>: quando a corrente no indutor de saída  $L_1$  chegar a zero, o diodo de roda livre  $D_{rl-1}$  bloqueia e esta etapa tem início. O indutor  $L_2$  continua transferindo energia para a bateria com tensão  $V_{bat2}$ , elevando seu nível de tensão.

<u>Quinta etapa (Figura 3 e)):</u> a última etapa, geralmente denominada de etapa descontínua, inicia-se com o bloqueio dos dois diodos de roda-livre (para o caso balanceado) ou com o bloqueio do diodo D<sub>rl-2</sub> (para o caso desbalanceado). As indutâncias de saída não possuem energia armazenada, assim, não havendo mais nenhuma transferência de energia. Todos os semicondutores estão bloqueados, indicando que todas as correntes nos elementos do conversor Forward são iguais a zero. Quando o interruptor S é mandado conduzir novamente, retorna-se à primeira etapa de operação e inicia-se um novo período de comutação.

Figura 3 – Etapas de operação: a) primeira etapa de operação; b) segunda etapa de operação; c) terceira etapa de operação; d) quarta etapa de operação e e) quinta etapa de operação



Fonte: Autoria própria (2020).





## **RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Um projeto foi realizado considerando-se as especificações de projeto apresentadas na Tabela 1. O projeto contempla a associação em série de duas baterias de 12 V e admitiu-se que poderá haver um desequilíbrio máximo de 2 V, ou seja, a condição de pior caso é uma bateria com tensão de 14 V e, consequentemente, a outra com tensão de 10 V.

Na Tabela 2, encontram-se os valores dotados e calculados. Para uma relação de transformação unitária, a máxima razão cíclica é igual a 0,412; como a razão cíclica nominal é igual a 0,4, o projeto é factível.

Para realizar a simulação numérica, modelou-se as baterias, simplificadamente, por um capacitor de elevado valor. Desse modo, pode-se simular os desbalanços de tensão a partir das condições iniciais de tensão nesses capacitores.

Especificação	Valor	
Tensão de entrada - E	24 V	
Tensão de saída (na bateria) - $V_{ m o}$	12 V	
Potência de saída - $P_o$	100 W	
Frequência de comutação - f <sub>s</sub>	50 kHz	
Razão cíclica nominal - D	0,4	
Número de saídas - γ	2	
Tensão máxima de desequilíbrio - V $_{\Delta}$	2 V	

Tabela 1 – Especificações de projeto

Fonte: Autoria própria (2020).

#### Tabela 2 - Valores adotados e calculados

Especificação	Valor
Relação de transformação - n	1
Razão cíclica máxima - D <sub>max</sub>	0,412
Indutância dos indutores - L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub>	9,216 μH
Máxima corrente no indutor L <sub>1</sub> - I <sub>L1max</sub>	8,68 A
Máxima corrente no indutor L <sub>2</sub> - I <sub>L2max</sub>	12,15 A

Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 4 apresenta as formas de onda das tensões nas baterias. Observa-se que, inicialmente, as baterias estão com tensões desequilibradas (14 V e 10 V) e que há o equilíbrio de tensão com o passar do tempo (ambas com 12 V).

Na Figura 5 tem-se as formas de onda das correntes nos indutores para o período desbalanceado. O conversor opera em MCD, sendo o período de descontinuidade menor para a bateria que tem menor tensão. Na Figura 6, apresenta-se novamente a corrente nos indutores, porém, para o período balanceado. As correntes nos indutores são iguais e apresentam a descontinuidade de corrente característica da operação do conversor em MCD.





Figura 4 – Formas de onda das tensões nas baterias



Fonte: Autoria própria (2020).





Fonte: Autoria própria (2020).





Fonte: Autoria própria (2020).





As formas de onda da tensão e da corrente no transistor são apresentadas na Figura 7. Os valores máximos de tensão e de corrente neste componente não se alteram durante o período desbalanceado.





Fonte: Autoria própria (2020).

## **CONCLUSÃO**

Este artigo apresentou o estudo de um conversor Forward aplicado como equalizador de tensão de baterias conectadas em série. O conversor foi projetado para operar no modo de condução descontínuo, para que a equalização de tensão ocorra em malha aberta, ou seja, para que não precise ser inserido um sistema de controle dedicado a esta necessidade.

Esta topologia mostrou-se adequada para futuras comparações com conversores de energia operando no mesmo modo, para que se possa comparar tanto suas vantagens e desvantagens quanto seu tempo de equalização, sua eficiência e seu custou de implementação.

Como continuidade da pesquisa, será implementado um protótipo de laboratório para realizar os ensaios experimentais. Também será realizada a comparação de desempenho com um conversor Flyback, projetado e construído com as mesmas especificações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo apoio neste projeto através da bolsa de Iniciação Científica concedida ao acadêmico Lucas Alessi Madalozo e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para realizar esta pesquisa.





## REFERÊNCIAS

CHATZINIKOLAOU, E.; ROGERS, D. J. A Comparison of grid-connected battery energy storage system designs. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 32, no. 9, p. 6913 - 6923, Sep. 2017.

COSTA, G. D.; ILLA FONT, C. H.; BARBI, I. Comprehensive analysis of a flyback converter for voltage equalization of battery strings. In: 13th IEEE International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2018. **Proceedings**. 2018, pp. 1200 – 1207.

DEKKA, A.; GHAFFARI, R.; VENKATESH, B.; WU, B. A survey on energy storage technologies in power systems. In: 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). **Proceedings**. 2015, p. 105 - 111.

EICHI, H.-R.; OJHA, U.; BARONTI, F.; CHOW, M.-Y. Battery management system: an overview of its application in the smart grid and electric vehicles. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 7, no. 2, p. 4 -16, Jun 2013.

HORIBA, T. Lithium-ion battery systems. **Proceedings of the IEEE**, vol. 102, no. 6, p. 939 - 950, Jun. 2014.

ILLA FONT, C. H. **Desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia para baterias de lítio com equalização de tensão**. Relatório de Pós-Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2019.

JUNG, C. Power up with 800-V systems: the benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles. **IEEE Electrification Magazine**, vol. 5, no. 1, p. 53 - 58, Mar. 2017.

KETZER, M. B.; LIMA, A. M. N.; OLIVEIRA, A. C.; JACOBINA, C. B. Evaluating circuit topologies for battery charge equalization. In: IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. **Proceedings**. 2013, p. 743 – 748.

KIMBALL, J.W.; KUHN, B.T.; KREIN, P.T. Increased performance of battery packs by active equalization. In: 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. **Proceedings**. 2007, p. 323 – 327.

LAWDER, M. T.; SUTHAR, B.; NORTHROP, P. W. C.; DE, S.; et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications. **Proceedings of the IEEE**, vol. 102, no. 6, p. 1014 - 1030, Jun 2014.

LINDEN, D.; REDDY, T. B., **Linden's handbook of batteries**. New York: McGraw-Hill Professional, 4 ed., 2010.





LINLIN, L.; XU, Z.; ZHUJINSHENG; JING, X.; et al. Research on dynamic equalization for lithium battery management system. In: 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). **Proceedings**. 2017, p. 6884 - 6888.

PAGLIOSA, M. A. **Conexão série de conversores modulares: metodologia para análise do auto-equilíbrio das tensões e estudo do conversor Flyback a duas chaves**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2018.

PAGLIOSA, M. A.; FAUST, R. G.; LAZZARIN, T. B.; BARBI, I. Input-series and outputseries connected modular single-switch flyback converter operating in the discontinuous conduction mode, **IET Power Electronics**, vol. 9, pp. 1962-1970, 2016.

RAMAN, S. R.; XUE, X. D.; CHENG, K. W. E. Review of charge equalization schemes for li-ion battery and super-capacitor energy storage systems. In: 2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications. **Proceedings**. 2014, p. 1 - 6.

RUI, L.; LIZHI, W.; XUELI, H.; QIANG, D.; JIE, Z. A review of equalization topologies for lithium-ion battery packs. In: 2015 34th Chinese Control Conference (CCC). **Proceedings**. 2015, p. 7922 - 7927.

SABIHUDDIN S.; KIPRAKIS A. E.; MUELLER, M. A numerical and graphical review of energy storage technologies. **Energies**, vol. 8, no. 1, p. 172 -216, 2015.

WANG, G.; KONSTANTINOU, G.; TOWNSEND, C. D.; POU, J.; et al. A review of power electronics for grid connection of utility-scale battery energy storage systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 7, no. 4, p. 1778 - 1790, Oct. 2016.

WILLIAMSON, S. S.; RATHORE, A. K.; MUSAVI, F. Industrial electronics for electric transportation: current state-of-the-art and future challenges. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 62, no. 5, p. 3021 - 3032, May 2015.

WHITE, D. A.; ADAMS, L. Safety & reliability capabilities of lithium-ion battery systems for subsea applications that use autonomous lithium-ion battery modules. In: 2013 OCEANS - San Diego. **Proceedings**. 2013, p. 1 -9.