

An Overview of the Structure and Improvement of the Main Parameters of Non-Isolated DC / DC Boost Converters

Omid Sharifiyana^{1,2}, PhD Student, Majid Dehghani^{1,2}, Assistant Professor, Ghazanfar Shahgholian^{1,2}, Associate Professor Sayyed Mohammad Mehdi Mirtalaei^{1,2}, Assistant Professor, Masoud Jabbari^{1,2}, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Smart Microgrid Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
omidsharifiyana@yahoo.com, dehghani@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir, mirtalaei.iaun@gmail.com, jabbari.masoud@gmail.com

Abstract

The production of clean electricity is one of the most basic human needs today. Therefore, the use of power plants that use renewable and environmentally friendly fuels (new energy) as their base fuel, has been highly appreciated. However, the output voltage level of local power plants based on new energies is as low as the input voltage of the next floors (inverters, etc.). Therefore, researchers have tried to solve this defect by using DC / DC boost converters. The structures related to these converters are different based on the designer's expectations such as voltage gain, output power, efficiency, input voltage specifications, etc. Boost converters are responsible for increasing the DC voltage by switching and storing energy in their inductor. But the same simple structure can be created with the help of new tricks such as using magnetic coupling, adding passive incremental circuits to the converter structure, creating more complete structures by using several active switches and even combining several structures together to the desired point in terms of voltage gain. On the other hand, with soft switching methods (resonance, snubber, etc.), the efficiency of boost converters is in the acceptable range. In this paper, the types of power plants based on new energy and then boost converters, which are the most basic elements of a power plant based on new energy, it is categorized in terms of incremental structures and applied methods for optimizing these converters, especially in terms of reducing losses and increasing efficiency.

Keywords: efficiency, non-insulated converters, resonant structure, snubber circuits, soft switching, voltage gain

Received: 16 February 2021

Revised: 10 April 2021

Accepted: 20 April 2021

Corresponding Author: Dr. Majid Dehghani

Citation: O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S. M. M. Mirtalaei, M. Jabbari, "An overview of the structure and improvement of the main parameters of non-isolated dc/dc boost converters", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 47, pp. 1-28, December 2021 (in Persian).

مروری بر ساختار و بهبود پارامترهای اصلی مبدل‌های افزایشنده غیرایزوله DC/DC

امید شریفیان^{۱،۲}، دانشجوی دکتری، مجید دهقانی^{۱،۲}، استادیار، غضنفر شاهقلیان^{۱،۲}، دانشیار، سید محمدمهدی میرطلایی^{۱،۲}، استادیار، مسعود جباری^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

omidsharifiyana@yahoo.com, dehghani@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir, mirtalaei.iaun@gmail.com, jabbari.masoud@gmail.com

چکیده: تولید انرژی الکتریکی پاک از اساسی‌ترین نیازهای پیش روی بشر امروز است. از این رو استفاده از نیروگاه‌هایی تولید برق که سوخت‌های تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست (انرژی‌های نو) به‌عنوان سوخت پایه آن‌هاست، بشدت مورد اقبال قرار گرفته است. حال آنکه سطح ولتاژ خروجی نیروگاه‌های محلی تولید انرژی الکتریکی بر پایه انرژی‌های نو، به‌عنوان ولتاژ ورودی طبقات بعدی (اینورترها و ...)، پایین است. از این رو محققان سعی کرده‌اند با استفاده از مبدل‌های افزایشنده DC/DC این عیب را برطرف سازند. ساختارهای مربوط به این مبدل‌ها بر اساس انتظارات طراح مانند ضریب بهره ولتاژ، توان خروجی، بازده، مشخصات ولتاژ ورودی و ... متفاوت است. مبدل‌های افزایشنده به کمک کلیدزنی و ذخیره انرژی در سلف خود، وظیفه افزایش ولتاژ DC را بر عهده دارند. اما همین ساختار ساده را می‌توان به کمک ترفندهای جدید همچون، استفاده از تزویج مغناطیسی، افزودن مدارات افزایشنده غیر فعال به ساختار مبدل، ایجاد ساختارهای کامل‌تر با بهره بردن از چندین کلید اکتیو و حتی ترکیب چند ساختار با هم به نقطه مطلوبی از نظر بهره ولتاژ رساند. از سوی دیگر با روش‌های کلیدزنی نرم (رزونانس و اسنابر و ...) راندمان مبدل‌های افزایشنده در محدوده قابل قبولی قرار می‌گیرند. در این مقاله، انواعی از نیروگاه‌های بر پایه انرژی‌های نو و سپس مبدل‌های افزایشنده که از اساسی‌ترین ارکان یک نیروگاه بر پایه انرژی‌های نو هستند، از نظر ساختارهای افزایشنده و روش‌های کاربردی جهت بهینه‌سازی این مبدل‌ها به خصوص از نظر کاهش تلفات و افزایش راندمان دسته‌بندی شده است.

کلمات کلیدی: راندمان، کلیدزنی نرم، ساختار رزونانسی، ضریب بهره ولتاژ، مبدل‌های غیر ایزوله، مدارهای اسنابر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید دهقانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد جمعیت و کاربرد وسایل صنعتی، نیاز روز افزون به انرژی اجتناب‌ناپذیر است. انرژی‌های پرکاربرد کنونی که عمدتاً از سوخت‌های فسیلی نشأت می‌گیرند، به دلیل پایان‌پذیر بودن و همچنین مشکلات زیست‌محیطی فراوان، هر روز دشواری‌های بیشتری را برای بشر ایجاد می‌کنند [۲،۱]. از این‌رو استفاده از انرژی‌های نو^۱ و تجدیدپذیر روز به روز پر اهمیت‌تر و حیاتی‌تر به نظر می‌رسد، زیرا هم از نظر منابع بسیار ارزان‌تر و در دسترس‌تر هستند، هم پایان‌ناپذیرند و سازگاری کامل با محیط زیست دارند [۴،۳]. بنابراین در دهه‌های اخیر این گونه انرژی‌ها مانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی پیل‌های سوختی و موارد مشابه، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶،۵].

نکته حائز اهمیت در استفاده از انرژی‌های نو وجود یک مشکل است، که از نظر مهندسان برق یکی از اصلی‌ترین معایب این انرژی‌ها به شمار می‌رود. نیروگاه‌هایی که بر مبنای انرژی‌های تجدیدپذیر کار می‌کنند، اگر بخواهند به صورت متمرکز احداث شوند، قابلیت استفاده از مقدار زیادی از انرژی از دست می‌رود، چون که نمی‌توان کل انرژی در محیط مورد نظر را دریافت کرد، در صورتی که راه حل ساده این مشکل استفاده از نیروگاه‌های محلی است [۷].

با استفاده از نیروگاه‌های کوچک محلی می‌توان مشکل نقاطی که توانایی استفاده از انرژی آن‌ها به خاطر خصوصیات مکانی وجود نداشت را حل کرد. ولی مشکل اساسی در این استراتژی سطح ولتاژ خروجی این نیروگاه‌های محلی است، زیرا این ولتاژ برای استفاده در طبقه‌های بعدی تجهیزات و مدارهای واسطه (انتقال، اینورترها و ...) خیلی کم است و بازدهی مجموعه را به شدت کاهش می‌دهد [۹،۸].

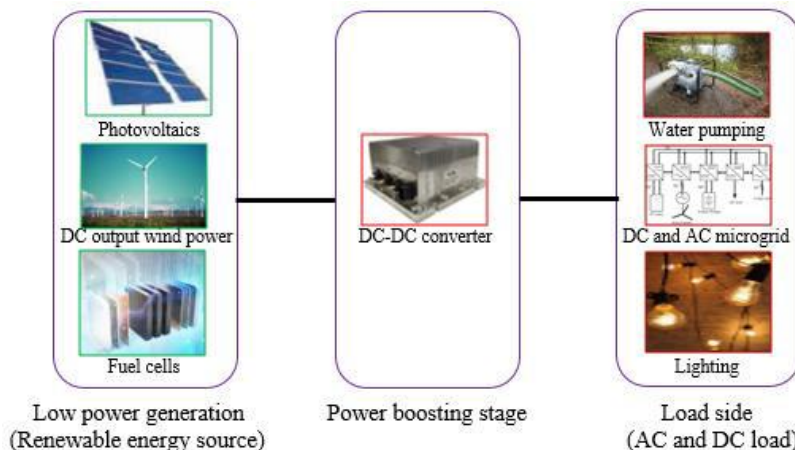
ولتاژ خروجی نیروگاه‌ها بر اساس انرژی تجدیدپذیر نسبت به نیروگاه‌ها بر پایه سوخت فسیلی بسیار کمتر است (حدود یک درصد). از این رو محققان بر آن شدند تا به کمک یک مدار واسط تحت عنوان مبدل DC/DC افزایش دهند، ولتاژ خروجی نیروگاه‌ها بر پایه انرژی‌های نو را تا حد قابل قبولی بالا ببرند. این مبدل‌ها امروزه با ساختار و توان‌ها متفاوت (از چند وات تا چند صد کیلو وات) طراحی و ساخته شده‌اند و روز به روز نیز در حال بهینه‌شدن هستند. پارامترهای مهم در طراحی یک مبدل DC/DC افزایش یافته عبارتند از: ضریب بهره ولتاژ، استرس ولتاژ روی کلیدها و دیودها، راندمان [۱۱،۱۰].

با توجه به انواع انرژی‌های نو که امروزه در دسترس بشر قرار دارند نیروگاه‌های بر پایه انرژی‌های نو مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که ولتاژ و جریان هر نوع نیروگاهی که از انرژی‌های نو استفاده می‌کند، با توجه به مبدل انرژی مخصوص خودش متفاوت است، چرا که هرچند از ساختارها و الگوریتم‌های مختلفی برای تبدیل انرژی استفاده می‌شود، اما هر کدام از نیروگاه‌ها خروجی مختص خود را دارا هستند. البته به‌طور کلی سطح ولتاژ تولیدی چنین نیروگاه‌هایی به مراتب کمتر از نیروگاه‌های فسیلی و یا اتمی است. به همین دلیل در هنگام طراحی یک مبدل باید به تمام جنبه‌های موضوع دقت شود [۱۳،۱۲].

در این مقاله در ابتدا بررسی نیروگاه‌های بر اساس انرژی‌های نو بیان می‌شود. سپس مبدل‌های افزایشنده مورد نیاز در این نیروگاه‌ها اشاره می‌شود و روش‌های انجام شده برای بهبود کارایی این مبدل‌ها بررسی می‌گردد. ساختار مقاله به این شرح است: پس از بیان اهمیت موضوع، اساس تبدیل انرژی‌های نو به انرژی الکتریکی و چگونگی انجام چنین استراتژی و چند نوع نیروگاه‌ها تولید انرژی که امروزه بیشتر مورد توجه قرار دارند در قسمت دوم اشاره شده است. در قسمت سوم انواع مبدل‌های افزایشنده و ساختارهای کلی این مبدل‌ها به همراه نحوه عملکرد و نقاط قوت و ضعف هر یک بیان شده است. در قسمت چهارم روش‌های مهم و کاربردی برای بهبود راندمان و کاهش تلفات مبدل‌ها مقایسه شده است. در انتها در قسمت پنجم نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

۲- کاربرد مبدل‌های افزایشنده در نیروگاه بر پایه انرژی‌های نو

با توجه به خصوصیت ساختاری نیروگاه‌ها مبتنی بر انرژی‌های نو، به عبارت دیگر نیاز به افزایش سطح ولتاژ پس از تولید انرژی الکتریکی از هر کدام از اشکال انرژی‌های نو، بهترین گزینه استفاده از مبدل‌های افزایشنده DC/DC به نظر می‌رسد. شکل (۱) ارتباط بین تولید توان کم و بارها را نشان می‌دهد.

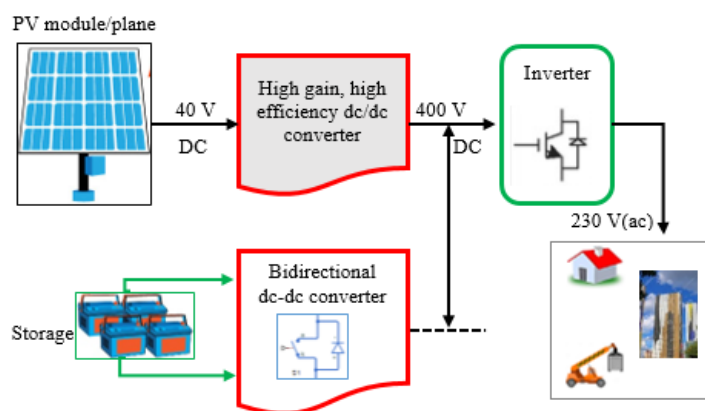


شکل (۱): نمایش شماتیک مراحل اصلی تولید تا مصرف انرژی الکتریکی با منشأ انرژی‌های نو

Figure (1): Schematic representation of the main stages of production to the consumption of electrical energy with the source of new energies

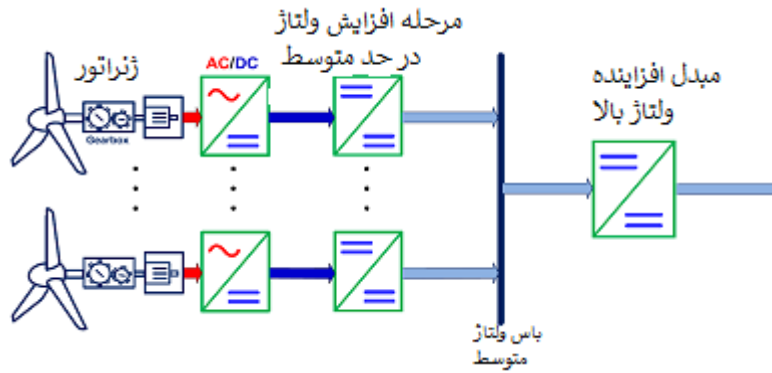
استفاده از انرژی‌های نو برای تولید انرژی الکتریکی تعدادی از آنها به علت بازده مناسب و در دسترس بودن در اغلب نقاط جهان مانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی و انرژی تولیدی توسط سلول‌های سوختی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵،۱۴]. البته به وضوح مشخص است، که ترکیب منطقی دو یا چند مورد از این ساختارها با توجه به منطقه بهره‌برداری، خواسته‌های طراح و قابلیت‌های هر یک از این ساختارها، دارای مزایای فراوانی خواهد بود [۱۶،۱۷]. برای هر نیروگاه وابسته به منبع تامین-کننده انرژی و سطح ولتاژ خروجی از مبدل‌ها با توانایی‌های متفاوت از نظر بهره‌ولتاژ، راندمان و... استفاده می‌شود. در این قسمت چند نیروگاه کوچک محلی که بر اساس انرژی‌های نو کار می‌کنند، از نظر کارایی بررسی می‌شوند. بلوک دیاگرام‌های نیروگاه خورشیدی^۳ [۱۸]، نیروگاه بادی^۴ [۱۹] و نیروگاه با انرژی سلول سوختی^۵ [۲۰] به ترتیب در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود هر نیروگاه یک مبدل DC/DC بعد از ورودی خود دارد، که ولتاژ DC خروجی منبع انرژی را تا حد مورد نظر باس DC افزایش می‌دهد. مبدل‌ها با توجه به کاربردشان انواع مختلف دارند، که در این قسمت مبدل‌های نوع افزایشنده ولتاژ و مبدل‌های دو طرفه (افزاینده-کاهنده) مورد نظر هستند، که براساس نیاز و مشخصات آنها از مبدل‌های ایزوله یا غیر ایزوله استفاده می‌شود.

مسیر کلی انرژی الکتریکی تولیدی توسط نیروگاه‌های پاک (نیروگاه‌های بر اساس انرژی‌های نو) مانند سایر منابع تولید انرژی شامل سه قسمت اصلی تولید، انتقال و مصرف است. البته نیروگاه‌های بر اساس انرژی‌های نو اغلب از مبدل‌های قدرت برای تبدیل سطح ولتاژ استفاده می‌کنند [۲۱،۲۲]. در شکل (۵) چارت کلی از تولید تا مصرف انرژی برای برق تولیدی نیروگاه‌های بر اساس انرژی‌های نو نشان داده شده است.

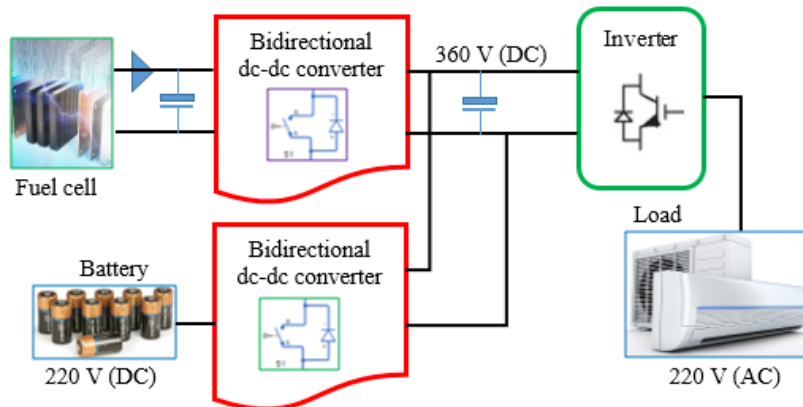


شکل (۲): بلوک دیاگرام یک نیروگاه کوچک محلی خورشیدی با سیستم تبدیل انرژی

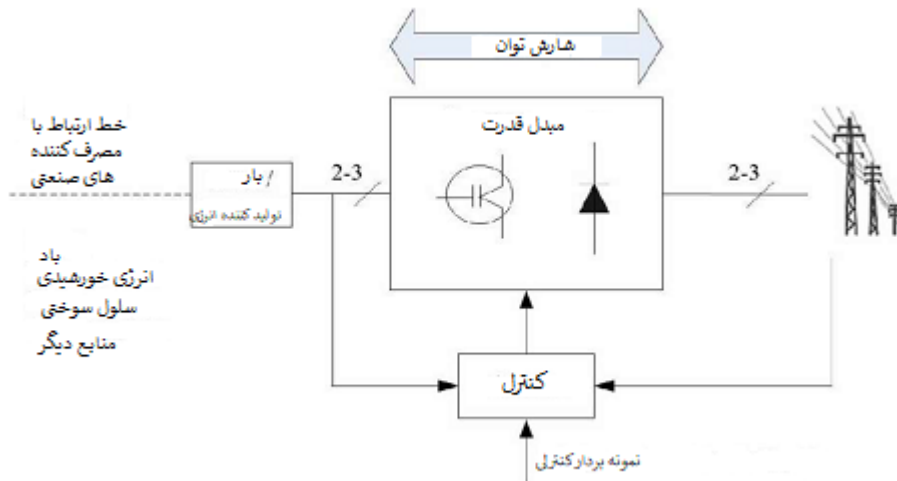
Figure (2): Block diagram of a small local solar power plant with an energy conversion system



شکل (۳): بلوک دیاگرام یک نیروگاه کوچک محلی بادی با سیستم تبدیل انرژی [۷]
Figure (3): Block diagram of a small local wind farm with an energy conversion system [7]



شکل (۴): بلوک دیاگرام یک نیروگاه کوچک محلی ترکیبی سلول سوختی / باتری با سیستم تبدیل انرژی [۸]
Figure (4): Block diagram A small local power plant combining a fuel cell / battery with an energy conversion system [8]



شکل (۵): بلوک دیاگرام تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه تا انتقال [۹]
Figure (5): Block diagram of electricity generation from source to transmission [9]

از آنچه بیان شد می توان چنین استنباط کرد که استفاده از انرژی های نو برای تولید انرژی الکتریکی به امری حتمی و اجتناب ناپذیر تبدیل شده است [۲۳، ۲۴]. در همین راستا مشخص شد که نیروگاه هایی که بر اساس انرژی های نو انرژی الکتریکی تولید می کنند، با یک محدودیت اساسی مواجه هستند. این محدودیت نیاز به مبدل های افزایشده برای جبران سطح ولتاژ

خروجی چنین نیروگاه‌هایی است، چرا که ولتاژ خروجی این نیروگاه‌ها اغلب از حد قابل قبول برای طبقات بعدی (درايوها، انتقال و...) پایین‌تر است. بنابراین بررسی دقیق و کامل مبدل‌های افزایشنده DC/DC لازم و ضروری است.

۳- تقسیم‌بندی مبدل‌های افزایشنده DC/DC

هر نیروگاه یک مبدل DC/DC بعد از ورودی خود دارد، که ولتاژ DC خروجی منبع انرژی را تا حد مورد نظر باس DC افزایش می‌دهد. مبدل‌های DC/DC با توجه به کاربردشان انواع مختلف دارند. به‌طور کلی براساس نوع اتصال مبدل‌های DC/DC به دو دسته مبدل‌های ایزوله^۶ و مبدل‌های غیر-ایزوله^۷ تقسیم می‌شوند [۲۶،۲۵].

۳-۱- مبدل‌های ایزوله

در مبدل‌های ایزوله به کمک کوپل مغناطیسی، مدار به دو طبقه جدا از نظر الکتریکی تقسیم می‌شوند که دارای مزایایی مانند ایزولاسیون الکتریکی بین ورودی و خروجی، استفاده از نسبت تبدیل ترانس برای افزایش ضریب بهره، سطح ولتاژهای کمتر در سمت سوئیچ‌ها و دیودها و ... می‌شود [۲۸،۲۷]. از معایب آن می‌توان به اشباع مغناطیسی هسته، حجم زیاد و سنگین شدن مدار، افزایش هزینه‌ها و ایجاد محدودیت توان انتقالی و ... اشاره نمود [۳۰،۲۹].

۳-۲- مبدل‌های غیرایزوله

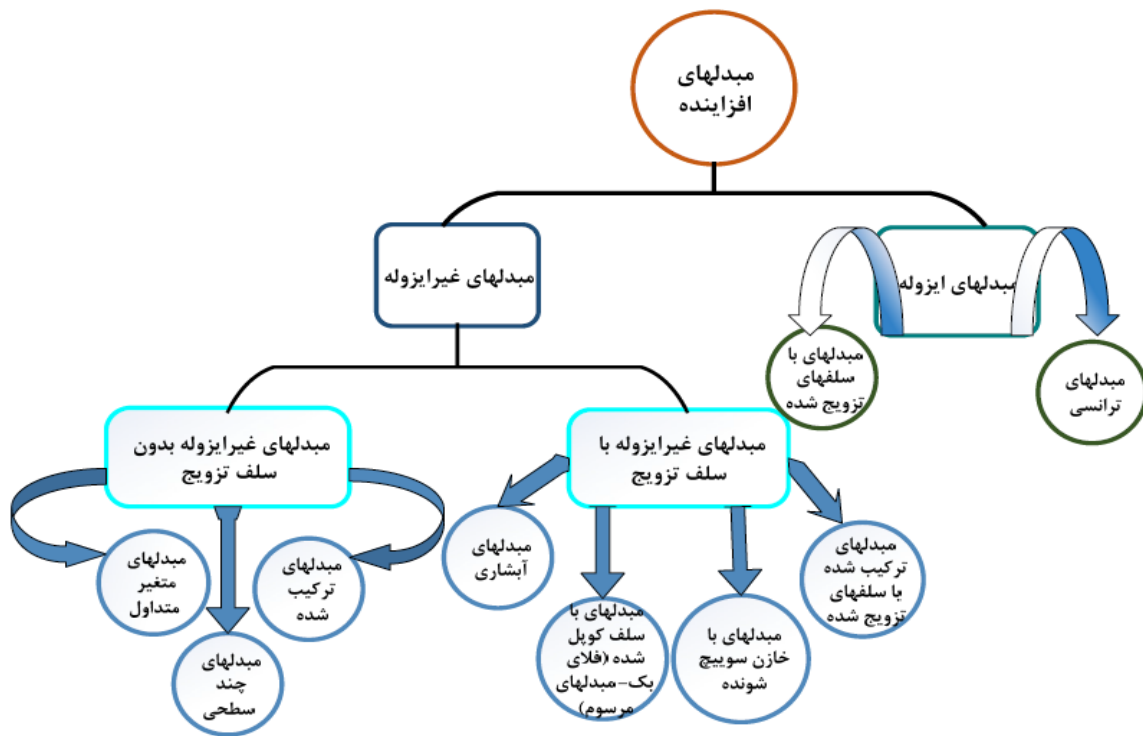
در مبدل‌های غیرایزوله بین ورودی و خروجی آن‌ها ارتباط الکتریکی برقرار است و برای بهبود ساختار مدار از کوپل مغناطیسی استفاده می‌گردد که کوپل مغناطیسی بین چند سلف برای افزایش بهره‌وری به کار برده می‌شود. در این مبدل‌ها دیگر مشکل اشباع هسته وجود ندارد و به نسبت مبدل‌های ایزوله وزن و هزینه کمتر و طراحی ساده‌تری دارند. ولی ولتاژ سمت سوئیچ‌ها نسبت به مبدل‌های ایزوله خیلی بیشتر است، که می‌تواند تلفات و مشکلاتی به همراه داشته باشد [۳۲،۳۱]. مبدل‌های غیرایزوله به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: مبدل غیر-ایزوله دوسمته^۸، مبدل غیرایزوله دو سمت به دو سیم‌پیچ^۹ و مبدل غیر-ایزوله دو سمت به سه سیم‌پیچ^{۱۰} [۳۳]. دسته‌بندی مبدل‌های افزایشنده از نظر ایزولاسیون الکتریکی شامل مبدل‌های ایزوله و غیرایزوله است. در مبدل‌های ایزوله از ترانس هم به منظور ایزولاسیون و هم جهت افزایش ضریب بهره استفاده می‌شود. در مبدل‌های غیرایزوله یا از نسبت تبدیل استفاده نمی‌شود و یا در صورت استفاده فقط از نسبت تبدیل بین دو سلف برای افزایش بهره می‌برند و ورودی و خروجی مبدل از نظر الکتریکی به هم متصل هستند [۳۴]. در شکل (۶) دسته‌بندی مبدل‌های افزایشنده بر اساس ایزولاسیون نشان داده شده است.

۴- بررسی ساختارهای مبدل‌های افزایشنده غیرایزوله

۴-۱- مبدل‌های متداول شامل یک کلید^{۱۱}

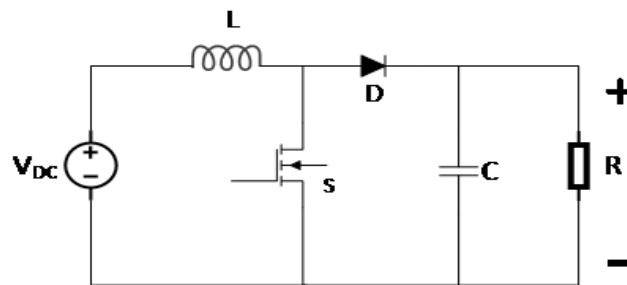
وظیفه اصلی مبدل‌های افزایشنده افزایش سطح ولتاژ است. بر همین اساس ساختارهای متعددی با خصوصیات متفاوت اما به-منظور برآورده‌سازی یک هدف یعنی بهبود ضریب بهره ولتاژ (افزایش ولتاژ خروجی نسبت به ولتاژ ورودی) ارائه شده است. یک مبدل ولتاژ افزایشنده در ضمن داشتن یک ضریب بهره ولتاژ مناسب باید از نظر بازده، قابلیت اطمینان، پیچیدگی‌های ساختاری و المان‌های به کار رفته در ساختار خود، گسترده بودن حیطه کاری و پوشش دادن انواع ورودی‌ها، کنترل‌پذیری و سایر پارامترهای حائز اهمیت برای یک سیستم الکترونیکی در محدوده مناسبی قرار گیرد.

مبدل‌های افزایشنده ساده که شامل یک کلید اکتیو و یک سلف هستند، در ابتدای راه مبدل‌های افزایشنده خودنمایی می‌کنند [۳۵]. با افزودن یک سلف تزویج در خروجی یک مبدل ساده می‌توان به راحتی ساختاری با ضریب بهره بالاتر به‌دست آورد [۳۷،۳۶]. مبدل معمولی در شکل (۷) و همین ساختار با افزودن سلف تزویج خروجی در شکل (۸) نشان داده شده است.



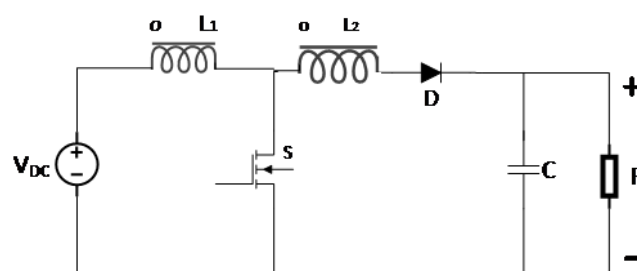
شکل (۶): بلوک دیاگرام بررسی مبدل‌ها از نظر ایزولاسیون

Figure (6): Block diagram of reviews converters in terms of isolation



شکل (۷): مبدل بوست معمولی [۱۲]

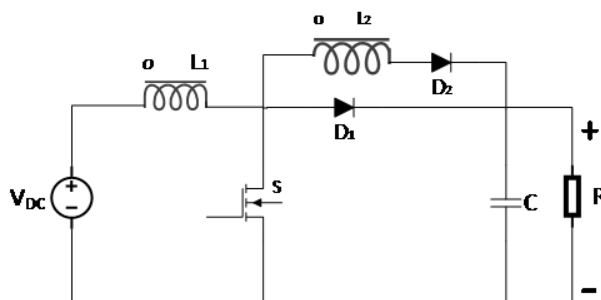
Figure (7): Conventional boost converter [12]



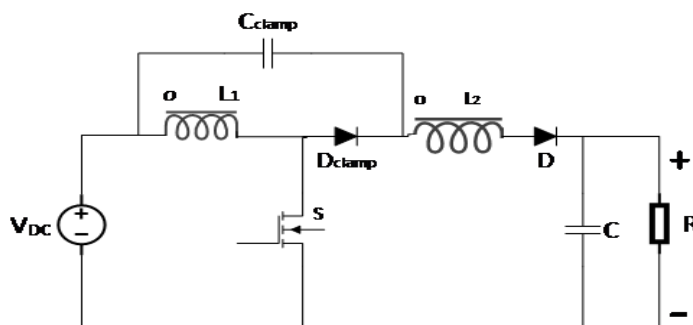
شکل (۸): مبدل بوست معمولی با سلف تزویج خروجی [۱۳]

Figure (8): Conventional boost converter with output coupled inductor [13]

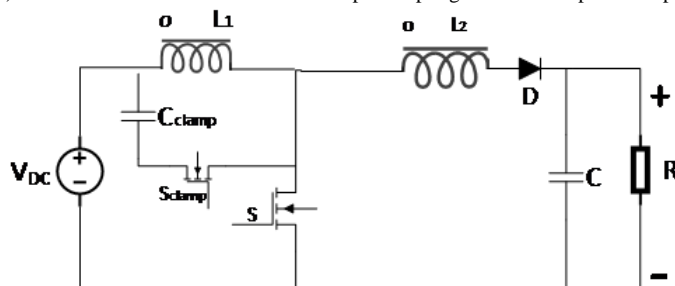
در همین راستا به کمک ساختارهای کلمپ و ترکیب آن با ساختاری ساده اما کاربردی چون مبدل افزایشنده معمولی با سلف تزویج خروجی و مدارات کلمپ کمکی می‌توان مبدل‌های افزایشنده مناسبی ارائه کرد [۳۹،۳۸]. ساختارهای کلمپ ولتاژ ورودی خود شامل کلمپ‌های غیرفعال [۴۰] و کلمپ‌های فعال هستند [۴۱]. کلمپ خروجی در شکل (۹-الف)، کلمپ ورودی در شکل (۹-ب) و کلمپ اکتیو نیز در شکل (۹-ج) نمایش داده شده است.



شکل (۹-الف): مبدل معمولی با سلف تزویج خروجی و کلمپ خروجی [۱۴]
Figure (9-a): Conventional boost converter with output coupling inductor and output clamp [14]



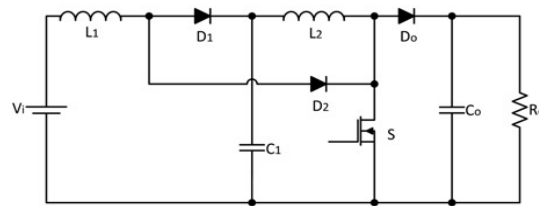
شکل (۹-ب): مبدل معمولی با سلف تزویج خروجی و کلمپ ورودی غیرفعال [۱۵]
Figure (9-b): Conventional boost converter with output coupling inductor and passive input clamp [15]



شکل (۹-ج): مبدل معمولی با سلف تزویج خروجی و کلمپ ورودی فعال [۱۶]
Figure (9-c): Conventional boost converter with output coupling inductor and active input clamp [16]

مبدل‌های با دو سلف تزویج سری را می‌توان به کمک مدارهای افزایشنده کمکی مانند یک کلمپ ادغام شده و خازن اضافی که در دو مرحله افزایشندگی را انجام می‌دهد [۴۲]، مدار کلمپ ادغام شده و سلف اضافی برای کلیدزنی نرم [۴۳] و یا مدار کلمپ ادغام شده با افزایشنده ولتاژ غیر-فعال دیود خازنی در یک یا چند طبقه به حالت‌های بهینه‌تر نزدیک کرد [۴۴] [۴۵]. چنین ساختارهایی با افزودن چند سلف تزویج شده و استفاده از حاصل ضرب چند نسبت تبدیل سلف‌ها به حالت مناسبی از نظر افزایش ضریب بهره ولتاژ می‌رسند [۴۶].

مبدل‌های افزایشنده به صورت پشت سرهم (آبشاری) نیز به کار برده می‌شود. این ساختار از خازن طبقه اول آبشار بعنوان ورودی طبقه دوم استفاده می‌کند. به عبارت دیگر با روشن شدن کلید خازن طبقه اول به کمک مبدل بوست همین طبقه شارژ شده و در ادامه نقش تغذیه طبقه دوم را به عهده می‌گیرد. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت به جای افزوده شدن ولتاژ ورودی به ولتاژ سلف مبدل برای تأمین ولتاژ خروجی، ولتاژ خازن ماقبل آخر با ولتاژ سلف طبقه آخر، ولتاژ خروجی را تأمین کرده و به این ترتیب باعث می‌شود ضریب بهره ولتاژ تا حد زیادی بهبود یابد [۴۷]. شکل (۱۰) این ساختار را نشان می‌دهد. ساختارهای آبشاری زمانی که با ساختارهای با سلف‌های سری تزویج شده ترکیب می‌شوند ضریب بهره ولتاژی قابل قبولی در اختیار طراح قرار می‌دهند [۴۸].

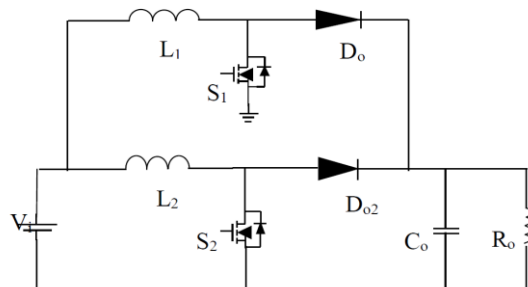


شکل (۱۰): مبدل افزایشده آبخاری [۲۱]

Figure (10): Cascade boost converter [21]

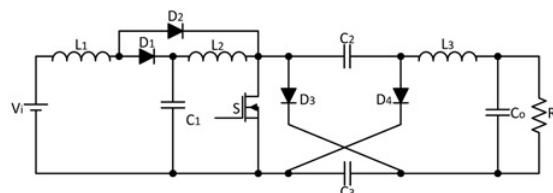
۲-۴- مبدل‌های متداول دارای دو کلید و چند سطحی

یکی دیگر از استراتژی‌های کاربرد در طراحی مبدل‌های افزایشده معمولی که مخصوصا در خودروهای الکتریکی به کار برده می‌شود [۴۹]، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این نمونه مبدل‌های افزایشده در حقیقت دو مبدل افزایشده ساده و مکمل هم هستند، زمانی که سلف یکی شارژ می‌شود، دیگری در حال تحویل انرژی سلف خود به خروجی است و بالعکس. همین ساختار را می‌توان با کنترل کلیدزنی مناسب و استفاده از سلف‌های تزویج هم هسته به نحوی تغییر داد تا در چهار افزایش ولتاژ را انجام می‌دهد. این ساختار به ساختار دو فاز ادغام شونده معروف است [۵۰]. ساختارهای دو فاز ادغام شونده را می‌توان در دو مسیر رفت و برگشت مبدل قرار داد و مبدل را به چهار فاز ادغام شونده با ضریب بهره ولتاژ بالاتر تبدیل کرد [۵۱]. همین ساختار با استفاده از مدارهای معروف به Z_{source} تا حد زیادی بهبود داده می‌شوند [۵۲]. خازن‌های موجود در ترکیبات این چنین با شارژ معکوس و قرار گرفتن به صورت مجموع تحویل خروجی می‌دهد. مدار مربوط به این ساختار در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): مبدل افزایشده تعویض شونده [۲۳]

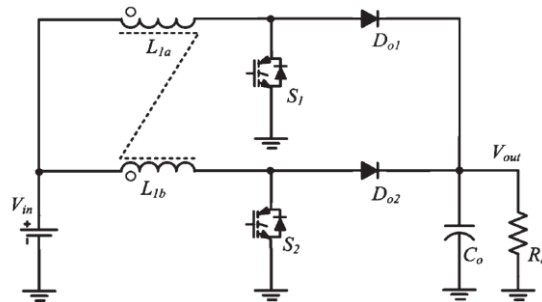
Figure (11): Interchangeable boost converter [23]



شکل (۱۲): مبدل افزایشده سه سطحی به همراه ساختار Z_{source} [۲۶]

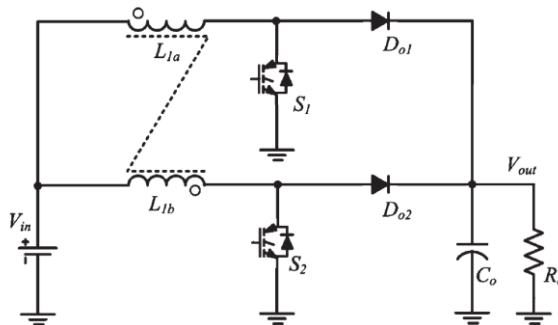
Figure (12): Boost converter three-level with structure Z_{source} [26]

در ادامه مبدل‌های خاص و کاربردی که بر اساس ساختارهای کلی نامبرده شده پایه‌گذاری شده‌اند بررسی می‌شوند. سری کردن دو مبدل بوست معمولی، می‌تواند در افزایش ضریب بهره ولتاژ نقش چشم‌گیری داشته باشد. در این حالت کلید ابتدایی روشن و خازن ابتدایی شارژ می‌شود، سپس این خازن به عنوان ورودی طبقه دوم وارد عمل شده و با روشن شدن کلید دوم ولتاژ خروجی را تأمین می‌کند [۵۳]. شکل (۱۳) یک ترکیب سری دو مبدل معمولی را نشان می‌دهد. در حالت سری هرچند ضریب بهره ولتاژ بالا رفته ولی اگر برای یک طبقه مشکلی پیش بیاید کل مبدل از مدار خارج می‌شود. اگر دو مبدل به طور موازی ترکیب شوند، توان انتقالی و قابلیت اطمینان افزایش پیدا می‌کند ولی ضریب بهره ولتاژ کم است. بنابراین تزویج دو سلف موازی پیشنهاد می‌شود که قادر است همه خواسته‌ها از یک مبدل افزایشده را برآورده سازد [۵۴]. این تزویج می‌تواند به صورت معکوس اجازه کلیدزنی مستقل را نیز فراهم کند [۵۵]. شکل (۱۴-الف) و شکل (۱۴-ب) این دو حالت را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴-الف): دو مبدل معمولی موازی شده با تزویج مغناطیسی هم جهت بین دو شاخه [۲۹]

Figure (14-a): Two conventional boost converters parallel to the magnetic coupling in the same direction between the two branches [29]

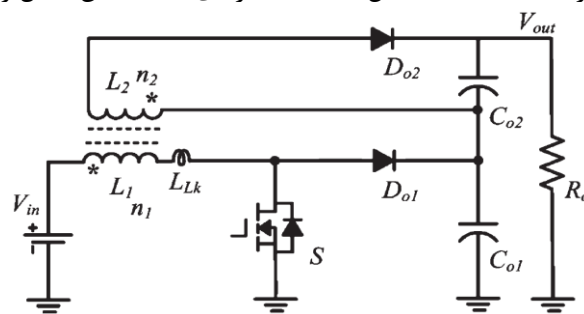


شکل (۱۴-ب): دو مبدل معمولی موازی شده با تزویج مغناطیسی معکوس بین دو شاخه [۲۹]

Figure (14-b): Two conventional boost converters paralleled by reverse magnetic coupling between two branches [29]

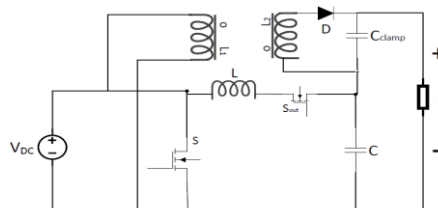
۳-۴- مبدل‌های شامل یک کلید مبتنی بر سایر مبدل‌های تزویج (فلای‌بک، فلای‌فروارد و...)

یکی دیگر از ساختارهای پر کاربرد به‌عنوان مبدل افزایش‌دهنده تزویج سلف یک مبدل معمولی با سلفی دیگر است به نحوی که ساختاری شبیه به یک مبدل فلای‌بک حاصل شود [۵۶]. در ساختارهایی که از استراتژی ترکیب مبدل افزایش‌دهنده معمولی و مبدل فلای‌بک استفاده شده، با روشن شدن کلید قدرت سلف مبدل معمولی شارژ شده و با خاموش شدن کلید علاوه بر خازن مبدل معمولی، سلف مبدل فلای‌بک نیز انرژی مورد نیاز بار را فراهم می‌کند [۵۷]. از دیگر مزایای مبدل افزایش‌دهنده معمولی ترکیب شده با ساختار فلای‌بک، قابلیت توسعه و بهبود این ساختار و سازگاری بسیار بالا و انعطاف پذیری در ترکیب شدن با سایر استراتژی‌های افزایش‌دهنده ولتاژ است [۵۸، ۵۹]. شکل (۱۵) ساختارهای مختلف این مبدل را نشان می‌دهد.



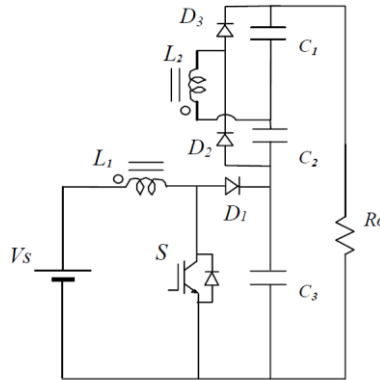
شکل (۱۵-الف): مبدل افزایش‌دهنده بر پایه مبدل فلای‌بک ساده [۳۰]

Figure (15-a): boost converter based on simple fly-back converter [30]

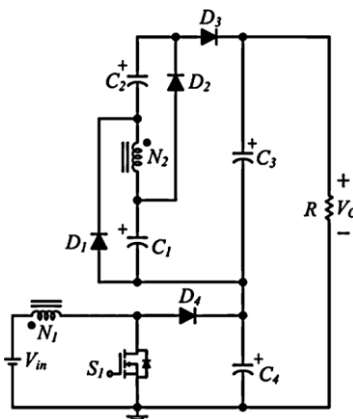


شکل (۱۵-ب): مبدل افزایش‌دهنده دوطرفه بر پایه مبدل فلای‌بک ساده [۳۱]

Figure (15-b): bidirectional boost converter based on simple fly-back converter [31]



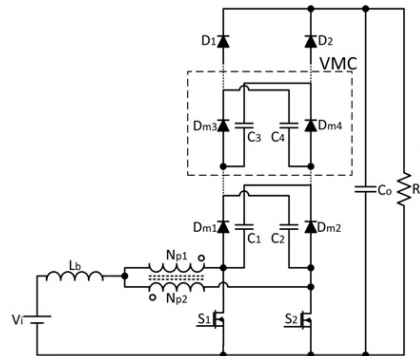
شکل (۱۵-ج): مبدل افزایشنده بر پایه مبدل فلای بک ساده با یکسو کننده تمام پل [۳۲]
Figure (15-c): boost converter based on a simple fly-back converter with full bridge rectifier [32]



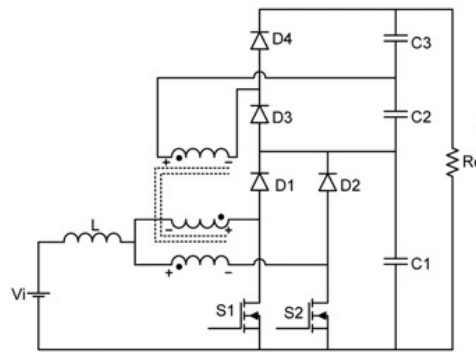
شکل (۱۵-د): مبدل افزایشنده بر پایه مبدل فلای بک ساده با چند برابر کننده ولتاژ [۳۳]
Figure (15-d): Boost converter based on a simple fly-back converter with voltage multiplier [33]

۴-۴ مبدل‌های دارای چند کلید مبتنی بر سایر مبدل‌های تزویج و یک کلید سویچ شونده

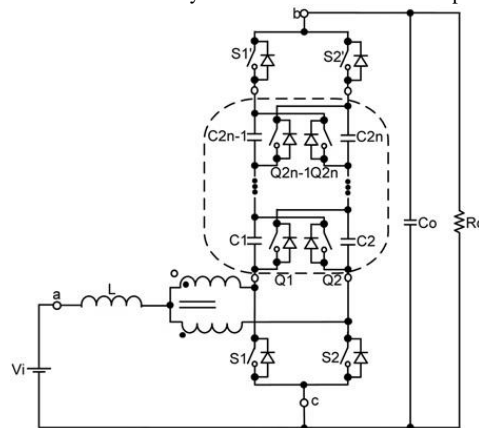
ساختار مشابه و پرکاربرد دیگر در همین زمینه مبدل افزایشنده فلای بک با ماژول چند طبقه افزایشنده ولتاژ است که می‌تواند بر اساس خواسته‌ها از مبدل طراحی و افزوده شود [۶۰] و یا حتی ساختاری که توانایی تغذیه داخلی مبدل را داشته باشد، نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶۱]. در شکل (۱۶) نمونه‌ای از این ساختار نشان داده شده است. در راستای این عملکرد مبدل‌هایی که شامل بخش ابتدایی به صورت یک مبدل افزایشنده معمولی باشند و در بخش دوم خود از یک مبدل فلای بک جهت افزایش بهره ببرند نیز جالب به نظر می‌رسد [۶۲]. در عین حال اگر بتوان خروجی مبدل را به کمک کلیدهای اکتیو تحت کنترل قرار داد عمده خواسته‌ها از یک مبدل برآورده شده، هرچند پیچیدگی کنترلی و مداری فراوانی دامن گیر طراح می‌شود [۶۳]. در شکل (۱۷) نمونه‌های کاملی از این ساختار نشان داده شده است.



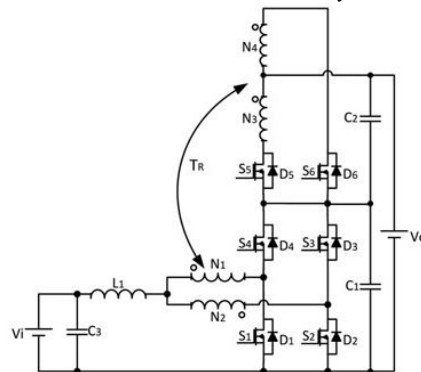
شکل (۱۶-الف): مبدل افزایشنده بر پایه مبدل فلای بک با ماژول چند برابر کننده ولتاژ [۳۴]
Figure (16-a): Boost converter times fly-back converter with a voltage multiplier module [34]



شکل (۱۶-ب): مبدل افزایشنده بر پایه مبدل فلائی بک با توانایی تغذیه داخلی [۳۵]
Figure (16-b): Boost converter times fly-back converter with internal power capability [35]



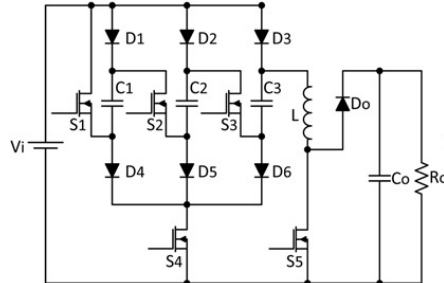
شکل (۱۷-الف): مبدل افزایشنده معمولی ترکیب با ساختار مبدل فلائی بک با چند برابر کننده اکتیو [۳۶]
Figure (17-a): Conventional boost converter combines the structure of a fly-back converter with an active multiplier [36]



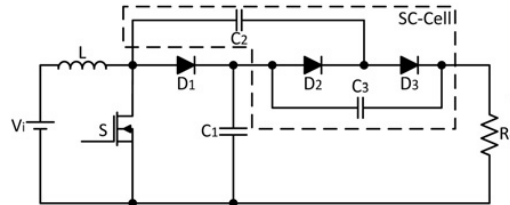
شکل (۱۷-ب): مبدل افزایشنده معمولی ترکیب با ساختار مبدل فلائی بک دو طرفه با خروجی قابل کنترل [۳۷]
Figure (17-b): boost converter combined bidirectional fly-back converter structure with controllable output [37]

مبدل‌های افزایشنده فلائی بک قابلیت تجمیع نیز داشته و می‌توان آن‌ها را به صورت چند طبقه نیز مورد استفاده قرار داد. این امر در افزایش ضریب بهره مبدل کمک شایانی می‌کند [۶۴]. یکی از ایرادهای این نوع مبدل، ناپیوستگی جریان خروجی است که برای حل این مشکل می‌توان از ساختارهای فلائی فروارد استفاده کرد. در ساختار فلائی فروارد در ابتدا با روشن شدن کلید تأمین بار توسط قسمت فروارد و خازن‌های مبدل انجام می‌گیرد و سلف فلائی بک مبدل نیز در حال شارژ است. با خاموش شدن کلید ساختار فلائی بک وارد عمل شده، بار و انرژی لازم برای شارژ خازن‌ها را فراهم می‌کند [۶۵]. شکل (۱۸) یک مبدل فلائی فروارد را نشان می‌دهد.

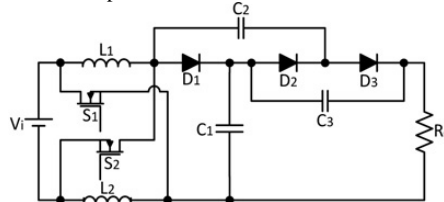
طبقه خازن سویچ شونده موازی فعال [۷۱]، مبدل با چند طبقه خازن سویچ شونده متوالی غیرفعال [۷۲] و مبدل خازن سویچ شونده متوالی دو فازه [۷۳] از مهم‌ترین مبدل‌های با خازن‌های سویچ شونده هستند. به جای خازن می‌توان از سلف نیز استفاده کرد که آنگاه آن را مبدل افزایشنده با سلف سویچ شونده می‌نامند [۷۴]. در شکل (۲۰) مبدل‌های افزایشنده با خازن سویچ شونده و در شکل (۲۱) مبدل افزایشنده با سلف سویچ شونده نشان داده شده است.



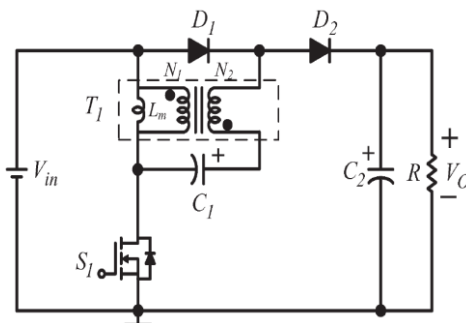
شکل (۲۰-الف): مبدل افزایشنده با خازن سویچ شونده چند طبقه موازی فعال [۴۲]
Figure (20-a): Switched capacitor boost converter with active parallel multi-level [42]



شکل (۲۰-ب): مبدل افزایشنده با خازن سویچ شونده متوالی غیرفعال [۴۳]
Figure (20-b): Switched capacitor boost converters with consecutive disabled [43]



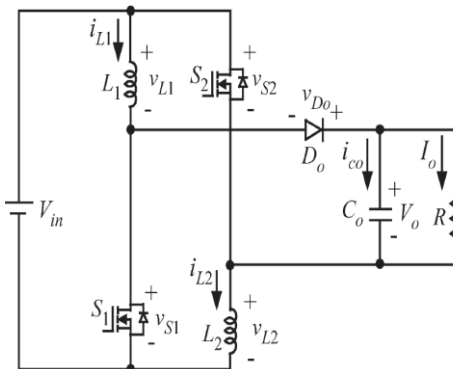
شکل (۲۰-ج): مبدل افزایشنده با خازن سویچ شونده متوالی دو فازه [۴۴]
Figure (20-c): Boost converter with consecutive two-phase switched capacitor [44]



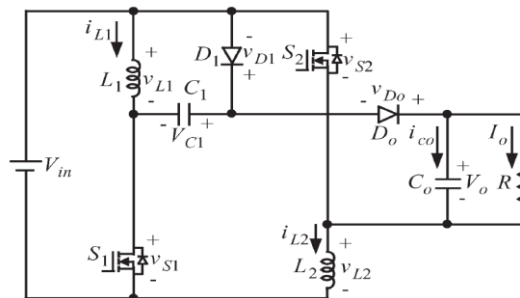
شکل (۲۱): مبدل افزایشنده با سلف سویچ شونده [۴۵]
Figure (21): Boost converter with self-switching [45]

یکی از اصلی‌ترین مشکلات مبدل‌های DC/DC جریان هجومی سلف این مدارها در لحظه راه‌اندازی است، که هم باعث فشار زیاد روی کلیدها و سایر المان‌های مدار می‌شود، هم به عنوان یک عیب بزرگ به خاطر محدودیت جریانی منبع ورودی محسوب می‌شود. از طرفی سعی بر آن است، که هم‌زمان با حل این مشکل پیچیدگی و هزینه و حجم مدار چندان تحت تاثیر قرار نگیرد. از این رو یک ساختار مناسب و بسیار پرکاربرد در مبدل‌های DC/DC غیر ایزوله استفاده از دو سلف غیر-تزوئج به-صورت موازی و به‌طور مجزا در ورودی مناسب به نظر می‌رسد. در این ساختار سلف‌ها در زمان شارژ توپولوژی موازی با هم و با منبع دارند (روشن بودن کلیدها) و در زمان دشارژ، ساختار سری (خاموش بودن کلیدها) بین منبع و سلف‌های مبدل برقرار

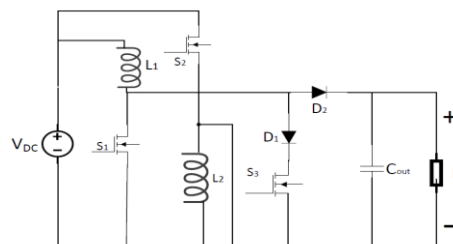
است. این دو سلف چون در زمان روشن بودن کلیدها (زمان شارژ شدن) تشکیل ساختار موازی می‌دهند، هم باعث تقسیم جریان هجومی بین دو کلید می‌شوند و هم می‌توانند در عین حال که، مقدار سلف‌ها از نظر اندازه نسبت به سلف بوست معمولی کاهش یافته، باز هم انرژی لازم برای تامین بار را در خود ذخیره کنند. به کمک استفاده از ترکیب ساختارهای دیگر به خصوص ساختار بسیار ساده و پر کاربرد افزایش ولتاژ دیود-خازنی به این توپولوژی می‌توان به ساختار کامل‌تری دست یافت. این ساختار را به صورت استفاده از یک افزایش ولتاژ روی یک کلید برای کل مدار و همچنین یک افزایش ولتاژ برای هر کدام از کلیدها به طور مجزا می‌توان ارائه کرد. شکل (۲۲-الف) مبدل با استفاده از دو سلف موازی غیر-تزوئج در ورودی را نشان می‌دهد [۷۵]. در شکل (۲۲-ب) یک افزایش دیود-خازنی در ورودی [۷۶] و در شکل (۲۲-ج) سوئیچ افزایش ولتاژ در ورودی [۷۷] به مدار قبلی اضافه شده است.



شکل (۲۲-الف): مبدل با استفاده از دو سلف موازی غیر تزوئج در ورودی [۴۶]
Figure (22-a): Converter uses two non-paired parallel inductors at the input [46]



شکل (۲۲-ب): مبدل با ساختار پایه‌ی استفاده از دو سلف موازی غیر تزوئج در ورودی با یک افزایش دیود-خازنی [۴۷]
Figure (22-b): Converter with basic structure using two unpaired parallel inductors at the input with a capacitor-diode [47]



شکل (۲۲-ج): مبدل با ساختار پایه دو سلف موازی غیر تزوئج در ورودی به اضافه کلید افزایش ولتاژ [۴۸]

Figure (22-c): Converter with base structure of two unpaired parallel inductors at the input plus switch to increase the duty [48]

مبدل‌های افزایش ولتاژ بر اساس ساختار پایه دو مسیر موازی در ورودی از نظر بهره ولتاژ در جایگاه مناسبی در میان مبدل‌های افزایش ولتاژ قرار دارند. استرس ولتاژ روی المان‌ها در چنین ساختارهایی عمدتاً در محدوده قابل قبولی است. این نمونه مبدل‌ها به سادگی می‌توانند به ساختارهای دو طرفه تبدیل شوند. البته درایو کلیدهای این مبدل‌ها نیاز به تغذیه‌های مجزا داشته و به نسبت مبدل‌های ساده و معمول تا حدی از مدارهای کنترلی پیچیده‌تری برخوردار است [۷۸]. مشخصات مهم مبدل‌ها با دو مسیر مجزای موازی در ورودی و مبدل بوست معمولی در جدول (۱) آمده است.

در جدول (۲) استرس ولتاژ روی کلید و ضریب بهره ولتاژ که از مهم‌ترین و اساسی‌ترین پارامترهای مبدل است، بیان شده است. در این جدول (MC) ضریب چند برابر کنندگی (ناشی از ترکیب مدارات چند برابر کننده غیر فعال دیود- خازنی با ساختارهای پایه مورد نظر) است.

بررسی ساختارهای کلی مبدل‌های افزایشنده اشاره شد که روی افزایش ضریب بهره ولتاژ مبدل به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر یک مبدل افزایشنده معطوف بود. حال آنکه تلفات کلیدزنی در ساختارهای کلیدزنی یکی از مسائلی که از اهمیت خاصی برخوردار است. این تلفات علاوه بر اینکه باعث ایجاد گرما روی کلید اصلی می‌شود، باعث کاهش راندمان مبدل نیز می‌گردد. افزایش تلفات کلیدزنی منجر به کاهش توان انقالی کلید اصلی و به دنبال آن کاهش توان مبدل می‌شود. از این رو اهمیت بررسی راه-کارهای کاهش تلفات کلیدزنی نسبت به روش‌های افزایش ضریب بهره ولتاژ کمتر نیست.

Table (1): Accurate comparison of parameters and number of boost converter elements with a basic structure and conventional boost converter

جدول (۱): مقایسه دقیق پارامترها و تعداد المان‌های چند مبدل بوست با یک ساختار پایه و مبدل بوست معمولی

پارامترها	نوع مبدل	مبدل با ساختار دو سلف و ورودی و کلید اضافی [۴۸]	مبدل با ساختار دو سلف ورودی یک‌طرفه با دیود خروجی [۴۶]	مبدل با ساختار دو سلف ورودی دو طرفه بدون دیود خروجی [۴۷]	مبدل بوست معمولی [۷]
بهره ولتاژ		$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+D1}{1-D1-D2}$	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+D}{1-D}$	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+D}{1-D}$	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$
استرس ولتاژ کلید		$V_{DS2} = \frac{V_o + V_{in}}{2} = V_{DS}$ $V_{DS3} = V_o$	$V_{DS2} = \frac{V_o + V_{in}}{2} = V_{DS1}$	$V_{DS2} = \frac{V_o + V_{in}}{2} = V_{DS1}$ $V_{DS3} = V_{in} + V_o$	V_o
استرس ولتاژ دیودها		$V_{D1} = V_{in}$ $V_{D2} = V_{in} + V_o$	$V_{D2} = V_{in} + V_o$	-	V_o
تعداد ماسفت‌ها		۳	۲	۳	۱
تعداد دیودها		۲	۱	۰	۱
تعداد سلف‌ها		۲	۲	۲	۱
تعداد خازن‌ها		۱	۱	۱	۱
قابلیت‌ها		بازده بالا- ساختار ساده- ریپل جریان ورودی کم	بازده بالا- ساختار ساده	بازده بالا- ریپل جریان ورودی کم- دو طرفه بودن	ساختار ساده- بدون کلید شناور- مدار کنترلی و تغذیه ساده
محدودیت‌ها		تعداد زیاد المان‌های فعال- کلید شناور	کلید شناور- یک‌طرفه بودن	کلید شناور- مدار کنترلی پیچیده	بهره ولتاژ کمتر از دیگر مبدل‌ها افزایشنده

Table (2): Accurate comparison of voltage gain and voltage stress on the main switch of several widely used boost converter structures

جدول (۲): مقایسه دقیق ضریب بهره ولتاژ و استرس ولتاژی روی کلید اصلی چند ساختار پر کاربرد مبدل‌های افزایشنده

مبدل افزایشنده	استرس ولتاژ روی کلید اصلی	ضریب بهره ولتاژ	استرس ولتاژ روی دیود
مبدل‌های متعارف و تعویض شونده [۷۹]	V_o	$\frac{1}{1-D}$	$V_{o1} + V_{o2} + \dots + V_{on}$
مبدل‌های سه سطحی [۸۰]	$\frac{V_o}{2}$	$\frac{2}{1-D}$	$\frac{V_o}{2}$
مبدل‌های آبشاری N طبقه [۸۱]	V_o	$(\frac{1}{1-D})^N$	$\frac{V_o}{n}$
مبدل‌های با استفاده از نسبت تبدیل سلف‌های تزویج [۸۲]	$n V_i$	$\frac{(n+1)-D}{1-D}$	V_o
مبدل‌های ترکیبی با ساختار فلای‌بک و استفاده از نسبت تبدیل سلف‌های تزویج [۸۳]	$\frac{V_i}{1-D}$	$\frac{nD+1}{1-D}$	V_o
مبدل‌های ترکیبی با ساختار فلای‌بک و استفاده از نسبت تبدیل سلف‌های تزویج و چند برابر کننده‌های ولتاژ (مدارات کلمپ) [۸۴]	$\frac{V_i}{1-D}$	$\frac{nVMC+1}{1-D}$	$\frac{D}{1-D} V_s$ nV_s $\frac{nD}{1-D} V_s$
مبدل‌های بر اساس خازن سویچ شونده [۸۵]	$\frac{V_o}{2}$	$\frac{2}{1-D}$	V_{On}
مبدل‌های چهار مرحله‌ای (چهار سطح تعویض شونده) [۸۶]	$\frac{V_o}{4}$	$\frac{4}{1-D}$	$\frac{2}{1-D} V_s$
مبدل‌های تعویض شونده با چند برابر کننده‌های ولتاژ (مدارات کلمپ) [۸۷]	$\frac{V_i}{1-D}$	$\frac{VMC+1}{1-D}$	$\frac{2n}{1-D} V_s$
مبدل‌های تعویض شونده با افزایشنده‌های غیر فعال (افزاینده‌های دیود-خازنی) [۸۸]	$\frac{V_o}{DMC}$	$\frac{DMC+1}{1-D}$	$\frac{2MC}{1-D} V_s$
مبدل‌های تعویض شونده و استفاده از نسبت تبدیل سلف‌های تزویج و چند برابر کننده‌های ولتاژ (مدارات کلمپ) [۸۹]	$\frac{V_i}{1-D}$	$\frac{2nVMC+1}{1-D}$	$\frac{1}{1-D} V_s$
مبدل‌های شامل ترکیب سری‌سازی چندین مبدل تزویج‌شده [۹۰]	$\frac{V_o}{VMC+1}$	$\frac{VMC+1}{1-D}$	$\frac{V_o}{MC+1}$
مبدل‌های شامل ترکیب سری‌سازی چندین مبدل تزویج‌شده با تغذیه مدار داخلی با سیم‌پیچ زام و نسبت تبدیل a_j [۹۱]	$\frac{V_o}{1 + \sum_{j=1}^n a_j}$	$\frac{1}{1-D} (1 + \sum_{j=1}^n a_j)$	$\frac{V_s}{1-D} (1+2a)$

۵- روش‌ها و ساختارهای کاهش تلفات مبدل‌های افزایشنده (روش‌های کلیدزنی نرم)

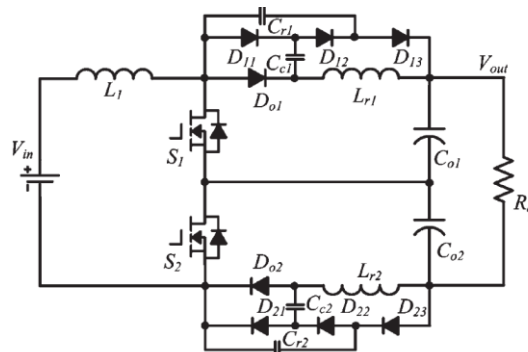
در مبدل‌های افزایشنده برای افزایش بهره‌وری و بهبود راندمان باید از روش‌های کلیدزنی نرم و ساختارهای مرتبط با آن استفاده شود. از مرسوم‌ترین روش‌های کلیدزنی نرم می‌توان به ساختارهای رزونانسی و اسنابر اشاره کرد که در این قسمت به‌طور مختصر به آنها اشاره می‌گردد.

۵-۱- روش کلیدزنی نرم بر اساس ساختارهای رزونانسی

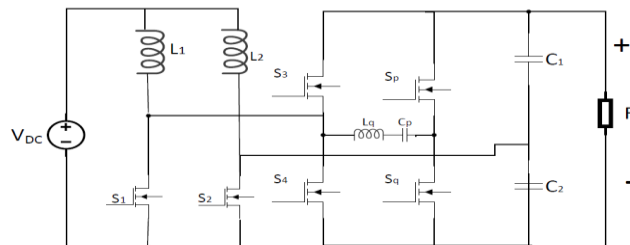
ساختارهای رزونانسی خود به دو صورت فعال و غیرفعال هستند. در ساختارهای غیرفعال با استفاده از مجموعه رزونانسی شامل یک سلف و خازن، در یک محدوده فرکانسی معین کلیدزنی نرم وجود دارد [۹۲]. یک ساختار مناسب در این زمینه یک سلف سری با یک خازن مدار افزایشنده پسیو است، که تشکیل یک ساختار رزونانسی را می‌دهد. این ساختار قابلیت قرار گرفتن هم در یک مسیر و هم در دو مسیر رفت و برگشت را دارد. یک نمونه از این ساختار در شکل (۲۳) نشان داده شده است [۹۳].

یکی دیگر از مدل‌های کلیدزنی نرم استفاده از سلف-خازن رزونانس است که با ایجاد رزونانس در فرکانس کاری مبدل می‌تواند کلیدزنی در جریان صفر را محقق کند. در این نمونه ساختارها می‌توان در زمانی که رزونانس اتفاق می‌افتد، با صفر شدن

جریان عبوری از کلید، آن را روشن کرد و تلفات کلیدزنی را به حداقل رساند [۹۵،۹۴]. در شکل (۲۴) مدار این ساختار نشان داده شده است [۹۶]. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود این روش را می‌توان برای کلیدزنی نرم چندین کلید استفاده کرد.



شکل (۲۳): مبدل افزایشنده با ساختار رزونانسی پسیو در دو مسیر [۶۳]
Figure (23): Boost converter with passive resonant structure in two directions [63]

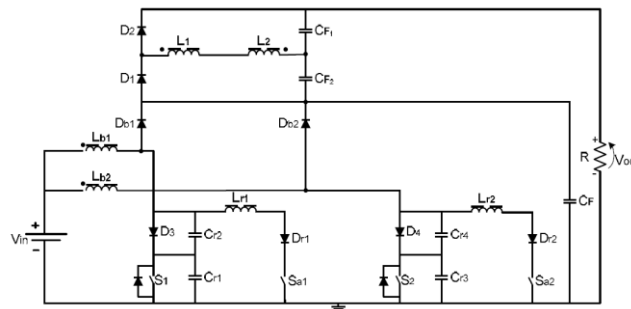


شکل (۲۴): مبدل افزایشنده با ساختار رزونانسی پسیو [۶۴]
Figure (24): Boost converter with passive resonant structure [64]

زمانی که از رزونانس غیرفعال برای کلیدزنی نرم استفاده شود به علت محدود بودن ناحیه رزونانسی برای المان‌ها مبدل محکوم به کارکرد در یک محدوده خیلی خاص است. به همین دلیل طراحان کلیدزنی نرم رزونانسی را پیشنهاد نموده‌اند [۹۸،۹۷]. در ساختارهای ترکیبی مانند مبدل فلای‌بک افزایشنده نیز کلیدزنی نرم حائز اهمیت بوده مخصوصاً زمانی که از چند کلید فعال استفاده شده باشد. در این مدارها از ترکیب ساختارهای رزونانسی برای هر کلید به منظور کاهش تلفات کلیدزنی استفاده می‌کنند. یک نمونه مناسب از رزونانس اکتیو در شکل (۲۵) نشان داده شده است [۹۹]. یکی دیگر از روش‌های ساده که به‌عنوان کلیدزنی نرم فعال شناخته می‌شود، استفاده از یک ساختار رزونانسی ساده اکتیو دقیقاً در دو سر کلید اصلی است. یکی از بزرگترین مزایای این ساختار این است که می‌تواند به کمک یک حلقه قفل فرکانس در یک پهنای فرکانسی گسترده‌ای کلیدزنی نرم را مهیا سازد. شکل (۲۶) یک مدار رزونانس با کلیدزنی فعال مستقیماً دو سر کلید را نشان می‌دهد [۱۰۰]. کلیدزنی نرم رزونانسی را می‌توان با اضافه کردن یک سلف در کنار خازن کلمپ مبدل‌های افزایشنده به نقطه مطلوبی رساند. چنین ساختارهایی بدون نیاز به ساختار جداگانه با بهره بردن از المان‌های موجود در مبدل و ترکیب آنها با المان‌های کمکی محدود به خواسته کلیدزنی نرم و کاهش تلفات رسید. شکل (۲۷) یکی از اساسی‌ترین ساختارها بر این اساس را نشان می‌دهد [۱۰۱].

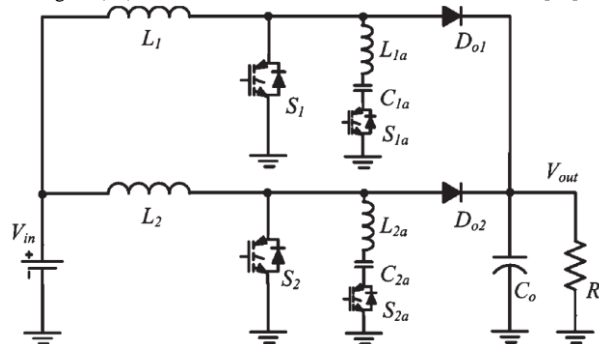
۲-۵- روش کلیدزنی نرم بر اساس ساختار مدارات اسنابر

یکی دیگر از روش‌های کلیدزنی نرم که در بسیاری از ساختارهای مبدل‌های افزایشنده مورد توجه قرار گرفته، استفاده از مدار اسنابر است [۱۰۲]. کلیت مدار اسنابر بر اساس یک خازن بنیان نهاده شده است. همان‌طور که مشخص است، یکی از اصلی‌ترین خصوصیات خازن یعنی پیوستگی ولتاژ در این عملکرد نقش اصلی را ایفا می‌کند.



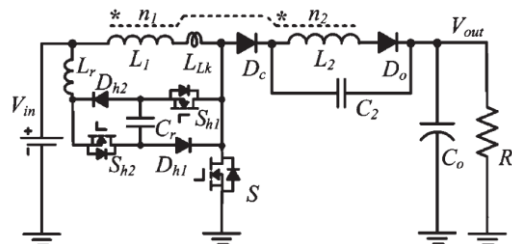
شکل (۲۵): مبدل افزایشنده با ساختار رزونانسی اکتیو [۶۵]

Figure (25): Boost converter with active resonant structure [65]



شکل (۲۶): مبدل افزایشنده با ساختار رزونانسی اکتیو دو سر کلید اصلی [۶۶]

Figure (26): Boost converter with active resonant structure of the main switch [66]

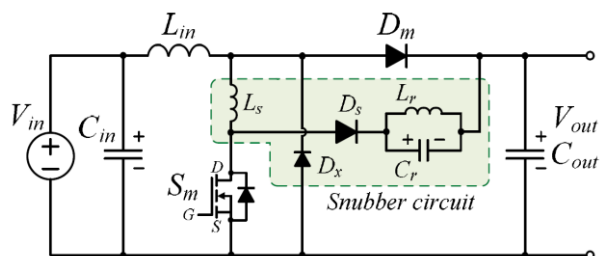


شکل (۲۷): مبدل افزایشنده با ساختار رزونانسی اکتیو به کمک استفاده از سلف اضافه شده به خازن کلمپ [۶۷]

Figure (27): Incremental converter with active resonance structure using an inductor added to the clamp capacitor [67]

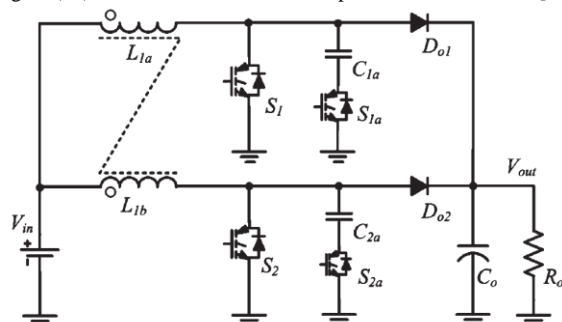
اساس کار مدار اسنابر به این صورت است که با قرار گرفتن ساختاری که عضو اصلی آن یک خازن است در دو سر کلید، زمانی که کلید می‌خواهد خاموش شود (کلید با تنش ولتاژی زیادی مواجه می‌شود) خازن اجازه چنین اتفاقی را نمی‌دهد. این امر به این دلیل است که چون ولتاژ کلید در زمان روشنی تقریباً صفر است، پس می‌توان گفت که دو سر خازن اسنابر نیز اتصال کوتاه است و ولتاژش نیز صفر است. ولی با خاموش شدن کلید، حداکثر ولتاژ دو سر کلید قرار می‌گیرد. این تغییر ولتاژ از اساسی-ترین عوامل تلفات کلیدزنی است. اما پیوستگی ولتاژ خازن اجازه افزایش ناگهانی ولتاژ دو سر کلید را نمی‌دهد. پس ولتاژ دو سر کلید زمانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد که جریان عبوری از سلف به صفر رسیده است. در نتیجه حاصل ضرب ولتاژ و جریان دو سر کلید که تلفات کلیدزنی را نشان می‌دهد، بسیار کاهش می‌یابد. البته یکی از مسائل مهم در این حالت مقداری انرژی است که در خازن اسنابر ذخیره می‌شود و با روشن شدن کلید هدر می‌رود. مدارهای اسنابر خود شامل دو مدل غیرفعال [۱۰۴، ۱۰۳] و فعال [۱۰۶، ۱۰۵] هستند. روش غیرفعال دیگر امروزه چندان مورد توجه نیست، چرا که تلفات و مشکلات خاص خود را به همراه دارد. شکل (۲۸) مبدل افزایشنده با مدار اسنابر غیرفعال را نشان می‌دهد [۱۰۷]. یک اسنابر فعال با کارایی بالا در شکل (۲۹) نشان داده شده است [۱۰۸]. در این ساختار در لحظه خاموش شدن کلید اصلی کلید اسنابر روشن شده و خازن اسنابر وظیفه خود را انجام می‌دهد.

روشی دیگر از ساختارهای اسنابر استفاده از خازن تغذیه داخلی به عنوان اسنابر است. این امر باعث می‌شود هم تلفات کلیدزنی کاهش یابد هم انرژی ذخیره شده در خازن در زمان خاموش شدن کلید اصلی هدر نرود [۱۱۰، ۱۰۹]. شکل (۳۰) نمونه‌ای از این ساختار را نشان می‌دهد [۱۱۱]. ساختاری دیگر برای کاهش تلفات کلیدزنی که از مدار اسنابر فعال استفاده می‌شود در شکل (۳۱) نشان داده شده است [۱۱۲]. در این ساختار از روش رزونانسی برای زمان روشنی و هم از خازن اسنابر برای کاهش تلفات خاموشی کلید اصلی استفاده می‌شود.



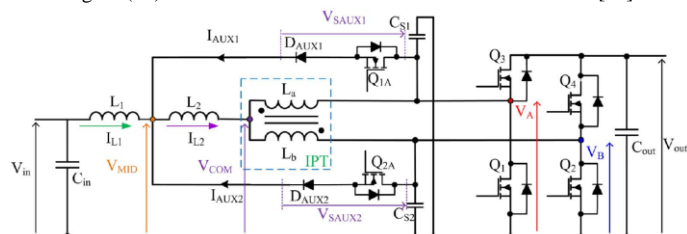
شکل (۲۸): مبدل افزایشنده با مدار اسنابر غیرفعال [۶۸]

Figure (28): Incremental converter with passive snubber circuit [68]



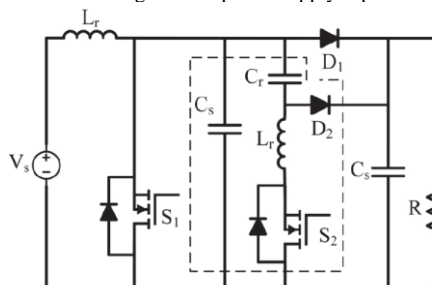
شکل (۲۹): مبدل افزایشنده با مدار اسنابر فعال [۶۹]

Figure (29): Incremental converter with active snubber circuit [69]



شکل (۳۰): مبدل افزایشنده با استفاده از خازن تغذیه داخلی به عنوان خازن اسنابر [۷۰]

Figure (30): Incremental converter using internal power supply capacitor as snubber capacitor [70]

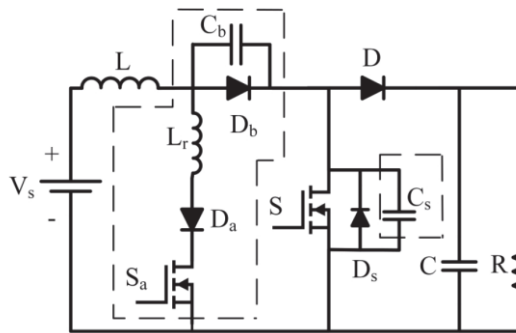


شکل (۳۱): مبدل افزایشنده با خازن اسنابر و ساختار رزونانسی [۷۱]

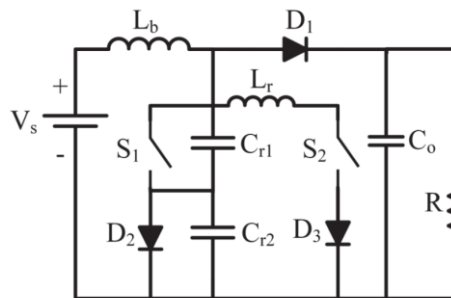
Figure (31): Incremental converter with snubber capacitor and resonant structure [71]

استفاده از ترکیب کلیدزنی نرم به کمک مدار اسنابر و ساختار رزونانسی برای حداقل کردن تلفات چه در لحظه خاموشی (اسنابر) و چه در زمان روشنی (ساختار رزونانسی) از روش‌هایی است که مورد توجه طراحان قرار گرفته به خصوص حالتی که به کلیدزنی نرم در ولتاژ صفر با بهره بردن از مدولاسیون پهنای پالس است. شکل (۳۲) این روش را در یک مبدل افزایشنده

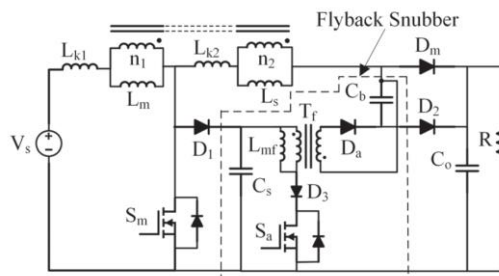
نشان می‌دهد [۱۱۳]. ساختار کامل‌تر در زمینه ترکیب کلیدزنی نرم به کمک مدار اسنابر و مدار رزونانسی است. این ساختار با کمک قسمت رزونانسی خود کلیدزنی در ولتاژ و جریان صفر و با بهره بردن از بخشی که به مدار اسنابر ساختار شناخته می‌شود کلیدزنی در ولتاژ صفر را فراهم می‌کند [۱۱۴]. همین ساختار که دارای دو سلف مربوط به قسمت رزونانس است را به راحتی می‌توان به وسیله ایجاد تزویج بین سلف‌ها به بهره‌وری بسیار بالایی رساند [۱۱۵]. از معایب یک ساختار کلیدزنی نرم همانند مدار اسنابر هدر رفتن انرژی است که از تلف شدن آن روی کلید اصلی جلوگیری به عمل آمده است. یکی از راه‌حل‌های این مشکل را می‌توان در انتقال با واسطه یا مستقیم به مدار تغذیه داخلی مبدل دانست. روش غیر مستقیم چنین طرحی در شکل (۳۳) نمایش داده شده است [۱۱۶]. استفاده از ساختار یک مبدل فلای‌بک به عنوان مبدل افزایشنده و هم‌زمان به کار بردن مدار اسنابر در این ساختار قابلیت افزایش ضریب بهره با حفظ راندمان بالا و کمترین تلفات کلیدزنی را ممکن می‌سازد. مدار شکل (۳۴) یک نمونه از این ساختار را نشان می‌دهد [۱۱۷].



شکل (۳۲): مدار اسنابر فعال و ساختار رزونانسی با مدولاسیون پهنای پالس [۷۲]
Figure (32): Active snubber circuit and resonant structure with pulse width modulation [72]



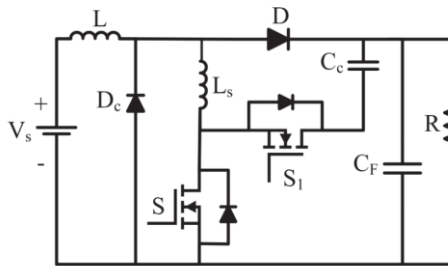
شکل (۳۳): مدار اسنابر فعال بدون تلفات [۷۵]
Figure (34): Active snubber circuit without losses [75]



شکل (۳۴): مبدل افزایشنده فلای‌بک با مدار اسنابر [۷۶]
Figure (34): Flyback booster converter with snubber circuit [76]

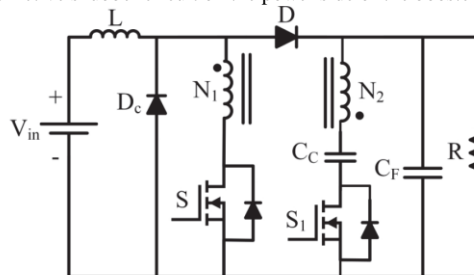
مدارهای اسنابر فعال را می‌توان مخصوصاً در ساختارهای مبدل‌های افزایشنده برای کاهش تلفات کلیدزنی استفاده کرد. مدارهای اسنابر فعال یکی از بیشترین کارایی‌های خود در یک مبدل افزایشنده را می‌توانند در طبقه قدرت و برای کاهش تلفات روی دیود قدرت نشان دهند. این نمونه ساختارها با استفاده از جداسازی مغناطیسی توسط سلف‌های تزویج شده به اوج بازدهی خود نزدیک می‌شوند. مدارهای اسنابر اکتیو در سمت قدرت یا همان کاهش‌دهنده تلفات خاموش شدن دیودهای قدرت در مبدل-

های افزایشنده هم در حالت ساده و هم در حالت ایزوله در شکل (۳۵) نشان داده شده‌اند [۱۱۸] [۱۱۹]. مروری بر چند روش بررسی اثر ساختار کلیدزنی نرم در مدارهای اسنابر فعال در جدول (۳) آمده است [۱۲۰]. همان‌طور که دیده می‌شود در مبدل‌های افزایشنده می‌توان به کمک ساختارهای مرسوم کلیدزنی به خصوص ساختارهای فعال رزونانسی و هم‌چنین مدارات اسنابر تا حد زیادی تلفات را کاهش و راندمان را افزایش داد. کلیدزنی نرم را می‌توان در لحظه خاموش شدن کلید اصلی، روشن شدن کلید اصلی، لحظه روشن شدن و لحظه خاموش شدن کلید اصلی و یا حتی در سمت قدرت تعبیه نمود و از عملکرد آن بهره برد. انتخاب ساختار برای کلیدزنی نرم در مبدل افزایشنده بر عهده طراح است تا با توجه با ساختار اصلی مد نظر خود با کمترین محدودیت مواجه باشد و به دنبال آن تبدیلی با کارایی بیشتر و قابلیت اطمینان و توان انتقالی مناسب‌تر ارائه دهد.



شکل (۳۵-الف): مدار اسنابر فعال در سمت قدرت مبدل افزایشنده [۷۷]

Figure (35-a): Active snubber circuit on the power side of the booster converter [77]



شکل (۳۵-ب): مدار اسنابر ایزوله فعال در سمت قدرت مبدل افزایشنده [۷۸]

Figure (35-b): Isolated snubber circuit active on the power side of the amplifier converter [78]

۶- نتیجه‌گیری

دست‌یافتن به منابع انرژی تجدیدپذیر و تولید انرژی الکتریکی از آن، خواسته مهم و ضروری انسان امروز است. نیروگاه‌هایی که وظیفه تبدیل انرژی‌های نو به انرژی الکتریکی را دارند، سازگار با طبیعت، پایان‌ناپذیر و در دسترس هستند. همه این محاسن با یک محدودیت، یعنی کم بودن سطح ولتاژ خروجی آنها (در بیشتر موارد و کاربرد ساده) برای استفاده قسمت‌های بعدی از جمله اینورترها و... تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از مبدل‌های DC/DC افزایشنده در خروجی این نیروگاه‌ها تا حد زیادی این مشکل برطرف می‌شود. از این رو مبدل‌های افزایشنده و تحقیق و توسعه چنین تجهیزاتی به‌طور چشم‌گیری مورد توجه محافل علمی قرار گرفته‌اند. در مبدل‌های افزایشنده دو خواسته ضریب بهره ولتاژ و راندمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

نیاز به بهینه‌سازی مبدل‌های افزایشنده برای تولید انرژی الکتریکی پاک و مطمئن، که خود مستلزم طراحی مبدل‌هایی با بهره ولتاژ و کارایی مناسب است، منجر به یک جهش جدی در خصوصیات اصلی مورد انتظار از یک مبدل افزایشنده، یعنی ضریب بهره ولتاژ و بازده در این مبدل‌ها شد. ساختارهای مختلفی که طراحان ارائه می‌کنند، تلاش برای بهبود ضریب بهره ولتاژ به کمک استفاده از روش‌های مرسوم در الکترونیک قدرت دارند. ساختارهایی همچون افزایشنده به کمک نسبت تبدیل بین سلف‌های ایزوله و یا سلف‌های غیرایزوله، ساختارهای تعویض شونده و چندسطحی، ترکیب چند ساختار، استفاده از روش‌های سری و موازی‌سازی و ساختارهای آبخاری از جمله مورد توجه‌ترین ساختارهای کلی مورد توجه برای مبدل‌های افزایشنده است.

Table (3): The effect of soft switching structure on the main elements of boost converters

جدول (۳): تأثیر ساختار کلیدزنی نرم روی المان‌های اصلی مبدل‌های افزایشنده

تأثیر روی دیود یکسوساز خروجی	تأثیر روی کلید تغذیه داخلی	تأثیر روی کلید اصلی	ساختار مبدل و مدار اسنابر فعال
روشنی و خاموشی در ولتاژ صفر- جریان بازیافت معکوس محدود	جریان روشنی نزدیک صفر و خاموشی در ولتاژ صفر	روشنی و خاموشی در ولتاژ صفر	مبدل افزایشنده با ساختار کلیدزنی نرم در ولتاژ صفر با مدولاسیون پهنای پالس با رزونانس سری [۱۲۲، ۱۲۱]
روشنی و خاموشی در ولتاژ صفر	جریان روشنی صفر و خاموشی در ولتاژ صفر	روشنی و خاموشی در ولتاژ صفر	مبدل افزایشنده با ساختار کلیدزنی نرم در ولتاژ صفر با مدولاسیون پهنای پالس با رزونانس موازی [۱۲۳]
روشنی در ولتاژ صفر و خاموشی در جریان و ولتاژ صفر	روشنی در جریان صفر و خاموشی در ولتاژ صفر	روشنی در ولتاژ صفر و خاموشی در جریان صفر	مبدل افزایشنده با ساختار کلیدزنی نرم در ولتاژ و جریان صفر با مدولاسیون پهنای پالس با رزونانس موازی [۱۲۴]
روشنی و خاموشی در ولتاژ صفر	روشنی در جریان صفر و خاموشی در ولتاژ صفر	روشنی در ولتاژ صفر و خاموشی در جریان صفر	مبدل افزایشنده با ساختار کلیدزنی نرم در ولتاژ و جریان صفر با مدولاسیون پهنای پالس با رزونانس و سلف‌های تزویج [۱۲۶، ۱۲۵]
-----	خاموشی و روشنی در جریان صفر	خاموشی و روشنی در ولتاژ صفر	مبدل افزایشنده با اسنابر فعال بدون تلفات [۱۲۷]
-----	روشنی در جریان صفر	خاموشی در ولتاژ صفر	مبدل افزایشنده با اسنابر فعال با خازن شناور و سلف برگشت تغذیه [۱۲۸]
جریان بازیابی معکوس افزایشی کنترل شده	-----	کلیدزنی در ولتاژ و جریان نزدیک صفر	مبدل افزایشنده ترکیبی فلای‌بک با اسنابر فعال برای قسمت فلای‌بک [۱۲۹]
بدون تلفات جریان معکوس- کاهش استرس ولتاژ روی دیود	-----	-----	مبدل افزایشنده با اسنابر فعال برای قسمت قدرت مبدل [۱۳۰]
بدون تلفات جریان معکوس- کاهش استرس ولتاژ روی دیود	-----	روشنی در ولتاژ صفر	مبدل افزایشنده با اسنابر فعال ایزوله برای قسمت قدرت مبدل [۱۳۱]

استفاده از چنین ساختارهایی نقش بسیار مهمی در بهبود وظیفه اصلی یک مبدل افزایشنده (ضریب بهره ولتاژ) ایفا می‌کند. با افزایش ضریب بهره ولتاژ مبدل‌های افزایشنده، باید خواسته مهم دیگر مبدل‌ها یعنی بازده در نظر گرفته شود، چرا که با افزایش ضریب بهره ولتاژ و توان انتقالی میزان تلفات مبدل نیز افزایش می‌یابد و می‌تواند عملاً مبدل را بدون استفاده کند. بر همین اساس باید ساختارهای مختلفی برای کاهش تلفات یک مبدل، خصوصاً تلفات کلیدزنی در نظر گرفته شود. ساختارهای رزونانسی غیرفعال و فعال، مدارات اسنابر فعال و غیرفعال و ترکیب‌های مختلفی از این ساختارها تاکنون ارائه شده و مبدل‌های افزایشنده را از نظر راندمان نیز در محدوده قابل قبولی قرار داده است. بنابراین می‌توان به کمک ترکیب ساختارهای مختلف و مرسوم افزایش ضریب بهره ولتاژ را ممکن ساخت. از سوی دیگر ساختارهای ترکیبی کلیدزنی نرم در مبدل‌های افزایشنده با ضریب بهره ولتاژ بالا، منتج به مبدلی افزایشنده با راندمان بالا و ضریب بهره ولتاژ مناسب می‌شود. این چنین استراتژی، باعث شده تا پژوهشگران حوزه انرژی با دست باز تولید انرژی الکتریکی را به سمت و سوی استفاده از انرژی‌های سازگار با طبیعت یا همان انرژی‌های نو سوق دهند.

References

مراجع

- [1] M. Das, V. Agarwal, "Design and analysis of a high efficiency dc-dc converter with soft switching capability for renewable energy applications requiring high voltage gain", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 2936-2944, Ma. 2016 (doi:10.1109/TIE.2016.2515565).
- [2] A. Asharfpoor, G. Shahgholian, "Harmonics generated by hydroelectric power plants and wind farms in the power system", International Journal Natural and Engineering Sciences, vol. 14, no. 2, pp. 21-40, 2020.
- [3] M. H. Rahman, S. K. Ghosh, M. S. Islam, A. K. Paul, "Design and analysis of a high efficiency modified dc-dc step up converter for PV system", Proceeding of the IEEE/PEEIACON, pp. 23-26, Dhaka, Bangladesh, Dec. 2019 (doi: 10.1109/PEEIACON48840.2019.9071949).

- [4] H. Ma, R. Zee, B. Nauta, "Design and analysis of a high-efficiency high-voltage class-d power output stage", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 7, pp. 1514-1524, July 2014 (doi: 10.1109/JSSC.2014.2317780).
- [5] M. Moradian, A. Soltani-Mohammadi, "A new control system for a dual stator-winding cage rotor induction generator in direct grid connected condition with maximum power point tracking of wind turbine", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 35, pp. 3-10, Autumn 2019.
- [6] G. Shahgholian, K. Khani, M. Moazzami, "Frequency control in autonomous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, Autumn 2015.
- [7] S. Hasanpour, Y. Siwakoti, F. Blaabjerg, "Hybrid cascaded high step-up dc/dc converter with continuous input current for renewable energy applications", *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 15, pp. 3487-3495, Nov. 2020 (doi: 10.1049/iet-pel.2020.0544).
- [8] W. Li, and X. He, "Review of non-isolated high-step-up dc/dc converters in photovoltaic grid-connected applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no.4, pp.1239-1250, Apr. 2011 (doi 10.1109/TI-A.2018.2814563).
- [9] M.H. Taghvaei, M.A.M. Radzi, S.M. Moosavain, H. Hizam, M. H. Marhaban, "A current and future study on non-isolated dc-dc converters for photovoltaic applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 216-227, Oct. 2013 (doi: 10.1016/j.rser.2012.09.023).
- [10] L. Po, L. Ruiyu, S. Tianying, Z. Jingrui, F. Zheng, "Composite adaptive model predictive control for dc-dc boost converters", *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 10, pp. 1706-1717, Aug. 2018 (doi: 10.1049/iet-pel.2017.0835).
- [11] M. Veerachary, P. Kumar, "Analysis and design of quasi-z-source equivalent dc-dc boost converters", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6642-6656, Nov/Dec. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.302-1372).
- [12] A. Affam, Y. Buswig, A. H. Othman, N. B. Julai, O. Qays, "A review of multiple input dc-dc converter topologies linked with hybrid electric vehicles and renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, Article Number: 110186, 2021 (doi: 10.1016/j.rser.2020.110186).
- [13] B. S. Revathi, M. Prabhakar, "Non isolated high gain DC-DC converter topologies for PV applications – A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 920-933, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2016.08.057).
- [14] S. Lee, H. Do, "Zero-ripple input-current high-step-up boost-SEPIC dc-dc converter with reduced switch-voltage stress", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6170-6177, Aug. 2017 (doi: 10.1109/TPEL.2016.2615303).
- [15] S. Sivakumar, M. JagabarSathik, P. S. Manoj, G. Sundararajan, "An assessment on performance of dc-dc converters for renewable energy applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 58, pp. 1475-1485, Ma. 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2015.12.057).
- [16] M. Larrañaga Aizpurua, Z. Leonowicz, "Advanced solar energy systems with thermoelectric generators", *Proceeding of the IEEE/EEEIC*, pp. 1-4, Palermo, Italy, June 2018 (doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493685).
- [17] M. Zamani, G. H. Riahy, N. Abdolghani, M. H. Zamani, G. Shahgholian, "Utilization of thermal energy storage for reducing battery bank size of hybrid (wind-PV) systems", *Proceeding of the IEEE/ICCEP*, pp. 709-714, Ischia, Italy, June 2011 (doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036358).
- [18] K. Anoune, M. Bouya, M. Ghazouani, A. Astito, A. B. Abdellah, "Hybrid renewable energy system to maximize the electrical power production", *Proceeding of the IEEE/IRSEC*, pp. 533-539, Marrakech, Morocco, Nov. 2016 (doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983992).
- [19] M. Abbasi, J. Lam, "A very high gain modular three-phase ac/dc soft-switched converter featuring high gain ZCS output rectifier modules without using step-up transformers for dc grid in wind systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, 3723-3736, July/Aug. 2018 (doi: 10.1109/TIA.2018.2814563).
- [20] V. Yaramasu, B. Wu, P.C. Sen, S. Kouro, M. Narimani, "Highpower wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 103, no. 5, pp. 740-788, Ma. 2015 (doi:10.1109/TIA.2018.2811572).
- [21] X. Fang, X. Ding, S. Zhong, Y. Tian, "Improved quasi-Y-source dc-dc converter for renewable energy", *CPSS Trans. on Power Electronics and Applications*, vol. 4, no. 2, pp. 163-170, Jun. 2019 (doi: 10.2429/5/CPSSPEA.2019.00016).
- [22] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, Summer 2020 (10.30501/JREE.2020.221567-1087).
- [23] M.L. Alghaythi, R.M. O'Connell, N.E. Islam, M.M.S. Khan, J.M. Guerrero, "A high step-up interleaved dc-dc converter with voltage multiplier and coupled inductors for renewable energy systems", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123165-123174, 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007137).
- [24] B. P. Baddipadiga, "A family of high-voltage-gain dc-dc converters based on a generalized structure", *IEEE Trans. on Sustain. Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 318-329, July 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2017.2777451).

- [25] A. Amir, A. Amir, H.S. Che, A. Elkhateb, N.A. Rahim, "Comparative analysis of high voltage gain dc-dc converter topologies for photovoltaic systems", *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 1147-1163, Jun. 2019 (doi: 10.1016/j.renene.2018.09.089).
- [26] T. Arunkumari, V. Indragandhi, "An overview of high voltage conversion ratio dc-dc converter configurations used in DC micro-grid architectures", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 670-687, 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2017.04.036).
- [27] M. Mirtalae, R. Amani-Nafchi, "Boost high step-up dc/dc converter with coupled inductors and diode-capacitor Technique", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 39, pp. 3-12, Autumn 2019.
- [28] A. Nourbehesht, M. Jabbari, "Design and implementation of a new resonant soft-switching dc/dc buck converter", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 38, pp. 3-12, Summer 2019.
- [29] C. Tu, X. Yu, F. Xiao, B. Liu, Q. Guo, "Transient DC bias suppression of three-port isolated DC-DC converter", *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 16, pp. 3787-3796, Nov. 2020 (doi: 10.1049/iet-pel.2020.0239).
- [30] R. Yin, M. Shi, W. Hu, J. Guo, P. Hu, Y. Wang, "An accelerated model of modular isolated dc/dc converter used in offshore dc wind farm", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 4, pp. 3150-3163, Apr. 2019 (doi: 10.1109/TPEL.2018.2854739).
- [31] G. Dileep, S.N. Singh, "Selection of non-isolated dc-dc converters for solar photovoltaic system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1230-1247, Sept. 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2017.03.130).
- [32] M. E. Başoğlu, B. Çakır, "Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated dc-dc converters by using a new approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1100-1113, July 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2016.01.128).
- [33] U.M. Choi, K.B. Lee, F. Blaabjerg, "Power electronics for renewable energy systems: wind turbine and photovoltaic systems", *Proceeding of the IEEE/ICRERA*, pp. 1-8, Nagasaki, Japan, Nov. 2012 (doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477249).
- [34] S.M. Chen, T.J. Liang, L.S. Yang, J.F. Chen, "A cascaded high step-up dc-dc converter with single switch for microsource applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1146-1153, July 2011 (doi: 10.1109/TIA.2018.2816345).
- [35] R.P. Torrico-Bascopé, L. F. Costa, G. V. Torrico-Bascopé, "Generation of new nonisolated high voltage gain DC-DC converters", *Proceeding of the IEEE/INTLEC*, pp. 1-8, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2011 (doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099836).
- [36] E. Mattos, A. M. S. S. Andrade, G. V. Hollweg, J. R. Pinheiro, M. L. S. Martins, "A review of boost converter analysis and desing in aerospace applications", *IEEE Latin America Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 305-313, Feb. 2018 (doi: 10.1109/TLA.2018.8327380).
- [37] S. Lee, H. Do, "High step-up coupled-inductor cascade boost dc-dc converter with lossless passive snubber", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7753-7761, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TIE.2018.2803731).
- [38] N. Vazquez, L. Estrada, C. Hernandez, E. Rodriguez, "The tapped-inductor boost converter", *Proceeding of the IEEE/ISIE*, pp. 538-543, Vigo, Spain, Jun. 2007 (doi: 10.1109/ISIE.2007.4374654).
- [39] W. Li, X. He, "An interleaved winding-coupled boost converter with passive lossless clamp circuits," in *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1499-1507, July 2007 (doi: 10.1109/TPEL.2007.900521).
- [40] Y. Berkovich and B. Axelrod, "Switched-coupled inductor cell for DC-DC converters with very large conversion ratio", *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 309-315, Ma. 2011 (doi: 10.1049/iet-pel.2009.0341).
- [41] Q. Zhao, F.C. Lee, "High-efficiency, high step-up DC-DC converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 65-73, Jan. 2003 (doi: 10.1109/TPEL.2002.807188).
- [42] T. Wu, Y. Lai, J. Hung and Y. Chen, "Boost converter with coupled inductors and buck-boost type of active clamp", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 154-162, Jan. 2008 (doi: 10.1109/TIE.2007.903925).
- [43] W. Rong-Jong, D. Rou-Yong, "High step-up converter with coupled-inductor", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1025-1035, Sept. 2005 (doi: 10.1109/TPEL.2005.854023).
- [44] B. Gu, J. Dominic, J. Lai, Z. Zhao, C. Liu, "High boost ratio hybrid transformer DC-DC converter for photovoltaic module applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 2048-2058, Apr. 2013 (doi: 10.1109/TPEL.2012.2198834).
- [45] Y. Hsieh, J. Chen, T. Liang, L. Yang, "Analysis and implementation of a novel single-switch high step-up DC-DC converter", *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 11-21, Janu. 2012 (doi: 10.1049/iet-pel.2010.0279).
- [46] R. Wai, C. Lin, R. Duan, Y. Chang, "High-efficiency DC-DC converter with high voltage gain and reduced switch stress", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 354-364, Feb 2007 (doi: 10.1109/TIE.2006.888794).
- [47] J.P.M. Figueiredo, F.L. Tofoli, R.L. Alves, "Comparison of nonisolated dc-dc converters from the efficiency point of view", *Proceeding of the IEEE/COPEP*, pp. 14-19, Natal, Brazil, Sept. 2011 (doi: 10.1109/CO-BEP.2011.6085174).

- [48] W. Li, Y. Zhao, J. Wu, X. He, "Interleaved high step-up converter with winding-cross-coupled inductors and voltage multiplier cells", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 133-143, Jan. 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2009.2028688).
- [49] R. Verma, S. L. Shimi, "Analysis and review of DC-DC converter for electric vehicle", *Proceeding of the IEEE/ICICCS*, pp. 1649-1654, Madurai, India, Mar. 2019 (doi: 10.1109/ICCONS.2018.8663130).
- [50] W. Martinez, C. A. Cortes, J. Imaoka, K. Umetani, M. Yamamoto, "Current ripple modeling of an interleaved high step-up converter with coupled inductor", *Proceeding of the IEEE/IFEEEC*, pp. 1084-1089, Kaohsiung, Taiwan, June 2017 (doi: 10.1109/IFEEEC.2017.7992192).
- [51] W. Khadmun, W. Subsingha, "High voltage gain interleaved dc boost converter application for photovoltaic generation system", *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 390-398, July 2013 (doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.767).
- [52] Y. Ping, X. Jianping, Z. Guohua, Z. Shiyu, "A new quadratic boost converter with high voltage step-up ratio and reduced voltage stress", *Proceedings of The IEEE/IPEMC*, pp. 1164-1168, Harbin, China, June 2012 (doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258989).
- [53] L. Huber, M. M. Jovanovic, "A design approach for server power supplies for networking applications", *Proceeding of the IEEE/APEC*, vol. 2, pp. 1163-1169, New Orleans, LA, USA, Feb. 2000 (doi: 10.1109/AP-EC.2000.822834).
- [54] L. Po-Wa, L. Yim-Shu, D. K. W. Cheng, L. Xiu-Cheng, "Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 787-795, Aug. 2000 (doi: 10.1109/41.857959).
- [55] H. Xudong, W. Xiaoyan, T. Nergaard, L. Jih-Sheng, X. Xingyi, Z. Lizhi, "Parasitic ringing and design issues of digitally controlled high power interleaved boost converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1341-1352, Sept. 2004 (doi: 10.1109/TPEL.2004.833434).
- [56] Q. Zhao, F.C. Lee, "High performance coupled-inductor DC-DC converters", *Proceeding of the IEEE/APEC*, pp. 109-113 vol.1, Miami Beach, FL, USA, Feb. 2003 (doi: 10.1109/APEC.2003.1179184).
- [57] H. Seong, H. Kim, K. Park, G. Moon, M. Youn, "High step-up DC-DC converters using zero-voltage switching boost integration technique and light-load frequency modulation control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1383-1400, Mar. 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2011.2162966).
- [58] J. Won Baek, R. Myung-Hyo, K. Tae-Jin, Y. Dong-Wook, K. Jong-Soo, "High boost converter using voltage multiplier", *Proceeding of the IEEE/IECON*, pp. 1-6, Raleigh, NC, USA, Nov. 2005 (doi: 10.1109/IECON.2005.1568967).
- [59] T. Liang, S. Chen, L. Yang, J. Chen, A. Ioinovici, "Ultra-large gain step-up switched-capacitor dc-dc converter with coupled inductor for alternative sources of energy", *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 4, pp. 864-874, Apr. 2012 (doi: 10.1109/TCSI.2011.2169886).
- [60] S.V. Araujo, R.P. Torrico-Bascope, G.V. Torrico-Bascope, "Highly efficient high step-up converter for fuel-cell power processing based on three-state commutation cell", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 1987-1997, June 2010 (doi: 10.1109/TIE.2009.2029521).
- [61] G.V. Torrico-bascope, S.A. Vasconcelos, R.P. Torrico-bascope, F.L. M. Antunes, D.S. De Oliveira, C.G.C. Branco, "A high step-up dc-dc converter based on three-state switching cell", *Proceeding of the IEEE/ISIE*, pp. 998-1003, Montreal, QC, Canada, July 2006 (doi: 10.1109/ISIE.2006.295772).
- [62] F.L. Tofoli, D.S. Oliveira, R.P. Torrico-Bascope, Y.J.A. Alcazar, "Novel nonisolated high-voltage gain dc-dc converters based on 3SSC and VMC", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3897-3907, Sept. 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2012.2190943).
- [63] E. F. de Oliveira, G. A. T. Hertz, M. de C. Gino, R. P. Torrico-Bascope, "Magnetically coupled bidirectional dc-dc converter based on the three state switching cell", *Proceeding of the IEEE/COBEP*, pp. 679-685, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, Oct. 2009 (doi: 10.1109/COBEP.2009.5347606).
- [64] S.L. Brockveld, G. Waltrich, "Boost-flyback converter with interleaved input current and output voltage series connection", *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 8, pp. 1463-1471, 2018 (doi: 10.1049/iet-pel.2017.0657).
- [65] K. Tseng, J. Chen, J. Lin, C. Huang, T. Yen, "High step-up interleaved forward-flyback boost converter with three-winding coupled inductors", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 4696-4703, Sept. 2015 (doi: 10.1109/TPEL.2014.2364292).
- [66] Y. Zhang, J. Shi, L. Zhou, J. Li, M. Sumner, P. Wang, C. Xia, "Wide input-voltage range boost three-level dc-dc converter with quasi-Z source for fuel cell vehicles", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 6728-6738, Sept. 2017 (doi: 10.1109/TPEL.2016.2625327).
- [67] A. Ganjavi, H. Ghoreishy, A. A. Ahmad, "A novel single-input dual-output three-level dc-dc converter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 8101-8111, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TIE.2018.2-807384).
- [68] L. Bor-Ren, L. Hsin-Hung, "Single-phase three-level PWM rectifier", *Proceedings of the IEEE/PEDS*, vol. 1, pp. 63-68, Hong Kong, Hong Kong, July 1999 (doi: 10.1109/PEDS.1999.794537).
- [69] G. Revana, V.R. Kota, "Simulation and implementation of resonant controller based PV fed cascaded boost-converter three phase five-level inverter system", *Journal of King Saud University- Engineering Sciences*, vol. 32, no. 7, pp. 411-424, Nov. 2020 (doi: 10.1016/j.jksues.2019.04.002).

- [70] F. Xiaogang, L. Jinjun, F.C. Lee, "Impedance specifications for stable DC distributed power systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 157-162, March 2002, (doi: 10.1109/63.988825).
- [71] O. Abutbul, A. Gherlitz, Y. Berkovich, A. Ioinovici, "Step-up switching-mode converter with high voltage gain using a switched-capacitor circuit", *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 50, no. 8, pp. 1098-1102, Aug. 2003 (doi: 10.1109/TCSI.2003.815206).
- [72] J. C. Rosas-Caro, J.M. Ramirez, F.Z. Peng, A. Valderrabano, "A DC-DC multilevel boost converter", *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 129-137, Jan. 2010 (doi: 10.1049/iet-pel.2008.0253).
- [73] Y. Tang, T. Wang, Y. He, "A switched-capacitor-based active-network converter with high voltage gain", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2959-2968, June 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.227-2639).
- [74] S. Chen, M. Lao, Y. Hsieh, T. Liang, K. Chen, "A novel switched-coupled-inductor dc-dc step-up converter and its derivatives", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 309-314, Jan./Feb. 2015, (doi 10.1109/TIA.2014.2332642).
- [75] Y. Shen, Lung, "Transformerless DC-DC converters with high step-up voltage gain", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3142-3155, Aug. 2009 (doi 10.1109/TIE.2017.2746335).
- [76] R.J. Wai, C.Y. Lin, R.Y. Duan, Y.R. Chang, "High-efficiency dc-dc converter with high voltage gain and reduced switch stress", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 354-364, Feb. 2007 (doi 10.1109/TIE.2009.2031197).
- [77] M. Lakshmi, "Non-isolated high gain dc-dc converter for dc microgrids", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 1205-1212, Aug. 2017 (doi 10.1109/TIE.2017.2733463).
- [78] L.S. Yang, T.J. Liang, "A Bidirectional Modular Multilevel dc-dc Converter of Triangular Structure", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 422-434, Jan. 2014 (doi 10.1109/TIE.2009.2022512).
- [79] D.R. Garth, W.J. Muldoon, G.C. Benson, E.N. Costague, "Multi-phase, 2-kilowatt, high-voltage, regulated power supply", *Proceeding of the IEEE/PESC*, pp. 110-116, Pasadena, CA, USA, April 1971 (doi: 10.1109/PESC.1971.7069141).
- [80] M.T. Zhang, Y. Jiang, F.C. Lee, M.M. Jovanovic, "Single-phase three-level boost power factor correction converter", *Proceedings of the IEEE/APEC*, pp. 434-439 vol.1, Dallas, TX, USA, March 1995 (doi: 10.1109/APEC.1995.468984).
- [81] L. Huber, M.M. Jovanovic, "A design approach for server power supplies for networking applications", *Proceedings of the IEEE/APEC*, vol.2, pp. 1163-1169, New Orleans, LA, USA, Feb. 2000 (doi: 10.1109/AP-EC.2000.822834).
- [82] F.S.F. Silva, A.A.A. Freitas, S. Daher, S.C. Ximenes, S.K.A. Sousa, M. S. Edilson, F.L.M. Antunes, C.M.T. Cruz, "High gain dc-dc boost converter with a coupling inductor", *Proceeding of the IEEE/COPEP*, pp. 486-492, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, Oct. 2009 (doi: 10.1109/COBEP.2009.5347668).
- [83] K.C. Tseng, T.J. Liang, "Novel high-efficiency step-up converter", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 151, no. 2, pp. 182-190, 9 Mar. 2004 (doi: 10.1049/ip-epa:20040022).
- [84] B. Ju-Won, R. Myung-Hyo, K. Tae-Jin, Y. Dong-Wook, K. Jong-Soo, "High boost converter using voltage multiplier", *Proceeding of the IEEE/IECON*, pp. 1-6, Raleigh, NC, USA, Nov. 2005 (doi: 10.1109/IECON-2005.1568967).
- [85] J.C. Rosas-Caro, J.M. Ramirez, P.M. Garcia-Vite, "Novel dc-dc multilevel boost converter", *Proceeding of the IEEE/PESC*, pp. 2146-2151, Rhodes, Greece, June 2008 (doi: 10.1109/PESC.2008.4592260).
- [86] C. Pan, C. Chuang, C. Chu, "A novel transformer-less adaptable voltage quadrupler dc converter with low switch voltage stress", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4787-4796, Sept. 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.2287020).
- [87] R. Gules, L. L. Pfischer, L. C. Franco, "An interleaved boost dc-dc converter with large conversion ratio", *Proceeding of the IEEE/ISIE*, vol. 1, pp. 411-416, Rio de Janeiro, Brazil, June 2003 (doi: 10.1109/ISIE.200-3.1267284).
- [88] L. Zhou, B. Zhu, Q. Luo, S. Chen, "Interleaved non-isolated high step-up dc-dc converter based on the diode-capacitor multiplier", *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 390-397, Feb. 2014 (doi: 10.1049/iet-pel.2013.0124).
- [89] G.A.L. Henn, R.N.A.L. Silva, P.P. Praça, L.H.S.C. Barreto, D.S. Oliveira, "Interleaved-boost converter with high voltage gain", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 11, pp. 2753-2761, Nov. 2010 (doi: 10.1109/TPEL.2010.2049379).
- [90] S.V. Araujo, R.P.T. Bascope, G.V.T. Bascope, L. Menezes, "Step-up converter with high voltage gain employing three-state switching cell and voltage multiplier", *Proceeding of the IEEE/PESC*, pp. 2271-2277, Rhodes, Greece, June 2008 (doi: 10.1109/PESC.2008.4592279).
- [91] G.C. Silveira, F.L. Tofoli, L.D.S. Bezerra, R.P. Torrico-Bascopé, "A nonisolated DC-DC boost converter with high voltage gain and balanced output voltage", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 6739-6746, Dec. 2014 (doi: 10.1109/TIE.2014.2317136).
- [92] C. Bai, B. Han, B. Kwon, M. Kim, "Highly efficient bidirectional series-resonant dc/dc converter over wide range of battery voltages", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 3636-3650, April 2020 (doi: 10.1109/TPEL.2019.2933408).

- [93] W. Hongyang, H. Xiangning, "Single phase three-level power factor correction circuit with passive lossless snubber", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 6, pp. 946-953, Nov. 2002 (doi: 10.1109/TPEL.2002.805578).
- [94] T. Zhan, Y. Zhang, J. Nie, Y. Zhang, Z. Zhao, "A novel soft-switching boost converter with magnetically coupled resonant snubber", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 11, pp. 5680-5687, Nov. 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.2295887).
- [95] M. Jabbari, U.D. Tehrani, "Double-boost switched-resonator converter", *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 8, pp. 1382-1388, June 2018 (doi: 10.1049/iet-pel.2017.0490).
- [96] M. Delshad, E. Shahri, "A new soft switching interleaved boost converter with high voltage gain", *Proceeding of the IEEE/ECTI*, pp. 744-747, Khon Kaen, Thailand, May 2011 (doi: 10.1109/ECTICON.2011.5947947).
- [97] J. Kim, M. Park, J. Han, M. Lee, J. Lai, "PWM resonant converter with asymmetric modulation for ZVS active voltage doubler rectifier and forced half resonance in PV application", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 508-521, Jan. 2020 (doi: 10.1109/TPEL.2019.2914016).
- [98] Y. Shang, C. Zhang, N. Cui, J. M. Guerrero, "A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 3731-3747, July 2015 (doi: 10.1109/TPEL.2014.2345672).
- [99] R.N.A.L. Silva, G.A.L. Henn, P.P. Praca, L.H.S.C. Barreto, D.S. Oliveira, F.L.M. Antunes, "Soft-switching interleaved boost converter with high voltage gain", *Proceeding of the IEEE/PESC*, pp. 4157-4161, Rhodes, Greece, June 2008 (doi: 10.1109/PESC.2008.4592607).
- [100] C.M.O. Stein, J.R. Pinheiro, H.L. Hey, "A ZCT auxiliary commutation circuit for interleaved boost converters operating in critical conduction mode", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 6, pp. 954-962, Nov. 2002 (doi: 10.1109/TPEL.2002.805607).
- [101] E. Roshandel, S. Kahourzade, A. Mahmoudi, "High step-up dc-dc converter for traction drives supplied by fuel cells", *Proceeding of the IEEE/VPPC*, pp. 1-6, Hanoi, Vietnam, Oct. 2019 (doi: 10.1109/VPPC465-32.2019.8952343).
- [102] T. Shamsi, M. Delshad, E. Adib, M.R. Yazdani, "A new simple-structure passive lossless snubber for dc-dc boost converters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 3, pp. 2207-2214, March 2021 (doi: 10.1109/TIE.2020.2973906).
- [103] M.R. Mohammadi, H. Farzanehfard, E. Adib, "Soft-switching bidirectional buck/boost converter with a lossless passive snubber", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 10, pp. 8363-8370, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TIE.2019.2947850).
- [104] M.A.N. Kasiran, A. Ponniran, M.H. Yatim, J. Itoh, "Evaluation of high power density achievement of optimum 4-level capacitor-clamped DC-DC boost converter with passive lossless snubber circuit by using Pareto-Front method", *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 40-49, 7 1 2020 (doi: 10.1049/iet-pel.2019.0604).
- [105] T. Kjellqvist, S. Ostlund, S. Norrga, "Active snubber circuit for source commutated converters utilizing the IGBT in the linear region", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2595-2601, Sept. 2008 (doi: 10.1109/TPEL.2008.2002093).
- [106] H. Bodur, E. Akboy, H. Yeşilyurt, "A new and modular active snubber cell for inverters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 288-296, Jan. 2020 (doi: 10.1109/TIE.2019.2896126).
- [107] N.D. Dao, D. Lee, "Passive soft-switching circuit for high power density SiC-based dc-dc boost converter", *Proceeding of the IEEE/APEC*, pp. 2136-2141, New Orleans, LA, USA, March 2020 (doi: 10.1109/APEC39645.2020.9124491).
- [108] G. Yao, A. Chen, X. He, "Soft switching circuit for interleaved boost converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 1, pp. 80-86, Jan. 2007 (doi: 10.1109/TPEL.2006.886649).
- [109] H. Lee, J. Yun, "Quasi-resonant voltage doubler with snubber capacitor for boost half-bridge dc-dc converter in photovoltaic micro-inverter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8377-8388, Sept. 2019 (doi: 10.1109/TPEL.2018.2883535).
- [110] T. Isobe, K. Kato, N. Kojima, R. Shimada, "Soft-switching single-phase grid-connecting converter using dcm operation and a turn-off snubber capacitor", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2922-2930, June 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.2274390).
- [111] M.R. Ahmed, G. Calderon-Lopez, F. Bryan, R. Todd, A.J. Forsyth, "Soft-switching SiC interleaved boost converter", *Proceeding of the IEEE/APEC*, pp. 941-947, Charlotte, NC, USA, March 2015 (doi: 10.1109/APEC.2015.7104462).
- [112] T. Ching-Jung, C. Chern-Lin, "Novel ZVT-PWM converters with active snubbers", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 861-869, Sept 1998, (doi: 10.1109/63.712292).
- [113] H. Bodur, A. F. Bakan, "A new ZVT-PWM DC-DC converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 40-47, Jan. 2002, (doi: 10.1109/63.988668).
- [114] A.F. Bakan, H. Bodur, I. Askoy, "A novel ZVT-ZCT PWM DC-DC converter", *Proceeding of the IEEE/EPE*, pp. 1-8, Dresden, Germany, Aug. 2006 (doi: 10.1109/EPE.2005.219462).

- [115] H. Bodur, A. F. Bakan, "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 676-684, March 2004 (doi: 10.1109/TPEL.2004.826490).
- [116] L.H.S.C. Barreto, A.A. Pereira, V.J. Farias, L.C. Freitas, J.B. Vieira, "A boost converter associated with a new nondissipative snubber", Proceeding of the IEEE/APEC, vol. 2, pp. 1077-1083, Anaheim, CA, USA, Feb. 1998 (doi: 10.1109/APEC.1998.654031).
- [117] T. Wu, Y. Chang, C. Chang, J. Yang, "Soft-switching boost converter with a flyback snubber for high power applications", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1108-1119, Mar. 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2011.2126024).
- [118] M. M. Jovanovic, "A technique for reducing rectifier reverse-recovery-related losses in high-power boost converters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, no. 5, pp. 932-941, Sept. 1998 (doi: 10.1109/6-3.712314).
- [119] M. M. Jovanovic, Y. Jang, "A new, soft-switched boost converter with isolated active snubber", Proceeding of the IEEE/APEC, vol.2, pp. 1084-1090, Anaheim, CA, USA, Feb. 2002 (doi: 10.1109/APEC.1998.6-54032).
- [120] S.R.B. Shah, S.M. Tadvin, M.R.T. Hossain, "A brief review of active snubber circuits for boost converter", Proceeding of the IEEE/I2CT, pp. 1-6, Pune, India, April 2018 (doi: 10.1109/I2CT.2018.8529668).
- [121] N.S. Ting, I. Aksoy, Y. Sahin, "A new zero-voltage-transition PWM dc-dc boost converter", Proceeding of the IEEE/ACEMP, pp. 257-262, Side, Turkey, Sept. 2015 (doi: 10.1109/OPTIM.2015.7427027).
- [122] S. Tandon, A.K. Rathore, B.L. Narasimharaju, "A ZVS series resonant current-fed PWM controlled dc-dc converter", Proceeding of the IEEE/ITEC, pp. 320-325, Chicago, IL, USA, June 2020 (doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161531).
- [123] R. Jagadeesh, N. Vishwanathan, S. Porpandiselvi, "An efficient parallel resonant converter for LED lighting", Proceeding of the IEEE/NPSC, pp. 1-5, Tiruchirappalli, India, Dec. 2019 (doi: 10.1109/NPSC.201-8.8771439).
- [124] L. Dong-Yun, L. Min-Kwang, H. Dong-Seok, I. Choy, "New zero-current-transition PWM dc-dc converters without current stress", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 18, no. 1, pp. 95-104, Jan. 2003 (doi: 10.1109/TPEL.2002.807206).
- [125] E. Chu, J. Bao, H. Xie, G. Hui, "A zero-voltage and zero-current switching interleaved two-switch forward converter with passive auxiliary resonant circuit", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 35, no. 5, pp. 4859-4876, March 2020 (doi: 10.1109/TPEL.2019.2944890).
- [126] T.T. Song, N. Huang, A. Ioinovici, "A zero-voltage and zero-current switching three-level dc-dc converter with reduced rectifier voltage stress and soft-switching-oriented optimized design", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 21, no. 5, pp. 1204-1212, Sept. 2006 (doi: 10.1109/TPEL.2006.880351).
- [127] H.N. Tran, A.M. Naradhupa, S. Kim, A. Tausif, "A fully soft-switched PWM dc-dc converter using An active-snubber-cell", Proceeding of the IEEE/IPEC, pp. 3833-3839, Niigata, Asia, Oct. 2018 (doi: 10.23919/IPEC.2018.8507448).
- [128] T.F. Wu, Y.D. Chang, C.H. Chang, H.X. Lee, "Boost converter with various passive/active snubbers for reducing component stress and achieving high efficiency", Proceeding of the IEEE/PEDS, Taipei, Taiwan, Nov. 2009 (doi: 10.1109/PEDS.2009.5385795).
- [129] H. Yeşilyurt, H. Bodur, "New active snubber cell for high power isolated PWM dc-dc converters", IET Circuits, Devices and Systems, vol. 13, no. 6, pp. 822-829, Oct. 2019 (doi: 10.1049/iet-cds.2018.5531).
- [130] H. Lei, R. Hao, X. You, F. Li, "Nonisolated high step-up soft-switching dc-dc converter with interleaving and dickson switched-capacitor techniques", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 3, pp. 2007-2021, Sept. 2020 (doi: 10.1109/JESTPE.2019.2958316).
- [131] T. Mishima, M. Nakaoka, "Performance evaluation on a fixed-frequency ZCS-PWM asymmetrical half-bridge dc-dc converter with auxiliary active edge-resonant snubber", Proceeding of the IEEE/PESC, pp. 2177-2183, Rhodes, Greece, June 2008 (doi: 10.1109/PESC.2008.4592265).

زیر نویس ها

1. Renewable energy
2. Boost converters dc/dc
3. Solar power plant
4. Wind power plant
5. Fuel Cell Power Plant
6. Isolated converters
7. Non-insulated converters
8. Bidirectional non-insulated converters
9. Bidirectional non-insulated converters with two inductor
10. Bidirectional non-insulated converters with three inductor
11. Conventional single-switch converters