

Двупосочни силови преобразуватели за управление на енергийни потоци в електрически транспортни средства (ЕТС)

Гергана Вачева, Николай Хинов

Технически Университет София, Факултет по Електроника, София 1000, България, бул. „Кл. Охридски“ 8, бл. 1, e-mail: gergana_vacheva@tu-sofia.bg, hinov@tu-sofia.bg

Резюме. В работата са разгледани различни схемни варианти на преобразуватели на електрическа енергия с приложение в електротранспортни средства. Това са различни топологии на двупосочни преобразуватели за заряд и разряд на елементи за съхранение на енергията. Представени са два типа - с и без галванично разделяне. Показани са изрази за определяне загубите в схемните елементи на преобразувателите. Направено е сравнение по различни показатели, което е полезно при избора на различни концепции и схеми за реализиране на електротранспортни средства за конкретни нужди и приложения.

Bi-directional power converters for control of energy flux in electrical transport vehicles (Gergana Vacheva, Nikolay Hinov). In the following work are reviewed various schemes of converters of electrical energy with application in the electrically driven vehicles. The schemas represent divers topologies of bi-directional converters for charge and discharge of components meant to store energy. The two following types are represented – with galvanic isolation and without it. Included in the work are presented equations for defining the losses in the conjunct components of the converters. Based on different data indexes is made a comparison that is useful to utilize while choosing various concepts and schemas for the fulfillment of electrically driven vehicles with specific needs and applications.

Увод

Електротранспортните средства (ЕТС) намират все по-широко приложение в индустрията и бита, поради редица техни предимства като: екологичност, ниска цена на километър пробег, възможност за балансиране на енергоснабдителната мрежа и др. [4,5]. Основните тенденции в тяхното развитие са свързани основно с осигуряването на възможности за обмен на енергия между отделното устройство и захранващата мрежа, осигуряването на ускорен заряд и рекуперация на енергията в режим на спиране. [6,7,8] Тяхното разпространение се ограничава основно от възможностите на елементите за съхранение на енергията – различни видове акумулатори и ултракондензатори. [11, 12]. В настоящата работа е направен преглед на различни типове преобразуватели на електрическа енергия с приложение в ЕТС. Както интерфейс между електромобилите и разпределителната

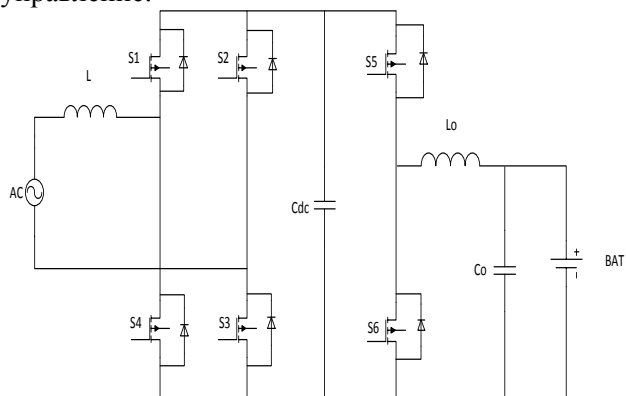
мрежа, двупосочните електронни преобразуватели трябва да притежават някои съществени изисквания, както от страна на електромобила, така и от мрежата. Превозните средства обикновено имат максимално напрежение на батерията между 300 и 400 волта. Мощността на двупосочните преобразуватели варира около 3 kW в режим на заряд. С оглед на напрежителните и токовите пикове и различните изолации, най-често използвани са мостовите схеми. В същото време преобразувателя трябва да бъде с малки размери, по-малко тегло, безопасен и надежден.

Топологии без галванично разделяне

Топологиите без галванично разделяне основно се използват, където напрежението трябва да бъде стъпално понижено или повишено със сравнително малко отношение. Също така те се използват при липсата на изискване за галванично разделяне между входа и изхода на

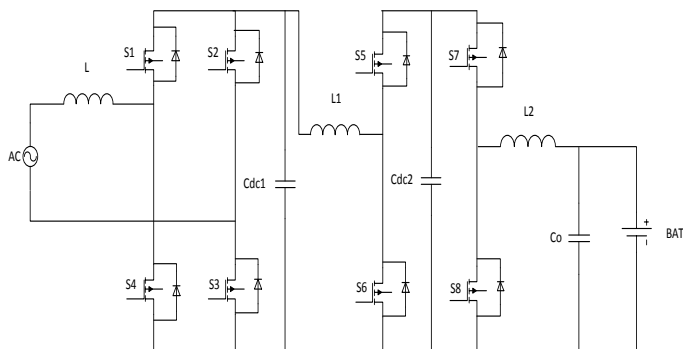
преобразувателя. Те са предназначени за относително малки мощности.

На фигура 1 е показана схемата на еднофазен понижаващ-повишаващ преобразувател с широчинно импулсна модулация. Тази топология използва по-малко полупроводникови елементи и управлението на енергийните потоци се осъществява със сравнително малко превключвания. Работата, без галванична изолация, не гарантира в достатъчна степен надеждността и сигурността на неговото управление.



Фигура 1: Двупосочен понижаващ-повишаващ дс-дс преобразувател

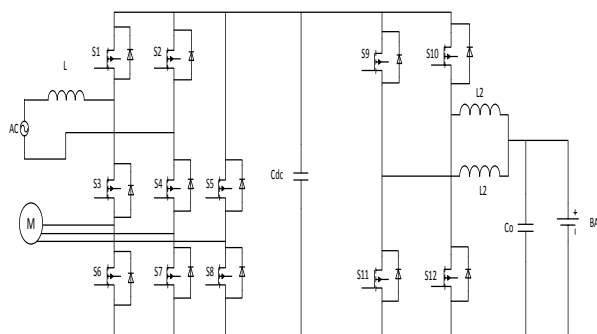
На Фигура 2 е показана схемата на еднофазен стъпален понижаващ-повишаващ преобразувател с широчинно импулсна модулация. Каскадният DC-DC преобразувател позволява двупосочно предаване на енергия и дава възможност за работа при широк диапазон на промени във входното и изходно напрежение. Кондензатора разделя преобразувателя на две части, като всяка една от тях може да функционира като повишаващ или като понижаващ. Това позволява по-добра използваемост на напрежението на батерията, но също така и по-големи загуби спрямо преобразувателя от Фигура 1.



Фигура 2: Еднофазен стъпален понижаващ-

повишаващ преобразувател с широчинно импулсна модулация

На Фигура 3 е показана схема на двупосочен заряден преобразувател, съставен от 8 транзистора и включващ в себе си DC-DC и DC-AC преобразуватели. Известни са няколко режима на работа - в първия случай тази схема може да работи като трифазен DC-AC инвертор или еднофазен инвертор с широчинно импулсна модулация. По този начин се реализира зарядя и разрядя на елемента за съхранение на енергията, без да се използват релета или други механични превключвателни устройства. Съответно този двупосочен, многофункционален преобразувател изисква сложен алгоритъм и система за управление и регулиране, което води до усложнения при нейната практическа реализация. Освен това е галванично неизоллирана схема.

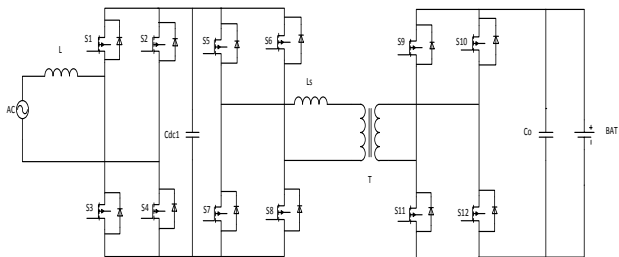


Фигура 3: Двупосочен заряден преобразувател

Топологии с галванично разделяне

Тези топологии използват високочестотни трансформатори [3,4,12]. Те се използват в повечето приложения, където се изисква съгласуване по напрежение и/или галванична изолация между разпределителната мрежа и устройството за съхранение на енергия. Употребата на високо честотни изолиращи трансформатори, прави системата по-компактна, лека и съответно по-подвижна. На Фигура 4 е показана такава схема. Тя съдържа еднофазен AC-DC инвертор с ШИМ и високочестотен двупосочен мостов, изолиран DC-DC преобразувател. Това схемно решение подобрява безопасността и намалява размера на инвертора. Регулирането в постояннотоковата част от схемата се осъществява чрез дефазирането и превключването на елементите, означени на схемата с S5-S12. Изпреварването и забавянето на превключването на приборите от двата моста (т.е.,

поляризираността на ъгъла на дефазирание) определя посоката на предаване на потока на енергия и ъгъла на изместване на фазата. Като по този начин се реализира регулиране на изходната мощност. Тези преобразуватели имат няколко ограничения при тяхното използване като високи стойности на коефициента на пулсации на тока, ограничения при регулирането при работа с меки комутации и големи токове през елементите на устройството.

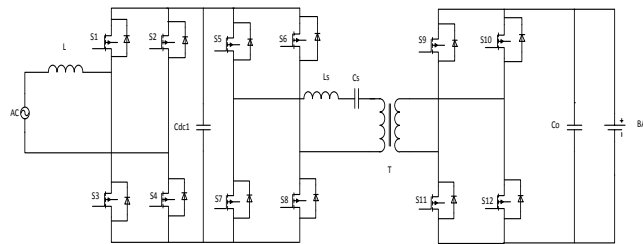


Фигура 4: Еднофазен ас-дс инвертор с ШИМ и високочестотен двупосочен мостов, изолиран DC-DC преобразувател

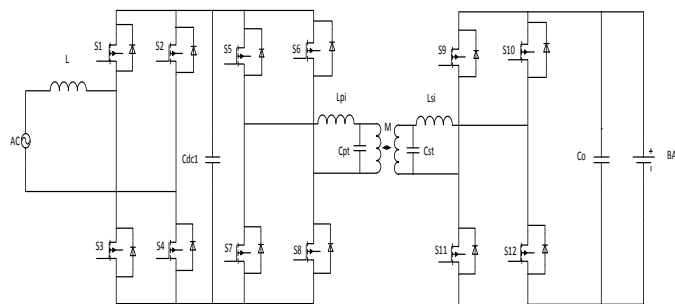
Подобно на топологията от Фигура 4, на Фигура 5 е представена схема, съставена от еднофазен инвертор с ШИМ, AC-DC преобразувател и последователен резонансен инвертор с високочестотна изолирана постояннотокова част. Чрез управление на дефазиранието се постига нулево превключване по напрежение (ZVS) на транзисторите, свързани към на първичната намотка на трансформатора S5-S8, и нулево превключване по ток (ZCS) на транзисторите свързани във вторичната намотка S9-S12.

Сравнен с двупосочния мостов преобразувател, пиковите токове при резонансния инвертор са много по-големи, което увеличава токовото натоварване на транзисторите, и съответно изисква по-висок клас елементи. От друга страна резонансния кондензатор работи с големи стойности на реактивна мощност и по този начин той също увеличава своя размер и тегло. Поради това този преобразувател не е най-предпочитания за разглежданите приложения. По перспективни са безконтактни схеми, които реализират безконтактно пренасяне на енергия чрез съчетаване на двойки трансформатори, образуващи различни видове резонансни кръгове. Тези схемни решения предлагат повече подвижност и удобство при заряд и разряд. Фигура 6 показва двустъпална безконтактна схема, която е съставена от еднофазен инвертор с ШИМ и високочестотен трансформаторен, изолиран DC-

DC преобразувател. Употребата на LCL резонансни вериги се използват за постигане на нулево превключване по напрежение на 8-те транзистора S1-S8 в постояннотоковата част от схемата. Изходната мощност се регулира чрез промяната на фазовата разлика между вторичното и първично напрежение на трансформатора. Въпреки това ефективността на тази топология е ниска, обикновено около 85% [12].



Фигура 5: Еднофазен инвертор с ШИМ, с AC-DC и последователен резонансен инвертор с високочестотна изолирана DC-DC част

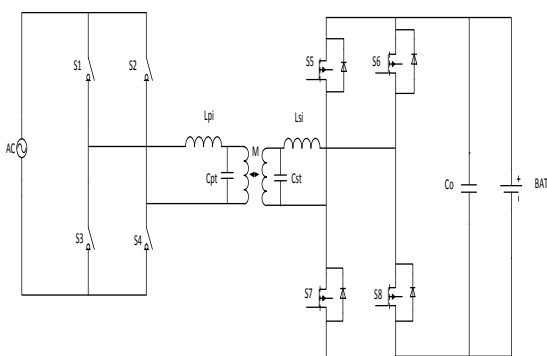


Фигура 6: Двустъпална топология съставена от ШИМ инвертор и индуктивен пренос на мощност

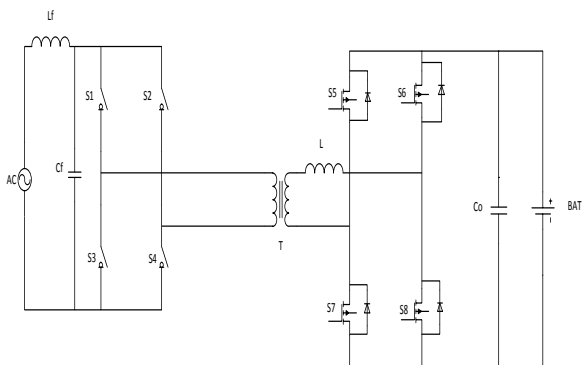
На базата на мощната трансформаторна схема показана на фигура 6, се синтезира матричен инвертор, представен на Фигура 7. S1-S4 са ключове с двупосочна проводимост. Тази топология използва едностъпално преобразуване, като по този начин се избягва използването на постояннотокова част (както беше в схемата от фиг.6). Това схемно решение подобрява ефективността на системата, в сравнение с предишната. Тъй като тази топология използва само един постояннотоков кондензатор, той има по-малки масогабаритни показатели и ниска цена. Въпреки това от страна на мрежата, тази схема съдържа много хармонични съставки.

На Фигура 8 е представена двупосочна едностъпална схема базирана на AC-DC двупосочен мостов преобразувател. Първичната страна е еднофазен матричен инвертор, където S1-

S4 са ключове с двупосочна проводимост. Всеки от тях се състои от два обратно свързани транзистора.[8,9,12] Тази схема може да управлява енергийните потоци двупосочно, използвайки принципа на фазовото регулиране. Изкривяванията на тока, породени от работата на инвертора, внасят смущения и хармоници в захранващата мрежа. За това е необходимо използването на филтър, който трябва да бъде проектиран, така че да съответства на утвърдените стандарти за качество на електрическата енергия. Сложността на тази схема идва от реализацията на системата за управление и множеството комутации.



Фигура 7: Двупосочна едностъпална топология базирана на матричен преобразувател



Фигура 8: Двупосочна едностъпална топология основана на AC-DC мостов преобразувател

Загуби в силовите електронни преобразуватели

Загубите в тези преобразуватели са причинени от полупроводниковите прибори – транзистори, диоди и пасивните елементи – индуктивности и кондензатори в схемата. Основно в тази статия се разглеждат загубите за да може да бъде направена оценка на ефективността на преобразувателя. За

тези цели тя се представя със следната формула:

$$\eta = \frac{P_{in} - \Sigma_{загуби}}{P_{in}},$$

където η ефективността на силовия преобразувател, P_{in} е входните загуби, $\Sigma_{загуби}$ е сумата от всички загуби.

Загубите в транзисторите и загуби при превключване се дават с:

$$P_T = U_{CE0} \cdot I_T + r_{CE} \cdot I_{TRMS}^2,$$

където U_{CE0} и r_{CE} се дават от каталожни данни за определен транзистор, I_{TRMS}^2 е средната стойност на тока през транзистора.

Загубите при превключване в дадения транзистор са:

$$P_{Tsw} = (E_{on} + E_{off}) f_s,$$

където f_s е честота на превключване, а E_{on} и E_{off} са загубите съответно, когато транзистора е отпушен и запушен. Стойностите на енергиите са дадени при определени тестови данни с напрежение U_{cc} . При други работни условия се дава оценка на загубите в транзистора със следната формула:

$$P_{Tsw} = \frac{U_T}{U_{cc}} (E_{on}(I_{Ton}) + E_{off}(I_{Toff})) f_s$$

Загуби в диода :

$$P_D = U_{F0} \cdot I_D + r_F \cdot I_{DRMS}^2,$$

където U_{F0} и r_F са дадени от каталожните данни са всеки диод, I_{DRMS}^2 е средната стойност на тока през диода.

Загубите в диода при превключване:

$$P_{Dsw} = E_{rr} \cdot f_s,$$

където f_s честотата на превключване и E_{rr} е енергията за възстановяване. Тя е дадена като функция от напрежението, тока и съпротивлението при отпушено и запушено състояние на диода. При преобразуване на предната формула при различни условия оценката на загубите в диода е:

$$P_{Dsw} = \frac{U_D}{U_{cc}} E_{rr} \cdot I_D \cdot f_s$$

Загуби в кондензатора се дават чрез вътрешното съпротивление в него и средната стойност на тока:

$$P_C = r_C \cdot I_{CRMS}^2$$

Основните загуби в индуктивните компоненти са причинени от енергията, получена в електрическите трансформатори и бобини, съставени от магнитно ядро. Тези загуби се дължат на различни механизми, свързани с променливо магнитно поле като вихрови токове и хистерезисни явления.

Загуби в ядрото на индуктора:

$$P_{Lcore} = W_{core} \cdot P_{core},$$

където P_{Lcore} са загубите в ядрото, W_{core} е теглото на ядрото, P_{core} са загубите в ядрото за Kg. Загуби в индуктора:

$$P_{Lcooper} = r_L \cdot I_{LRMS}^2,$$

където r_L е съпротивлението в индуктора, I_{LRMS}^2 е средната стойност на тока в индуктора.

Заклучение

В тази работа са разгледани различни схеми на двупосочни преобразуватели, които намират приложение в електротранспортните средства. Разгледани са основните предимства и недостатъци на всяка топология. Основно схемите без галванично разделяне са по-лесни за изпълнение, и се използват за ниска и средна мощност. Схемите с галванично разделяне са по-компактни и намират широко приложение при изолиране на разпределителната мрежа и устройството за заряд. Показани са изрази за определяне загубите в гравивните елементи на преобразувателите. Направена е оценка на ефективността на преобразувателите.

Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2016 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Mohan, T.M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] Ogata K., Modern Control Engineering, Prentice Hall, 2002. Kokornaczyk, E., M. Stiebler.
- [3] R. Strzelecki, G. Benycek Power electronics in smart electrical energy networks, (Eds.), Springer
- [4] Sudipta Chakraborty, Marcelo G. Simões, William E. Kramer, Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems, A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer
- [5] Muhammad H. Rashid, Power electronics handbook, Second edition
- [6] Dylan C. Erb, Omer C. Onar, Alireza Khaligh, Bi-Directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles
- [7] Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo, Hamid Gualos, DC/DC Converters for electric vehicles
- [8] Michael James Pepper, B.S. University of Central Florida, 2004, Bi-Directional DCM DC-to-DC converter for hybrid electric vehicles
- [9] M. K. Kazimierczuk, Dept. of Electr. Eng., Wright State Univ., Dayton, OH, USA, D. Q. Vuong, B. T. Nguyen, J. A. Weimer, Topologies of bidirectional PWM dc-dc power converters
- [10] Hamid R. Karshenas, Hamid Daneshpajoo, Alireza Safae, Praveen Jain and Alireza Bakhshai, Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems
- [11] F. Bordry CERN, Geneva, Switzerland, Power converters: definitions, classification and converter topologies
- [12] J. Jiang, Y. Bao, Le Yi Wang, Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid