

یکسوسازهای فعال

قسمت اول

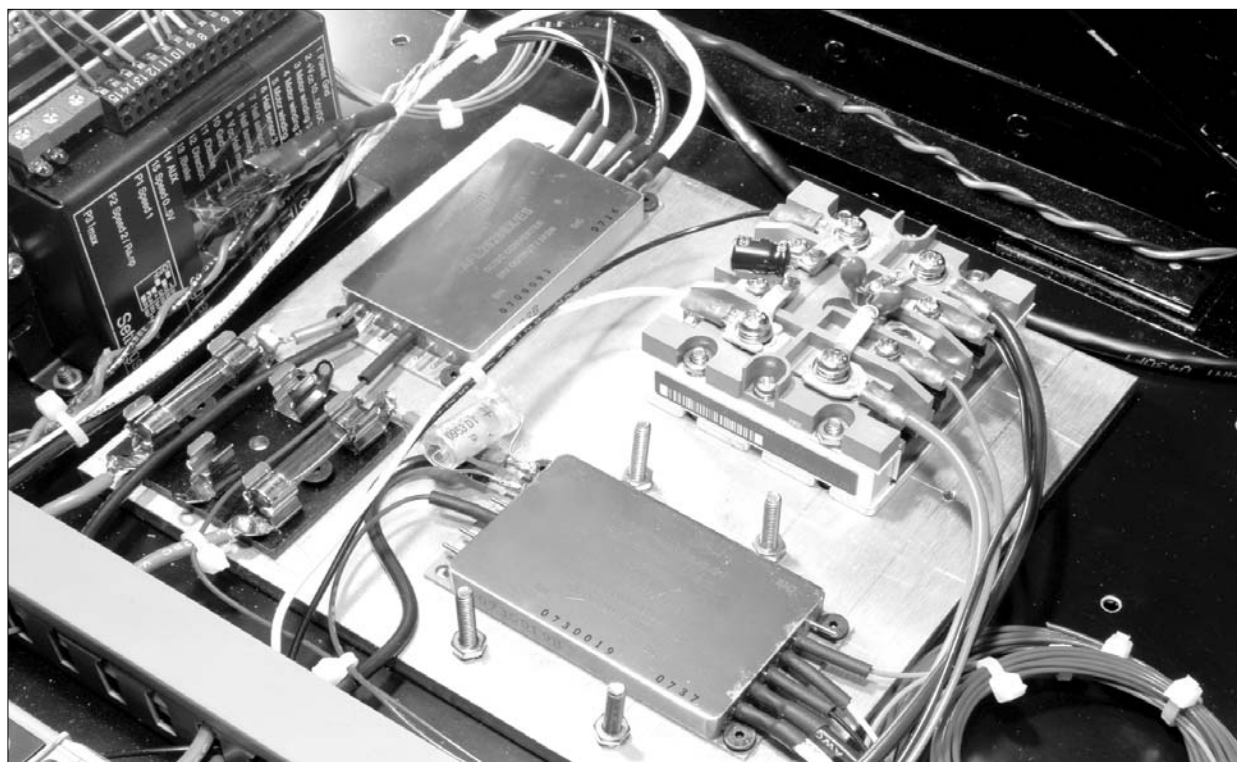
نسل جدید یکسوسازها



گردآوری: مهندس علی النقی مرزوقی^۱

در این مقاله قصد داریم به معرفی این یکسوسازها و بیان انواع توپولوژی‌های آن‌ها پرداخته، و توپولوژی‌های مختلف را باهم مقایسه نماییم. در نهایت با روش‌های مدولاسیون و کنترل این مبدل‌ها (که مهم‌ترین مسأله در مورد یکسوسازهای فعال است) آشنا خواهیم شد.

امروزه یکسوسازهای^۲ فعال به طور جدی به عنوان جایگزینی برای یکسوسازهای مرسوم در صنعت مطرح شده‌اند. ویژگی‌های منحصر بفرد این یکسوسازها در اصلاح ضریب توان و قابلیت بازیافت توان، آنها را از سایر رقبایشان متمایز می‌کند.



واژه‌های کلیدی: مبدل قدرت، یکسوساز فعال، مدارهای چندسطحی

مقدمه

از اولین روزهای غلبه‌ی طرفداران برق ac به طرفداران برق dc، و راه‌اندازی اولین شبکه‌ی ac، بحث یکسوسازها برای تغذیه‌ی بارهای dc پیش کشیده شد. امروزه نیز یکسوسازهای ac/dc تکفاز و سه فاز با جریان خط ورودی نزدیک به سینوسی و اعوجاج جریان کم به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده شده و درخواست برای آنها روز به روز افزایش می‌یابد. یکسوسازهای دیودی مرسوم آرایش ساده‌ای دارند، قابلیت اطمینان آنها بالاست، هزینه‌ی پایینی داشته و نیازی به کنترل ندارند. اما ایراد این یکسوسازها ضریب توان کم (۰/۵ تا ۰/۹)، جریان خط با اعوجاج بالا، نیاز به فیلترهای پسیو در ورودی [۱]، محدودیت کار در ولتاژها و توان‌های محدود به مقادیر نامی ادوات استفاده شده و عدم قابلیت بازیافت توان (انتقال توان از بار به شبکه) است. از میان ایرادات ذکر شده در بالا، تولید هارمونیک‌های مرتبه‌ی پایین در جریان ورودی [۲] و مسأله‌ی توان راکتیو [۳] از بقیه حادتر هستند. هرچند با قراردادن فیلترها، جبران‌سازها و یا ترانسفورماتورهای چند پالسه تا حدی می‌توان هارمونیک‌ها و توان راکتیو را کنترل کرد و یا با بکار بردن توپولوژی‌های یکسوساز دیودی با سه سویچ قدرت ac [۴]، نیم پل [۵] و تمام پل [۶] می‌توان بالاتری از یکسوسازها گرفت، ولی مجموعه‌ی معایب فوق بحث استفاده از یک جایگزین مناسب برای این یکسوسازها را باز نمود.

در یک دسته‌بندی، یکسوسازها مطابق شکل ۱ دسته‌بندی می‌شوند. [۷]

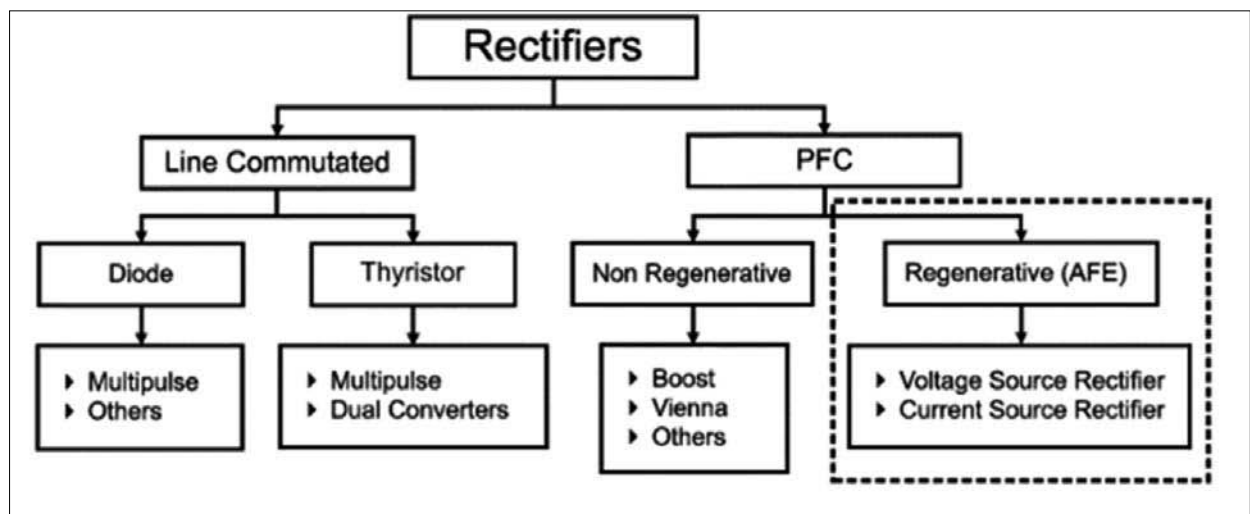
همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، یکسوسازهای با اصلاح

ضریب توان^۴ (PFC) خود به دو دسته‌ی یکسوسازهای با قابلیت بازیافت توان (انتقال توان از سمت بار به شبکه) و بدون قابلیت بازیافت توان تقسیم می‌شوند. یکسوسازهایی که قابلیت انتقال توان از سمت بار به شبکه را مهیا می‌کنند، یکسوسازهای فعال نامیده می‌شوند. نوع منبع ولتاژی این یکسوسازها مبدل‌های چند سطحی می‌باشند. البته این مبدل‌ها در دو مود اینورتری و یکسوکندنگی می‌توانند کار کنند. مبدل‌های چندسطحی به عنوان جایگزین مناسب برای کار در توان‌های بالا و ولتاژ متوسط ارایه شده‌اند. مفهوم اولیه‌ی مبدل‌های چندسطحی در سال ۱۹۷۵ با ثبت یک اختراع معرفی شد [۷]. با گسترش الکترونیک قدرت و پیدایش توپولوژی‌های جدید مبدل‌های چندسطحی، امکان کار در ولتاژهای فراتر از محدوده‌ی نیمه‌هادی‌های کلاسیک فراهم شده است. [۸]

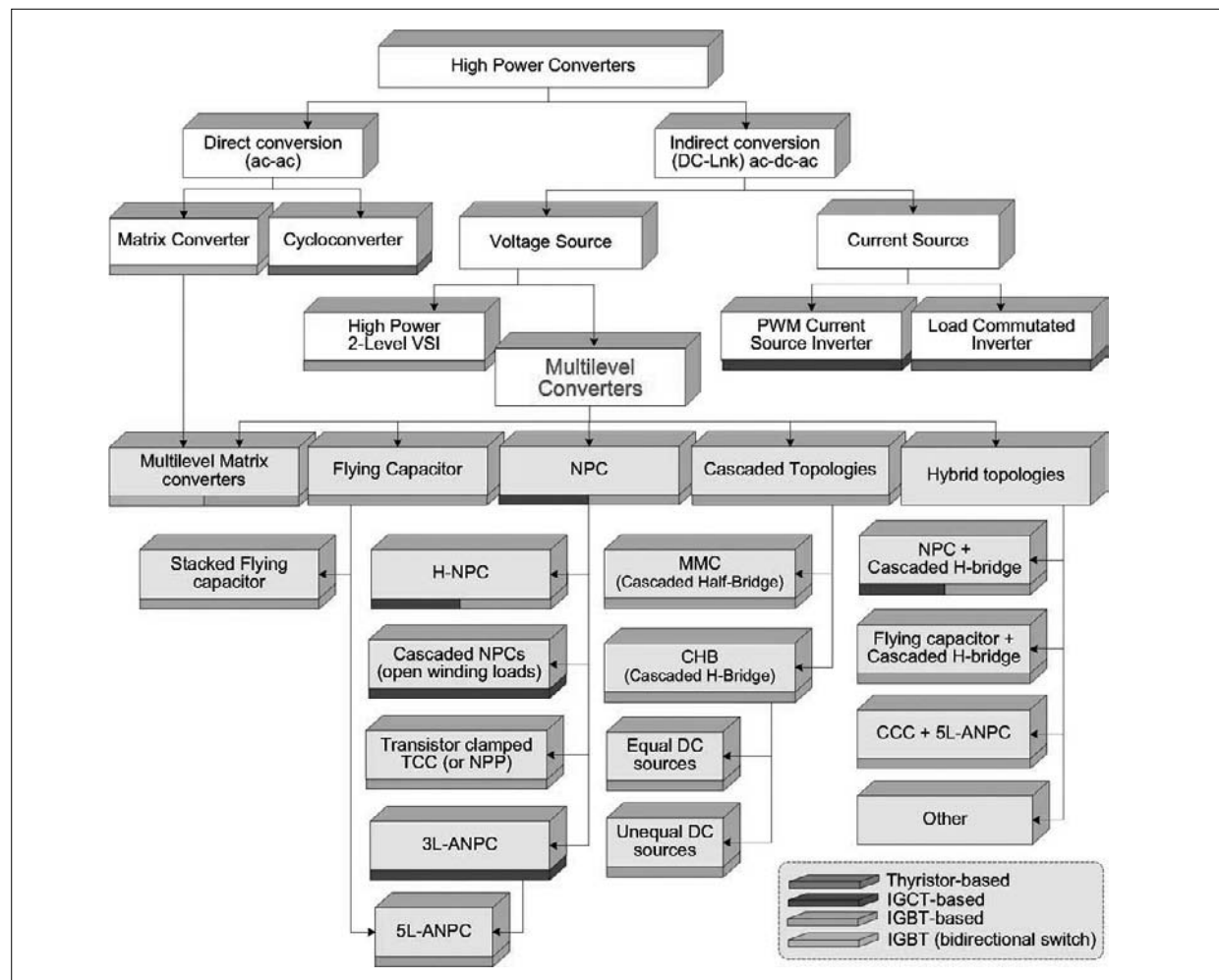
مبدل‌های چندسطحی شامل آرایه‌ای از نیمه‌هادی‌های قدرت و خازن‌های منبع ولتاژی هستند که خروجی آنها ولتاژ با شکل موج پله‌ای تولید می‌کند. در این مبدل‌ها کموتاسیون سویچ‌ها امکان اضافه شدن ولتاژها را به هم ممکن می‌سازد، در حالی که نیمه‌هادی‌های قدرت تنها لازم است ولتاژهای کمتری را تحمل کنند.

مبدل‌های چندسطحی می‌توانند در سطوحی بیشتر از چندین ده مگاوات آمپر کار کنند و نسبت به مبدل‌های سنتی اقتصادی‌تر هستند و اجازه‌ی کاهش هارمونیک جریان، اصلاح ضریب توان و کاهش اندازه‌ی فیلتر را می‌دهند.

توپولوژی‌های متفاوتی برای مبدل‌های چندسطحی پیشنهاد شده و برای این توپولوژی‌ها راهبردهای کنترل و مدولاسیون متنوعی ارایه شده است. در ادامه به معرفی توپولوژی‌های مختلف مبدل‌های چندسطحی می‌پردازیم.



شکل ۱ - دسته بندی انواع یکسوسازها



شکل ۲- دسته بندی انواع مبدل‌ها [۷]

۲. انواع مبدل‌ها

۲.۱. تقسیم‌بندی مبدل‌ها [۷]

مبدل‌های توان بالا به دو دسته کلی مبدل‌های با تبدیل مستقیم^۵ و مبدل‌های با تبدیل غیرمستقیم^۶ تقسیم می‌شوند. مبدل‌های با تبدیل غیرمستقیم خود به دو نوع منبع ولتاژی و منبع جریان تقسیم می‌شوند. مبدل‌های منبع جریان به دو نوع مبدل با کموتاسیون بار و مبدل با کموتاسیون اجباری تقسیم می‌شوند. مبدل‌های منبع ولتاژی یا دو سطحی اند و یا چندسطحی و مبدل‌های چندسطحی یا یک لینک dc دارند مانند مبدل مهار دیودی و خازن شناور و یا چند لینک dc دارند مانند مبدل تمام پل متوالی یا کاسکاد. شکل ۲ دسته‌بندی فوق را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد.

۲.۲. مبدل‌های چندسطحی

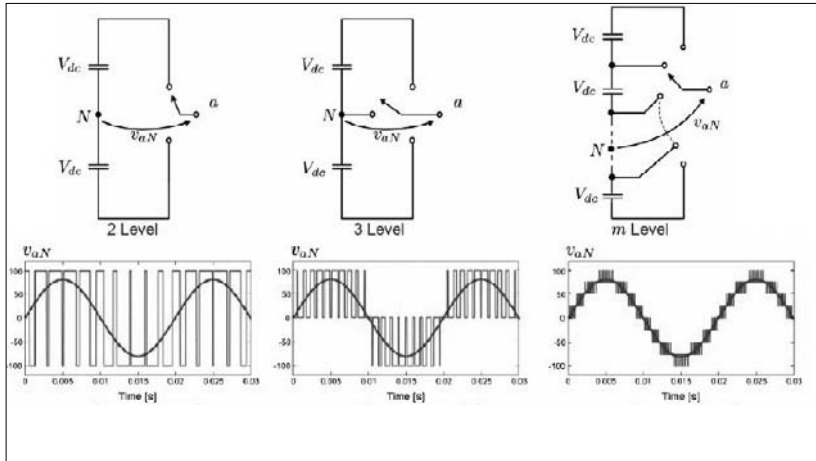
مبدل‌های چندسطحی شامل آرایشی از نیمه‌هادی‌های قدرت و منابع ولتاژ خازنی می‌باشند که اگر به نحو مناسبی کلیدزنی شوند، می‌توانند

ولتاژ پله‌ای با دامنه و فرکانس دلخواه تولید کنند.

مفهوم مبدل‌های چندسطحی با ثبت یک اختراع [۷] که به نوعی مبدل سه سطحی را معرفی می‌کرد، بیان شد. متعاقباً چندین توپولوژی مبدل چندسطحی گسترش داده شد. به هر حال، مفهوم اولیه یک مبدل چند سطحی برای دستیابی به توان بالاتر عبارتست از استفاده از یک سری سویچ‌های نیمه‌هادی قدرت با تعدادی منابع dc برای انجام تبدیل توان و ترکیب کردن یک شکل موج پلکانی. خازن‌ها، باتری‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند به عنوان منابع dc مذکور بکار روند. کموتاسیون سویچ‌های قدرت این منابع متعدد dc را جمع می‌کند تا به ولتاژ خروجی بالا دسترسی پیدا شود در حالی که ولتاژ کار سویچ‌ها از ولتاژ تک تک این منابع بالاتر نمی‌رود. [۹]

مشخصه‌های جالب توجه یک مبدل چندسطحی به طور خلاصه می‌توانند به این صورت بیان شوند [۹]:

کیفیت شکل موج پلکانی: مبدل‌های چندسطحی نه تنها می‌توانند ولتاژ خروجی را با اعوجاج بسیار پایین تولید کنند، بلکه



شکل ۳- مفهوم سطح در مبدل‌های چندسطحی [۱۰]

دارد. این مسأله ممکن است موجب پیچیدگی و گرانی کل سامانه گردد. همچنین فرکانس کلیدزنی به جهت تلفات سویچ‌ها محدود است.

۳.۲. مفهوم سطح در مبدل‌های چندسطحی [۱۰]

با در نظر گرفتن مبدل‌های شکل ۳ مشاهده می‌شود که در مبدل دو سطحی گره *a* می‌تواند به $+V_{dc}$ و $-V_{dc}$ متصل شود. بنابراین خروجی دو سطحی است یعنی یا $+V_{dc}$ است و یا $-V_{dc}$. در مبدل سه سطحی گره *a* می‌تواند به 0 ، $+V_{dc}$ و یا $-V_{dc}$ متصل شود، بنابراین خروجی سه سطحی است. در مبدل *m* سطحی نیز گره *a* می‌تواند به *m* گره با ولتاژهای متفاوت متصل شود و *m* سطح ولتاژ تولید کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سطوح شکل موج تولیدی سینوسی‌تر می‌شود.

۴.۲. انواع مبدل‌های چندسطحی

در دو دهه‌ی گذشته تعداد زیادی توپولوژی‌های چندسطحی معرفی شده‌اند و تحقیقات بعدی، روش‌های کنترل و مدولاسیون متعددی برای این مبدل‌ها پیشنهاد داده‌اند. به هر حال سه ساختار اصلی مبدل‌های چندسطحی عبارتند از: مبدل مهار دیودی $^V NP$ ، مبدل خازن شناور $^A FC$ و مبدل تمام پل متوالی یا کاسکاد $^A CHB$ [۷]. سایر توپولوژی‌های موجود از ترکیب دو توپولوژی از توپولوژی‌های فوق و یا با اندکی تغییر در یکی از آنها قابل حصول هستند. [۹]

۱.۴.۲. مبدل مهار دیودی [۹]

یک نمونه مبدل مهار دیودی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مبدل می‌توان کلیدزنی را طوری انجام داد تا طبق شکل ۵، سطوح دلخواه حاصل شوند. وظیفه‌ی دیودهای مهار در این مبدل، محدود کردن ولتاژ هر کلید به V_{dc} است.

قادرند تنش‌های dv/dt را نیز کاهش دهند و در نتیجه مسایل سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) را بهبود دهند.

• امکان عملکرد در ولتاژهای بالاتر: به دلیل ساختار چند سطحی و روشن بودن کلیدها در قسمتی از پریود کلیدزنی، امکان عملکرد مبدل در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ نامی اجزای بکار رفته در ساختار وجود دارد.

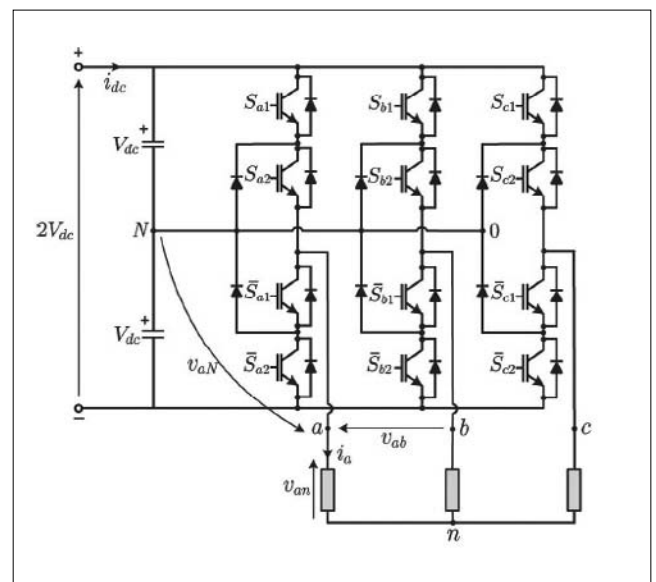
• ولتاژ مد مشترک (CM): مبدل‌های چندسطحی ولتاژ مد مشترک کمتری ایجاد می‌کنند و بنابراین تنش ولتاژ روی یاتاقان‌های یک موتور متصل به درایو چند سطحی می‌تواند کاهش یابد. علاوه بر این، ولتاژ مد مشترک می‌تواند با استفاده از

راهبردهای مدولاسیون پیشرفته مانند آنچه که در [۱۴-۵] معرفی شده‌اند به طور کلی حذف شوند.

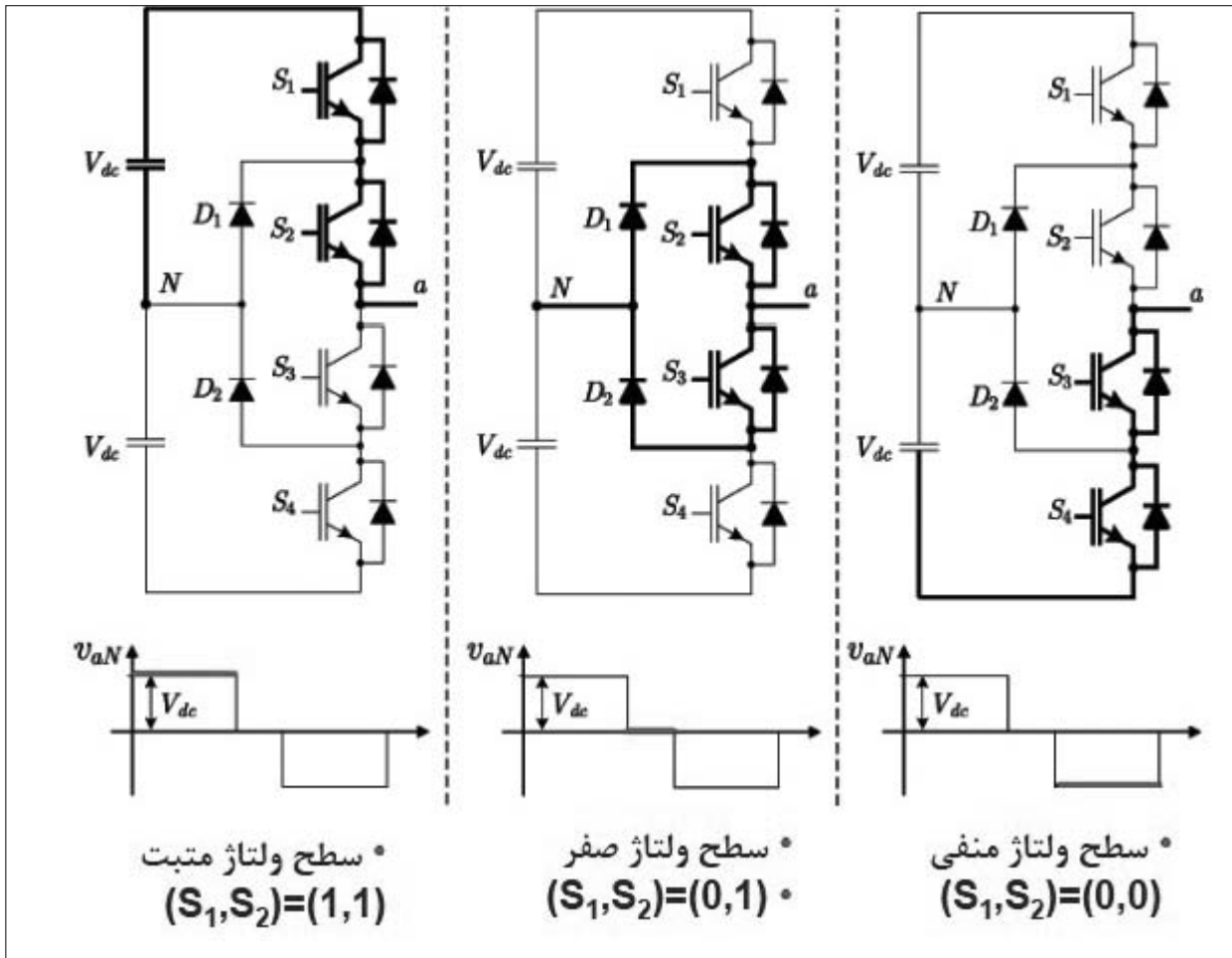
• جریان ورودی: مبدل‌های چندسطحی می‌توانند جریان ورودی را با اعوجاج بسیار کم از شبکه بکشند.

• فرکانس کلیدزنی: مبدل‌های چند سطحی می‌توانند در هر دو فرکانس کلیدزنی پایه و بالای مدولاسیون پهنای باند (PWM) کار کنند. باید ذکر شود که فرکانس کلیدزنی پایین‌تر بیشتر مواقع به معنی تلفات کلیدزنی پایین‌تر و بازده بالاتر است.

علی‌رغم مزایای مذکور مبدل‌های چندسطحی دارای معایبی نیز هستند. یک عیب مهم مبدل‌های چندسطحی تعداد بیشتر سویچ‌های نیمه‌هادی آنهاست. اگرچه سویچ‌های ولتاژ پایین‌تر می‌توانند در یک مبدل چندسطحی استفاده شوند، هر سویچ یک مدار درایو گیت نیاز



شکل ۴- مبدل مهار دیودی [۹]



شکل ۵- چگونگی تولید سطوح در مبدل مهار دیودی [۹]

- همین امر کاپاسیتانس مورد نیاز مبدل را کمینه می‌کند.
- خازن‌ها می‌توانند به صورت گروهی شارژ اولیه شوند.
 - برای فرکانس پایین کلیدزنی، بازده بالاست.
- معایب:

- فلوی توان حقیقی برای یک اینورتر تنها مشکل است. زیرا سطوح dc میانی تمایل به اضافه‌شارژ یا دشارژ (بر حسب مد عملکرد و جهت جریان بار) دارند و باید به صورت صحیح پایش و کنترل شوند.
- تعداد دیودهای مورد نیاز متناسب با درجه‌ی دوم تعداد سطوح افزایش می‌یابد که این مسئله می‌تواند برای سطوح بالا مشکل‌ساز شود.

۲.۴.۲. مبدل خازن شناور [۹]

این مبدل که در شکل ۶ نشان داده شده است، در سال ۱۹۹۲ معرفی شد. ساختار آن مانند مبدل مهار دیودی است با این تفاوت که به جای دیودهای مهار از خازن‌ها برای محدود کردن ولتاژ هر کلید به V_{dc} استفاده می‌شود. یک مبدل m سطحی از نوع خازن شناور تعداد (1-

اگرچه هر کلید نیمه‌هادی باید قادر به کار در ولتاژ V_{dc} باشد، دیودهای مهار برای بلوکه کردن ولتاژ معکوس در مبدل‌های با تعداد سطوح بیشتر از ۵، نیاز به ولتاژهای نامی متفاوتی دارند که در مرجع [۱۱] پیرامون این مسئله به طور مفصل بحث شده است. البته می‌توان تعدادی دیود با ولتاژ پایین‌تر را نیز سری کرد تا به هدف فوق رسید.

در هر مبدل مهار دیودی m سطحی متشکل از $(m-1)$ جفت سویچ در هر فاز، m سطح ولتاژ روی ولتاژ خط به نوترال و $(2m-1)$ سطح ولتاژ روی خط به خط ایجاد می‌شود. در ضمن تعداد $(m-2)$ $(m-1)$ عدد دیود برای هر فاز مورد نیاز است.

از کاربردهای این مبدل می‌توان استفاده به عنوان جبران‌گر توان راکتیو (STATCOM) و راه‌انداز موتورهای دور متغیر را نام برد. از مهم‌ترین مزایا و معایب مبدل مهار دیودی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مزایا:
- همه‌ی فازها از یک گذرگاه dc مشترک استفاده می‌کنند که

- ساختار ماژولار این مبدل، امکان توسعه‌ی آسان را برای سطوح مختلف ولتاژ و توان فراهم می‌آورد.
- معایب مدار کنترل به جهت نیاز به کنترل سطوح ولتاژ خازن‌های دشوار است.
- پیش‌شارژ تمام خازن‌ها در سطح ولتاژ یکسان، کاری پیچیده است.
- برای کار با توان حقیقی خالص بازده پایین است.
- تعداد زیاد خازن‌ها هزینه و حجم مدار را بالا می‌برند.

۳.۴.۲. مبدل تمام پل متوالی (کاسکاد) [۹]

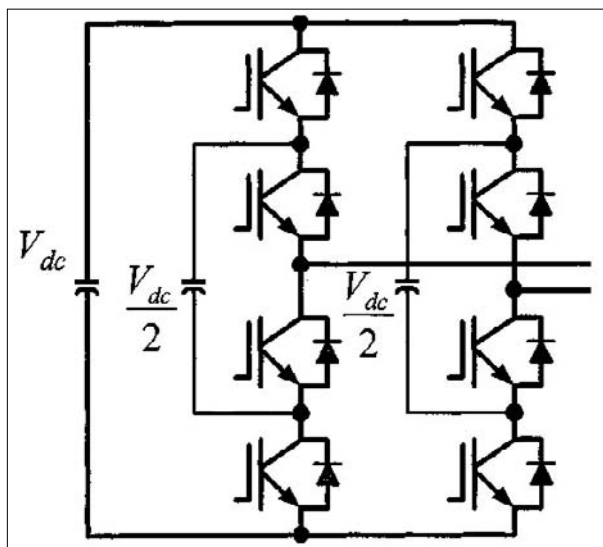
مطابق شکل ۸، مبدل تمام پل متوالی از اتصال سری N سلول تمام پل با آرایش H ساخته شده است. هر سلول شامل چهار کلید نیمه‌هادی (با دیود موازی-معکوس) و یک منبع dc (یا لینک خازنی) است. هر یک از سلول‌ها می‌توانند سه مقدار مختلف ولتاژ در خروجی ایجاد نمایند: $+V_{dc}$ ، 0 یا $-V_{dc}$. این کار با کلیدزنی مناسب ۴ سویچ قدرت انجام می‌گیرد.

سویچ‌های ۱ و ۲ و همچنین سویچ‌های ۳ و ۴ همواره به صورت مکمل کلیدزنی می‌شوند. جدول ۱.۲ حالات مختلف کلیدزنی را نشان می‌دهد.

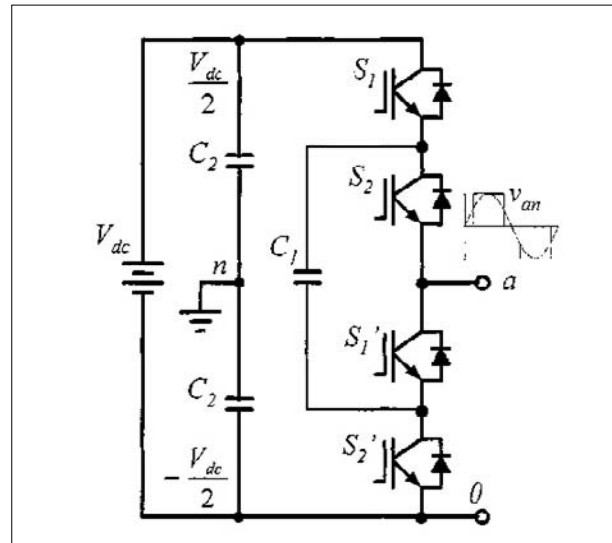
ولتاژ پایانه‌ی ac این مبدل یعنی V_{an} به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$V_{an} = V_{a1} + V_{a2} + \dots + V_{a} [(m-1)/2] \quad 2-1$$

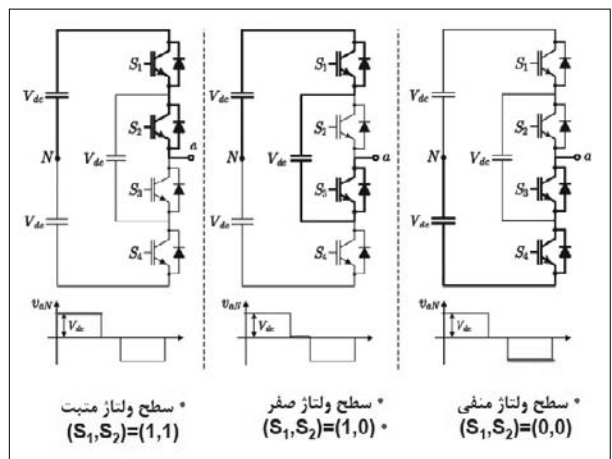
V_{ai} ولتاژ پایانه ac سلول i ام و m تعداد سطوح ولتاژ نهایی



شکل ۸- یک سلول مبدل چند سطحی تمام پل متوالی [۹]



شکل ۶- مبدل خازن شناور سه سطحی [۹]



شکل ۷- چگونگی تولید سطوح در مبدل خازن شناور [۹]

m لینک dc و خازن مهار در هر فاز نیاز دارد. یک مزیت این مبدل وجود حالات کلیدزنی اضافی برای تولید سطوح ولتاژ داخلی است که به این ویژگی افزونگی^{۱۰} گفته می‌شود. برای نمونه در شکل ۷ برای به دست آمدن سطح ولتاژ صفر می‌توان به جای کلیدهای S_1 و S_3 ، کلیدهای S_2 و S_4 را روشن نمود. خاصیت افزونگی قابلیت کار مبدل خازن شناور را در شرایط خطا^{۱۱} فراهم می‌کند.

مزایا و معایب این مبدل عبارتند از:

مزایا

- فلوی توان‌های اکتیو و راکتیو می‌تواند کنترل شود.
- حالات تکراری مختلفی برای تولید سطوح ولتاژ میانی وجود دارد.

- اتصال سری تمام پل‌های مشابه فرآیند تولید را سریع‌تر و ارزان‌تر می‌کند.
- برای سطوح میانی ولتاژ، حالات اضافی کلیدزنی وجود دارد. معایب
- برای هر سلول منبع dc جداگانه نیاز است که این مسأله کاربرد این مبدل‌ها را در حالت اینورتری محدودتر می‌کند.

ادامه دارد

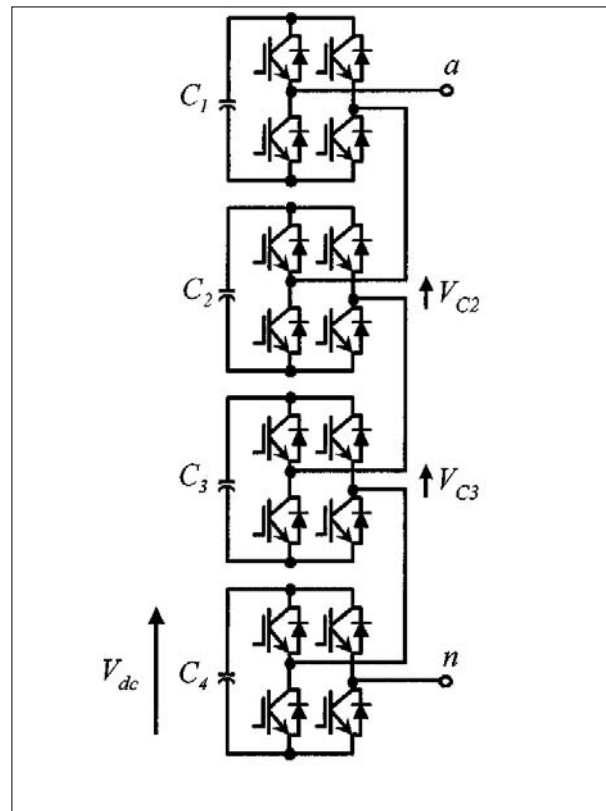
مراجع:

- [1] Vazquez, S.; Leon, J.I.; Carrasco, J.M.; Franquelo, L.G.; Galvan, E.; Reyes, M.; Sanchez, J.A.; Dominguez, E.; , "Analysis of the Power Balance in the Cells of a Multilevel Cascaded H-Bridge Converter," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.57, no.7, pp. 2287-2296, July 2010
- [2] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, Power Electronics: Converters Applications and Design, 3rd ed. New York: Wiley, 2002.
- [3] A. Trzynadlowski, Introduction to Modern Power Electronics, 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [4] TOLLIK, D., and PIETKIEWICZ, A.: Comparative analysis of 1-phase active power factor correction topologies. Proceedings of IEEE international Telecommunication energy conference, INTELEC-92,1992, pp. 5 177523
- [5] BOYS, J.T., and GREEN, A.: Current-forced single-phase reversible rectifier, IEEE Proc, Vol. 136, Pt .B, No. 5, September. 1989
- [6] WU, R., DEWAN, S.B., and SLEMON, G.R.: A PWM AC-DC converter with fixed switching frequency, IEEE Trans. Ind. Elec., 1990, IA-26, (5), pp. 880-886
- [7] J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.49, no. 4, pp. 724-738, 2002.
- [8] Iman-Eini, H.; Schanen, J.-L.; Farhangi, S.; Roudet, J.; , "A Modular Strategy for Control and Voltage Balancing of Cascaded H-Bridge Rectifiers," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.23, no.5, pp.2428-2442, Sept. 2008
- [9] Surin Khomfoi and Leon M. Tolbert, Ph.D., "Multilevel Power Converters", Power Electronics Handbook, The University of Tennessee, Department of Electrical and Computer Engineering, Knoxville, Tennessee, USA

پی‌نویس:

۱. پژوهشگر آزمایشگاه فشار قوی دانشگاه تهران

- Rectify
- Bulk Front-end
- Power Factor Corrected
- Direct Conversion
- Indirect Conversion
- Neutral Point Clamped
- Flying Capacitor
- Cascaded H-bridge
- Redundancy
- Fault Tolerant
- Battery-based



شکل ۸- ساختار مبدل چند سطحی تمام پل متوالی تکفاز [۹]

می‌باشد. اگر مبدل سه فاز باشد، سه نمونه‌ی مشابه از این ساختار به صورت ستاره یا مثلث بکار می‌رود. مبدل کاسکاد متشکل از m سلول می‌تواند $(2m+1)$ سطح ولتاژ مختلف را در خروجی ایجاد نماید. بنابراین شکل موج تولیدی به سینوسی نزدیک‌تر است.

مبدل‌های تمام پل متوالی برای مقاصدی چون تولید استاتیک توان راکتیو، واسط بین منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه و کاربردهای مبتنی بر باتری^{۱۲} بکار می‌روند. همچنین به جهت نیاز این مبدل‌ها به منابع dc مجزا و تأمین این منابع از سوی منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، برای کاربرد مذکور بسیار ایده‌آل هستند.

همچنین یکی از مهم‌ترین قسمت‌های راه‌انداز خودروهای الکتریکی یک مبدل کاسکاد است که در حالت کارکرد موتور خودرو، به عنوان اینورتر عمل نموده و از باتری‌ها به عنوان لینک dc خود استفاده می‌کند و در حالت ترمزی آن، به عنوان یکسوساز عمل کرده و انرژی را به باتری‌ها بر می‌گرداند.

مهم‌ترین مزایا و معایب مبدل‌های چندسطحی تمام پل متوالی به شرح زیر است:

مزایا:

- تعداد سطوح ولتاژ خروجی از دو برابر منابع dc بیشتر است ($s=2m+1$).