Improving the Tolerance of Power Semiconductor Switches Failure in an Active Rectifier Based on Cascaded H-bridge Multilevel Converter

Armin Panahi¹, Yousef Neyshabouri^{*1}, Milad Shamouei Dallaei Milan²

¹Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran ²Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran E-mails: st_a.panahi@urmia.ac.ir; y.neyshabouri@urmia.ac.ir; m.milan@mail.sbu.ac.ir * means corresponding author

Short Abstract

In this paper, a new method based on model predictive control with a finite control set is proposed for the cascaded H-bridge converter-based active rectifier to control the converter under switch fault conditions. The purpose of the fault-tolerant method is to guarantee the continuous operation of the converter after switch(es) open-circuit failure. After the occurrence of an open circuit fault in the switches, by using the system model, the presented model predictive approach enables the operation of the converter despite the presence of a faulty cell. The proposed method sets the dc voltages of dc-link capacitors at the reference value under balanced and unbalanced dc loads and keeps the current drawn from the grid at a good quality. The performance of the proposed method has been evaluated through simulations based on the seven-level cascaded H-bridge converter in the MATLAB/SIMULINK environment.

Keywords

Multilevel converter, Cascaded H-bridge converter, Model predictive control, Fault tolerance.

1- Short Introduction

Multilevel converters are a cost-effective solution in high-power medium voltage systems. One of the essential features of the Cascaded H-bridge converter is its modularity, simple design, and high scalability. The purpose of the cascaded H-bridge converter-based rectifier is to achieve a sinusoidal current with a unit power factor on the ac side and provide capacitor voltage sources in the dc link of the cells and, accordingly, inject power to the dc consumers in the dc link of the cells. On the other hand, semiconductor power devices are constantly being switched, thus, the possibility of switch failure is high. In multi-level converters, such as cascaded h-bridge converter, tolerance against the occurrence of power switch faults is one of the critical challenges. The purpose of fault tolerance is to provide a solution through which the converter continues operation with the maximum remaining healthy capacity after fault in one or more power switches, and there is no need for the entire converter to be tripped off.

2- Proposed Work and Methodology

This paper develops a fault tolerant method based on model predictive control with a finite control set for the cascaded H-bridge converter-based active rectifier. First, the discrete-time model of the converter is derived and then a cost function including two control goals, i.e., regulating and balacing the dc voltage capacitors, and current control is definded. Based on the location and type of the switch failure, the available post-fault switching states are derived and given. These are the input of the optimization process where the optimal switching state is selected and applied to the converter. Also, in the proposed method, the faulty full-bridge cell is kept in use as a half-bridge cell after fault occurrence. The simulation results are provided in different scenarions, under balanced and unbalnced dc loads, pre-fault and post-fault condition and single and dual switch failures.

3- Conclusion

In this paper, a fault-tolreant method based on model predictive control with a finite control set is developed for the cascaded H-bridge converter-based active rectifier. In the proposed method, two control objectives were defined, i.e., controlling the absorbed current from the grid, and balancing the voltages of the DC link capacitors. Based on the simulation results, the proposed method provides the following important achievements after the occurrence of an open circuit fault in the switch.

1) The converter continues to work despite the defective cell so that the dc voltages of all capacitors are kept regulated and balanced (the dc-link capacitors of both faulty and healthy cells are set at the reference value).

2) The input AC current of the rectifier is controlled with an appropriate THD and the actual current well follows the reference value.

4- References

[1] S. Arazm and K. Al-Haddad, "ZPUC: A New Configuration of Single DC Source for Modular Multilevel Converter Applications," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 97-113, 2020

[2] K. K. Monfared, Y. Neyshabouri, A. Miremad, S. Ahmadi and H. Iman-Eini, "Optimal Switching-Sequence-Based Model Predictive Control for a Hybrid Multilevel STATCOM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 10, pp. 9952-9960, Oct. 2022

[3] Y. Xia and Y. Xu, "A Transferrable Data-Driven Method for IGBT Open-Circuit Fault Diagnosis in Three-Phase Inverters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 12, pp. 13478-13488, Dec. 2021

بهبود تحملپذیری خطای کلیدهای نیمههادی قدرت در یکسوساز فعّال مبتنی بر مبدل چندسطحی پل آبشاری

آرمين پناهي

گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

يوسف نيشابورى

استادیارگروه مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

میلاد شموئی دلایی میلان

گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیدہ

كلمات كليدي

مبدل چندسطحی، ساختار پل آبشاری، کنترل پیشبین، تحمل پذیری خطا، خطای مدار باز.

نام نویسنده مسئول: یوسف نیشابوری ایمیل نویسنده مسئول: y.neyshabouri@urmia.ac.ir

> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

['] 7-Level Cascaded H-Bridge (7L-CHB)

۱– مقدمه

مبدلهای الکترونیک قدرت چندسطحی در سیستمهای ولتاژ متوسط توان بالا یک راهحل مقرون به صرفه به شمار می آیند [۱-۳]. از مبدل های چند سطحی مرسوم می توان به مبدل مهار دیودی، مبدل خازن شناور و مبدل پل آبشاری اشاره کرد [۴–۵]. این توپولوژیها بهطور گسترده در کاربردهای مختلف مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفتهاند. که آنها را به گزینهای مناسب جهت استفاده در کاربردهای صنعتی تبدیل کرده است [۶]. از ویژگیهای مهم مبدل پل آبشاری می توان به مدولار بودن^۲، طراحی ساده و قابلیت گسترش پذیری بالا اشاره کرد [۷]. این ویژگیها باعث شده تا مبدل پل آبشاری در کاربردهای متعدد، اعم از اینورتری و یکسوسازی موردتوجه قرار گیرد. در سالیان گذشته، استفاده از مبدل پل آبشاری در محرکه موتورهای الکتریکی، اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه و سیستمهای انتقالac انعطاف پذیر^۳ بسیار موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است [۹–۸]. چالش اصلی در مبدل تمام پل آبشاری، نیازمندی آن به منابع لینک dc متعدد در بیشتر کاربردهای اینورتری است [۱۱-۱۰]. بااین حال در صورت استفاده از این مبدل در کاربرد یکسوسازی، نیاز به منابع توان dc متعدد مرتفع شده و اين منابع با خازن هاي الكتروليت جايگزين خواهند شد [۱۲]. از یکسوساز فعال مبتنی بر مبدل تمام پل آبشاری در کاربردهایی نظیر محرکههای الکتریکی و همچنین ترانسفورماتورهای حالتجامد استفاده می شود [۱۳]. هدف یکسوساز[†]پل آبشاری، دستیابی به جریان سینوسی با ضریب توان واحد در سمت ac و تأمین منابع ولتاژ خازنی در لینک dc سلولها و به تبع آن، تزریق توان به مصرف کننده های dc در لینک dc سلولهاست [۱۱]. برخلاف یکسوسازهای دیودی و تریستوری، جریانی که یکسوساز فعال مبتنی بر مبدل تمامپل آبشاری از شبکه میکشد دارای مؤلفه های هارمونیکی اندک و ضریب توان واحد است. همچنین، مبدل قابلیت انتقال دوطرفه توان را داراست. در کاربرد یکسوسازی، علاوه بر کنترل جریان در سمت ac، باید تعادل ولتاژ خازنهای dc نیز تأمین شود. روشهای مختلفی برای کنترل یکسوساز مبتنی بر مبدل پل آبشاری ارائه شده است. در برخی از این استراتژیها، از روش کنترلی تناسبی-انتگرالی^۵ استفاده میشود که شارش توان را در هر سلول تنظيم مي كند [۱۴-۱۵]. ساير روش ها كنترل كننده جريان هیسترزیس [18] یا روش حذف هارمونیکهای معین ، تعادل ولتاژ خازنها را از طريق استراتژیهای مدولاسيون مبتنی بر افزونگی تأمين می کنند [۱۷-۱۸].

کلیدهای قدرت نیمههادی بهطور مداوم تحت تنش و کلیدزنی قرار دارند ازاینرو احتمال آسیب رسیدن به آنها بسیار زیاد میباشد. در مبدلهای چندسطحی ازجمله مبدل تمام پل آبشاری، قابلیت اطمینان در برابر رخداد خطای کلیدهای قدرت از چالشهای مهم به شمار میآید [۱۹]. در مبدلهای چند سطحی به دلیل افزایش سطوح ولتاژ، تعداد کلیدهای قدرت افزایش چشم گیری دارند که این عامل سبب شده تا میزان وقوع خطا در مبدلهای چندسطحی بیشتر شود [۲۰]. در مبدل پل آبشاری، عمدتاً از کلید IGBT بهعنوان کلید نیمههادی استفاده میشود. خطای رخداده در کلید میتواند ناشی از خطای اتصال کوتاه^م، خطای مدار باز^۴ و یا عدم آتش متناوب باشد که به فرمان وصل، کلید بهطور دائم قطع میماند و مسیر عبور جریان قطع میشود. در خطای اتصال کوتاه، حتی با دریافت فرمان قطع، کلید همچنان وصل می ماند [۲۲]. با توجه به اتصال آبشاری سلولها، رخداد خطا در تنها یک کلید

(سلول) در مبدل تمام پل آبشاری میتواند منجر به اختلال در کارکرد کل مبدل و درنهایت خارج شدن مبدل از شبکه شود. تمرکز این مقاله بر روی خطای مدارباز است که در کلیدهای IGBT از نوع مدولار رخ میدهد [۲۲].

هدف از تحمل پذیری خطا، ارائه راهکاری است که پس از رخداد خطا در یک یا چند کلید قدرت، مبدل بتواند با حداکثر ظرفیت سالم باقیمانده به کار خود ادامه دهد و نیازی نباشد که کل مبدل از مدار خارج شود. در [۳۳] و [۳7]، تحمل پذیری خطا در کاربرد اینورتری مبدل پل آبشاری موردمطالعه قرار گرفته است. در این کاربردها عمدتاً فرض بر آن است که لینک db سلولها با منابع ایزوله db تغذیه شده است و هدف از تحمل پذیری خطا تأمین حداکثر ولتاژ متقارن خط به خط در خروجی ac است که به بار ac متصل است، لذا کنترل ولتاژ خازنهای لینک dc مطرح نیست. حال آنکه با توجه به کاربرد یکسوسازی روش پیشنهادی، کنترل ولتاژ خازنهای لینک db و حفظ کیفیت جریان کشیده شده از شبکه از اهداف این مقاله میباشند. به عبارت دیگر، در کاربرد یکسوسازی مبدل پل آبشاری، استفاده از روشهای ارائه شده در [۳۳] و [۴۲] باعث می شود پس از رخداد خطا، ولتاژهای متعادل خط به خط بهدرستی در سمت ac مبدل تولید شود، اما تعادل ولتاژهای منادل خط به خط کاربرد یکسوسازی مبدل پل آبشاری، استفاده از روشهای ارائه شده در است.

در [۲۴]، پس از رخداد خطا در کلید، با استفاده از رلهها، مبدل قادر خواهد بود به عملکرد خود ادامه دهد. در این روش از یک سلول یدکی در ساختار مبدل استفاده شده است. به عبارتی از یک روش سختافزاری برای افزایش تحمل پذیری خطا استفاده شده است. حال آنکه روش پیشنهادی در این مقاله، بهصورت نرمافزاری و بدون اضافه کردن سختافزار، موفق به بهبود تحمل پذیری خطا در مبدل موردنظر شده است. در [۲۵]، با تنظیم اختلاف زاویه ولتاژ فازها، ولتاژ خط به خط خروجی مبدل، متعادل نگه داشته میشود. در [۲۶] نیز، شکل مرجع مدولاسیون ولتاژ فازها به نحوی اصلاح میشود که پس از رخداد خطا در این مقالات نیز، جزو اهداف کنترلی نمی باشد. در کاربرد یکسوسازی، بهجای در این مقالات نیز، جزو اهداف کنترلی نمی باشد. در کاربرد یکسوسازی، بهجای در این مقالات نیز، حوان هداف کنترلی نمی باشد. در کاربرد یکسوسازی، بهجای منابع مستقل، در لینک b سلولها، خازنهای الکترولیت قرار دارند. وقوع خطا در کلید قدرت می تواند منجر به از دست رفتن تعادل ولتاژ خازنهای لینک dc در کلید قدرت می تواند منجر به از دست رفتن تعادل ولتاژ خازنهای لینک dc

در این مقاله، روشی جهت بهبود تحمل پذیری خطا در یکسوساز مبتنی بر مبدل پل آبشاری ارائه شدهاست. هدف ازاینروش، تداوم کار کرد مبدل پس از رخداد خطا میباشد. روش پیشنهادی قادر است، پس از رخداد خطا، ولتاژ تمام خازنهای سمت bc را در مقدار مرجع خود تثبیت کند. بدین ترتیب باوجود رخداد خطا، ولتاژ و توان bc موردنیاز تمام مصرف کنندههای bc تأمین میشود. برای رسیدن به این هدف، با بهره گیری از مفهوم کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، پس از رخداد خطای مدار باز در کلید قدرت، روش پیشنهادی با استفاده از حالات کلیدزنی باقیمانده و انتقال آنها به روش کنترل پیش بین، به متعادل سازی ولتاژ خازنها و بهبود وضعیت جریان خروجی می پردازد. همچنین سلول تمام پل معیوب نیز به صورت سلول نیم پل مورداستفاده قرار می گیرد تا توان مصرف کننده bc به لینک bc این سلول متصل است نیز همچنان تأمین

استراتژی تحملپذیری خطای پیشنهادی در این مقاله، مبتنی بر کنترل پیشبین مدل با مجموعه کنترل محدود^{۱۰} (FCS-MPC) است که در دهه

[&]quot; Modularity

^r Flexible Ac Transmission Systems(FACTS)

^{*} Rectifier

[°] Proportional-Integrator (PI)

⁶ Selective Harmonic Elimination (SHE)

⁷ Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)

[^] Short Circuit Fault(SC)

¹ Open Circuit Fault(OC)

¹⁰ Finite-Control-Set Model Predictive Control (FCS-MPC)

گذشته در کنترل مبدلهای چندسطحی بهطور گسترده توسعه یافته است [۲۸-۲۷]. این روش، ماهیت گسسته مبدل و حالتهای کلیدزنی را در نظر میگیرد و از چندین مزیت ازجمله پاسخ دینامیکی سریع، فقدان مدولاتور و انعطاف پذیری بالا برخوردار است [۲۹]. در روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، ابتدا مدل زمان گسسته برای پیش بینی متغیرهای آینده سیستم برای یک افق از پیش تعریف شده استخراج می شود. سپس، تابع هزینه ای که اهداف کنترلی را می شود، برای هر حالت کلیدزنی ممکن ارزیابی می شود. حالت کلیدزنی بهینه که تابع هزینه را به حداقل می رساند در دوره نمونه برداری بعدی اعمال می شود [۲۹]. در روش پیشنهادی این مقاله تابع هزینه شامل کنترل جریان خروجی و همچنین کنترل ولتاژ خازنهای لینک cb سلولها می باشد.

در بخش دوم مقاله، ابتدا ساختار یکسوساز مبتنی بر مبدل تمام پل آبشاری هفت سطحی و اصول کارکرد آن در حالت نرمال و پیش از اعمال خطا بررسی شده است. سپس در بخش سوم به بررسی مدل ریاضی مبدل پرداخته شده است و مدل دینامیکی زمان گسسته سیستم استخراج و تابع هزینه متناسب با اهداف کنترلی موردنظر که شامل کنترل جریان و کنترل ولتاژ خازنهای لینک dc میباشد، تعریف شده است. سپس، تأثیر خطای مدار باز کلید قدرت در یکی از سلولها و استراتژی تحمل پذیری خطا در بخش چهارم موردبررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم نتایج شبیه سازی برای صحت و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، ارائه شده است و درنهایت بخش ششم به نتیجه گیری اختصاص داده شده است.

۲- بررسی ساختار مبدل پل آبشاری

ساختار یکسو کننده TL-CHB در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار از اتصال آبشاری ۳ سلول تمام پل (پل H) به صورت آبشاری تشکیل شده است و کلیدهای S₁₁ و S₁₄ کلیدهای قطر اصلی، و کلیدهای S₁₂ و S₁₃ کلیدهای قطر فرعی نامیده میشوند هر سلول قادر است بسته به حالت کلیدزنی در خروجی خود سه سطح ولتاژ ،*V*_{dc} و *V*_{dc} را تولید کند. به صورتی که اگر کلیدهای قطر اصلى روشن شوند، سطح ولتار: Vdc، اگر كليدهاى قطر فرعى روشن شوند، سطح ولتاژ Vdc- و درصورتی که ۲ کلید بالا یا ۲ کلید پایینی روشن شوند، سطح ولتاژ 0 در خروجی سلول تولید می شود. از ترکیب سطوح ولتاژی مختلف، یک شکل موج هفت سطحی در خروجی مبدل تولید خواهد شد. سمت ac با یک فیلتر با اندوکتانس L با مقاومت داخلی R به شبکه متصل است. در سمت dc، هر سلول از یک خازن Cj تشکیل شده است که $j \in \{1, 2, 3\}$ به ترتیب نشان دهنده خازن از یک خازن مربوط به هر سلول است. هر سلول از ۴ کلید قدرت Sji تشکیل شده است که Rj . همچنین، توان مصرفی سلول
های مبدل، با مقاومتهای . $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ مدل شده است. حالات کلیدزنی مبدل تمام پل آبشاری در جدول ۱ آمده است. در یکسوساز مبتنی بر پل آبشاری به کار رفته در این مقاله، سه خازن در لینک dc سلول ها وجود دارد. مطابق جدول ۱، این خازن ها با توجه حالت های کلیدزنی و جهت جریان، می توانند شارژ یا دشارژ شوند یا بدون تغییر باقی بمانند.

۳- توسعه روش کنترل پیشبین مبتنی بر مدل بر روی یکسوساز فعال مبتنی بر مبدل تمام پل آبشاری هفت سطحی

در این بخش، برای کنترل جریان، تأمین توان مصرفی سلول ها و متعادل سازی ولتاژ خازن ها، کنترل پیش بین مدل با مجموعه محدود برای یکسوساز مبتنی بر مبدل تمام پل آبشاری توسعه داده شده است. روش کنترل پیش بین مدل با مجموعه محدود، رویکردی برای انتخاب بهترین حالت کلیدزنی ممکن برای یک مبدل است. این روش کنترلی، تأمین اهداف کنترلی که شامل جریان خروجی و ولتاژ خازن های سلول ها می باشد را تضمین میکند. این کار با استفاده از تجزیه و تحلیل پارامترهای اندازه گیری شده، پارامترهای سیستم، مقادیر پیش بینی شده و حالات کلیدزنی انجام می گیرد. همان طور که در شکل ۱

مشخص شده است، لینک b مبدل پل آبشاری به کاررفته خازنی است و مبدل توان اکتیو از شبکه می کشد تا توان اکتیو مصرفی بارهای bk هر سلول را تأمین کند و درنتیجه ولتاژ خازنها در مقدار مرجع خود ثابت بمانند. شکل ۵، دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی در این مقاله را نشان میدهد که شامل دو وضعیت پیش و پس از رخداد خطاست. در این بخش، عملکرد روش ارائه شده در وضعیت کار نرمال مبدل شرح داده می شود و در بخش ۴، استراتژی تحمل-پذیری خطا موردبحث قرار خواهد گرفت. مطابق شکل ۲، میانگین ولتاژ همه خازنها با مقدار مرجع (،*۲) مقایسه می شود سپس مقدار اختلاف بهدست آمده به کنترل کننده IP داده می شود. بدین طریق جریان مرجع تولید خواهد شد.



شكل۱. ساختار يكسو كننده 7L-CHB

سطوح		وضعيت كليدزني						cl	V	c2	v	3	ولتاژ
ولتاژ	S_{II}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	S_{3I}	S_{32}	i>0	i<0	i>0	i<0	i>0	i<0	خروجى
1	1	0	1	0	1	0	-	+	-	+	-	+	3E
2	1	0	1	0	0	0	-	+	-	+	أثير	بى آ	
	1	0	0	0	1	0	-	+	ثير	یی تا	-	+	2E
	0	0	1	0	1	0	الير	یی ت	-	+	-	+	
	1	0	0	0	0	0	-	+	ثير	یی تا	اثير	بى آ	
	0	0	1	0	0	0	الير	یی ت	-	+	اثير	بى آ	
2	0	0	0	0	1	0	الير	یی ت	اثير	یی تاثیر		+	Б
3	1	0	1	0	0	1	-	+	-	+	+	-	Е
	1	0	0	1	1	0	-	+	-	+	-	+	
	0	1	1	0	1	0	+	-	-	+	-	+	
	0	0	0	0	0	0	الير	یی ت	ئير	یی تا	أثير	بى آ	
	0	0	0	1	1	0	الير	یی ت	+	-	-	+	
	1	0	0	1	0	0	-	+	+	-	الير	بى آ	
4	0	1	1	0	0	0	+	-	-	+	الير	بى آ	0
	0	1	0	0	1	0	+	-	ثير	یی تا	-	+	
	0	0	1	0	0	1	ائير	یی ت	-	+	+		
	1	0	0	0	0	1	-	+	ثير	یی تا	+		
	0	1	0	0	0	0	+	-	ئير	یی تا	أثير	بى آ	
	0	0	0	1	0	0	الير	یی ت	+	-	اثير	بى آ	
5	0	0	0	0	0	1	الير	یی ت	اثير	یی تا	+	-	Б
5	0	1	0	1	1	0	+	-	+	-	-	+	-E
	0	1	1	0	0	1	+	-	-	+	+	-	
	1	0	0	1	0	1	-	+	+	-	+	-	
	0	1	0	1	0	0	+	-	+	-	أثير	بى آ	
6	0	0	0	1	0	1	الير	یی ت	+	-	+	-	-2E
	0	1	0	0	0	1	+	-	ئير	یی تا	+	-	
7	0	1	0	1	0	1	+		+		+		3E



جدول ۱.حالات كليدزني مبدل 7L-CHB

۳-۱- مدلسازی جریان خروجی

با توجه به شکل ۱، بر اساس مدل مداری سیستم داریم:

$$V_s = Ri_s + L\frac{di_s}{dt} + e_k \tag{1}$$

که در آن e_k ولتاژ شبکه و v_s ولتاژ خروجی مبدل میباشد. در حالت گسسته می توان نوشت:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{i_s(k+1) - i_s(k)}{T_s} \tag{(7)}$$

در رابطه (۲)، (*k*)، مقدار فعلی جریان و (*k*+1)، نمونه بعدی میباشد. *T_s نیز* زمان نمونهبرداری است. لذا با جایگذاری رابطه (۲) در (۱)، مدل زمان گسسته جریان بهصورت زیر به دست خواهد آمد.

$$i_{s}^{p}(k+1) = \frac{T_{s}}{L} [V_{s}(k) - e(k)] + \left[1 - \frac{T_{s}R}{L}\right] i_{s}(k) \qquad (\texttt{\texttt{Y}})$$

۲-۳- مدلسازی ولتاژ خازنها

تأمین توان مصرف کننده های dc و به تبع آن، متعادل سازی ولتاژ خازن های لینک dc یکی از اهداف مهم کنترلی است. بدین منظور، می بایستی ولتاژ خازن ها با ریپل مناسبی مقدار مرجع خود را دنبال کنند. مبدل CHB-7L تک فاز از سه خازن با ولتاژهای ایرون و دیم تشکیل شده است. ولتاژ این خازن ها در حوزه زمان پیوسته بر حسب جریان و ظرفیت خازن به صورت زیر بیان می شوند:

در رابطه (۴)، i_{c1} ، i_{c2} ، i_{c2} ، i_{c1} ، (۴) در رابطه (۴)، i_{c2} ، i_{c1} ، (۴) در رابطه (۴)

$$v_{C1}(t) = v_{C1}(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_{C1}(\tau) d\tau$$

$$v_{C2}(t) = v_{C2}(0) + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_{C2}(\tau) d\tau$$

$$v_{C3}(t) = v_{C3}(0) + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_{C3}(\tau) d\tau$$
(f)

از رابطه (۴)، مدل زمان گسسته ولتاژ خازنهای شناور را بهصورت زیر میتوان به دست آورد.

$$v_{c1}(k+1) = v_{c1}(k) + \frac{T_s}{C_1} i_{c1}(k+1)$$

$$v_{c2}(k+1) = v_{c2}(k) + \frac{T_s}{C_2} i_{c2}(k+1)$$

$$v_{c3}(k+1) = v_{c3}(k) + \frac{T_s}{C_3} i_{c3}(k+1)$$
(Δ)

در رابطه (۵)، ($v_{c1}(k)$ و ($v_{c2}(k)$ و ($v_{c3}(k)$ به ترتیب مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ خازن سلول اول، دوم و سوم میباشد و ($(k+1) = v_{c2}(k+1) = v_{c2}(k+1)$ مقادیر پیش بینی شده ولتاژ خازن ها پس از گذشت زمان T_S (زمان نمونه برداری) می باشد. در رابطه (۵)، جریان پیش بینی شده خازن ها، وابسته به وضعیت کلیدزنی و جریان ورودی عه مبدل است که در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$\begin{split} i_{C1}(k+1) &= (S_1 - S_2)i_s(k) \\ i_{C2}(k+1) &= (S_5 - S_6)i_s(k) \\ i_{C3}(k+1) &= (S_9 - S_{10})i_s(k) \end{split} \tag{9}$$

۳-۳- تعریف تابع هزینه و بهینهسازی

تابع هزینه در این مقاله با دو هدف کنترلی تعریف شده است. هدف اول، به حداقل رساندن اختلاف بین جریان کشیده شده از شبکه ac و جریان مرجع آن

و هدف دوم، شارژ نگه داشتن خازنهای لینک dc میباشد. دو تابع هزینه در این مقاله تعریف شده است. تابع هزینه اول، مربوط به کارکرد عادی مبدل و دیگری مربوط به حالت بعد از رخداد خطا میباشد. تابع هزینه در حالت کارکرد عادی مبدل بهصورت رابطه ۷ بیان میشود.

$$g(k) = \lambda_{i} \left| \dot{i}_{s}^{*}(k+1) - \dot{i}_{s}^{p}(k+1) \right|$$

$$+ \lambda_{cap} \left| v_{Ci}^{*}(k+1) - v_{Ci}^{p}(k+1) \right|$$
(Y)

که در آن $i\lambda$ و λ_{cap} به ترتیب ضرایب وزنی جریان و ولتاژ خازنهاست. جمله اول تابع هزینه فوق، مربوط به کنترل جریان کشیده شده از شبکه میباشد و جمله دوم مربوط به کنترل ولتاژ خازن سلولهاست. در تابع هزینه مربوط به کارکرد عادی مبدل مقدار ضریب وزنی جریان $1 = i\lambda$ در نظر گرفته شده است. همچنین، مقدار ضریب وزنی کنترل ولتاژ خازن همه سلولها با هم برابر است. در طول هر بازه نمونهبرداری، به ازای ۲۷ حالت کلیدزنی (جدول ۱)، ۲۷ حالت پیشبینی شده برای جریان عد و ولتاژ هر خازن محاسبه میشود و حالت کلیدزنی که حداقل مقدار را برای تابع هزینه ایجاد میکند، انتخاب شده و در بازه نمونهبرداری بعدی اعمال میشود. تابع هزینه در شرایط خطا به صورت رابطه Λ بیان میشود.

$$g_{cost} = \lambda_{i}^{i} \left| i_{s}^{*}(k+1) - i_{s}^{p}(k+1) \right| + \lambda_{cap1}^{i} \left| V_{c1}^{*}(k+1) - V_{c1}^{p}(k+1) \right| + (\Lambda)$$

$$\lambda_{cap2}^{i} \left| V_{c2}^{*}(k+1) - V_{c2}^{p}(k+1) \right| + \lambda_{cap3}^{i} \left| V_{c3}^{*}(k+1) - V_{c3}^{p}(k+1) \right|$$

ضریب وزنی مربوط به جمله کنترل جریان، $l = \lambda' a$ میباشد. ضریب وزنی مربوط به کنترل جریان، ا $\lambda'_i = \lambda'_{cap1}$ مینصورت که برای سلول معیوب، ضریب وزنی برابر 40 = λ'_{cap1} و برای سلولهای سالم برابر سلول معیوب، ضریب وزنی برابر. 30 = $\lambda'_{cap2} = \lambda'_{cap3}$

۴- روش پیشنهادی تحمل پذیری خطا

وقوع خطا در کلید قدرت در یکسوساز مبتنی بر مبدل تمام پل آبشاری می تواند منجر به از دست رفتن تعادل ولتاژ خازنهای لینک dc و همچنین اعوجاج جریان خروجی مبدل شود. با یک استراتژی مناسب جهت بهبود تحمل پذیری خطا، مبدل می تواند باوجود کلیدهای معیوب به کار خود ادامه دهد. پس از شناسایی رخداد خطای مدار باز، نخست باید سلول معیوب، مطابق شکل ۳ پیکربندی مجدد شود تا بتوان از ظرفیت سالم آن همچنان استفاده کرد و سپس استراتژی کنترل پیش بین متناسب با شرایط خطا باید اصلاح شود که در ادامه موردبحث قرار خواهد گرفت. روش پیشنهادی در این مقاله، قادر به تأمین تحمل پذیری خطا در یک و یا دو کلید قدرت است. بهمنظور سادگی، در گام اول، خطای مدار باز بر روی کلید ایکاز سلول اول اعمال شده است. در گام دوم، خطای مدار باز بر روی ۲ کلید داکاز سلول اول و کلید 22از سلول دوم اعمال شده است.



شکل۳. پیکربندی مجدد سلول پس از وقوع خطای مدار باز درکلید S1 و S2





شکل ۴. پیکربندی مجدد سلول پس از وقوع خطای اتصال کوتاه



جدول۲. حالات کلیدزنی پس از رخداد خطا در کلید S₁₁

سطوح			كليدزنى	وضعيت			v	-1	v	c2	v	c3	ولتاژ
ولتاژ	S_{II}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	S_{31}	S_{32}	i>0	i<0	i>0	i<0	i>0	i<0	خروجى
2	0	0	1	0	1	0	تائير	بى	-	+	-	+	2E
	0	0	1	0	0	0	تاثير	بى	-	+	نائير	یی ت	
3	0	0	0	0	1	0	تاثير	یی	اثير	یی ت	-	+	E
	0	1	1	0	1	0	+	-	-	+	-	+	
	0	0	0	0	0	0	تائير	بى	ائير	یی ت	نائير	یی ت	
	0	0	0	1	1	0	تائير	یی	+	-	-	+	
4	0	1	1	0	0	0	+	-	-	+	نائير	یی ت	0
	0	1	0	0	1	0	+	-	ائير	یی ت	-	+	
	0	0	1	0	0	1	تاثير	یی	-	+	+	-	
	0	1	0	0	0	0	+	-	ائير	یی ت	نائير	یی ت	
	0	0	0	1	0	0	تاثير	یی	+	-	نائير	يى ت	
5	0	0	0	0	0	1	تاثير	یی	اثير	یی ت	+	-	-E
	0	1	0	1	1	0	+	-	+	-	-	+	
	0	1	1	0	0	1	+	-	-	+	+	-	
	0	1	0	1	0	0	+	-	+	-	نائير	یی ت	
6	0	0	0	1	0	1	تاثير	یی	+	-	+	-	-2E
	0	1	0	0	0	1	+	-	اثير	یی ت	+	-	
7	0	1	0	1	0	1	+	-	+	-	+	-	-3E

روش پیشنهادی می تواند در مقابل خطای اتصال کوتاه نیز تحمل پذیری خطا را تأمین نماید. در روش پیشنهادی، پس از رخداد خطای اتصال کوتاه، حالات کلیدزنی که شامل کلید معیوب می باشد کنار گذاشته می شوند و با استفاده از حالات کلیدزنی ممکن برای مبدل اعمال می شود. بهعنوان نمونه تحت شرایط رخداد خطا در کلید ۱ از سلول ۱ وضعیت سلول ۱ به صورت نشان داده شده در شکل ۴ درمی آید. همان گونه که در این شکل دیده می شود، با استفاده از کلیدهای سالم باقیمانده در سلول ۱، می توان دو سطح ولتاژ 0 و $V_{\rm c}$. را تولید کرد و درنتیجه می توان سلول تمام پل معیوب را به صورت سلول ۱ می توان را به صورت نشان داده شده در می الم باقیمانده در سلول ۱، می توان را به صورت سلول ۱ می می دان کلیده از کلیدهای مالم باقیمانده در سلول ۱ می توان دو سطح ولتاژ 0 و $V_{\rm c}$.

پس از رخداد خطای مدار باز بر روی کلید S₁₁ از سلول اول، ولتاژ خازنها و همچنین جریان تزریقی به شبکه بررسی شده است. مطابق شکل (۳-الف)،

زمانی که خطای مدار باز در یکی از کلیدهای قطر اصلی سلول (مثلاً کلید S۱) رخ دهد، سلول مذکور قادر به تولید سطح ولتاژ مثبت نخواهد بود. چنانچه کلیدی از قطر فرعی سلول مطابق شکل (۳–ب)، (مثلاً کلید S2) دچار خطای مدار باز شود، سلول موردنظر توانایی تولید سطح ولتاژ منفی را ندارد.

در این مقاله، خطا در کلید IS از سلول اول، به ۳ طریق اعمال شده است. در حالت اول، کل کلید IGBT که شامل IGBT به همراه دیود موازی معکوس است، مدار باز شده است. در این حالت کل کلید معیوب و از مدار خارج می شود، به همین دلیل جهت جریان اهمیتی ندارد. شایان توجه است که جریان مثبت، جریان خارج شونده از مبدل درنظر گرفته شده است که از IGBT عبور می کند

و جریان منفی، جریان واردشونده به مبدل میباشد که مسیر عبور آن همواره از طریق دیود بسته میشود. بهعبارتدیگر، با عبور جریان از دیود، خازنهای لینک dc شارژ و هنگام عبور جریان از IGBT، خازنها دشارژ میشوند. در حالت دوم، تنها IGBT دچار خطای مدار باز شده و از مدار خارج شده است اما دیود موازی معکوس آن همچنان به عملکرد عادی خود ادامه میدهد. در حالت سوم، دیود مدار باز شده و IGBT به عملکرد خود ادامه میدهد.

مطابق جدول ۱، در حالت کارکرد عادی مبدل، ۲۷ حالت کلیدزنی وجود دارد كه منجر به توليد هفت سطح ولتاژ در خروجي مبدل مي شود. پس از ايجاد خطای مدار باز در کلید S₁₁، مطابق جدول ۲ حالاتی که این کلید در وضعیت روشن قرار دارد حذف خواهند شد، به عبارتی در تمامی حالات کلیدزنی، کلید در وضعیت صفر قرار خواهد گرفت. بنابراین، سلول اول دیگر قادر به تولید S_{11} سطح ولتاژ مثبت نمی باشد و تنها توانایی تولید سطوح ولتاژ صفر و منفی را دارد. مطابق جدول۲، درکل، ۱۸ حالت کلیدزنی باقی میماند که به بلوک کنترل پیشبین فرستاده می شود. بلوک کنترل پیشبین از میان حالات کلیدزنی باقیمانده، بهینه ترین حالت را در هر دوره نمونه برداری انتخاب می کند. در حالت دوم، IGBT دچار خطا شده اما كليد از ظرفيت باقىمانده خود استفاده مىكند و جریان از دیود عبور میکند. هنگامیکه جریان عبوری از کلید مثبت باشد، چون IGBT دچار خطا شده، بنابراین ۱۸ حالت کلیدزنی مطابق جدول ۲ درنظر گرفته می شود. در صورتی که که جریان عبوری از کلید منفی باشد، چون جریان منفى از ديود كليد معيوب عبور مىكند، لذا براى جريان منفى، ٢٧ حالت عملکرد خود ادامه میدهد و جریان از آن عبور داده می شود. در این صورت، با توجه به اینکه جریان مثبت از IGBT عبور میکند، ۲۷ حالت کلیدزنی برای جریان مثبت وجود خواهد داشت و در جریان منفی، با توجه به رخداد خطا در دیود، ۱۸ حالت کلیدزنی موجود میباشد. دیاگرام فلوچارتی روش پیشنهادی پیشبین مبتنی بر مدل در شکل ۶ نشان داده شده است.

در گام دوم، خطای مدار باز بر روی ۲ کلید ۲۱۱ از سلول اول و کلید 222 از سلول دوم اعمالشده است. با توجه به اینکه کلید ۲۱۱ یکی از کلیدهای قطر اصلی سلول اول می،اشد، بنابراین سلول اول توانایی تولید سطح ولتاژ مثبت را نخواهد داشت. کلید 222 نیز یکی از کلیدهای قطر فرعی سلول دوم می،اشد. بنابراین سلول دوم، فقط قادر به تولید سطح ولتاژ مثبت و صفر در خروجی خود می،اشد و توانایی تولید سطح منفی را نخواهد داشت. حالات کلیدزنی مبدل پس از رخداد خطا در ۲ کلید ۲۱ و 222 در جدول ۳، آورده شده است. شایان ذکر روش پیشنهادی، برای تعداد سلول های متفاوت نیز قابل تعمیم است. به ازای هر تعداد سلول، مطابق ایده مطرح شده در مقاله، بسته به نوع و محل رخداد خطا، گذاشته می شوند و سپس حالات کلید زنی ای که قابل اعمال به مبدل نیستند، کنار گذاشته می شوند و سپس حالات کلیدزنی باقیمانده به بلوک تابع هزینه ارسال



شکل ۷. تأثیر ضرایب وزنی بر ریپل ولتاژ و کیفیت جریان (الف) حالت قبل از رخداد خطای مدار باز برای هر سه سلول (ب) اصلاح ضریب وزنی سلول معیوب

۵- نتایج شبیهسازی

در این قسمت با کمک نرم افزار MATLAB/SIMULINK ساختار یکسوساز مبتنی بر 7L-CHB مطابق شکل ۱، شبیه سازی شده است. یکسوساز مور دمطالعه، به شبکه ۷ 1200 متصل است. ولتاژ لینک bd هر سه سلول برابر با ۷ 600 می باشد. همچنین، نرخ نمونه برداری سیستم کنترل، S س 60 است. پارامترهای ساختار شبیه سازی شده در جدول ۴ ارائه شده است.

۵-۱- تعیین ضرایب وزنی در تابع هزینه

همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، اهداف کنترلی مطابق رابطه ۷ و ۸ در توابع هزینه تعریف شدهاند. هدف کنترلی اول، کنترل جریان کشیده شده از شبکه و هدف کنترلی دوم متعادل سازی ولتاژ خازنهای لینک dc می باشد. ضرایب وزنی هر جمله، میزان اهمیت آن جمله را نشان می دهد. به هر میزانی که، مقدار ضریب وزنی عبارتی بیشتر باشد، حالت کلیدزنی انتخاب می شود که متغیر کنترلی مربوط به آن عبارت، با کمترین خطا مقدار مرجع خود را دنبال کند. هرچند این امر ممکن است موجب افزایش خطا در سایر متغیرهای کنترلی شود. از این رو، باید نوعی مصالحه در انتخاب ضرایب وزنی وجود داشته باشد تا به به ترین شکل ممکن به اهداف کنترلی بیان شده در تابع هزینه دست یافت. با توجه به رابطه ۷ و ۸، $_{cap}$ ضریب وزنی مربوط به ولتاژ خازنهای لینک dc و $_i$ ضریب وزنی مربوط به جریان خروجی مبدل می باشد. ضریب وزنی مربوط به کنترل جریان یا همان $_i$ برابر یک در نظر گرفته شده است. شکل (۷–الف)،



شکل۶. فلوچارت روش کنترل پیشنهادی مبتنی بر روش پیشبین مبتنی بر مدل

جدول ۳.حالات کلیدزنی پس از رخداد خطا در کلید S11 و S22

سطوح			كليدزنى	وضعيت	,		v_{cl}	V _{c2}	V _{c3}	ولتاژ
ولتاژ	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	S_{31}	S_{32}	i>0 i<0	i>0 i<0	i>0 i<0	خروجى
2	0	0	1	0	1	0	یی تاثیر	- +	- +	2E
	0	0	1	0	0	0	يى تاثير	- +	يى تاثير	
3	0	0	0	0	1	0	يى تاثير	بى تاثير	- +	Е
	0	1	1	0	1	0	+ -	- +	- +	
	0	0	0	0	0	0	يى تاثير	بى تاثير	يى تاثير	
4	0	1	1	0	0	0	+ -	- +	يى تاثير	0
4	0	1	0	0	1	0	+ -	بى تاثير	- +	0
	0	0	1	0	0	1	یی تاثیر	- +	+ -	
	0	1	0	0	0	0	+ -	بى تاثير	بى تاثير	
5	0	0	0	0	0	1	يى تاثير	بى تاثير	+ -	-E
	0	1	1	0	0	1	+ -	- +	+ -	
6	0	1	0	0	0	1	+ -	بى تاثير	+ -	-2E

جدول ۴. پارامترهای شبیه سازی

پارامتر	نماد	مقدار
فركانس	f_o	50 HZ
ولتاژ لينک dc	V_{dc}	600 V
ولتاژشبكه	V_s	1200 V
مقاومت بار هر سلول	R_{j}	20 Ω
مقاومت فيلتر	R_S	0.5 Ω
سلف فيلتر	L_S	8 mH
خازن	C_j	5 mF
زمان نمونه برداري	Ts	60 µS

مطابق جدول ۳، هنگامی که ۲ کلید دچار خطا شده، ۱۲ حالت کلیدزنی باقی ماندهاست که منجر به تولید ۵ سطح ولتاژ در خروجی مبدل می شود. با توجه به جدول مذکور، با توجه به وقوع خطا در ۲ کلید، مبدل توانایی تولید سطوح ولتاژ 3E و 3E- را ندارد. بنابراین، سطوح ولتاژ خروجی مبدل از ۷ سطح در حالت کارکرد عادی مبدل به ۵ سطح ولتاژ کاهش پیدا کرده است.

THD جریان تزریقی به شبکه و میانگین خطای ولتاژ خازنها از مقدار مرجعشان را قبل از وقوع خطای مدار باز برای سه سلول نشان میدهد. مطابق شکل مذکور، با افزایش A_{cap} جریان خروجی دچار اعوجاج شده و THD جریان خروجی افزایش می یابد. مشاهده می شود با افزایش مرد از مقدار ۵۰ به بالا، THD جریان به بالاتر از ۱۰٪ میرسد که مطلوب نیست. همچنین، هنگامیکه λ_{cap} به مقادیر پایین تر میل می کند، میانگین خطای ولتاژ خازن ها افزایش می یابد كه اين امر نيز مطلوب نمي باشد. بنابراين با انتخاب ضريب وزني مناسب مي توان مصالحهای بین THD جریان کشیده شده از شبکه و میانگین خطای ولتاژ خازنها ایجاد کرد. در شبیهسازی مربوط به شرایط کاری نرمال مبدل، مقدار رمدا در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، پس از رخداد خطا در λ_{cap} یک سلول، نیمی از حالتهای کلیدزنی مربوط به آن سلول کنار گذشته می شود. این مسئله، انتقال توان اکتیو به لینک dc سلول معیوب و حفظ شارژ خازن آن سلول را دشوارتر می کند. ازاین رو پس از رخداد خطا، ضریب وزنی کنترل ولتاژ خازن، مربوط به سلول معيوب به λ_{cap}^\prime افزايش مىيابد تا با افزايش اهميت آن، تعادل ولتاژ خازن سلول معيوب بهتر تأمين شود. شكل (٧-ب) تأثير ضرايب وزنی مختلف بر روی THD جریان کشیده شده از شبکه و میانگین خطای ولتاژ خازن از مقدار مرجع را برای سلول معیوب نشان میدهد. با انتخاب ضریب وزنی بهینه، باید تعادلی میان خطای ولتاژ خازن و THD جریان ایجاد کرد. با توجه به این شکل، پس از رخداد خطا، ضریب وزنی مربوط به سلول معیوب، از ۳۰ به ۴۰ افزایش داده می شود.

۵-۲- عملکرد یکسوساز پیش از اعمال خطای مدار باز

در این بخش، عملکرد یکسوساز، تحت شرایط کاری نرمال و به ازای بارهای متعادل و نامتعادل، به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) نشان داده شده است. مطابق شكل (٨-الف)، جريان ورودى يكسوساز بهخوبى جريان مرجع را دنبال کرده است. مطابق شکل (۸-ب) ولتاژ هر سه خازن لینک dc در مقدار مرجع خود تثبیت شده است. بار مصرفی هر سلول مطابق شکل (۸–پ)، برابر ۱۸ کیلووات می باشد. همچنین، در شکل (۹) عملکرد یکسوساز تحت شرایط کاری نرمال و به ازای بارهای نامتعادل نشان داده شده است. میزان توان مصرفی بارهای dc در سلولهای اول، دوم و سوم مبدل به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۶ کیلووات میباشد. در روشهای مدلاسیون کلاسیک، مانند روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی با شیفت فاز (PSPWM) توان ورودی به مبدل به صورت مساوی میان سلولها توزیع می شود. در صورتی که عدم تعادل قابل ملاحظه ای بین توان مصرفی بارهای DC وجود داشته باشد (مانند مثال موردمطالعه)، ولتاژ خازنهای لینک dc سلولها دچار عدم تعادل خواهد شد. بهعبارتدیگر، خازن سلولی که بار مصرفی آن بیشتر است دچار افت ولتاژ و سلولی که بار مصرفی آن کمتر است دچار اضافه ولتاژ خواهد شد. هر چه میزان عدم تعادل بارهای dc بیشتر باشد میزان عدم تعادل در شارژ خازنها نیز بیشتر میشود. بهمنظور حل این چالش، در این مقاله یک استراتژی کنترلی مبتنی بر روش کنترل پیشبین، برای متعادلسازی ولتاژ خازنها توسعه داده شده است. با استفاده از این روش، توان کل ورودی به مبدل (از شبکه) بهصورت مساوی (یا با یک نسبت معین از پیش تعیین شده) بین سلولها توزیع نمی شود، بلکه بسته به وضعیت ولتاژ خازن همه سلولها، بهترین حالت کلیدزنی که به کنترل جریان و تعادل ولتاژ خازنها كمك كند، انتخاب مي شود. درنتيجه، با تغيير نقطه كار مبدل، يا ميزان توان مصرفي سلولها، تعادل ولتاژ خازنها حفظ مي شود. مطابق شكل (۹-الف)، جریان ورودی یکسوساز بهخوبی جریان مرجع را دنبال کرده است.مطابق شکل (۹-ب)، یکسوساز در شرایطی که بارهای مصرفی نامتعادل هستند نیز، عملکرد مناسبی داشته و تعادل ولتاژ خازنها حفظ شده است.







شکل۹. رفتار مبدل در شرایط نرمال و تحت بارهای نامتعادل



شکل۱۰. رفتار مبدل در شرایط خطای مدار باز و پیش از اعمال روش پیشنهادی

۵-۳- عملکرد یکسوساز پس از وقوع خطا و پیش از اعمال روش پیشنهادی

در شکل ۱۰، شکل موجهای جریان مبدل و ولتاژ خازنها، پس از اعمال خطا و پیش از اعمال روش پیشنهادی نشان داده شده است. مقدار بار مصرفی هر سلول ۱۸ کیلووات درنظرگرفته شده است. خطای مدار باز در ثانیه چهارم بر روی کلید _{۱۱}S از سلول اول اعمال شده است. مطابق شکل (۱۰–الف)، پس از رخداد خطا، جریان مبدل دچار اعوجاج شدید شده و جریان مرجع را دنبال نکرده

است. همچنین، ولتاژ خازنهای لینک dc افت شدیدی کرده و از ۶۰۰ ولت به حدود ۲۰۰ ولت میرسند. در چنین شرایطی، باید مبدل از شبکه جدا شود که این مسئله به قطع انتقال توان به بارهای dc می انجامد.

۵-۴- عملکرد یکسوساز پس از وقوع خطا و اعمال روش پیشنهادی در این قسمت، عملکرد مبدل پس از وقوع خطای مدار باز در کلید S₁₁ و با اعمال روش پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. خطای مدار باز در کلید، در سه حالت، بررسی شده است: خطای ماژول کلید (کل کلید)، خطای IGBT و خطای دیود. شکل (۱۱) عملکرد مبدل حین رخداد خطا در کل کلید را نشان میدهد. مشاهده میشود که پس از رخداد خطای مدار باز در ثانیه چهارم،

جریان خروجی بهخوبی جریان مرجع را دنبال می کند. ولتاژ خازنها حفظ همچنان بر روی مقدار مرجع خود تثبیت شدهاند و تعادل ولتاژ خازنها حفظ شده است. هرچند ریپل ولتاژ خازنها کمی افزایش یافته است که این مسئله به دلیل کاهش تعداد حالتهای کلیدزنی و سخت تر شدن برآوردن کردن اهداف تابع هزینه است. همچنین به منظور تائید کارایی روش پیشنهادی در شرایط رخداد خطای اتصال کوتاه، نتایج شبیه سازی پس از رخداد خطای اتصال کوتاه در کلید ۱ از سلول ۱ در لحظه k = 1 در شکل ۱۲ ارائه شده است. در این مبدل حین رخداد خطا در TGBT، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این دهد و جریان از خود عبور می دهد. با اعمال روش پیشنهادی، جریان خروجی مبدل و جریان مرجع به خوبی یکدیگر را دنبال می کنند و ولتاژ هر سه خازن لینک dc در مقدار مرجع خود تثبیت شده است.شکل (۱۴) عملکرد مبدل حین رخداد خطا در دیود موازی معکوس را نشان می دهد. در این حالت، دیوات را می کرد این منه در میدان مرجع به خوبی یکدیگر را دنبال می کنند و ولتاژ هر سه خازن مبدل و جریان مرجع موازی معکوس را نشان می دهد. در این حالت، دو این

دیود موازی معکوس با IGBT، تأثیر بیشتری در شارژ خازنهای لینک dc دارد، به همین دلیل مطابق شکل (۱۴)، خطا در دیود موازی معکوس نسبت به خطای IGBT، ولتاژ خازنهای لینک dc را بیشتر تحت تأثیر قرار داده است. همچنین شکل ۱۳، طیف هارمونیک جریان AC یکسوساز را پس از رخداد خطای مدار باز در کلید ₁₁ نشان میدهد. شکل (۱۵-الف) مربوط به شرایطی است که روش پیشنهادی تحمل پذیری خطا اعمال نشده است. مطابق این شکل THD جریان در این حالت ۴۸٬۳۶٪ است که مقدار مطلوبی نمی باشد. شکل (۱۵-ب) طیف هارمونیک جریان یکسوساز را پس از اعمال روش پیشنهادی نشان میدهد. مطابق این شکل THD جریان به مقدار ۱٫۷۸٪ کاهش پیدا کرده است که مقدار مطلوبی است.

۵-۵- عملکرد یکسوساز پس از اعمال خطای مدار باز بر روی ۲ کلید

نتایج شبیه سازی پس از رخداد خطای مدار باز بر روی ۲ کلید S₁₁ از سلول اول و کلید S₂₂ از سلول دوم در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ولتاژ هر سه خازن باوجود اعمال خطا بر روی ۲ کلید مبدل، هم در حالت قبل از خطا و هم پس از اعمال خطا مدار باز در مقدار مرجع خود و با

ریپل کمتر ۵٪ تثبیت شدهاند. همچنین جریان خروجی مبدل، جریان مرجع را دنبال کرده است.



شکل۱۱ . رفتار مبدل پس از خطای مدار باز در کلید S11 و اعمال روش پیشنهادی تحمل پذیری خطا



شکل ۱۲. عملکرد مبدل پس از رخداد خطای اتصال کوتاه در کلید S11 و اعمال روش پیشنهادی، (الف) جریان کشیده شده از شبکه، (ب) ولتاژ خازنهای سلولها



شکل ۱۳. رفتار مبدل پس از رخداد خطای مدار باز در IGBT اعمال روش پیشنهادی





شکل ۱۷- ولتاژ خروجی سلولهای یکسوساز قبل و بعد از اعمال خطا در کلیدهای S₁₁ و S₂₂ (الف) سلول بالایی، (ب) سلول میانی، (ج) سلول پایینی







شکل ۱۹. جریان لینک dc پس از رخداد خطای مدار باز در کلید S11 (الف) سلول اول، (ب) سلول دوم، (ج) سلول سوم



شکل ۱۵.طیف هامونیک جریان یکسوساز (الف) قبل از اعمال روش کنترلی (ب) پس از اعمال روش کنترلی



شکل ۱۶- ولتاژ خروجی سلولهای یکسوساز قبل و بعد از اعمال خطا در کلید S11 (الف) سلول بالایی، (ب) سلول میانی، (ج) سلول پایینی



شکل ۲۰. جریان لینک dc پس از رخداد خطای مدار باز در کلیدهای S1۱ و S2۱ (الف) سلول اول، (ب)سلول دوم، (ج)سلول

جدول ۵. مقایسه روش پیشنهادی با روشهای موجود برای تحمل پذیری خطا در مبدل پل آبشاری

اده سازی	روش پي	بری خطا	تحمل پذ	3		
نرم افزاری	سخت افزاری	تحملپذیری خطا در یک کلید	تحملپذیری خطا در چند کلید	کاربرد اینورت ری	کاربردیک سوسازی	
	\checkmark	\checkmark		\checkmark		مقاله[۲۴]
\checkmark		\checkmark		\checkmark		مقاله[٢٣]
\checkmark		\checkmark		\checkmark		مقاله[٢۵]
\checkmark		\checkmark			\checkmark	مقاله[١١]
	\checkmark	\checkmark		\checkmark		مقاله[۳۰]
~			\checkmark		~	روش پیشنهادی

۵-۶- تحلیل شکل موج ولتاژ خروجی سلولها

شکل (۱۶) ولتاژ خروجی سلولهای مبدل پل آبشاری را پس از رخداد خطای مدار باز در کلید _{۱۱} نشان می دهد. مشاهده می شود، سلول اول قبل از رخداد خطا، سه سطح ولتاژ ۲۰۰۶ و و ۶۰۰۶- ولت تولید کرده است. بعد از ثانیه چهارم و رخداد خطای مدار باز در کلید _{۱۱}۵، سطح ولتاژ مثبت به دلیل رخداد خطا در یکی از کلیدهای قطر اصلی سلول، حذف شده است. از ترکیب ولتاژ خروجی سلولها، هفت سطح در حالت قبل از خطا و ۶ سطح در حالت بعد از خطا خروجی مبدل به دست می آید. همچنین شکل (۱۷) ولتاژ خروجی سلولهای مبدل را در حالتی که خطا بر روی ۲ کلید _{۱۱}۲ و ₂₂۶ اعمال شده است را نشان می معدد. مطابق شکل مذکور، هر سه سلول قبل از خطا سه سطح ولتاژ ۲۰۰۶ و می دو ۲۰۰۶- ولت را تولید کردهاند. بعد از ثانیه چهارم، سلول اول به دلیل وقوع مثبت نمی باشد. همچنین، سلول دوم به علت رخداد خطای مدار باز در یکی از کلیدهای قطر فرعی خود، توانایی تولید سطح ولتاژ منهی را ندارد. سلول سوم نیز همچنان به تولید سه سطح ولتاژ در سمت AC خواه مدار دامه داده است.

شکل ۱۸ (الف) و (ب) به ترتیب نشان دهنده ولتاژ سمت ac مبدل پس از رخداد خطای مدار باز در کلید (S_{11}) و کلیدهای (S_{11}) میباشد. همچنین شکل ۱۹ جریان لینک dc سلولها پس از رخداد خطای مدارباز در I_1 و شکل ۲۰ جریان لینک dc سلولها به هنگام رخداد خطای مدارباز در کلیدهای - I_1 (S_{11}) می انشان میدهد. همان گونه که در شکل ۱۸ (الف) دیده می شود، پس از رخداد خطای مدار باز در کلید می در بس از رخداد خطای مدار باز در کلید (I_2) می انشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱۹ (الف) دیده می شود، پس از رخداد خطای مدار باز در کلید (I_2) می انشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱۹ (الف) دیده می شود، پس از رخداد خطای مدار باز در کلید (I_1)

نیست و درنتیجه تعداد سطح ولتاژ مبدل از ۷ سطح به ۶ سطح پس از رخداد خطا کاهش مییابد. مطابق شکل ۳(ب)، با رخداد خطا در کلیدهای (S₁₁-S₂₁)، سلول اول و دوم به ترتیب سطح مثبت و منفی ولتاژ را نمیتوانند تولید کنند و بنابراین تعداد سطح ولتاژ خروجی مبدل از ۷ به ۵ کاهش یافته است.

۶- مقایسه روشهای موجود برای تحمل پذیری خطا

در این قسمت، روشهای موجود برای تحمل پذیری خطا در مبدل پل آبشاری مقایسه شده است. این مقایسه از سه منظر انجام شده است: روش پیادهسازی، قابلیت تحمل پذیری چندین خطا و کاربرد.

الف) روش پیادەسازى

روشهای تحمل پذیر خطای موجود به استراتژیهای مبتنی بر نرمافزار و مبتنی بر سخت افزار طبقه بندی می شوند. در یک رویکرد مبتنی بر سخت افزار، واحدهای اضافی در ساختار اینورتر وارد می شوند ولی در یک رویکرد مبتنی بر نرمافزار، سیستم کنترل و تکنیک مدولاسیون اصلاح می شود تا مبدل با حداکثر ظرفیت در شرایط پس از خطا کار کند. مطابق جدول ۵، در مقالههای [۳۳]، [۲۵] از روش نرم افزاری برای تحمل پذیری خطا بهره گرفته شده است. در ۲۵]، با تنظیم اختلاف زاویه ولتاژ فازها، ولتاژ خط به خط خروجی مبدل، متعادل نگه داشته می شود. در [۲۴] پس از رخداد خطا در کلید، با استفاده از رلهها و سلول یدکی، مبدل قادر خواهد بود به عملکرد خود ادامه دهد. همچنین در [۳۰] نیز، یک مدول شامل ۶ کلید الکترونیک قدرت به ساختار مبدل اضافه می شود تا تحمل پذیری خطا تأمین شود.

ب) توانایی/عدم توانایی تحملپذیری خطا در چند سلول

در مقالههای [۱۱]، [۲۴]، [۳۳]، [۲۵] تحمل پذیری خطا در یک کلید قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در روش پیشنهادی تحمل پذیری خطا در چند کلید قدرت موردمطالعه قرار گرفته است. به طوری که اگر یک کلید از سلول اول و کلید دیگر از سلول دوم دچار خطا شود، روش پیشنهادی قادر است تا همچنان ولتاژ خازنهای لینک DC را در مقدار مرجع تثبیت کند و کیفیت جریان کشیده شده از شبکه نیز حفظ شود.

پ) کاربرد

یکی از وجوه تمایز اصلی روش پیشنهادی با سایر روشهای تحمل پذیری خطا، این است که در بیشتر روشهای موجود، تحمل پذیری خطا در کاربرد اینورتری مبدل پل آبشاری موردمطالعه قرار گرفته است ([۳۳] و [۲۴]). در این کاربردها عمدتاً فرض بر آن است که لینک cb سلولها با منابع ایزوله cb تغذیه شده است و هدف از تحمل پذیری خطا، صرفاً تأمین حداکثر ولتاژ متقارن خط به خط در خروجی ca است که به بار ca متصل است، لذا کنترل ولتاژ خازنهای لینک cb مطرح نیست. به عبارت دیگر، در کاربرد یکسوسازی مبدل پل آبشاری، استفاده از روشهای مذکور باعث میشود ولتاژهای متعادل خط به خط به درستی و پس از رخداد خطا در سمت ca مبدل تولید شود، اما تعادل ولتاژهای خازنهای لینک cb که برای کاربرد یکسوسازی ضروری است – تأمین نخواهد شد.

۷- نتیجهگیری

در این مقاله، یک استراتژی مبتنی بر کنترل پیشبین مدل با مجموعه کنترلی محدود (FCS-MPC) به منظور تحمل پذیری خطای کلیدهای قدرت در یکسوساز مبتنی بر مبدل پل آبشاری، ارائه شد. منظور از خطا، خطای مدار باز است که در مرحله اول، در یک کلید و در مرحله دوم در دو کلید قدرت اعمال شد. در روش پیشنهادی، در ابتدا مدل ریاضی یکسوساز مبتنی بر مبدل پل آبشاری هفت سطحی در حوزه زمان گسسته استخراج شد و سپس دو هدف کنترلی تعریف شده است: ۱-کنترل جریان تزریقی به شبکه ۲-کنترل ولتاژ خازنهای لینک cb. در گام بعد، با تعریف یک تابع هزینه چندهدفه، حالت کلیدزنی مناسب برای به حداقل رساندن تابع هزینه استخراج و به سیستم اعمال loop PI control," 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 2018, pp. 168-172.

[1۵] محمدحسین سعیدی نیا، محمد مهرگان، سید علیرضا داوری، «کنترل مستقیم توان یکسوساز AFE بر پایه شار مجازی و محدودسازی نوسانهای توان در شرایط عدم تعادل شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۴، زمستان ۹۸.

[16] Yan Y, Liu F, Shi T, Zhang G, Wang Z, Xia C. Model predictive current control for multilevel CHB-PMSM system with lower calculation. IET Electric Power Applications. 2020 Jun;14(6):1089-96.

[17] M. Wu, Y. W. Li and G. Konstantinou, "A Comprehensive Review of Capacitor Voltage Balancing Strategies for Multilevel Converters Under Selective Harmonic Elimination PWM," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 3, pp. 2748-2767, March 2021.

[18] A. Moeini, H. I.- Eini, and A. Marzoughi, "Dc link voltage balancing approach for cascaded H-bridge active rectifier based on selective harmonic elimination pulsewidth modulation," IET Power Electron., vol. 8, no. 4, pp. 583–590, Aug. 2015.

[19] H. Shi, H. Wen and J. Li, "Fault Analysis and Fault-Tolerant Method of Dual Active Bridge Converter under Triple Phase Shift Control," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 1121-1127

[20] N. Zhao, Z. Zheng and Y. Li, "Fault-tolerant Method Based on Reconstructed Modulation for H-bridge Converter in Power Electronic Traction Transformer," 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2021, pp. 1-4

[21] Y. Xia and Y. Xu, "A Transferrable Data-Driven Method for IGBT Open-Circuit Fault Diagnosis in Three-Phase Inverters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 12, pp. 13478-13488, Dec. 2021

[22] J. Lamb and B. Mirafzal, "Open-Circuit IGBT Fault Detection and Location Isolation for Cascaded Multilevel Converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 6, pp. 4846-4856, Jun. 2017.

[23] S. Bazyar, H. Iman-Eini and Y. Neyshabouri, "A Fault-Tolerant Method for Cascaded H-Bridge-Based Photovoltaic Inverters With Improved Active and Reactive Power Injection Capability in Postfault Condition," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 9, pp. 9029-9038, Sept. 2022

[24] M. D. Patel, D. J. Pandya, D. Y. Raval and N. Y. Yagnik, "Fault-Tolerant Structure for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter using Relays," 2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, India, 2019, pp. 008-013

[25] Q. Xiao et al., "An Improved Fault-Tolerant Control Scheme for Cascaded H-Bridge STATCOM With Higher Attainable Balanced Lineto-Line Voltages," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 4, pp. 2784-2797, April 2021

[26] Moeini, H. I.- Eini, and A. Marzoughi, "Dc link voltage balancing approach for cascaded H-bridge active rectifier based on selective harmonic elimination pulsewidth modulation," IET Power Electron., vol. 8, no. 4, pp. 583–590, Aug. 2015.

[۲۷] عباس کتابی، شیال صفایی، »استفاده از مبدل چند سطحی ماژوالر با

استفاده از روش کنترل پیشبین در سیستمهای فتوولتاییک متصل به شبکه»،

مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸ ،شماره ۴ ،صفحات ۱۷۳۰–۱۷۱۹

[28] E. Garayalde, I. Aizpuru, U. Iraola, I. Sanz, C. Bernal and E. Oyarbide, "Finite Control Set MPC vs Continuous Control Set MPC Performance Comparison for Synchronous Buck Converter Control in Energy Storage Application," 2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2019, pp. 490-495

[29] L. Tarisciotti, P. Zanchetta, A. Watson, S. Bifaretti, and J. C. Clare, "Modulated model predictive control for a seven-level cascaded Hbridge back-to-back converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 10, pp. 5375–5383, Oct. 2014.

[30] H. Salimian and H. Iman-Eini, "Fault-tolerant operation of threephase cascaded H-bridge converters using an auxiliary module," IEEE Transactions on Ind. Elec., vol. 64, no. 2, pp. 1018-1027, 2016 شده است. با رخداد خطا و بسته به محل و نوع خطا، برخی از حالات کلیدزنی کنار گذاشته میشوند و فرآیند بهینهسازی با حضور حالات کلیدزنی باقیمانده و اصلاح ضرایب وزنی ادامه مییابد. بر اساس نتایج شبیهسازی، روش پیشنهادی پس از رخداد خطای مدار باز در کلید، دستاوردهای مهم زیر را ارائه میدهد:

- مبدل باوجود سلول معیوب به کار خود ادامه میدهد و توان موردنیاز تمام بارهای dc (اعم از بار متصل به سلول معیوب و بار متصل به سلول سالم) تأمین می شود.
- ۲) جریان AC ورودی یکسوساز با THD مناسب کنترل شده و تعادل ولتاژ
 خازنهای لینک dc نیز پس از رخداد خطا حفظ می شود.

مراجع

[1] S. Arazm and K. Al-Haddad, "ZPUC: A New Configuration of Single DC Source for Modular Multilevel Converter Applications," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 97-113, 2020

[3] M. Shamouei-Milan, R. Asgarniya, M. G. Marangalu, M. R. Islam and A. Mehrizi-Sani, "A Single-Phase High Gain Active-Switched Quasi Z-Source NNPC Inverter," 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT), Male, Maldives, 2023

[4] M. Sadoughi, A. Zakerian, A. Pourdadashnia and M. Farhadi-Kangarlu, "Selective Harmonic Elimination PWM for Cascaded Hbridge Multilevel Inverter with Wide Output Voltage Range Using PSO Algorithm," 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2021, pp. 1-6

[5] Y. Ye, T. Hua, S. Chen and X. Wang, "Neutral-Point-Clamped Five-Level Inverter With Self-Balanced Switched Capacitor," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 3, pp. 2202-2215, March 2022

[6] Hassanifar, M., Shamouei-Milan, M., & Neyshabouri, Y. (2022, February). T-type Nested Neutral Point Clamped (T-NNPC) Multilevel Inverter: Identification and Diagnosis of IGBT Switch Failures. In 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC) (pp. 409-413). IEEE.

[7] Y. Neyshabouri and H. Iman-Eini, "A New Fault-Tolerant Strategy for a Cascaded H-Bridge Based STATCOM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 8, pp. 6436-6445, Aug. 2018

[8] Y. Neyshabouri, K. K. Monfared, H. Iman-Eini, Q. Xiao and M. Farhadi-Kangarlu, "Cascaded H-bridge Based STATCOM With Improved Ride Through Capability of Submodule Failures," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 4, pp. 4034-4045, April 2022

[9] M. Ahmadijokani, M. Mehrasa, M. Sleiman, M. Sharifzadeh, A. Sheikholeslami and K. Al-Haddad, "A Back-Stepping Control Method for Modular Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 1, pp. 443-453, Jan. 2021

[10] D. Xie, C. Lin, Q. Deng, X. Ge and B. Gou, "A Fast Diagnosis Scheme for Multiple Switch Faults in Cascaded H-Bridge Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 7, no. 3, pp. 1000-1015, Sept. 2021

[11] Qi, C., Chen, X., Tu, P., & Wang, P. (2017). Cell-by-cell-based finite-control-set model predictive control for a single-phase cascaded H-bridge rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *33*(2), 1654-1665.

[12] S. Wang, N. Jiao, J. Ma, T. Liu and X. Liu, "Analysis and Optimization of Voltage Balancing Control Limits for Cascaded H-Bridge Rectifiers," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 11, pp. 10677-10687, Nov. 2021

[13] Y. Hu et al., "High-Frequency-Link Current Stress Optimization of Cascaded H-Bridge-Based Solid-State Transformer With Third-Order Harmonic Voltage Injection," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 1027-1038, Feb. 2021

[14] V. A. Kumar and M. Arounassalame, "Comparison of CHB Multi level inverters using Level shifted Modulation techniques with closed