

طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل برای اینورترهای چندسطحی متصل به شبکه در نیروگاه‌های خورشیدی

سید سجاد میراکبری

کارشناسی ارشد مهندسی برق (گرایش قدرت)، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

sajjad.mirakbari@gmail.com

چکیده

افزایش نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه، نیاز به مبدل‌های الکترونیک قدرتی با کیفیت جریان مطلوب، پاسخ دینامیکی سریع و رفتار پایدار در برابر تغییرات تابش و امپدانس شبکه را تشدید کرده است. در این مقاله، یک چارچوب طراحی و پیاده‌سازی برای کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل با مجموعه کنترل محدود (FCS-MPC) در اینورتر سه‌سطحی دیودکلمپ‌شده (NPC) ارائه می‌شود. ساختار پیشنهادی شامل مدل گسسته جریان در چارچوب $\alpha\beta$ ، مدل اختلاف ولتاژ خازن‌های لینک DC، پیش‌بینی دوگامی برای جبران تأخیر محاسباتی، محدودسازی تغییرات کلیدزنی و تابع هزینه چندهدفه با مقیاس‌بندی بدون بعد است. افزون بر آن، معماری نرم‌افزار بلادرنگ، شرایط تست سخت‌افزار در حلقه و شاخص‌های مقایسه با کنترل جریان PI-PWM و FCS-MPC پایه تدوین می‌شود. مقاله ماهیت طراحی روش و تحلیل نظری دارد؛ بنابراین هیچ عدد شبیه‌سازی یا آزمایش انجام‌نشده‌ای به عنوان نتیجه واقعی گزارش نمی‌شود. خروجی اصلی، الگوریتمی بازتولیدپذیر و یک برنامه اعتبارسنجی کمی برای ارزیابی THD، خطای ردیابی جریان، نوسان نقطه خنثی، توان راکتیو، تلاش کلیدزنی و زمان اجرای محاسبات است. بررسی مطالعات معتبر ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۶ نشان می‌دهد ادغام کنترل چندهدفه، انتخاب بهینه بردار و مدیریت هزینه محاسباتی همچنان از محورهای اصلی توسعه کنترل پیش‌بین اینورترهای متصل به شبکه است.

واژگان کلیدی: کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل؛ اینورتر چندسطحی؛ NPC سه‌سطحی؛ نیروگاه فتوولتائیک؛ اتصال به شبکه؛ تعادل نقطه خنثی؛ کیفیت توان.

۱. مقدمه

تحول ساختار تولید برق از واحدهای سنکرون بزرگ به منابع مبتنی بر مبدل، ماهیت کنترل ولتاژ و جریان را تغییر داده است. در نیروگاه فتوولتائیک، توان در سمت DC تابع تابش، دما، ویژگی‌های ماژول و الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان است؛ در مقابل، شبکه AC انتظار تزریق جریان با مؤلفه بنیادی مشخص، اعوجاج محدود و تبادل توان راکتیو کنترل شده دارد. این دو خواسته از طریق لینک DC، اینورتر و فیلتر واسط به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

اینورترهای دوسطحی به دلیل ساختار ساده همچنان پرکاربردند، اما در توان و ولتاژ بالاتر، تنش نیمه‌رساناها، شیب تغییرات ولتاژ و نیاز به فیلتر پر حجم می‌تواند محدودکننده باشد. ساختار چندسطحی با افزودن ترازهای ولتاژ خروجی، کیفیت شکل موج را بهبود می‌دهد، اگرچه تعداد حالت‌های مجاز، مدیریت خازن‌ها و تصمیم‌گیری کنترل را پیچیده‌تر می‌کند. در میان گزینه‌ها، توپولوژی NPC سه‌سطحی توازن مناسبی میان بلوغ صنعتی و پیچیدگی فراهم می‌سازد.

کنترل‌کننده‌های PI در چارچوب سنکرون همراه با PWM به علت پیاده‌سازی آسان و فرکانس کلیدزنی قابل پیش‌بینی، معیار مرجع مناسبی هستند. کنترل پیش‌بین با مجموعه محدود به جای ایجاد دستور پیوسته برای مدولاتور، مدل مبدل را برای همه حالت‌های کلیدزنی مجاز ارزیابی می‌کند و حالتی را که یک تابع هزینه کمینه دارد اعمال می‌کند. چنین سازوکاری می‌تواند محدودیت‌های جریان، نقطه خنثی و تعویض کلید را در یک تصمیم مشترک لحاظ کند.

با این همه، عملکرد مطلوب MPC تضمین شده نیست: خطای مدل اندوکتانس، تأخیر نمونه‌برداری، تغییر امپدانس شبکه، وزن‌دهی نامناسب تابع هزینه، و افزایش اندازه فضای جست‌وجو می‌توانند عملکرد را کاهش دهند. مقاله حاضر به جای ادعای بهبود تجربی بدون آزمایش، مسئله طراحی را دقیق فرمول‌بندی کرده و روش آزمون و پذیرش آن را ارائه می‌کند.

مرور Mirza و Hussain در سال ۲۰۲۴ درباره کاربرد FCS-MPC در اینورترهای PV متصل به شبکه، انعطاف این روش و چالش‌های انتخاب تابع هزینه و تاب‌آوری نسبت به اغتشاش را برجسته می‌کند. مرور منتشرشده در Electronics در ۲۰۲۵ نیز نشان می‌دهد که تطبیق ساختار کنترل با ماهیت اینورتر و شرایط اتصال به شبکه ضروری است. این دو مطالعه بنیان انتخاب مسئله چندهدفه مقاله حاضرند [۱، ۲].

۲. پیشینه پژوهش و تبیین شکاف علمی

ادبیات اخیر را می‌توان در چهار محور دسته‌بندی کرد: نخست کنترل مستقیم جریان یا توان؛ دوم کاهش ولتاژ مد مشترک و اثرهای جانبی آن؛ سوم موازنه ولتاژ خازن‌ها و کاهش تلاش کلیدزنی؛ و چهارم کاستن از بار پردازشی با کاهش مجموعه نامزدها یا استفاده از راهبردهای چندبرداری. تفاوت اصلی روش‌ها صرفاً نوع تابع هزینه نیست؛ بلکه انتخاب مدل پیش‌بین، زمان اعمال فرمان و محل اندازه‌گیری جریان نیز در نتیجه اثر می‌گذارد.

Bebboukha و همکاران در (۲۰۲۴) Scientific Reports کنترل جریان مبتنی بر FCS را با ملاحظه مهار ولتاژ مد مشترک برای اینورتر سه‌فاز بررسی کرده‌اند [۳]. این یافته از نظر ساخت تابع هزینه چندشاخصه مهم است، هرچند انتقال مستقیم نتایج آن به NPC سه‌سطحی نیازمند بازمدل‌سازی نقطه خنثی و بردارهای اضافی است.

در مطالعه Xu و همکاران (۲۰۲۵) کنترل پیش‌بین رویدادمحور برای اینورتر NPC سه‌سطحی با فیلتر LCL مطرح شده است [۴]. این دسته روش‌ها یادآوری می‌کنند که افزایش نرخ محاسبه لزوماً بهترین راه برای ارتقای کیفیت نیست؛ گزینش هوشمندانه دفعات بهینه‌سازی نیز گزینه‌ای قابل آزمون است.

پژوهش منتشرشده در (۲۰۲۵) Control Engineering Practice کنترل پیش‌بین اقتصادی برای اینورتر DC/AC سه‌سطحی با تأکید بر پایداری و معیارهای عملکرد ارائه کرده است [۵]. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۶، روش چندبرداری نزدیک برای NPC متصل به شبکه، بالانس نقطه خنثی و میرایی فعال فیلتر را ترکیب می‌کند؛ مقادیر گزارش‌شده در آن مقاله مربوط به نمونه و شرایط همان پژوهش بوده و نباید به سامانه پیشنهادی حاضر نسبت داده شود [۶].

شکاف کاربردی اصلی در طراحی یک مسیر عملی از معادله تا کد است: پیوند بین مدل فیزیکی، نرمال‌سازی وزن‌های هزینه، جبران تأخیر، محدودیت حفاظتی و سنجش زمان اجرای واقعی اغلب در توضیحات کوتاه مقالات محو می‌شود. در این مقاله همه این اجزا به صورت یک معماری یکپارچه و قابل تمییزی عرضه می‌شوند.

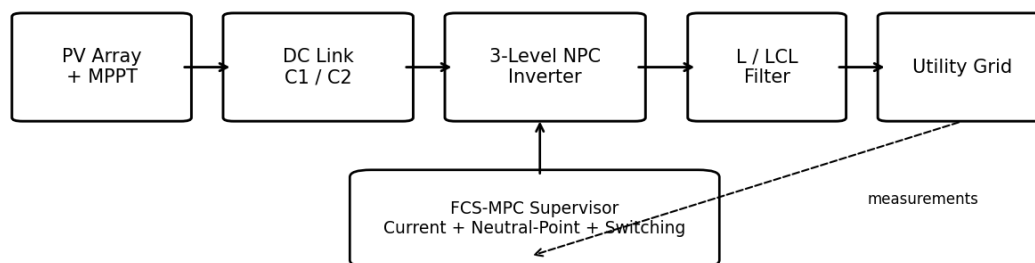
پیام مرتبط با طراحی حاضر	سامانه / محور	منبع و سال
لزوم بررسی جامع اهداف چندگانه	PV و FCS-MPC مرور	Mirza & Hussain، ۲۰۲۴
افزودن محدودیت مد مشترک	جریان و ولتاژ مد مشترک	و همکاران، ۲۰۲۴ Bebboukha
مدیریت بار محاسباتی	LCL سه‌سطحی و NPC	و همکاران، ۲۰۲۵ Xu
لزوم ارزیابی هزینه عملیاتی	هزینه و پایداری	Economic FCS-MPC، ۲۰۲۵
انتخاب نامزد و ارزیابی خازن‌ها	چندبرداری و تعادل نقطه خنثی NPC	و همکاران، ۲۰۲۶ Li

۳. مشخصات سامانه و فرضیات مدل

سامانه انتخابی یک نیروگاه خورشیدی سه‌فاز با ساختار دومرحله‌ای است: آرایه PV به مبدل DC-DC و الگوریتم MPPT متصل می‌شود؛ لینک DC از دو خازن سری تشکیل شده و یک اینورتر NPC سه‌سطحی، انرژی را از طریق فیلتر به نقطه اتصال مشترک (PCC) تزریق می‌کند. مدل اصلی کنترل جریان، فیلتر L را در نظر می‌گیرد؛ نسخه LCL به صورت توسعه جداگانه تحلیل می‌شود تا نتایج این دو مدل بدون قید به یکدیگر تعمیم داده نشوند.

فرض می‌شود ولتاژ شبکه و جریان‌های سه‌فاز نمونه‌برداری می‌شوند، زاویه شبکه از PLL یا سامانه هم‌زمان‌سازی معتبر به دست می‌آید و فرمان توان راکتیو از لایه بالادست دریافت می‌شود. مدل ایده‌آل اولیه از افت هدایت کلیدها، زمان مرده و اشباع مغناطیسی صرف نظر می‌کند؛ این آثار سپس در بخش عدم قطعیت و آزمون سخت‌افزار منظور می‌شوند.

هر بازوی NPC دارای سه وضعیت مؤثر P، O و N است که به ترتیب به نیم‌باس مثبت، نقطه میانی و نیم‌باس منفی متصل می‌شوند. ترکیب سه بازو ۲۷ حالت کلیدزنی ایجاد می‌کند، اما شماری از آنها بردار ولتاژ فضایی یکسانی دارند؛ حالت‌های افزونه می‌توانند اثر متفاوتی بر جریان نقطه خنثی داشته باشند. بنابراین حذف ساده افزونگی ممکن است قابلیت موازنه خازن‌ها را محدود کند.



پارامتر	نماد	* مقدار نمونه طراحی
توان نامی	P_n	کیلووات ۱۰۰
ولتاژ خط به خط شبکه	VLL	ولت مؤثر ۴۰۰
فرکانس شبکه	fgrid	هرتز ۵۰
DC ولتاژ لینک	Vdc	ولت ۸۰۰
اندوکتانس فیلتر در هر فاز	L	میلی‌هانی ۲
مقاومت فیلتر در هر فاز	R	اهم ۰٫۱
DC ظرفیت هر خازن	$C_1=C_2$	میکروفاراد ۲۲۰۰
دوره نمونه‌برداری کنترل	T_s	میکروثانیه ۵۰

* اعداد صرفاً نقطه شروع طراحی و سناریوی آزمون هستند؛ اندازه‌گیری یا نتایج حاصل از شبیه‌سازی محسوب نمی‌شوند. انتخاب نهایی فیلتر، نیمه‌رساناها و ولتاژ DC باید با تحلیل حرارتی، ولتاژ مجاز و الزامات اتصال به شبکه تطبیق داده شود.

۴. مدل ریاضی اینورتر و اتصال به شبکه

۴-۱. مدل ولتاژ حالت‌های کلیدزنی

بردار وضعیت کلیدزنی به صورت $s=[s_a \ s_b \ s_c]^T$ با اعضای مجموعه $\{1, 0, -1\}$ تعریف می‌شود. در حالت متعادل بودن ولتاژ دو خازن، ولتاژ قطبی هر بازو نسبت به نقطه میانی تقریباً برابر $v_{xo}=(V_{dc}/2)s_x$ است. در حالت نامتعادل، مقدار واقعی باید با ولتاژ خازن متناظر با وضعیت P یا N محاسبه شود. تبدیل کلارک، ولتاژ مؤثر در صفحه ساکن را فراهم می‌کند:

$$v_{\alpha\beta} = (2/3) [v_a + v_b \cdot e^{j2\pi/3} + v_c \cdot e^{j4\pi/3}]$$

لازم است مؤلفه صفر برای شبکه سه‌سیمه مستقل از جریان‌های خط در نظر گرفته شود، ولی در بررسی ولتاژ مد مشترک، ولتاژ صفر برابر میانگین سه ولتاژ بازو است. این تمایز مانع تفسیر نادرست نقش بردارهای صفر در نشتی و سازگاری الکترومغناطیسی می‌شود.

۲-۴. مدل جریان فیلتر L

با جهت مثبت جریان از مبدل به شبکه و فرض مقاومت سری معادل R، معادله هر مؤلفه در چارچوب $\alpha\beta$ به صورت $L \frac{di}{dt}$ با $vinv - vg - Ri =$ نوشته می‌شود. با گسسته‌سازی اویلر رو به جلو:

$$i\alpha\beta(k+1) = (1 - R \cdot Ts/L) i\alpha\beta(k) + (Ts/L) [vinv, \alpha\beta(k) - vg, \alpha\beta(k)]$$

اویلر به دلیل سربار کم برای گام نمونه‌برداری کوچک جذاب است؛ ولی در صورت افزایش Ts/L یا دینامیک شدید شبکه، گسسته‌سازی دقیق مبتنی بر نگهدار مرتبه صفر دقت بیشتری دارد. در سامانه واقعی باید اعتبار مدل گسسته با داده نمونه‌برداری شده و تحلیل حساسیت سنجیده شود.

۳-۴. مدل ولتاژهای لینک DC و نقطه خنثی

اختلاف ولتاژ نقطه میانی به صورت $\Delta v_{np} = vC1 - vC2$ تعریف می‌شود. در مدل خازن‌ها، مشتق ولتاژ هر خازن از جریان واردشونده یا خارج‌شونده همان خازن به دست می‌آید. برای استخراج رابطه دقیق باید توپولوژی رسانش هر وضعیت و جهت جریان فازها مشخص شود؛ یک فرم متداول ساده‌شده چنین است:

$$\Delta v_{np}(k+1) = \Delta v_{np}(k) + (Ts/C_{eq}) \cdot inp(s(k), iabc(k))$$

در اینجا علامت و مقدار جریان نقطه خنثی تابع قرارداد جهت جریان و مدل سخت‌افزار است؛ C_{eq} ضریب ظرفیت معادل مدل انتخابی است و نباید بدون استخراج مدار معادل مقدار ثابت فرض شود. برای پیاده‌سازی، جدول نگاشت جریان NP برای هر وضعیت باید از مدار رسانش سوئیچ‌ها تولید و سپس با تست پالس کوتاه تأیید شود.

۴-۴. توان اکتیو و راکتیو

با تعریف تبدیل کلارک توان‌ناوردا یا توان‌محور باید ضرایب توان به همان قرارداد هماهنگ باشند. در قرارداد دامنه‌ناوردا، روابط متداول زیر به کار می‌روند:

$$P = 3/2 \cdot (v\alpha i\alpha + v\beta i\beta) \quad ; \quad Q = 3/2 \cdot (v\beta i\alpha - v\alpha i\beta)$$

مرجع جریان را می‌توان از P^* و Q^* در چارچوب سنکرون یا از معکوس ماتریس روابط فوق محاسبه کرد. هنگامی که ولتاژ شبکه نامتعادل یا هارمونیک است، استخراج مؤلفه توالی مثبت اهمیت پیدا می‌کند؛ در غیر این صورت فرمان جریان ممکن است خود حاوی ریبیل ناخواسته شود.

۵. طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین

۱-۵. افق پیش‌بینی و جبران تأخیر

در نسخه پایه FCS-MPC افق یک‌گامی اتخاذ می‌شود: نمونه‌برداری در لحظه k ، پیش‌بینی برای $k+1$ و اعمال حالت بهینه در دوره بعد. با وجود تأخیر محاسبه و اعمال پالس، الگوریتمی که زمان‌بندی سخت‌افزار را نادیده بگیرد ممکن است حالت منتخب را یک نمونه دیر اعمال کند. پیشنهاد حاضر از پیش‌بینی جبرانی استفاده می‌کند: ابتدا حالت کنونی برای محاسبه $i(k+1)$ در نظر گرفته می‌شود؛ سپس هر نامزد برای $i(k+2)$ و $\Delta v_{np}(k+2)$ ارزیابی می‌شود.

این جبران زمانی معتبر است که زمان ADC، اجرای محاسبات و زمان به‌روزرسانی گیت مشخص و پایدار باشند. اندازه‌گیری بیشینه زمان اجرا در سخت‌افزار هدف باید جزء معیار پذیرش قرار گیرد؛ میانگین زمان اجرای مناسب به تنهایی برای جلوگیری از از دست رفتن مهلت بلادرنگ کافی نیست.

۲-۵. طراحی تابع هزینه بدون بعد

تابع هزینه از مجموع خطای ردیابی جریان، عدم تعادل نقطه خنثی، کوشش کلیدزنی و در صورت لزوم ولتاژ مد مشترک تشکیل می‌شود. برای جلوگیری از وابستگی وزن‌ها به یکا، هر مؤلفه با مقدار مرجع مهندسی نرمال می‌شود:

$$J(s) = w_i ||i^*(k+2) - \hat{i}(k+2|s)||^2 / I_{base}^2 + w_{np} \Delta v_{np}^2 / V_{np,base}^2 \\ + w_{sw} N_{trans}(s, s_{prev}) / N_{base} + w_{cmv} v_{cm}^2(s) / V_{cm,base}^2$$

وزن‌ها اعداد مثبت و قابل تنظیم‌اند؛ مقیاس I_{base} بهتر است به جریان نامی یا خطای پذیرفتنی جریان، و $V_{np,base}$ به آستانه مهندسی قابل قبول نقطه خنثی مرتبط باشد. N_{trans} تعداد جابه‌جایی سطح در سه فاز بین دو نمونه است و جایگزین دقیقی برای تلفات انرژی کلیدزنی نیست؛ برای برآورد واقعی اتلاف باید جدول E_{on}/E_{off} متناسب با جریان، دما و ولتاژ نیمه‌رسانا وارد شود.

۳-۵. قیود سخت و قواعد محافظتی

پیش از انتخاب کمینه هزینه، نامزدهایی که باعث نقض حد جریان پیش‌بینی‌شده، محدوده مجاز ولتاژ خازن، وضعیت گیت غیرمجاز یا محدودیت کلیدزنی می‌شوند کنار گذاشته می‌شوند. از منظر ایمنی، محدودیت‌های سخت جایگزین حفاظت مستقل اضافه‌جریان، اضافه‌ولتاژ و پایش خطای درایور نیستند؛ بخش ایمنی باید خارج از حلقه بهینه‌سازی نیز وجود داشته باشد.

اگر مجموعه نامزدها پس از اعمال قیود خالی شد، راهبرد بازیابی باید از پیش مشخص باشد: کاهش توان مرجع، اعمال وضعیت امن سازگار با توپولوژی یا توقف کنترل‌شده مطابق پروتکل حفاظتی. انتخاب کورکورانه نزدیک‌ترین نامزد نامعتبر از نظر صنعتی قابل دفاع نیست.

برای کاهش بار پردازش می‌توان دو مرحله انتخاب داشت: ابتدا بردارهای نزدیک به ولتاژ مرجع مطلوب و سپس حالت‌های افزونه مربوط به موازنه نقطه خنثی ارزیابی شوند. این کار به شرط حفظ پوشش مؤثر حالات و بررسی سناریوهای بحرانی توصیه می‌شود.

۴-۵. شبه‌کد پیاده‌سازی

گام ۱: نمونه‌برداری هم‌زمان از جریان‌های فاز، ولتاژ PCC و ولتاژ خازن‌ها؛ اعتبارسنجی مقادیر و کنترل صحت سنسورها.

گام ۲: تخمین زاویه و فرکانس شبکه؛ تولید مرجع جریان بر اساس توان قابل دسترس PV، محدودیت جریان و فرمان توان راکتیو.

گام ۳: پیش‌بینی حالت $k+1$ با وضعیت اعمال‌شده فعلی؛ آماده‌سازی فهرست ۲۷ حالت و حذف حالات غیرمجاز.

گام ۴: برای هر نامزد، پیش‌بینی جریان و اختلاف ولتاژ خازن‌ها در $k+2$ ؛ محاسبه تابع هزینه نرمال‌شده و بررسی قیود.

گام ۵: انتخاب کمینه هزینه با قاعده رفع تساوی قطعی؛ ذخیره حالت منتخب و شمارنده وضعیت‌های بررسی‌شده.

گام ۶: اعمال پالس پس از تضمین زمان مرده؛ ثبت شاخص‌های کنترلی؛ در صورت خطا ورود به ماشین حالت حفاظت.

۶. هماهنگی کنترل توان و MPPT در نیروگاه خورشیدی

مبدل DC-DC در ساختار دومرحله‌ای می‌تواند حلقه MPPT را از کنترل سریع جریان شبکه جدا کند. اما قانون بقا اقتضا می‌کند توان قابل تزریق در اینورتر با توان PV و تغییر انرژی ذخیره‌شده در خازن‌های لینک DC سازگار باشد. در تغییر ناگهانی تابش، اگر P^* از توان ورودی پایدار بیشتر شود، ولتاژ لینک DC افت می‌کند؛ بنابراین محدودکننده توان و تنظیم‌کننده آرام ولتاژ لینک باید در لایه بالادست تعبیه شوند.

مرجع جریان اکتیو از توان مورد نیاز و مؤلفه توالی مثبت ولتاژ شبکه استخراج می‌شود؛ مرجع راکتیو نیز با رعایت محدوده جریان کل مبدل تعیین می‌گردد. در اشباع جریان، اولویت P و Q باید با کد شبکه و سیاست بهره‌برداری منطبق باشد؛ این مقاله اولویت‌دهی را به عنوان متغیر سناریو تعریف می‌کند و نسخه واحدی را برای همه شبکه‌ها تجویز نمی‌کند.

در اتصال به شبکه ضعیف، تغییر زاویه PLL و نوسان ولتاژ PCC با دینامیک حلقه جریان برهم‌کنش دارد. بنابراین مطالعه پایداری تنها با ارزیابی مبدل در برابر منبع ولتاژ ایده‌آل کفایت نمی‌کند. شاخص نسبت اتصال کوتاه (SCR) و نسبت R/X شبکه در سناریوهای آزمون باید تغییر داده شوند.

در صورت به‌کارگیری سامانه ذخیره‌ساز یا پیکربندی تک‌مرحله‌ای، ساختار مرجع DC تغییر می‌کند؛ در این مقاله این موارد دامنه توسعه محسوب می‌شوند تا مقایسه کنترل‌کننده‌ها از نظر معماری سامانه منصفانه باقی بماند.

۷. پیاده‌سازی بلادرنگ و ملاحظات دیجیتال

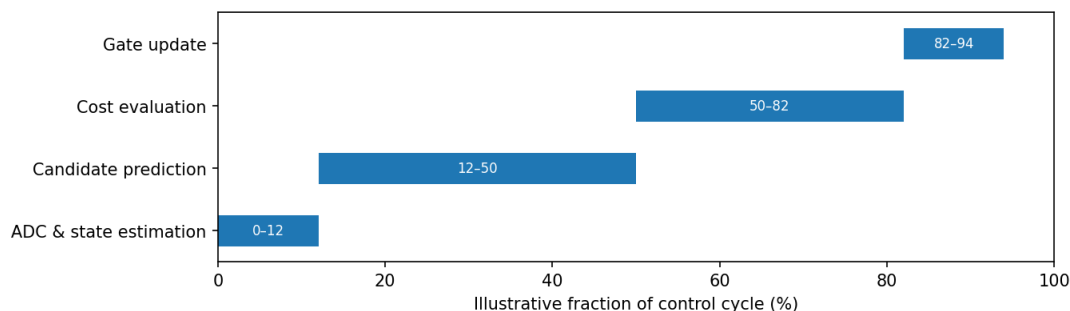
پیاده‌سازی روی DSP یا FPGA باید فرایند نمونه‌برداری، تبدیل مختصات، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و به‌روزرسانی گیت را به وظایف زمان‌مند تبدیل کند. در DSP استفاده از آرایه ثابت برای ۲۷ نامزد، حذف تخصیص پویا، پیش‌محاسبه ضرایب $a=1-RT_s/L$ و $b=Ts/L$ و استفاده از انواع داده مشخص توصیه می‌شود. در FPGA محاسبه موازی نامزدها می‌تواند تأخیر را کاهش دهد، ولی هزینه منابع منطقی و دقت عددی باید بررسی شود.

برای جلوگیری از خطای مقادیر نقطه ثابت، دامنه جریان، ولتاژ و تابع هزینه پیش از انتقال به سخت‌افزار باید تحلیل بازه‌ای شود. تعیین تعداد بیت مناسب نه صرفاً براساس حالت نامی، بلکه بر اساس پیک‌های ناشی از اتصال کوتاه، ناهمگنی سنسورها و اغتشاشات گذرا ضروری است.

زمان‌بندی تبدیل ADC و لچ PWM باید با مدار قدرت هماهنگ باشد. زمان مرده می‌تواند ولتاژ اعمال‌شده را به تابعی از علامت جریان تبدیل کند و در جریان‌های کم به خطای قابل مشاهده بینجامد. جبران زمان مرده، با توجه به دقت آشکارسازی جهت جریان، باید در مدل یا لایه فرمان لحاظ شود.

ماشین حالات نرم‌افزار دست‌کم شامل آغاز ایمن، پیش‌شارژ لینک DC، هم‌زمان‌سازی شبکه، افزایش تدریجی جریان، بهره‌برداری نامی، کاهش توان و خطا/توقف است. اجازه فعال‌سازی پالس تنها پس از احراز تمام شرط‌های بین‌قفل صادر می‌شود.

در سامانه صنعتی، ثبت رخداد های خطا با برچسب زمانی، مقادیر جریان/ولتاژ پیش از قطع و وضعیت کلیدزنی منتخب، برای تحلیل علت ریشه‌ای ضروری است. این ثبت اطلاعات باید سربار پیش‌بینی‌پذیری داشته باشد و به زمان‌بندی حلقه کنترل آسیب نرساند.



مرحله	ورودی	خروجی	ریسک اصلی
نمونه‌برداری	و کالیبراسیون ADC	حالت اندازه‌گیری شده	نویز و تأخیر
تخمین	و فیلترها PLL	زاویه / ولتاژ پایه	خطای فرکانس
پیش‌بینی	مدل و حالت‌ها	آینده Δv جریان و	عدم قطعیت مدل
بهینه‌سازی	هزینه و قیود	وضعیت منتخب	اضافه‌زمان محاسبه
اعمال گیت	interlock دستور و	پالس کلیدها	و خطا dead-time

۸. طراحی آزمون‌ها و معیارهای کمی ارزیابی

برای ارزیابی معتبر، سه کنترل‌کننده باید تحت مدل یکسان، ولتاژ شبکه یکسان و محدودیت‌های حرارتی و جریان یکسان مقایسه شوند: کنترل PI در dq همراه با FCS-MPC، PWM تک‌گامی پایه و FCS-MPC پیشنهادی دارای جبران تأخیر و تابع هزینه چندهدفه. تنظیم پارامتر هر روش باید با داده کالیبراسیون جدا از آزمون نهایی انجام شود تا نتایج دچار سوگیری ناشی از تنظیم انتخابی نشوند.

سناریوی حالت پایدار شامل چند نقطه بار از کم تا نامی و چند مقدار Q^* است. سناریوی گذرا شامل پله P^* ، پله Q^* ، افت تابش، تغییر ولتاژ شبکه و اعوجاج از پیش تعریف شده است. سناریوی عدم قطعیت با تغییر R ، L ، امپدانس شبکه و خطای اندازه‌گیری اجرا می‌شود. در نسخه دارای LCL، تغییر فرکانس رزونانس و کارایی میرایی فعال باید مستقل گزارش شود.

THD جریان باید با مشخص کردن بازه نمونه‌برداری، تعداد سیکل، مؤلفه بنیادی و پهنای باند هارمونیک محاسبه شود. مقایسه دو الگوریتم با پنجره FFT متفاوت قابل اعتماد نیست. همچنین عملکرد شبکه در PCC و جریان سمت مبدل نباید با یک عنوان کلی «THD خروجی» جایگزین شوند.

معیار خطای ردیابی RMS در بازه N نمونه برابر جذر میانگین مربع فاصله مرجع و جریان اندازه‌گیری شده است. برای نوسان نقطه خنثی، هم مقدار RMS و هم بیشینه قدرمطلق Δv_{np} گزارش می‌شود. تعداد انتقال سطح در هر بازو، برآورد تلفات بر اساس مشخصات نیمه‌رسانا و بیشینه زمان محاسبه نیز باید به صورت مجزا گزارش شوند.

برای آزمون تکرارپذیری، مشخصات نسخه نرم‌افزار، گام حلگر، مدل سنسور، روش هم‌زمان‌سازی، زمان مرده و الگوریتم مدیریت خطا ثبت می‌شود. در سخت‌افزار در حلقه HIL لازم است نرخ نمونه‌برداری مدل قدرت از نرخ کنترل تفکیک شود و تأخیر واقعی حلقه آزمایش شامل ارتباطات ورودی/خروجی اندازه‌گیری گردد.

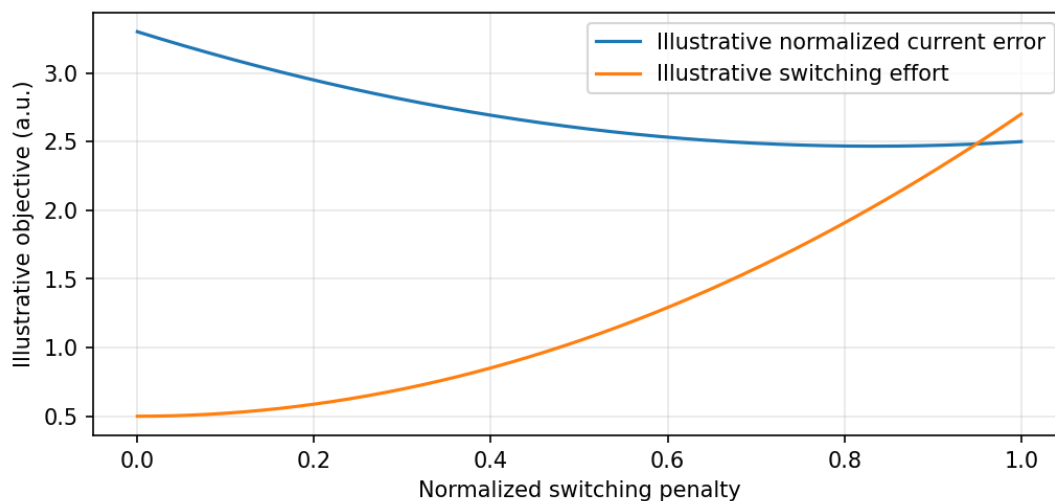
معیار گزارش	شاخص اصلی	تحریک	شناسه سناریو
میانگین و بیشینه	THD، Δv_{np}	توان ثابت در ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪	S۱
زمان نشست و فراجش	پاسخ گذرا	در محدوده مجاز P^* پله	S۲
خطای ماندگار	P/Q جداسازی	Q^* پله	S۳
افت و بازیابی ولتاژ	DC پایداری لینک	PV افت تابش	S۴
خطای ردیابی و حفاظت	استحکام	و امپدانس شبکه L تغییر	S۵
جریان قله و بازیابی	محدودسازی جریان	اختلال ولتاژ شبکه	S۶
بدترین زمان اجرای مشاهده‌شده	قابلیت بلادرنگ	اجرای روی پردازنده هدف	S۷

۹. راهبرد تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی وزن‌ها

وزن‌های تابع هزینه باید به جای حدس ثابت، در یک فرایند چندمرحله‌ای تعیین شوند. مرحله اول تعیین آستانه‌های ایمنی و مقیاس پایه است. مرحله دوم یافتن محدوده وزن‌های معقول با آزمایش طراحی فاکتوریل یا جست‌وجوی شبکه‌ای است. در مرحله سوم جبهه پارتو میان خطای جریان، نوسان نقطه خنثی و تلاش کلیدزنی ساخته می‌شود؛ انتخاب نهایی با توجه به محدودیت توان، هزینه حرارتی و مقررات کیفیت توان انجام می‌شود.

افزایش وزن جریمه کلیدزنی در حالت کلی می‌تواند تعداد تعویض‌ها را کاهش دهد، اما ممکن است خطای جریان را بیشتر کند؛ شکل ۳ صرفاً تصویر مفهومی چنین مصالحه‌ای است و نمودار نتایج شبیه‌سازی نیست. رابطه واقعی لزوماً یکنواخت یا درجه دوم نخواهد بود، زیرا حالت‌های نامزد گسسته‌اند و مرزهای بهینه به صورت پله‌ای جابه‌جا می‌شوند.

تحلیل حساسیت باید تعامل وزن‌ها را نیز بررسی کند. افزایش جریمه نقطه خنثی در جریان‌های بالا ممکن است بردارهای افزونه خاصی را ترجیح دهد که به نوبه خود الگوی کلیدزنی را تغییر دهند. در ولتاژ DC نامتعادل، مدل تقریبی حالت متعادل ممکن است به انتخاب بردار اشتباه منجر شود؛ بنابراین صحت مدل ولتاژ بازو بخش جدایی‌ناپذیر از مطالعه وزن‌هاست.



۱۰. تحلیل پایداری، استحکام و محدودیت‌ها

بر خلاف برخی کنترل‌کننده‌های خطی با تحلیل مشخصه حلقه بسته ساده، تضمین پایداری FCS-MPC نیازمند ملاحظات ویژه برای مجموعه ورودی گسسته، افق محدود و محدودیت‌های عملیاتی است. کمینه‌سازی یک تابع هزینه مرحله‌ای به تنهایی به معنای اثبات پایداری مجانبی نیست. برای ارائه ادعای رسمی پایداری باید شرایط کاهش تابع لیاپانوف، ناحیه نوردای امکان‌پذیر یا کران‌مندی نهایی با فرض‌های مشخص اثبات شود.

در مقاله حاضر ادعای اثبات عمومی پایداری مطرح نمی‌شود. به جای آن، مسیر تحلیل پیشنهادی شامل تعریف خطای حالت نسبت به مسیر تناوبی، بررسی کران عدم قطعیت مدل، تعیین کران ناحیه مجاز ولتاژ/جریان و ارزیابی تجربی بدترین سناریو است. در پژوهش تکمیلی می‌توان قید پایانی و تابع ارزش پایانی یا روش کنترل پیش‌بین اقتصادی با تضمین کران‌مندی را بررسی کرد.

خطای پارامتر L در رابطه پیش‌بینی به طور مستقیم بر جمله Ts/L مؤثر است؛ بنابراین یک مقدار تخمینی ثابت برای شبکه با امپدانس متغیر ممکن است خطا را تشدید کند. شناسایی آنالین پارامترها یا ناظر اغتشاش می‌تواند دقت پیش‌بینی را بهتر کند، اما افزودن هر ناظر نیاز به تحلیل پایداری و تأخیر محاسباتی مستقل دارد.

در حضور نامتعادلی سه‌فاز، فرمان جریان سینوسی متعادل لزوماً جریان و توان لحظه‌ای بدون ریبیل فراهم نمی‌کند. راهبرد کنترل توالی منفی باید به هدف شبکه و تحمل حرارتی مبدل وابسته باشد. همچنین مهار ولتاژ مد مشترک در سامانه بدون ترانسفورماتور نیازمند مدل ظرفیت پارازیتی آرایه PV و مسیر نشی است و صرف بهینه‌سازی ولتاژ متوسط سه بازو برای تضمین جریان نشی کافی نیست.

محدودیت اصلی روش پیشنهادی آن است که بدون شبیه‌سازی اختصاصی یا آزمایش HIL نمی‌توان میزان کاهش THD، تلفات و زمان پاسخ را عددگذاری کرد. همچنین کارایی طراحی با فیلتر L به صورت خودکار به فیلتر LCL تعمیم نمی‌یابد. این مرزبندی برای جلوگیری از نسبت دادن نتایج ادبیات به نمونه طراحی شده ضروری است.

۱۱. بحث و مقایسه روش‌شناختی

مزیت نظری FCS-MPC در مسئله حاضر، امکان انتخاب مستقیم وضعیت نیمه‌رسانا بر اساس اهداف رقابتی است. در کنترل PI-PWM، هر حلقه غالباً به صورت جداگانه تنظیم می‌شود و قیود حالت کلیدزنی در مدولاتور اعمال می‌شوند؛ در MPC تصمیم‌گیری مشترک است، اما با افزایش تعداد اهداف، تنظیم وزن‌ها و تفسیر رفتار دشوارتر می‌شود.

چندبرداری کردن خروجی MPC و اختصاص زمان ماند به بردارها، طیف هارمونیک را منظم‌تر می‌کند، ولی ساختار اجرا را از الگوریتم تک‌برداری ساده دور می‌سازد. مطالعه منتشرشده در ۲۰۲۶ درباره NPC چندبرداری نشان می‌دهد این مسیر برای تعادل نقطه خنثی و کاهش اعوجاج قابل بررسی است [۶]؛ با این وجود انتخاب بین مدل تک‌برداری و چندبرداری باید براساس سخت‌افزار موجود و نتایج مقایسه هم‌شرط صورت گیرد.

با توجه به امکان افزایش حجم محاسبات، کاهش نامزدها و پیش‌محاسبه ضرایب توصیه می‌شود؛ اما حذف وضعیت‌های افزونه به منظور سرعت، می‌تواند امکان موازنه خازن‌ها را کاهش دهد. راه‌حل عملی، حفظ حالات افزونه مرتبط با علامت جریان NP و حذف مشروط بردارهای دور از مرجع است.

یکی از تفاوت‌های مهم طراحی مقاله حاضر با رویکردهای صرفاً مبتنی بر نمودار شبیه‌سازی، جداسازی سه سطح ادعاست: رابطه‌های ریاضی و منطق کنترل به عنوان مشتقات نظری؛ داده‌های منتشرشده دیگران به عنوان شواهد خارجی؛ و نتایج اختصاصی سامانه پیشنهادی که تنها بعد از اجرای آزمون مجاز به گزارش‌اند. این تفکیک شفافیت و امکان داوری علمی را افزایش می‌دهد.

ویژگی	PI-PWM	پایه FCS-MPC	پیشنهادی FCS-MPC
وضعیت مستقیم + قیود	وضعیت کلید مستقیم	وضعیت کلید مستقیم	وضعیت مستقیم + قیود
پیش‌بینی دوگامی	اغلب ساده	اغلب ساده	پیش‌بینی دوگامی
هزینه نرمال و قید	وزن در هزینه	وزن در هزینه	هزینه نرمال و قید
نامزدهای غربال‌شده	ارزیابی نامزدها	ارزیابی نامزدها	نامزدهای غربال‌شده
متغیر، قابل جریمه	متغیر	متغیر	متغیر، قابل جریمه
طرح نیازمند اعتبارسنجی	معیار مقایسه	معیار مقایسه	طرح نیازمند اعتبارسنجی
فرکانس کلیدزنی	نسبتاً ثابت	نسبتاً ثابت	فرکانس کلیدزنی
وضعیت این مقاله	معیار مقایسه	معیار مقایسه	وضعیت این مقاله

۱۲. چارچوب اعتبارسنجی قابل باز تولید

برای تبدیل این طراحی به یک مقاله تجربی، نخست مدل سوئیچینگ کامل NPC همراه با دیودها، مقاومت حالت روشن، زمان مرده، مدار DC و مشخصات سنسور ساخته می‌شود. سپس صحت مدل متوسط و مدل پیش‌بین با نمونه‌های گسسته در چند وضعیت کلیدزنی بررسی می‌شود. اختلاف دو مدل باید در شکل خطای پیش‌بینی یک‌گامی و دوگامی گزارش شود.

پس از تایید مدل پایه، از یک مجموعه داده سناریوی تنظیم وزن‌ها و از مجموعه دیگری برای آزمون نهایی استفاده می‌شود. همه کنترل‌کننده‌ها باید به محدودیت‌های جریان و ولتاژ مشترک پایبند باشند. اگر یک روش برای جلوگیری از نقض حفاظت توان را کاهش دهد، این رویداد باید همراه مقدار انرژی تزریق‌نشده گزارش شود.

در HIL، تأخیر ورودی/خروجی و jitter پردازنده کنترل به صورت مستقل اندازه‌گیری می‌شوند. برای آزمایش نمونه قدرت واقعی، توالی ایمن از باس DC کاهش‌یافته تا توان نامی، بررسی دمای نیمه‌رساناها و آزمون عملکرد حفاظت الزامی است. شاخص‌های عملکرد باید همراه تعداد تکرارها و دامنه تغییرات گزارش شوند.

در ارائه نتایج نهایی توصیه می‌شود جداول هر سناریو دارای میانگین، انحراف معیار یا بازه تغییرات و تعداد تکرار باشند. نمودارهای جریان، ولتاژ نقطه خنثی، طیف هارمونیک و زمان اجرا باید از داده خام قابل دسترسی تولید شوند. ثبت بذر تصادفی برای آزمون‌های اغتشاش و نسخه مدل شبیه‌سازی بازتولیدپذیری را افزایش می‌دهد.

۱۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش نظام‌مند برای طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل در اینورتر NPC سه‌سطحی نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه تدوین شد. سهم روش‌شناختی آن ترکیب مدل جریان و اختلاف ولتاژ لینک DC، جبران تأخیر دوگامی، تابع هزینه بدون‌بعد، محدودیت‌های حفاظتی و معماری اجرای بلادرنگ در یک زنجیره واحد است.

بررسی ادبیات ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۶ نشان می‌دهد که کنترل چندهدفه و کاستن از پیچیدگی محاسبات همچنان موضوعاتی فعال هستند. با وجود مزیت نظری روش پیشنهادی، برتری عددی آن نسبت به PI-PWM و FCS-MPC پایه در این مقاله اثبات نشده است؛ زیرا آزمایش یا شبیه‌سازی اختصاصی اجرا نشده است. گام پژوهشی بعدی پیاده‌سازی مدل سوئیچینگ، سنجش خطای پیش‌بینی، تنظیم وزن‌ها با معیار پارتو و سپس آزمون HIL و نمونه واقعی است.

به عنوان توصیه کاربردی، انتخاب نهایی کنترل‌کننده باید نه فقط بر پایه حداقل THD، بلکه با توجه هم‌زمان به تلفات کلیدزنی، عدم تعادل خازن‌ها، پاسخ در شبکه ضعیف، الزامات حفاظتی و بدترین زمان اجرای روی پردازنده هدف انجام شود.

منابع

- [۱] Mirza, S., & Hussain, A. (۲۰۲۴). New Approaches in Finite Control Set Model Predictive Control for Grid-Connected Photovoltaic Inverters: State of the Art. *Solar*, ۴(۳), ۴۹۱-۵۰۸. <https://doi.org/10.3390/solar4030023>
- [۲] A Review of Model Predictive Control for Grid-Connected PV Applications. (۲۰۲۵). *Electronics*, ۱۴(۴), ۶۶۷. <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/667>
- [۳] Bebboukha, A., et al. (۲۰۲۴). Finite control set model predictive current control for three phase grid connected inverter with common mode voltage suppression. *Scientific Reports*, ۱۴, ۱۹۸۳۲. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71051-9>
- [۴] Xu, K., Liu, C., Lin, Z., & Hong, F. (۲۰۲۵). Event-triggered model predictive control for NPC three-level LCL-type grid-connected inverters. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, ۴۴(۵), ۲۳-۳۳. <https://doi.org/10.12067/ATEEE2310061>
- [۵] Finite-control-set economic model predictive control for a DC/AC inverter. (۲۰۲۵). *Control Engineering Practice*, ۱۶۳, ۱۰۶۳۸۵. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106385>
- [۶] Li, X., Ren, Z., & Mao, Y. (۲۰۲۶). Optimized composite control of three-level NPC grid-connected inverters based on nearest three-vector model predictive strategy. *Control Engineering Practice*, ۱۷۷, ۱۰۷۱۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.107186>
- [۷] El Khelifi, Y., El Magri, A., Lajouad, R., Bouattane, O., & Giri, F. (۲۰۲۴). Output-feedback control of a grid-connected photovoltaic system based on a multilevel flying-capacitor inverter with power smoothing capability. *ISA Transactions*, ۱۴۷, ۳۶۰-۳۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.02.007>

[۸] Advancements in Multilevel Inverters for Efficient Harnessing of Renewable Energy: A Comprehensive Review and Application Analysis. (۲۰۲۴). IEEE Access, ۱۲, ۱۵۶۹۳۹-۱۵۶۹۶۴. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3477501>

[۹] Adaptive PWM Control and Dynamic Switching Frequency for Leakage Current Suppression and THD Control in ۳-Level NPC Inverters. (۲۰۲۵). Journal of Energy: Energija, ۷۴(۴). <https://doi.org/10.37798/2025.44721>

[۱۰] A Control Strategy of a Three-Level NPC Inverter with PV Array Reconfiguration for THD Reduction and Enhancement of Output Power of the System Under Partial Shading Conditions. (۲۰۲۶). Applied Sciences, ۱۶(۵), ۲۴۳۷. <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/5/2437>