

АЛГОРИТЪМ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ДВУФАЗЕН СИЛОВ МНОГОИЗВОДЕН ИМПУЛСЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ ЗА ПОСТОЯННО НАПРЕЖЕНИЕ С ДОПЪЛНИТЕЛНА ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА

Евгени Малев¹

¹Технически университет -Варна

ALGORITHM OF CONTROL OF TWO-PHASE INTERLEAVED DC - DC CONVERTER WITH ADDITIONAL MEASURING SYSTEM

Evgeni Malev¹

¹ Technical University of Varna

Abstract

The present material discusses the topology of Two-phase Interleaved DC – DC converter and its applicability in electric transport systems. In the material, various modifications of the topology are considered. The creation of a control algorithm in which an additional system for measuring the parameters of the battery is used is also discussed.

Keywords: Interleaved DC – DC converter, MATLAB, PIC microcontroller, Li-ion battery

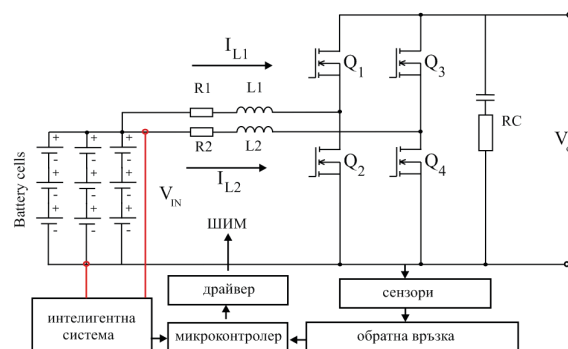
ВЪВЕДЕНИЕ

Силовите електронни преобразуватели на електрическа енергия, се основно преобразуващо звено на енергия в съвременните възобновяеми енергийни източници, електрическият транспорт, промишлените кранове, автоматизираните системи и други. Характерно за тях е ефективността при преобразуването на електрическа енергия. В съвременната силова електроника, развитието на тази група силови схеми, е насочено към хибридни преобразуватели и силови ключове с нови подобрени характеристики. Подобни хибридни преобразуватели за единица време могат да преобразуват няколко нива на напрежение от два или повече източника от различен тип (батерия, суперкондензатор, шина за постоянно напрежение и други).

ТОПОЛОГИЯ НА СИЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С РЕДУВАЩИ СЕ ЗВЕНА

Силовите електронни преобразуватели с редуващи се звена е комплексна топология,

създадена от свързване на две или повече паралелни топологии преобразуватели (повишаващ, понижаваш и др.). Тази топология се характеризира с минимални стойности на напрежението на входа, малки загуби от превключване на силовите ключове, висока ефективност. В сравнение с основната конвенционална топология, от която е изграден, неговите преимущества още са свързани с намаляване на размера на устройството и по-висока надеждност [1].



Фиг. 1. Принципна схема на силов преобразувател с редуващи се звена

Алгоритъмът за един силов преобразувател се създава на базата на някакво управление на избрана топология силов електронен преобразувател. В случая се използва Двустепенен силов преобразувател с редуващи се звена. Дву и четири степенните преобразуватели от тази топология, се използват широко в архитектурата на хибридни и електрически автомобили [2]. Освен някакъв кратен брой звена, на базата на този преобразувател, може да бъде създаден N - кратен силов преобразувател, за по-високи мощности и мощности изискващи различни нива на преобразуване. На фигура 1, е показана схема на двустепенен преобразувател с редуващи се звена. Електрическата енергия, абсорбирана от индукторите може да бъде изразена чрез формулата:

$$W_L = U_{IN} \times I_L \times D \times T_s (1)$$

Където U_{in} е входното напрежение, I_L е индукторния ток T_s – времето за превключване.

Промяната на индукторния ток се отразява върху ефективността на управлението. При различни управляващи системи плъзгащо управление, хистерезисно управление и управление базирано на изкуствения интелект, индукторния ток е основна компонента в управляващия процес и неговата промяна се определя от формулата:

$$\Delta I_L = (D \times U_{IN}) / (L \times f_{sw}) (2)$$

където, D е работния цикъл, U_{in} е входното напрежение, L – стойността на индуктора, f_{sw} е честотата на превключване [3].

Индуктора на подобен преобразувател, се избира от следната формула:

$$L_1 = (D \times U_{IN}) / (\Delta I_L \times N \times f_{sw}) (3)$$

Кондензатора на преобразувателя, се избира от следната формула:

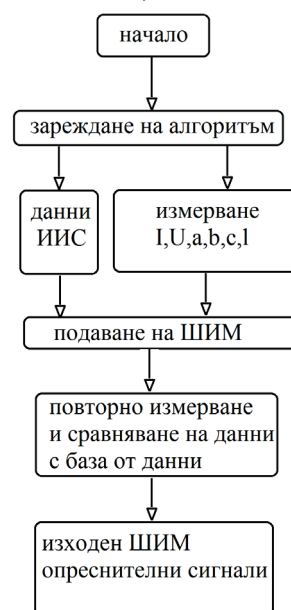
$$C_o = (D \times I_o) / (U_o \times N \times f_{sw}) (4)$$

където I_o е изходен ток, а U_o е изходно напрежение. Двупосочен силов преобразувател с редуващи се звена с приложение в електрически превозни средства, може да играе ролята на умножител или делител на напрежение между батерията и задвижващия блок. В зависимост от това дали работи в повишаващ или понижаващ режим, устройството работи с високо ниво на преобразуване. Такива високи нива на преоб-

зуване на напрежение, съществуват в електротранспорта (разлика между стойностите на напреженията на батерията и шината за постоянен напрежение), хибридни фотоволтаични системи и други. Преобразуването се извършва при еднаква честота на превключване и фазово изместване [4][5].

АЛГОРИТЪМ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Проектирането на алгоритъм е сложен процес, при който чрез задаване на машинен код, се задават управляващи сигнали към силовата схема. Основно този алгоритъм трябва да бъде съобразен с параметрите на преобразувателя, товара, параметрите на силовите ключове и тяхната синхронизация с останалите компоненти[6]. Алгоритъма на преобразувателя, оказва влияние на ефективността на силовото устройство и работните цикли да съвпадат с честотата на ШИМ сигналите. На фигура 1 е показана блокова схема на предложения алгоритъм за управление на двуфазен преобразувател. Алгоритъмът е проектиран за приложение в двуфазен преплетен силов преобразувател съставен от няколко блока: 1) микропроцесорен управляващ, обратна връзка – съставена от операционни усилватели 3) измервателна система за входно-изходни мощности параметри на преобразувателя 4) допълнителна интелигентна – измервателна система, която да отразява параметрите на батерията (основни и допълнителни).



Фиг. 2. Блок схема на алгоритъм за управление на силовия преобразувател

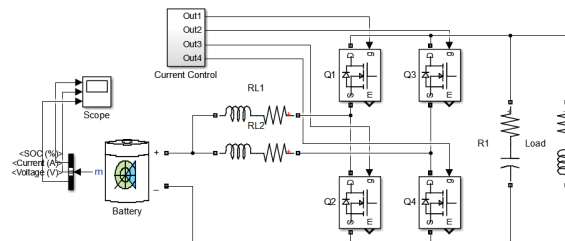
При проектирането на подобен алгоритъм, е важно да се синхронизира работата между измервателните системи в обратната връзка и от там на сигналите към микропроцесорната система. Това може да бъде постигнато чрез подходящо инициализиране на входните канали на микропроцесорното устройство. Дефинирането на векторите от входове и напрежение от аналогово - цифрови преобразуватели от микропроцесорното устройство се извършва от основното тяло, което дефинира главните променливи в алгоритъма: `unsigned int dacVout = 0x00FF;` // дефиниране на променливи измервани от операционните усилватели. Всеки сигнал, преминаващ от един тактов период към друг, ще има проблеми с настройката и задържането на импулса по време на работата на устройството. За да се намали влиянието на т.нар. “фалшиви” времена на превключване, към управлението може да бъде интегриран, допълнителен синхронизатор, който поставя граници на работната честота [8].

Допълнителните тактови честоти се получават, ако към преобразувателя е добавено допълнително микропроцесорно устройство или е интегриран в друга компютърна система [9][10]. В случая синхронизирането е нужно, понеже преобразувателя и интелигентната система, се управляват от две отделни микропроцесорни системи. Като цяло в едно подобна система, с две или повече микропроцесорни устройства, ако има n асинхронни такта, то при проектирането е нужно да има $n(n-1)$. При използване на примерни синхронизиращи тактове `uClk` и `vClk` е нужно да се дефинират синхронизиращите тактове чрез следните променливи `sync_u2v` и `sync_v2u`. Ако управлението се извършва чрез PID микроконтролер, то производната константа на изхода, ще бъде изчислена чрез следното уравнение:

$$V_o = (K_p + s K_d + (K_i/s)) \times E(s) \quad (5)$$

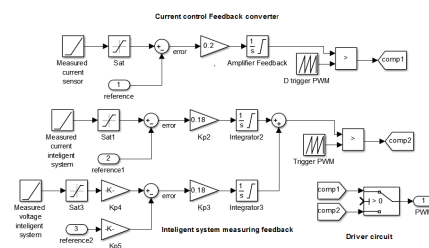
В средата за програмиране Матлаб, е създадена блокова на схема на преобразувателя с редуващите се звена. Представен е преобразувателя, който е паралелна комбинация от два повишаващи се преобразувателя със силови ключове Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . От ниската и високата страна на модела са разположени

батерията (клетка от батерии) и товар Load. Моделът е показан на фигура 3. Интелигентната система е вградена в блока за батерии, тя измерва състоянията на заряд и разряд, терминалното напрежение, разрядния ток и температурата.



Фиг. 3. Модел на силов преобразувател с редуващи се звена

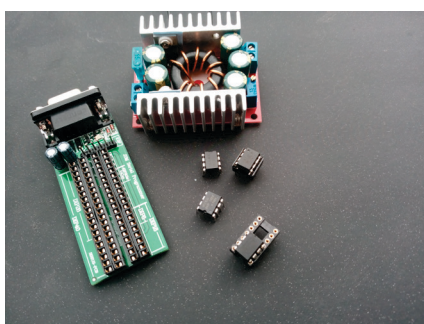
На фигура 4, е представен блоков модел на управление. В него са реализирани блок за управление по ток на двупосочния преобразувател с редуващи се звена. Моделирани са управлението по ток (обратна връзка, данни от токов сензор и неговата референтна стойност, сравняващ операционен усилвател и тригер, формиращ работната ШИМ). Другия блок на системата, са моделирани блоковете за допълнителния блок на измерване за управление – допълнителна измервателна интелигентна система, следяща процесите на заряд и разряд съставена от (сензори на системата за измерване на напрежението и тока, изпраща данни към интелигентната система и управлението на преобразувателя, тригер за формиране на ШИМ). Двата сигнала от обратната връзка от управлението по ток и интелигентната система, се изпращат към сравняващ компаратор.



Фиг. 4. Модел на управлението - обратната връзка и ШИМ задаващия драйвер на силов преобразувател с редуващи се звена

Реализирането на физически прототип на алгоритъма за управление може да реализира чрез микроконтролерно устройство от фамилията PIC [11]. Микроконтролерите от

серията PIC16XXX биха осъществили подходящ трансфер между всички канали на управление: от обратната връзка на силовия преобразувател към изходните данни изпратени и запаметени, които следят процесите за заряд и разряд на батерийната клетка. Основни предимства на микроконтролерното устройство: 32 - битови регистри, 16 - битови канали за пренасяне данните от измерването. Друго изключително важно преимущество на тези микроконтролери е тяхната възможност за комуникация. Микроконтролерите поддържат интерфейсите: Сериен, I2C, и Cricket Bus.



Фиг. 5. Хардуерен ресурс за реализиране на силовия електронен преобразувател (програматор за семейство от PIC микроконтролерно устройство, измерващи операционни усилватели)

Алгоритъмът на управление е основан на управлението по ток, който е входящ за силовия преобразувател. Той се следи и в интегрираната интелигентна система, която е директно свързана с блока за управление на силовия преобразувател [12][13]. Тя също като обратната връзка на преобразувателя следи два параметъра: входния ток на преобразувателя и входното напрежение, а основните измервани параметри от интелигентната система са разрядния ток и терминалното напрежение на батерията. От това следва, че канала следи общо 5 променливи: 2 от управлението по ток и 3 от измервателната система. От една страна това осигурява по прецизен контрол и от това следва по прецизно управление по ток на преобразувателя [14]. Друга полза от тази интелигентна измервателна система, е възможност за увеличаване на прецизността на управление, поради това, че интелигентната система може да измерва и други параметри на батерията (клетката от батерии) като комплекс-

но съпротивление на батерията, променящата се температура по време на работа и проводимостта. Недостатъците на тази допълнителна измервателна система са свързани с допълнителното усложняване на проектирането на цялата система за проектиране и увеличаване на вероятността на грешка от измерване, която може да се изрази чрез следната формула:

$$\varepsilon = V_{\text{ref}} - \alpha V_{\text{out}} \quad (6)$$

Усилването в т.нар. “отворен контур”, може да се изрази чрез следното уравнение:

$$V_{\text{out}}(s) / V_{\text{in}}(s) = (H(s)) / (1 + H(s)G(s)G_1(s)) \quad (7)$$

В таблица са представени параметрите на Преобразувател, за който алгоритъма на управление, може да бъде приложен:

Параметър	Стойност
Входно напрежение [V]	200
Изходно напрежение [V]	400
Честота на превключване [kHz]	20
Максимална стойност на индукторния ток [A]	25
Максимална изходна мощност [kW]	5
Индуктор [μH]	100
Кондензатор [μF]	200

Таблица.1. Основни параметри на силовия преобразувател с редуващи се звена, за който е проектиран алгоритъма

За да се разбере каква ефективност ще има алгоритъма на работа, е нужно да бъде направен математически модел на управлението и преобразувателя. В следващата таблица са показани основните параметри използвани за моделиране на батерията на силовия преобразувател [15].

Таблично представяне на променливи свързани с алгоритъма: коефициент на умножение на измерван ток $k_i = 0.08$; коефициента на измерено напрежение $k_v = 0.21$; коефициент температура $k_t = 0.25$; Компоненти от Цифрово-аналоговия преобразувател $0,02722V_p$; $0,0371I_p$; времена на прекъсване между измерванията на двете системи – $2\mu s$; изчислен наклон за смяна на наклона на батерията - $\delta C_{ABT} = 0,01203 \text{ min}^{-1}$

Параметър	Стойност
Размер Li-ion	30kWh
Терминално напрежение	200V
Разрязан ток	25A
Капацитет	200Ah
Пиков ток на разряд	200A

I_{in}	I_{disch}	G_{in}	G_{disch}
12.2	12.18	15.1	15.1
12.9	12.87	16.1	16.1
15.2	15.17	16.3	16.3
17.5	17.48	17.1	17.102
19	18.98	17.5	17.5
21	20.97	17.9	17.92

Таблици.2 и 3 . Основни параметри на клетката от батерии за силовия преобразувател с редуващи се звена и Управляващи константи от обратната връзка на управлението по ток (I_{in} – измерван ток на батерията G_{in} - коефициент на усилване на обатната връзка) и интелигентната система (I_{in} – измерван ток на батерията G_{in} - коефициент на усилване на интелигентната система)

Таблично представяне на константите обработвани от обратната връзка, заедно с интелигентната система. В повишаващ или понижаващ режим, основния вектор на алгоритъма ще има следния вид: $x = [i_L V_o V_{in}]$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия материал е предложен алгоритъм за силов електронен преобразувател с редуващи се звена. Посочени са основните стъпки при проектирането, основните му функционални звена и допълнителна измерваща система. Съставена е блокова схема на математически модел на представения преобразувателя и управлението му в средата за програмиране – Матлаб. Направен е анализ на съставянето на алгоритъма и формирането на основните му функционални звена.

REFERENCE

[1] D.J.S. Newlin, R. Ramalakshmi, S. Rajasekaran “A performance comparison of interleaved boost converter and conventional boost converter for renewable energy application” Green High Performance Computing (ICGHPC), 2013 IEEE
[2] Juan Pablo Villegas Ceballos, Sergio Ignacio Serna-Garcés, Daniel González Montoya, Carlos Andrés Ramos-Paja, Juan David Bastidas-

Rodríguez “Charger/discharger DC/DC converter with interleaved configuration for DC-bus regulation and battery protection” Energy Science and Engineering Volume 8, Issue 2 February 2020 Pages 530-543
[3] Texas Instruments AN-1820 LM5032 Interleaved Boost Converter
[4] Simon Bramble, Field Application Engineer, and Paul Holden, Member of Technical Staff “Digital Feedback Controls Supply Voltage Accurately”
[5] Ching-Ming Lai, Yuan- Chih Lin, Dasheng Lee “Study and Implementation of a Two-Phase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter for Vehicle and DC-Microgrid Systems”
[6] Xiaogang Wu, Boyang Yu, Jiuyu Du Wenwen Shi “Research on Four-Phase Interleaved Step-Up DC/DC 3 Converter for Photovoltaic Energy Storage System”
[7] A. Thiyagarajan, S. G. Praveen Kumar and A. Nandini, "Analysis and comparison of conventional and interleaved DC/DC boost converter," *Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology - ICCTET 2014*, 2014, pp. 198-205, doi: 10.1109/ICCTET.2014.6966287.
[8] De Melo, R.R., Tofoli, F.L., Daher, S. et al. Interleaved bidirectional DC–DC converter for electric vehicle applications based on multiple energy storage devices. *Electr Eng* 102, 2011–2023 (2021)
[9] Clifford E. Cummings “Synthesis and Scripting Techniques for Designing Multi-Asynchronous Clock Designs” Sunburst Design, Inc.
[10] Kavitha M., Sivachidambaranathan V. “Comparison of Different Control Techniques for Interleaved DC-DC Converter ” *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* Vol. 9, No. 2, June 2018, pp. 641~647 ISSN: 2088-8694
[11] <https://pic-microcontroller.com/designing-a-pid-motor-controller-using-pic16f876/>
[12] Sajib Chakraborty S., Vu H., Mahedi Hasan M., Tran D., El Baghdadi M. and Hegazy O. “DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends” *Energies* 2019, 12, 1569
[13] Christophe Basso “Dc-dc converters feedback and control” On-shemi
[14] CTS-F614100 <https://www.alibaba.com/Electric-Car-Battery-Pack>
[15] APPLICATION NOTE | AN:211 “Constant Current Control for DC-DC Converters” Vicon Power Bench