Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity P.P 39-56

Vol. 12/ No. 2/ Summer 2023 ISSN 2322-2344 EISSN 2717-1639

Power Conditioner Design and Control for LCL-based Grid-Connected Photovoltaic System via LCL Filter Based on Inverter and Grid-Side Currents Feedback

Majid Hosseinpour[1*], Associate Professor, Tooraj Sabetfar[2], Ph.D. Student

1- Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
Hoseinpour.majid@uma.ac.ir
2- Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
t.sabetfar@uma.ac.ir

Abstract:
Nowadays, due to global warming and the depletion of fossil fuel sources, it is necessary to utilize clean and sustainable energy resources. Distributed power generation based on renewable energies such as solar energy, wind energy, and fuel cells is an effective solution to achieve sustainable and environmentally friendly energies. Due to low cost and mass production, Photovoltaic (PV) cells have been attended in recent decades. Solar energy, as an unlimited, clean, and cost-effective source of energy, can be converted into electrical energy using photovoltaic arrays. This paper presents a design, control, and stability analysis of an inverter-based power conditioner, which is connected to a low-voltage grid with an LCL filter, to manage the power injection of the PV system. Since the voltage generated by PV arrays is lower than the grid voltage, a DC-DC converter is used to increase the PV output voltage. The LCL filter is employed to improve the injected current quality and to reduce interface inverter output voltage distortions. This filter may cause resonance and system instability. A current double feedback control method, which uses inverter-side and grid-side currents as feedback currents, is proposed to damp the resonance and improve harmonic eliminations. A DC-DC boost converter is employed to increase voltage amplitude and MPPT. The double currents feedback strategy is based on the inverter-side current and the grid-side current feedback to damp the resonance, improve the harmonic attenuation capability, and enhance the stability capability. The Converter-side Current Feedback (CCF) damps the resonance and improves the inverter-side current quality. The Grid-side Current Feedback (GCF) maintains the system stability against grid impedance changes. A systematic design procedure is presented for the proposed control scheme parameters. Resonance damping, marginal stability, and grid-connected characteristics are considered during the design to ensure the grid-connected system stability. The systematic design procedure of the proposed control strategy parameters is presented considering resonance damping, stability margin, and grid-connected features to ensure the system stability in a non-ideal and weak grid. The parameters of the current regulator of the suggested control system were determined based on the “Routh Hurwitz” criteria. Compared to the conventional capacitor current feedback active damping method, the suggested method provides more stability margin and lower inverter-side and grid-side current THD. The stability analysis of the suggested control method for significant changes in grid inductance, as well as the sensitivity analysis of the studied system for changes in LCL parameters, indicates the appropriate stability. The proposed power conditioner system is simulated in MATLAB/Simulink to verify the model’s performance and the proposed control method. The simulation results show good performance of the proposed system in managing PV power flow into the grid, high quality of the injected current, and system stability against the grid impedance change disturbances.

Keywords: LCL Filter, Power Conditioning System, PV Array, Sensitivity Analysis, Stability Analysis

Submit date: 2022/05/27
Accepted date: 2023/06/07

Corresponding author’s name: Majid Hosseinpour
Corresponding author’s address: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Daneshgah Ave., Ardabil, Iran

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۵۶-۳۹

Vol. 13 / No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

سیستم بهساز توان فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL مبتنی بر استراتژی کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه

نوع مطالعه: پژوهشی

مجید حسین‌پور، دانشیار، تورج ثابت‌فر، دانشجوی دکتری
گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Hoseinpour.majid@uma.ac.ir

چکیده: انرژی خورشید به عنوان یک منبع انرژی نامحدود، پاک و مقرون به صرفه، با استفاده از سلول‌های فتوولتائیک به انرژی الکتریکی قابل تبدیل است. در این مقاله یک سیستم بهساز توان فتوولتائیک متصل به شبکه با فیلتر LCL، با قابلیت تزریق جریان با کیفیت و توانایی پایداری بالا در مقابل اغتشاشات ارایه شده است. با توجه به اینکه ولتاژ خروجی سلول‌های فتوولتائیک پایین‌تر از ولتاژ شبکه است، لذا از مبدل DC-DC استفاده شده است و جهت تبدیل ولتاژ DC به ولتاژ AC مورد نیاز شبکه از اینورتر با فیلتر LCL استفاده شده است. به منظور اطمینان از حذف تشدید و ناپایداری ناشی از استفاده از فیلتر LCL، از استراتژی کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه استفاده شده است. حاشیه پایداری در کنترل مرسوم شامل فیدبک جریان خازن و جریان سمت شبکه در شبکه ضعیف مقداری پایین است و نیازمندی‌های سیستم را تامین نمی‌کند. در روش کنترل پیشنهادی برای بررسی قابلیت پایداری سیستم و تامین نیازمندی‌های سیستم، تأخیر زمانی نیز در طراحی لحاظ شده است و پایداری سیستم در شبکه ضعیف و در حضور اندوکتانس شبکه قابل توجه ارزیابی شده است. در مقایسه با استراتژی‌های مرسوم (فیدبک جریان خازن و جریان سمت شبکه)، سیستم بهساز توان فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL تحت استراتژی پیشنهادی به یک میرایی تشدید مناسب دست می‌یابد و حاشیه پایداری بزرگ‌تر و مشخصات بهتر متصل به شبکه تحت شبکه ضعیف را تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی سیستم بهساز توان فتوولتاییک پیشنهادی بیانگر عملکرد دقیق سیستم کنترلی، ردگیری مناسب حداکثر توان آرایه فتوولتاییک و تزریق جریان با کیفیت بسیار مناسب به شبکه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آرایه فتوولتاییک، تحلیل پایداری، تحلیل حساسیت، سیستم بهساز توان، فیلتر LCL

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر مجید حسین‌پور

نشانی نویسنده‌ی مسئول : اردبیل- خیابان دانشگاه- دانشگاه محقق اردبیلی- دانشکده فنی و مهندسی- گروه قدرت

۱- مقدمه

با توجه به گرمایش زمین و رو به کاهش بودن انرژی‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی پاک و پایدار ضروری است. بنابراین سیستم تولید توان توزیع شده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، توربین بادی، پیل‌های سوختی و انرژی زیست توده یک روش موثر برای دستیابی به انرژی پایدار و دوستدار محیط زیست است. سلول‌های فتوولتائیک (PV) بعلت پتانسیل بالا، قیمت پایین و تولید انبوه در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در سیستم‌های تولید پراکنده غالبا سطح ولتاژ تولیدی پایین بوده و وابسته به شرایط محیطی می‌باشد. لذا استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای سیستم‌های تولید پراکنده اجتناب‌ناپذیر است (Hou et al, 2021). برای تبدیل توان از سلول‌های فتوولتائیک به توان مورد نیاز شبکه یا بار، استفاده از اینورتر منبع ولتاژ یا اینورتر منبع جریان بعلت پایین بودن ولتاژ تولیدی کافی نیست. بنابراین مبدل DC/DC بین PV و اینورتر جهت افزایش ولتاژ استفاده می شود (Banaei & Bonab, 2017). دریافت حداکثر توان از سیستم‌های فتوولتائیک امری مهم در افزایش راندمان آنهاست. با توجه به اینکه مشخصه خروجی سلول‌های خورشیدی تحت تغییرات تابش و دما است، لذا این سیستم‌ها به ندرت در نقطه ماکزیمم توان کار می‌کنند. بنابراین ردیابی حداکثر توان (MPPT) در افزایش راندمان این سیستم‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند (Bhattacharyya, et al, 2020).

رشد استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت واسط منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع، هارمونیک‌هایی در ولتاژ و جریان تزریقی به شبکه بوجود می‌آورد که منجر به مشکلات کیفیت توان در سیستم توزیع می شود (Kumar, A. N,et al, 2021). از فیلترهای سلفی (L)، سلفی-خازنی (LC) و سلفی-خازنی- سلفی (LCL) جهت کاهش هارمونیک‌ها استفاده می شود. فیلتر نوع L در فرکانس کلیدزنی بالا تضعیف هارمونیک بهتری دارد و در سیستم‌هایی که فرکانس کلیدزنی پایین است فیلتر L معمولی با فیلتر LCL جایگزین می شود تا هارمونیک جریان شبکه را در اطراف فرکانس کلیدزنی کاهش دهد (Liu et al, 2018; Rasekh et al, 2021; Aalizadeh et al, 2021). فیلتر L دارای اندازه سلف بزرگ بوده و درنتیجه تلفات آن بیشتر است. در حالیکه فیلتر LCL نسبت به فیلتر L اندوکتانس کل کمتری دارد و عملکرد آن در حذف هارمونیک‌ها مناسب‌تر بوده همچنین چگالی توان بالاتری دارد (He, et al 2020 ; Ma et al, 2020). در مقابل مزایای فیلتر LCL، استفاده از این فیلتر در خروجی مبدل‌ها منجر به بروز تشدید و ناپایداری در سیستم می شود. لذا بهره‌گیری از روش‌های مختلف میرایی برای اطمینان از پایداری سیستم اجتناب ناپذیر است (Rasekh and Hosseinpour, 2020a; Rasekh and Hosseinpour, 2020b).

دو روش برای میرایی تشدید فیلتر LCL شامل روش میرایی فعال و روش میرایی غیر فعال وجود دارد. روش میرایی فعال بعلت عدم وجود تلفات اضافی، نسبت به روش غیرفعال برتری دارد. در مقابل برتری مذکور، این روش میرایی به سنسورهای ولتاژ و جریان و همچنین روش کنترلی پیچیده نیاز دارد. روش‌های متنوعی برای میرایی فعال تشدید فیلتر LCL متصل به شبکه معرفی شده که روش‌های مبتنی بر بازخورد جریان یا ولتاژ خازن علایق تحقیقاتی بیشتری را به خود جلب کرده است. میرایی فعال با فیدبک جریان خازن با لحاظ تاخیر محاسباتی و تاخیر مدولاسیون پهنای پالس، معادل یک امپدانس مجازی موازی با خازن فیلتر LCL می‌باشد که فرکانس تشدید فیلتر LCL با این امپدانس مجازی تغییر می‌یابد

پایداری سیستم متصل به شبکه با فیلتر LCL به فرکانس تشدید (f_r) و فرکانس نمونه‌برداری (f_s) بستگی دارد (Fang, T., & Huang, 2021). پایداری سیستم در شبکه ضعیف به یک ششم فرکانس نمونه برداری محدود می شود. به این ترتیب، به ازای $f_r < f_s / 6$ فیدبک جریان سلف سمت اینورتر پایداری سیستم را تثبیت می‌کند در حالی که فیدبک جریان سلف سمت شبکه نمی‌تواند سیستم را پایدار نماید (Zhao, et al, 2022) و به ازای $f_r > f_s / 6$ فیدبک جریان سلف سمت شبکه پایداری سیستم را تثبیت می‌کند (Chen et al, 2019; Zhang et al, 20202).

اگر فرکانس تشدید واقعی از یک ششم فرکانس نمونه‌برداری بزرگ‌تر باشد، امپدانس مجازی مولفه‌ی مقاومتی منفی خواهد داشت، در نتیجه یک جفت قطب ناپایدار در تابع تبدیل حلقه باز ایجاد شده و رفتار سیستم غیرمینیمم فاز می‌شود (Xie et al, 2019; Pan et al. 2014). علاوه بر این اگر پیک تشدید میرا نشود، پهنای باند محدود شده و دینامیک سیستم کند می شود. با توجه به تغییرات امپدانس شبکه، فرکانس تشدید فیلتر LCL در یک محدوده گسترده تغییر خواهد کرد. علاوه بر این، اگر فرکانس تشدید دقیقا برابر با یک ششم فرکانس نمونه‌برداری باشد، اینورتر متصل به شبکه با کنترل دیجیتال به سختی می‌تواند پایدار بماند (Li, et al 2021, Ding et al, 2022).

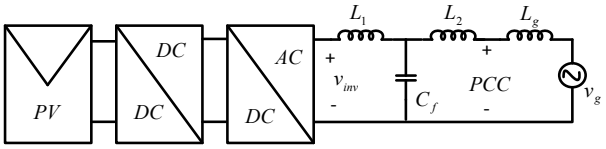
در این مقاله جهت تزریق توان تولیدی PV به شبکه توزیع، از یک مبدل بوست به منظور افزایش سطح ولتاژ تولیدی PV و همچنین اعمال MPPT استفاده شده و جهت اتصال اینورتر به شبکه از فیلتر LCL بهره گرفته شده است. به منظور کنترل اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه، استراتژی کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه جهت میرایی تشدید و بهبود هارمونیک‌ها ارائه شده است. در اینورتر فتولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL فیدبک جریان سمت اینورتر، تشدید را مهار می‌کند و کیفیت جریان سمت اینورتر را بهبود می‌دهد. فیدبک جریان سمت شبکه پایداری اینورتر را در مقابل تغییرات امپدانس شبکه حفظ می‌نماید. روند طراحی سیستماتیک پارامترهای استراتژی پیشنهادی، با توجه به میرایی تشدید، حاشیه

پایداری و ویژگی متصل به شبکه برای اطمینان از پایداری سیستم در شبکه ارایه شده است.

بقیه این مقاله به شرح زیر است. بخش دوم، در زمینه سلول‌های خورشیدی و ردگیری حداکثر توان است. در بخش سوم، استراتژی کنترل فیدبک سمت اینورتر و بازخورد جریان متصل به شبکه و مدل ریاضی آن با لحاظ تاخیرهای زمانی (ZOH) ارائه شده است. در بخش چهارم، روند طراحی سیستماتیک پارامترهای سیستم کنترل پیشنهادی و طراحی پارامترهای تنظیم‌کننده جریان ارائه می شود. در بخش پنجم، یک مطالعه موردی تحت استراتژی پیشنهادی و مقایسه با سایر استراتژی‌ها بررسی می‌شود. در بخش ششم، شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی با ارایه سناریوهای مختلف ارایه شده است.

۲- سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

ساختار اتصال دو مرحله‌ای سلول فتوولتائیک متصل به شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. ولتاژ تولیدی سلول فتوولتائیک بعلت وابستگی به شرایط محیط، متغیر و همچنین پایین‌تر از نیاز شبکه است. بنابراین جهت تثبیت ولتاژ و همچنین افزایش دامنه ولتاژ تولیدی از مبدل DC/DC افزاینده استفاده شده است و مبدل DC/DC با بکارگیری الگوریتم ردیابی ماکزیمم توان یا همان MPPT توان بیشینه را از منبع ورودی دریافت می‌کند. سپس این توان را در خروجی خود به مبدل DC/AC تحویل می‌دهد. به منظور کاهش هارمونیک ولتاژ و جریان تزریقی به شبکه، در خروجی اینورتر از فیلتر LCL استفاده شده است. فیلتر LCL دارای امپدانس صفر در فرکانس تشدید است که سبب ناپایداری اینورتر می شود که جهت پایداری اینورتر، بایستی تشدید ناشی از فیلتر LCL میرا گردد.



شکل (۱): شمای کلی سلول فتوولتائیک متصل به شبکه با فیلتر LCL

۲-۱- الگوریتم ردیابی توان ماکزیمم MPPT

جهت دستیابی به بازده بالا در سلول‌های فتوولتائیک، مطلوب است که سلول فتوولتاییک در بیشترین مقدار توان ممکن بهره‌برداری شوند. برای دریافت بیشترین مقدار توان، استفاده از یک دنبال کننده توان بیشینه که بتواند در شرایط مختلف محیطی، سلول فتوولتائیک را در بیشترین نقطه توان قرار دهد ضروری است. روش‌های مختلفی برای (MPPT) وجود دارد اما روش هدایت افزایشی (INC) از دقت عملکردی دینامیکی مناسبی در حین تغییرات دما و تابش برخوردار است (Jordehi, 2016). اساس این روش بر این امر استوار است که در نقطه ماکزیمم، توان شیب نمودار P-V برابر صفر است و قبل از نقطه ماکزیمم شیب منحنی مثبت و بعد از آن شیب منحنی منفی می شود. در واقع الگوریتم کنترلی MPPT با محاسبه تغییرات توان و ولتاژ در هر لحظه مقدار شیب را محاسبه می‌کند. اگر شیب منحنی P-V مثبت باشد، نقطه کار در سمت چپ نقطه توان بیشینه قرار دارد و باید ولتاژ آرایه فتولتاییک جهت جذب بیشترین توان افزایش یابد. اگر شیب منحنی P-V منفی باشد نقطه کار در سمت راست نقطه توان بیشینه قرار دارد و باید ولتاژ آرایه فتولتاییک جهت جذب بیشترین توان کاهش یابد که این کار از طریق اعمال سیگنال کنترلی مدولاسیون پهنای پالس (PWM) به سوییچ مبدل DC/DC صورت می‌گیرد.

۳- مدل و آنالیز اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه

۳-۱- شرح سیستم

به منظور تزریق جریان با کیفیت مناسب و بهبود پایداری سیستم اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL، استراتژی کنترل فیدبک جریان سلف سمت اینورتر و جریان سلف سمت شبکه پیشنهاد شده است. شمای کلی پیکربندی اینورتر فتولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL به همراه شمای کلی ساختار کنترلی پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. L_1 سلف سمت اینورتر، C_f خازن فیلتر و L_2 سلف سمت شبکه فیلتر LCL را تشکیل می‌دهند. جریان‌های i_1، i_C و i_2 به ترتیب جریان سمت اینورتر، جریان خازن و جریان سمت شبکه است. ولتاژهای v_{inv}، v_g و v_{PCC} به ترتیب ولتاژ سمت اینورتر، ولتاژ شبکه و ولتاژ نقطه اتصال مشترک است. به طور کلی، امپدانس شبکه در نقطه اتصال مشترک (PCC) از یک اندوکتانس و مقاومت تشکیل شده است. بدترین حالت از حیث پایداری، اندوکتانس خالص است و لذا امپدانس شبکه به صورت سلف خالص در نظر گرفته می شود. روند کنترل بصورت زیر است که ولتاژ لینک DC و ولتاژ مرجع از هم تفریق شده و خطای آن به تنظیم کننده ولتاژ G_v داده شده و در خروجی آن جریان مرجع تولید می شود. با استفاده از حلقه قفل فاز (PLL) جریان مرجع و ولتاژ شبکه سنکرون می‌شوند. سیگنال حاصل از جریان مرجع و خروجی PLL با جریان عبوری از سلف L_2 توسط جمع کننده جریان مقایسه شده و خطای آن به تنظیم کننده جریان G_i داده می شود. استراتژی کنترل پیشنهادی بر اساس فیدبک جریان سلف سمت اینورتر و فیدبک جریان سلف سمت شبکه است. از کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس (SPWM) تک قطبی برای اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه استفاده شده است. بنابراین فرکانس موثر هارمونیک‌ها در دو برابر فرکانس کلیدزنی $2f_s$ ظاهر می‌شود.

۳-۲- کنترل اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL

ساختار کنترل پیشنهادی برای اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور تثبیت ولتاژ

لینک DC و ایجاد تعادل در توان تولیدی سیستم فتوولتاییک با توان تزریقی به شبکه، تنظیم کننده ولتاژ G_v مطابق معادله (۱) استفاده شده است. عملکرد صحیح این تنظیم کننده، تثبیت ولتاژ لینک DC را تضمین می‌کند.

$$G_v = K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s} \qquad (۱)$$

در طرح کنترل اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL، تابع تبدیل پل اینورتر توسط K_{PWM} نمایش داده شده که برابر با $K_{PWM} = v_{in} / v_{tri}$ است. v_{tri} دامنه سیگنال حامل مثلثی و v_{in} ولتاژ ورودی اینورتر یا همان ولتاژ لینک DC است. روش کنترل پیشنهادی دارای دو حلقه کنترلی بوده و مبتنی بر فیدبک جریان سمت اینورتر و همچنین فیدبک جریان سمت شبکه می‌باشد. حلقه بیرونی حلقه کنترل جریان سمت شبکه است که از فیدبک جریان سمت شبکه استفاده می‌کند. حلقه داخلی حلقه کنترل ولتاژ اینورتر است که از فیدبک جریان سلف سمت اینورتر همراه با ضریب ثابت K به عنوان یک امپدانس مجازی برای جریان سمت اینورتر استفاده می‌کند. در حلقه بیرونی به منظور تنظیم جریان سمت شبکه از تنظیم‌کننده جریان G_i استفاده شده که مطابق زیر یک کنترل‌کننده PI می‌باشد.

$$G_i = K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \qquad (۲)$$

مطابق شکل (۲) تابع تبدیل فیلتر LCL از نسبت جریان سمت شبکه(i_2) به ولتاژ اینورتر(v_{inv}) بصورت زیر است:

$$G_{LCL} = \frac{i_2}{v_{inv}} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \qquad (۳)$$

و فرکانس تشدید فیلتر LCL بصورت زیر بیان می‌شود:

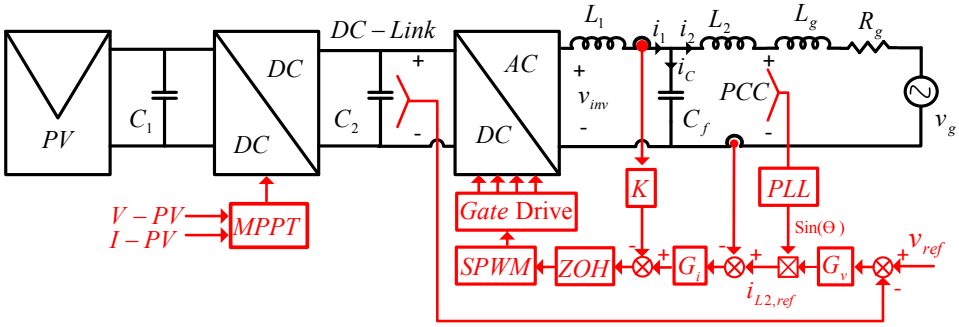
$$f_{LCL} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \qquad (۴)$$

در کنترل دیجیتال، تاخیر محاسباتی و تاخیر مدولاسیون پهنای پالس (PWM) وجود دارد. تاخیر محاسباتی مرتبط با مدت زمان لحظه‌ای نمونه‌برداری و لحظه به‌روزرسانی مرجع PWM است که برای نمونه‌برداری و محاسبه استفاده می شود. تاخیر PWM ناشی از نگه دارنده‌ی مرتبه‌ی صفر (ZOH) ایجاد می شود. نگه دارنده‌ی مرتبه‌ی صفر، مرجع PWM را بعد از هر به‌روزرسانی ثابت نگه می‌دارد. این تاخیر بصورت زیر تعریف می‌شود (Guan et al, 2019):

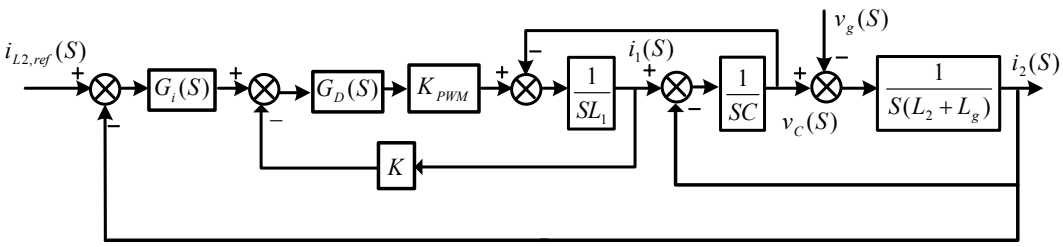
$$G_D(s) = \frac{1}{T_S} e^{-\lambda s T_S} . \frac{1 - e^{-sT_S}}{s} \approx e^{-1.5 s T_S} ; (0 \le \lambda \le 1) \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، e^{-STs} تأخیر زمانی یک دوره نمونه‌برداری، $1/T_S$ دوره نمونه‌برداری و $(1-e^{-STs})/S$ نگه دارنده‌ی مرتبه‌ی صفر (ZOH) است. نمودار استراتژی کنترل اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL تحت استراتژی کنترل جریان سمت اینورتر و سمت شبکه بر مبنای میرایی فعال و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی در شکل (۳) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۳)، خروجی سیستم کنترلی، جریان تزریقی به شبکه (i_2) است و ورودی‌های این سیستم شامل جریان مرجع تزریقی به شبکه ($i_{L2,ref}$) و ولتاژ شبکه (v_g) می‌باشد. با استفاده از قاعده میسون می‌توان تابع تبدیل حلقه باز این سیستم ($i_{2\text{-}ol}$) را در حضور تنظیم‌کننده جریان سمت شبکه G_i و تاخیر زمانی G_D مطابق با رابطه (۶) محاسبه نمود. مطابق رابطه (۶) علاوه بر جریان مرجع، ولتاژ شبکه (v_g) نیز در کیفیت جریان شبکه ($i_{2\text{-}ol}$) نقش دارد و اگر کیفیت ولتاژ شبکه پایین باشد، جریان شبکه را نیز تحت تاثیر قرار خواهد داد.



شکل (۲): شمای کلی مدار قدرت و ساختار کنترل پیشنهادی برای اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL



شکل (۳): نمودار معادل سیستم کنترل پیشنهادی تحت استراتژی کنترل جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه

$$i_{2_OL}=\frac{K_{PWM}G_DG_i(s)}{L_1(L_2+L_g)Cs^3+C(L_2+L_g)KG_DK_{PWM}s^2+(L_1+L_2+L_g)s+KG_DK_{PWM}}\times i_{L2,ref}-\frac{s^2L_1C+sCG_DK_{PWM}K+1}{L_1(L_2+L_g)Cs^3+C(L_2+L_g)KG_DK_{PWM}s^2+(L_1+L_2+L_g)s+KG_DK_{PWM}+K_{PWM}G_DG_i}\times v_g \quad (۶)$$

$$i_{2_CL}=\frac{\left(K_{P2}K_{PWM}s+K_{I2}K_{PWM}\right)G_D}{L_1(L_2+L_g)Cs^4+C(L_2+L_g)KG_DK_{PWM}s^3+(L_1+L_2+L_g)s^2+\left(K_{P2}+K\right)G_DK_{PWM}s+K_{I2}K_{PWM}G_D}\times i_{L2,ref}-\frac{L_1Cs^3+CG_DK_{PWM}Ks^2+s}{L_1(L_2+L_g)Cs^4+C(L_2+L_g)KG_DK_{PWM}s^3+(L_1+L_2+L_g)s^2+\left(K_{P2}+K\right)G_DK_{PWM}s+K_{I2}K_{PWM}G_D}\times v_g \quad (۷)$$

۴- روند طراحی سیستماتیک پارامترهای سیستم کنترل پیشنهادی

در استراتژی کنترل پیشنهادی مبتنی بر فیدبک جریان سمت اینورتر و فیدبک جریان سمت شبکه، K ضریب فیدبک جریان سمت اینورتر ا ست. K_{P2} و K_{I2} پارامترهای کنترلر PI در تنظیم کننده جریان(G_i) ه ستند که تاثیر قابل توجهی در عملکرد اینورتر خور شیدی مت صل به شبکه با فیلتر LCL از جمله فرکانس ت شدید، میرایی ت شدید، حا شیه پایداری و ویژگی‌های مت صل به شبکه دارد. برای د ستیابی به نیازهای فوق، فرآیند طراحی سیستماتیک پارامترها به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱) محدودیت پایداری پارامترها با توجه به تاخیر زمانی

۲) میرایی تشدید فیلتر LCL توسط فیدبک جریان سمت اینورتر، پارامتر K را تعیین می‌کند.

۳) پیشنهاد یک مدل ساده در محدوده فرکانس پایین

۴) طراحی پارامترهای کنترل کننده PI با مدل ترکیبی با در نظر گرفتن نیازمندی‌های متصل به شبکه و پایداری سیستم

۴-۱- محدودیت پایداری پارامترها با توجه به تاخیر زمانی در معیار Routh-Hurwitz

با ا ستفاده از قاعده مي سون می‌توان تابع تبدیل حلقه ب سته ($i_{2\text{-}cl}$) سیستم کنترل پیشنهادی برای اینورتر خور شیدی مت صل به شبکه با فیلتر LCL تحت ا ستراتژی کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه در ح ضور تنظیم‌کننده جریان سمت شبکه G_i و تاخیر زمانی G_D مطابق با رابطه (۷) محاسبه نمود.

مطابق بسط سری تیلور، تاخیر زمانی G_D را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$G_D(s)=\frac{1}{1+1.5T_Ss} \quad (۸)$$

مطابق روابط (۲)-(۷) و (۸)، معادله م شخ صه سي ستم حلقه ب سته $G_{CL}(s)$ بصورت (۹) قابل بیان است:

$$\begin{aligned}G_{CL}(s)&=1.5L_1(L_2+L_g)CT_ss^5+L_1(L_2+L_g)Cs^4\\&+[(L_2+L_g)CKK_{PWM}+1.5(L_1+L_2+L_g)T_s]s^3\\&+(L_1+L_2+L_g)s^2+(K+K_{P2})K_{PWM}s+K_{I2}K_{PWM}\end{aligned} \quad (۹)$$

مطابق معیار Routh–Hurwitz، برای اینکه قطب‌های حلقه ب سته سیستم در نیم صفحه سمت راست محور موهومی قرار نگیرند، عناصر موجود در ستون اول جدول Routh و عناصر موجود در معادله مشخصه سي ستم حلقه ب سته باید هم علامت یا مثبت با شند. بنابراین، برای اطمینان از پایداری سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL، دامنه پارامترهای K، K_{P2} و K_{I2} بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases}K>\dfrac{L_1}{L_2+L_g}\left(K_{P2}-1.5T_SK_{I2}\right)\\K+K_{P2}>1.5T_SK_{I2}>\dfrac{L_1}{L_2+L_g}\left(K_{P2}-K\right)\\\dfrac{L_2+L_g}{L_1}K+1.5T_SK_{I2}>K_{P2}>1.5T_SK_{I2}-K\\R_{S1}>0\end{cases} \quad (۱۰)$$

که R_{s1} بر اساس جدول Routh مطابق رابطه (۱۱) قابل تعریف است.

$$R_{S1}=(K+K_{P2})K_{PWM}-1.5T_SK_{I2}K_{PWM}-\frac{(L_2+L_g)CKK_{PWM}^2K_{I2}}{(L_1+L_2+L_g)K-\left(K+K_{P2}-1.5T_SK_{I2}\right)L_1} \quad (۱۱)$$

مطابق (۹)، با افزایش اندوکتانس شبکه (L_g)، برای اطمینان از پایداری سي ستم اینورتر خور شیدی مت صل به شبکه با فیلتر LCL دامنه K، K_{P2} و K_{I2} افزایش می‌یابد.

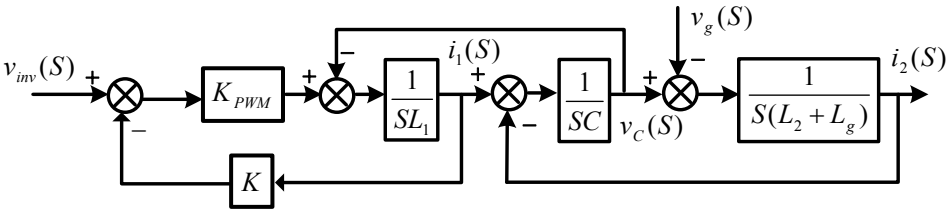
۴-۲- فیدبک جریان سمت اینورتر و مدل ساده شده در محدوده فرکانس پایین

نمودار معادل کنترل جریان سمت اینورتر سي ستم اینورتر خور شیدی مت صل به شبکه با فیلتر LCL در شکل (۴) ن شان داده شده ا ست.

مطابق شکل (۴)، معادله مشخصه تابع تبدیل حلقه باز این دیاگرام کنترلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_0(s) = as^3 + bs^2 + cs + d \qquad (۱۲)$$

که $a = L_1(L_2 + L_g)C$، $b = C(L_2 + L_g)KK_{PWM}$، $c = L_1 + L_2 + L_g$ و $d = KK_{PWM}$ می‌باشند.



شکل (۴): نمودار معادل کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر

به علت تشدید فیلتر LCL، یک حلقه جریان واحد برای اطمینان از ثبات سیستم کافی نیست. بنابراین از یک حلقه داخلی با بازخورد جریان سلف سمت اینورتر جهت میرایی تشدید و ثبات سیستم استفاده شده است.

با مقایسه معادله مشخصه تابع تبدیل فیلتر LCL در رابطه (۳) با رابطه (۱۲)، KK_{PWM} و $C(L_2 + L_g)KK_{PWM}s^2$ مولفه‌های اضافه شده به رابطه (۳) هستند که سبب میرایی تشدید می شوند. مطابق (۱۲)، معادله مشخصه سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با فیدبک جریان سمت اینورتر، یک تابع مرتبه سه است. طبق روش Cardano، اگر K بزرگتر از صفر باشد، Δ بزرگ‌تر از صفر خواهد شد.

$$\Delta = \left(ba - 9ad\right)^2 - 4(b^2 - 3ac)\left(c^2 - 3bd\right) = 3L_2^6\begin{bmatrix} e^2K^2K_{PWM}^2\left(27y^3 + 26y^2 - 2y - 1\right) + \\ 4\left(1+y\right)^3 ye + 4e^3K^4K_{PWM}^4 \end{bmatrix} > 0 \qquad (۱۳)$$

بنابراین، معادله (۱۳) یک ریشه حقیقی و دو ریشه مختلط مزدوج دارد و معادله مشخصه تابع تبدیل حلقه باز این سیستم با فیدبک جریان سمت اینورتر را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

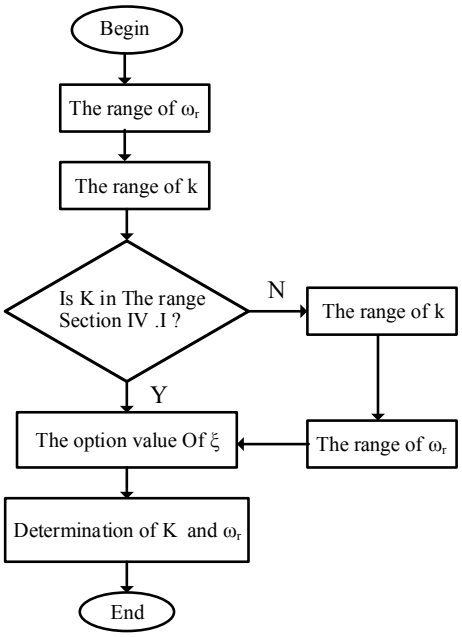
$$D_0(s) = \left(ms + n\right)\left(s^2 + \xi\omega_r s + \omega_r^2\right) = 0 \qquad (۱۴)$$

که $-n/m$، ξ و ω_r ریشه حقیقی، نسبت میرایی و فرکانس تشدید در اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با فیدبک جریان سمت اینورتر هستند:

$$\begin{cases} \zeta = \dfrac{-b + \frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{Y_1} + \sqrt[3]{Y_2}\right)}{3a.\omega_r} \\ \omega_r = \dfrac{1}{3a}\sqrt{\left[-b + \frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{Y_1} + \sqrt[3]{Y_2}\right)\right]^2 + \frac{3}{4}\left(\sqrt[3]{Y_1} + \sqrt[3]{Y_2}\right)^2} \\ \dfrac{n}{m} = \dfrac{-b - \frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{Y_1} + \sqrt[3]{Y_2}\right)}{3a.\omega_r} \end{cases} \qquad (۱۵)$$

$$\begin{cases} e = C/\left(L_2 + L_g\right),\ y = L_1/\left(L_2 + L_g\right) \\ Y_{1,2} = e^2L_2^6KK_{PWM}\left[K^2K_{PWM}^2 - 3ey(1+y)\right] + \\ \quad \frac{3}{2}eyL_2^3\left[eL_2^3KK_{PWM}\left(8y-1\right) \pm \sqrt{\Delta}\right] \end{cases} \qquad (۱۶)$$

با این حال، فرکانس تشدید در روش میرایی فعال اغلب نادیده گرفته می شود. در طرح پیشنهادی اگر فرکانس تشدید بین $10f_n$ و $f_s/6$ باشد (f_n فرکانس مولفه اصلی و f_S فرکانس نمونه‌برداری)، می‌توان به پاسخ دینامیکی بهتر و میرایی هارمونیک جریان دست یافت. مطابق با (۱۵)، نسبت میرایی (ξ)، ضریب فیدبک جریان سمت اینورتر(K) و فرکانس تشدید ω_r به هم وابسته هستند. بعلاوه، K باید در محدوده پایداری معادله (۱۰) باشد. روند طراحی ξ، K و ω_r در فلوچارت شکل (۵) به تصویر کشیده شده است. ابتدا دامنه فرکانس تشدید در سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL را می‌توان با فرکانس کلیدزنی تعیین نمود و سپس دامنه K می‌تواند بر اساس رابطه (۱۵) تعیین شود. اگر دامنه K در محدوده پایداری رابطه (۱۰) باشد، مقدار مطلوب ξ در مرحله بعدی بدست می‌آید. در غیر این صورت، باید دامنه‌های K و ω_r برای ورود به محدوده پایداری رابطه (۱۰) اصلاح



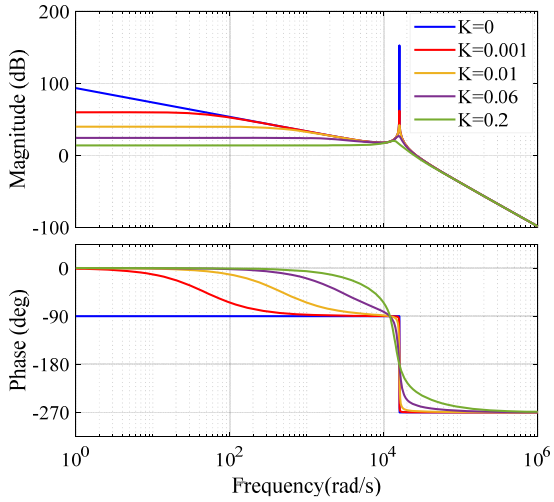
شکل (۵): طراحی پارامتر K در فیدبک جریان سمت اینورتر

شوند. سپس مقدار مطلوب ξ تعیین می‌شود. سرانجام، K و ω_r تعیین می‌شود

نمودار bode سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL بر ا ساس فیدبک جریان سلف سمت اینورتر و طبق تابع تبدیل شکل (۴) با تغییرات K در شکل (۶) ن شان داده شده ا ست. فیدبک جریان سلف سمت اینورتر میرایی ت شدید فیلتر LCL را مهیا می‌کند. در K=0، فرکانس سی ستم با فرکانس ت شدید برابر ا ست ($\omega = \omega_r$). بنابراین منحنی زاویه فاز مستقل از مقدار ξ و برابر با ۹۰- درجه ا ست. در فرکانس‌های غیر از فرکانس ت شدید، منحنی زاویه فاز به مقدار ξ ب ستگی دارد و با فزایش K ن سبت میرایی ξ افزایش می‌یابد. ن سبت میرایی اندازه دامنه ت شدید را تعیین می‌کند و هرچه مقدار K افزایش می‌یابد دامنه ت شدید کمتر می شود. از طرف دیگر، دو ری شه مختلط مزدوج معادله مشخصه سیستم اینورتر خور شیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با فیدبک جریان سمت اینورتر از محور موهومی فا صله دارد. بنابراین، برای ساده سازی روند طراحی سیستماتیک پارامترهای سی ستم کنترل، تابع تبدیل ساده شده سی ستم در محدوده فرکانس پایین از i_2 به v_{inv} بصورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{i_2}{v_{inv}} = \frac{1}{K} \qquad (۱۷)$$

طبق رابطه (۱۷)، منحنی فاز بر حسب فرکانس از صفر شروع می‌شود، و منحنی اندازه بر ح سب فرکانس با محور فرکانس موازی می شود. منحنی‌های اندازه در فرکانس پایین با نمودار bode اینورتر خور شیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL ن شان داده شده در شکل (۶) مطابقت دارد.



شکل (۶): نمودار bode فیدبک جریان سمت اینورتر با تغییرات K

۳-۴- طراحی پارامترهای تنظیم‌کننده جریان

پارامترهای تنا سبی و انتگرالی تنظیم‌کننده جریان G_i تأثیر زیادی در پایداری و قابلیت اطمینان سیستم اینورتر خور شیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL دارد. هدف کنترلی این ا ست که فرکانس گو شه (Corner frequency) پایین‌تر از فرکانس ت شدید با شد. بنابراین در کنترلر جریان (G_i) مقدار K_{P2} را باید طوری انتخاب نمود که فرکانس تشدید بالاتر باشد. در این بخش، پارامترهای کنترل کننده PI بر اساس حا شیه پایداری و پا سخ دینامیکی طراحی و تعیین می شود. فرکانس ت شدید سی ستم اینورتر خور شیدی مت صل به شبکه با فیلتر LCL مطابق با رابطه (۱۵) و شکل (۵) تعیین شده ا ست. در نمودار Bode تابع تبدیل حلقه باز سیستم، تقاطع منحنی فاز با ۱۸۰- درجه، معادل فرکانس ت شدید فیلتر LCL ا ست. بنابراین، در طراحی حا شیه بهره، مدل اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با فیدبک جریان سمت اینورتر لحاظ شده است، حاشیه بهره (GM) می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$-20\log\left|\frac{\left(K_{P2}+\frac{K_{I2}}{s}\right).K_{PWM}}{L_1(L_2+L_g)Cs^3+CL_2KK_{PWM}s^2+(L_1+L_2+L_g)s+KK_{PWM}}\right|_{s=j\omega_r} \geq GM \qquad (۱۸)$$

اگر شبکه ایده‌آل نباشد با احتساب اندوکتانس شبکه (L_g)، دامنه K_{P2} افزایش می‌یابد. بنابراین، دامنه K_{P2} بدون اندوکتانس شبکه L_g بصورت زیر است:

$$K_{P2} \geq \frac{\left|L_1L_2Cs^3+CL_2KK_{PWM}s^2+(L_1+L_2)s+KK_{PWM}\right|_{s=j2\pi f_{LCL}}}{K_{PWM}\times 10^{\frac{GM}{20}}} \qquad (۱۹)$$

مطابق رابطه (۱۹)، اگر C یا L_1 افزایش یابد، دامنه K_{P2} کاهش می‌یابد. فرکانس گذر فاز (ω_C) در سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با

فیلتر LCL بسیار کمتر از فرکانس تشدید فیلتر LCL است. بنابراین، تابع تبدیل حلقه باز یا تابع انتقال سیستم با کنترل کننده PI در محدوده فرکانس پایین بصورت زیر است:

$$G_{OP} = \left(K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \right) . \frac{1}{K} \qquad (۲۰)$$

سپس، حاشیه فاز (PM) سیستم را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$180^{\circ} + < \frac{\left(K_{P2} S + K_{I2} \right)}{S.K} \geq PM \qquad (۲۱)$$

به طور کلی، در یک سیستم کنترلی با پایداری مناسب، مقدار PM باید بیشتر از ۴۵ درجه باشد.

با توجه به فرکانس گذر فاز سیستم (ω_c) در (۲۲)، دامنه‌های K_{P2} و K_{I2} را می‌توان به ترتیب توسط (۲۳) و (۲۴) بدست آورد.

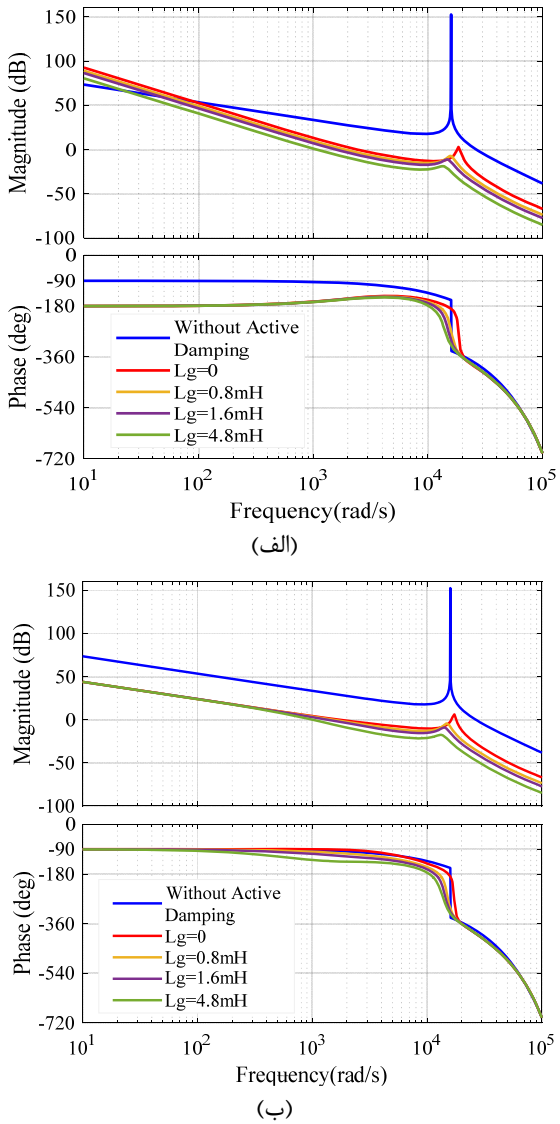
$$\omega_c \propto \frac{K_{I2}}{\sqrt{K^2 - K_P^2}} \leq 10 f_n \times 2\pi \qquad (۲۲)$$

$$0 \leq K_{P2} \leq K \qquad (۲۳)$$

$$K_{I2} \leq 10 f_n \times 2\pi \times \sqrt{K^2 - K_{p2}^2} \qquad (۲۴)$$

۴-۴- مقایسه بین استراتژی پیشنهادی و استراتژی کنترل مرسوم

نمودارهای bode سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با استراتژی کنترلی پیشنهادی و استراتژی میرایی فعال مرسوم بر اساس فیدبک جریان خازن و فیدبک جریان سمت شبکه در شکل (۷) نشان داده شده است. از نقطه نظر مشخصه میرایی، استراتژی پیشنهادی و استراتژی میرایی فعال مرسوم با حضور تأخیر زمانی در میرایی تشدید سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL به نحو مناسبی عمل می‌کنند. عملکرد فیلتر LCL در استراتژی میرایی فعال مرسوم با افزایش امپدانس شبکه L_g مختل می شود و فرکانس تقاطع و بهره سیستم تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم کاهش می‌یابد. ولی استراتژی پیشنهادی حالت پایدار را در محدوده



شکل(۷): نمودار bode اینورتر خورشیدی متصل به شبکه ضعیف با فیلتر LCL ؛ (الف): با استراتژی مرسوم، (ب): با روش پیشنهادی

فرکانس پایین حفظ می‌کند که تأثیر قابل توجهی بر مشخصات خروجی سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL بویژه THD جریان سمت شبکه دارد. علاوه بر این، استراتژی پیشنهادی حاشیه پایداری بیشتری نسبت به میرایی فعال مرسوم دارد.

۵- تحلیل پایداری و آنالیز حساسیت سیستم

در این بخش یک مثال طراحی برای سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL تحت استراتژی پیشنهادی مبتنی بر فیدبک جریان سمت اینورتر و فیدبک جریان سمت شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تحلیل پایداری و آنالیز حساسیت سیستم تحت بررسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL در جدول (۱) ارایه شده

ا ست. فرکانس ت شدید در محدوده $10f_n$ و $0.5f_s$ قرار دارد که f_n فر کانس مولفه ا صلی ولتاژ خروجی و f_s فر کانس کلیدزنی اینورتر می‌باشد.

جدول (۱): پارامترهای اینورتر فتوولتائیک متصل به شبکه با فیلتر LCL

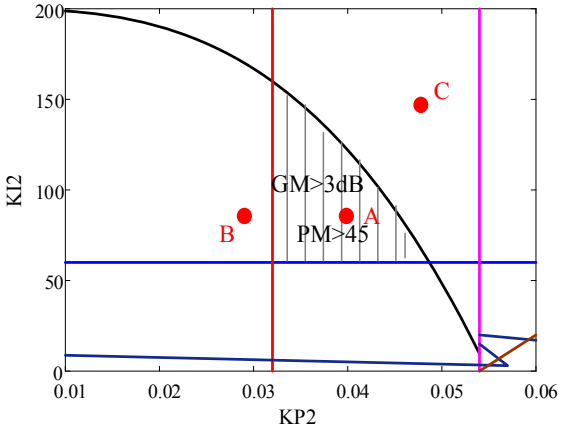
پارامتر	مقدار
سلف سمت اینورتر (L_1)	۰/۸ mH
سلف سمت شبکه (L_2)	۰/۵ mH
خازن فیلتر (C_f)	۱۰μF
ولتاژ موثر شبکه (v_g)	۲۲۰V
فرکانس شبکه (f_n)	۵۰Hz
فرکانس کلیدزنی (f_s)	۱۰kHz
خازن خروجی PV	۱۰۰μF
خازن لینک DC	۴۷۰۰μF

مطابق معادله م شخ صه حلقه ب سته سی ستم $G_{CL}(s)$ در رابطه (۱۰) مقادیر K، K_{P2} و K_{I2} بزرگ‌تر از صفر هستند و دامنه آن‌ها را می‌توان با مع یار Routh-Hurwitz م طابق طبق روابط (۲۵) و (۲۶) محاسبه نمود.

$$K+K_{P2}>1.5T_SK_{I2}>K_{P2}-K \quad (۲۵)$$

$$\left(K+K_{P2}\right)-1.5T_SK_{I2}-\frac{CKK_{PWM}K_{I2}}{K-\left(K_{P2}-1.5T_SK_{I2}\right)}>0 \quad (۲۶)$$

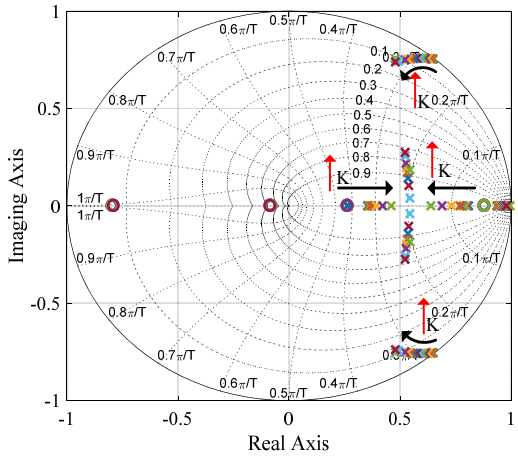
در شکل (۸) محدوده پارامترهای کنترلر جریان م شخص شده ا ست. برای دستیابی به میرایی تشدید فیلتر LCL، مقدار K و ω_r باید تعیین شود. مطابق رابطه (۱۵)، K و ω_r به ترتیب ۰/۰۵۷ و ۱۵۹۰۰rad/s تعیین می‌شود. برای تامین نیازمندی‌های سیستم شامل $GM>3dB$ و $PM>45^\circ$ در توان نامی P_n دامنه K_{P2} و K_{I2} بر ا ساس روابط (۱۹) و (۲۳)-(۲۶) محا سبه می شود. علاوه بر این، با توجه به تغییرات $L_1(\pm20\%)$، $L_2(\pm20\%)$ و $C(\pm20\%)$ دامنه K_{P2} مطابق رابطه (۲۵) از محدوده [0.0335,0.057] به [0.04,0.057] تغییر می‌یابد. جهت د ستیابی به حا شیه پایداری منا سب، نقطه A در ($K_{P2}=0.04$, $K_{I2}=90$) تنظیم می شود. دامنه تابع تبدیل حلقه باز سی ستم در فرکانس پایه ($\omega_n=100\pi$) برابر با ۱۴dB ا ست. مقادیر PM و GM به ترتیب ۹۲/۳° و ۱۳/۰۴dB ا ست که در آن سیستم پایدار است. با این حال، به ازای ($K_{P2}=0.03$, $K_{I2}=90$) نقطه B خارج از محدوده م شخص شده در شکل (۸) ا ست و مقادیر PM و GM به ترتیب به ترتیب ۸۵/۳° و ۱۶/۲۴dB ست. نقطه C به ازای ($K_{P2}=0.05$, $K_{I2}=150$) نیز خارج از محدوده تعیین شده است و مقادیر PM و GM به ترتیب ۷۹° و ۱/۸dB است و نیاز پایداری سیستم را برآورد نمی‌کند. بنابراین، نقاط هاشور خورده در شکل (۸) بر مبنای معادله (۲۳)-(۲۶) عملکرد پایدار سی ستم را ت ضمین و نیازمندی‌های سیستم متصل به شبکه را تامین می‌کند.



شکل (۸): محدوده پارامترها در کنترل کننده G_i

نمودار صفر و قطب حلقه باز سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL تحت استراتژی پیشنهادی با اعمال کنترل کننده جریان G_i با افزایش K در شکل (۹) ارائه شده است. صفر و قطب‌های سیستم در دایره واحد قرار دارند و با افزایش مقدار K، سی ستم همچنان پایدار است.

برای برر سی قابلیت پایداری سی ستم و تامین نیازمندی‌های سی ستم $GM>3dB$ و $PM>45^\circ$، سی ستم با تأخیر زمانی طراحی شده است. نمودارهای bode سیستم اینورتر خور شیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با تغییرات پارامترهای LCL و شبکه ضعیف تحت استراتژی پیشنهادی در شکل (۱۰) ارائه شده است. مطابق شکل (۱۰-الف) مقدار سلف سمت اینورتر (L_1) از ۰/۷ میلی هانری تا ۱/۱ میلی هانری (±20%) تغییر کرده است. با تغییر L_1، دامنه تابع تبدیل حلقه باز سی ستم در فرکانس پایه ($\omega_n=100\pi$) در ۱۴dB ثابت می‌ماند و مقادیر GM از ۶/۶dB به ۲/۸۲dB و PM از ۹۲/۵° به ۵۸/۶° تغییر می‌کند. بنابراین، سی ستم هنوز دارای پایداری منا سب ا ست ولی نیازمندی‌های سی ستم در $L_1=1.1mH$ برآورده نمی شود. در مقدار خازن (C_f) فیلتر LCL از ۸ میکروفاراد تا ۱۲ میکرو فاراد (±20%) تغییر اعمال شده است. با تغییر C_f، مطابق شکل (۱۰-ب) دامنه تابع تبدیل حلقه باز سیستم در فرکانس پایه در ۱۴dB ثابت می‌ماند، GM از ۵/۶۹dB به ۳/۸۴dB و PM از ۸۹/۱° به ۸۸/۹° تغییر می‌کند. بنابراین، با تغییر اندازه خازن نیز سیستم همچنان پایداری مناسب خود را حفظ می‌کند و نیازمندی‌های سیستم برآورده می‌شود.

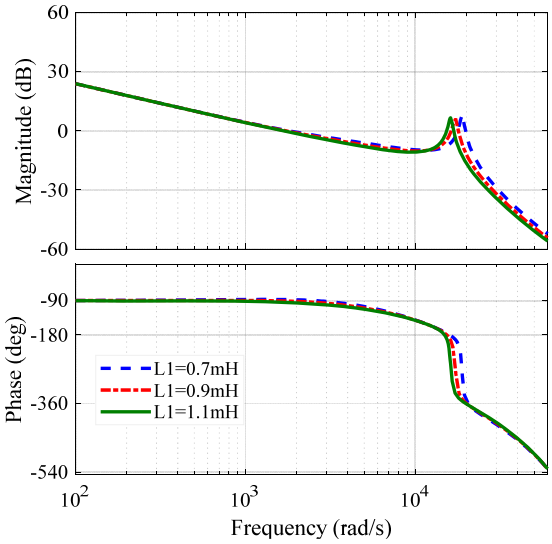


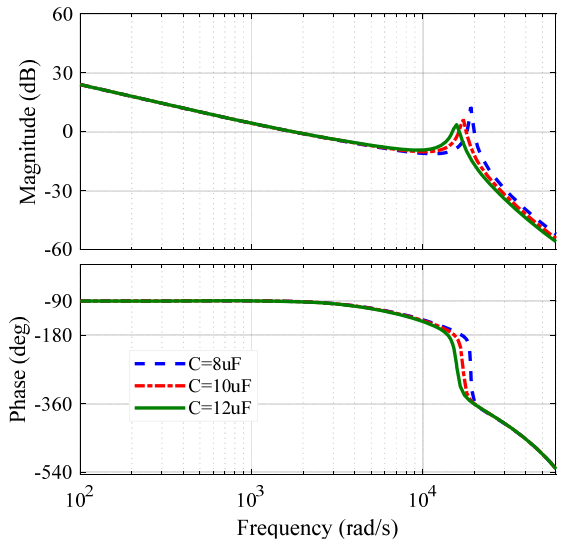
شکل (۹): نمودار صفر و قطب حلقه باز سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL تحت استراتژی پیشنهادی

با انتخاب مقادیر مختلف برای اندوکتانس شبکه $L_g=0.8mH$ ، $L_g=1.6mH$ و $L_g=4.8mH$ ، نمودار بود حلقه باز سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با لحاظ اندوکتانس شبکه در شکل (۱۰-ج) نشان داده شده است. با تغییر L_g، دامنه تابع تبدیل حلقه باز سیستم در فرکانس پایه ($\omega_n = 100\pi$) در ۱۴dB ثابت می‌ماند GM از ۱۰/۱dB به ۲۰/۷dB و PM از °۷۷/۱ به °۵۹/۹ تغییر می‌کند. بنابراین سیستم در شبکه ضعیف، تحت شرایط مذکور پایداری قابل قبولی را دارا می‌باشد و نیازمندی‌های سیستم برآورده می شود. نمودارهای bode سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL در شبکه ضعیف تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم (Pan, Donghua, et al.2014) با انتخاب اندوکتانس شبکه $L_g=0.8mH$ ، $L_g=1.6mH$ و $L_g=4.8mH$ ، در شکل (۱۰-د) نشان داده شده است. تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم بر اساس فیدبک جریان خازن و فیدبک جریان سمت شبکه، دامنه تابع تبدیل حلقه باز سیستم در فرکانس پایه از ۲۹/۳dB به ۲۰/۷dB تغییر می‌یابد، مقدار GM از ۱۴/۱dB به ۲۲dB تغییر کرده و مقدار PM از °۲۵/۳ به °۱۵/۸ تغییر می‌کند بنابراین با افزایش L_g تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم، نیازمندی‌های سیستم تامین نمی شود. در مقایسه با استراتژی کنترل میرایی فعال مرسوم، استراتژی پیشنهادی در محدوده فرکانس پایین، پایدارتر و دارای ویژگی میرایی تشدید بهتری است. بنابراین عملکرد سیستم با تغییر پارامترهای فیلتر LCL، به ویژه امپدانس شبکه L_g برای شبکه ضعیف مطلوب می‌باشد. مقادیر انتخابی سلف و خازن با توجه به شرایط محیطی، دما و طول عمر تغییر می‌یابد. خازن دارای تغییرات ۲± در صد به علت تغییرات دما در طول سال و دارای تغییرات ۵- تا ۱۰+ درصد به دلیل خطای ساخت است.

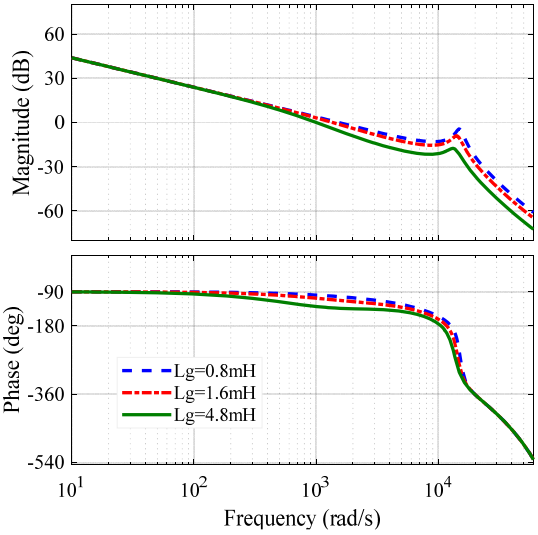
شاخص‌های مختلفی به عملکرد مناسب فیلتر وابسته است که یکی از این شاخص‌ها THD جریان است که با توجه به تغییر پارامتر های فیلتر، مقدار THD تغییر کرده و فیلتر عملکرد متفاوتی خواهد داشت. با گذشت زمان مقادیر سلف و خازن با احتمال زیاد دچار کاهش می‌شوند.

برای تحلیل حساسیت سیستم ناشی از تغییر پارامترهای فیلتر LCL، فرض شده که با گذشت زمان بین ۵ الی ۲۰ در صد پارامترهای فیلتر دچار کاهش شده است. در جدول (۲) آنالیز حساسیت سیستم بر اساس تغییرات مقادیر سلف و خازن در شبکه ایده‌آل و شبکه غیر ایده‌آل با روش کنترلی پیشنهادی و مرسوم ارائه شده است.

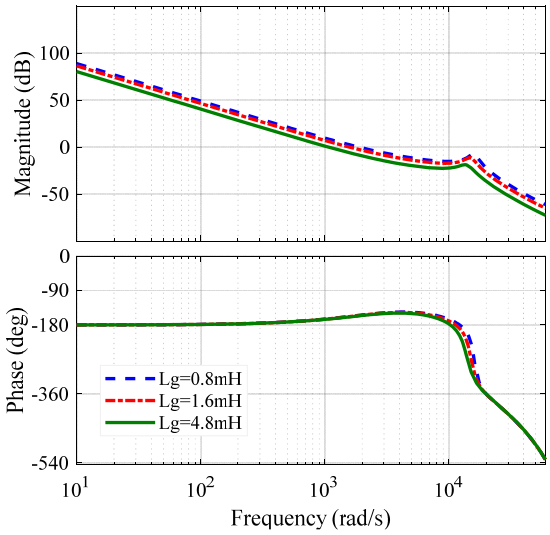




شکل(۱۰-الف): نمودار bode اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با تغییرات سلف L_1 تحت استراتژی پیشنهادی



شکل(۱۰-ب): نمودار bode اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با تغییرات خازن C_f تحت استراتژی پیشنهادی



شکل(۱۰-ج): نمودار bode اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با تغییرات اندوکتانس شبکه L_g تحت استراتژی پیشنهادی

شکل(۱۰-د): نمودار bode اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL با تغییرات اندوکتانس شبکه L_g تحت استراتژی مرسوم

جدول (۲): آنالیز حساسیت سیستم بر اساس تغییرات مقادیر سلف و خازن

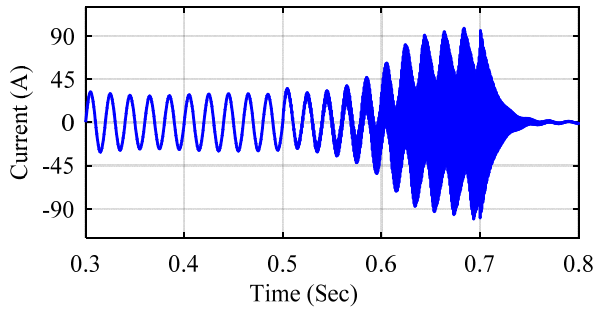
	روش کنترل پیشنهادی شبکه ایده‌آل (L_g=0mH)		روش کنترل مرسوم شبکه ایده‌آل (L_g=0mH)		روش کنترل پیشنهادی شبکه غیر ایده‌آل (L_g=4.8mH)		روش کنترل مرسوم شبکه غیر ایده‌آل (L_g=4.8mH)	
	THD-L2	THD-L1	THD-L2	THD-L1	THD-L2	THD-L1	THD-L2	THD-L1
کاهش ۵٪ هر دو سلف	۱/۲۵٪	۵/۸۱٪	۱/۷۹٪	۵/۹۵٪	۱/۳۵٪	۵/۸۲٪	۲/۶۷	۶/۰۷٪
کاهش ۱۰٪ هر دو سلف	۱/۲۵٪	۶/۱۳٪	۱/۸۱٪	۶/۲۶٪	۱/۳۵٪	۶/۱۳٪	۲/۷۴٪	۶/۳۸٪
کاهش ۱۵٪ هر دو سلف	۱/۲۵٪	۶/۴۸٪	۱/۸۴٪	۶/۶۰٪	۱/۳۷٪	۶/۴۷٪	۲/۸۳٪	۶/۷۳٪
کاهش ۲۰٪ هر دو سلف	۱/۲۶٪	۶/۸۷٪	۱/۸۶٪	۷/۰۱٪	۱/۳۸٪	۶/۸۶٪	۲/۹۴٪	۷/۱۳٪
کاهش ۵٪ خازن	۱/۲۵٪	۵/۵۴٪	۱/۷۸٪	۵/۶۷٪	۱/۳۵٪	۵/۵۴٪	۲/۵۶٪	۵/۸۰٪
کاهش ۱۰٪ خازن	۱/۲۵٪	۵/۵۴٪	۱/۷۸٪	۵/۶۷٪	۱/۳۵٪	۵/۵۴٪	۲/۵۶٪	۵/۸۰٪
کاهش ۱۵٪ خازن	۱/۲۵٪	۵/۵۴٪	۱/۷۸٪	۵/۶۸٪	۱/۳۵٪	۵/۵۴٪	۲/۵۷٪	۵/۸۱٪
کاهش ۲۰٪ خازن	۱/۲۵٪	۵/۵۵٪	۱/۷۸٪	۵/۶۸٪	۱/۳۵٪	۵/۵۵٪	۲/۵۷٪	۵/۸۱٪
کاهش ۵٪ هر دو سلف و خازن	۱/۲۵٪	۵/۸۲٪	۱/۷۹٪	۵/۹۵٪	۱/۳۵٪	۵/۸۱٪	۲/۶۲٪	۶/۰۷٪
کاهش ۱۰٪ هر دو سلف و خازن	۱/۲۵٪	۶/۱۳٪	۱/۸۱٪	۶/۲۶٪	۱/۳۵٪	۶/۱۳٪	۲/۶۵٪	۶/۳۸٪
کاهش ۱۵٪ هر دو سلف و خازن	۱/۲۵٪	۶/۴۹٪	۱/۸۴٪	۶/۶۱٪	۱/۳۵٪	۶/۴۸٪	۲/۷۰٪	۶/۷۴٪
کاهش ۲۰٪ هر دو سلف و خازن	۱/۲۵٪	۶/۸۹٪	۱/۸۶٪	۷/۰۴٪	۱/۳۶٪	۶/۸۸٪	۲/۷۴٪	۷/۱۴٪

۶- نتایج شبیه‌سازی

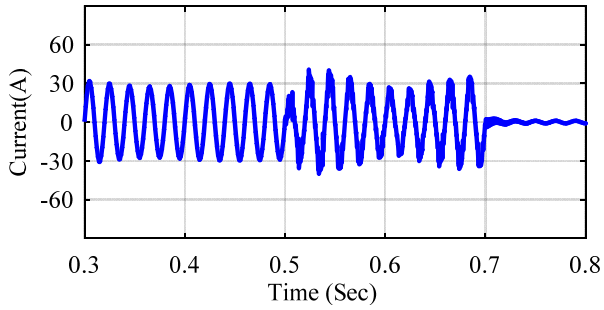
۶-۱- بررسی پایداری سیستم با تغییرات ضریب فیدبک جریان سمت اینورتر (K)

ضریب فیدبک جریان سمت اینورتر (K) تحت شبکه ایده‌آل (L_g=0) از ۰/۰۵۷ به ۰/۰۲ کاهش می‌یابد، نتایج آزمایش تحت استراتژی پیشنهادی در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است. قبل از لحظه t = 0.5sec، اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL به طور

پیوسته با بار کامل تحت استراتژی پیشنهادی کار می‌کند. در لحظه t = 0.5sec، پارامتر K به طور ناگهانی از ۰/۰۵۷ به ۰/۰۲ تغییر می‌کند و جریان شبکه (i_2) به سرعت افزایش می‌یابد. در لحظه t = 0.7sec، جریان شبکه بیش از جریان اضافه بار است، در نتیجه اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL ناپایدار شده و بایستی از شبکه جدا شود. در آزمایش دوم که در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است؛ قبل از لحظه t = 0.5sec، اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL به طور پیوسته با بار کامل تحت استراتژی پیشنهادی کار می‌کند. در لحظه t = 0.5sec، پارامتر K به طور ناگهانی از ۰/۰۵۷ به ۰/۲ افزایش می‌یابد و هارمونیک جریان شبکه (i_2) به سرعت افزایش می‌یابد. در لحظه t = 0.7sec، جریان متصل به شبکه بعلت افزایش هارمونیک تزریقی به شبکه و ناپایداری سیستم، اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL از شبکه جدا می شود. بنابراین، تحت استراتژی پیشنهادی با میرایی فعال در K = 0.057، اینورترخورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL به طور پیوسته و پایدار کار می‌کند.



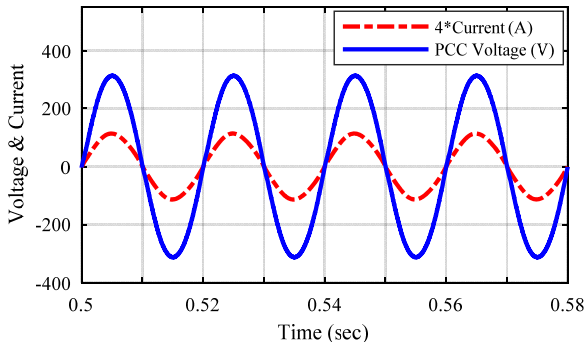
(الف)



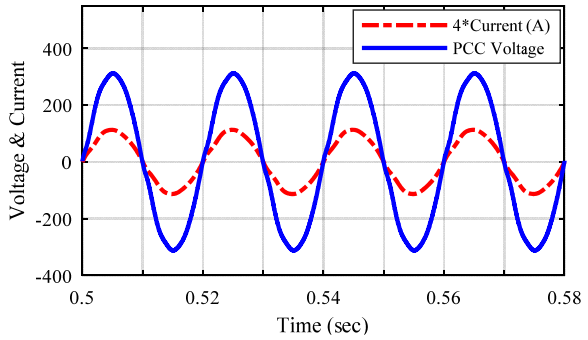
(ب)

شکل (۱۱): جریان شبکه با اعمال تغییرات در ضریب فیدبک جریان سمت اینورتر، (الف): تغییر از ۰/۰۵۷ به ۰/۰۲، (ب): تغییر از ۰/۰۵۷ به ۰/۰۲

ولتاژ نقطه اتصال مشترک و جریان تزریقی به شبکه (با ضریب چهار تحت شبکه ضعیف و غیر ایده‌آل با اندوکتانس شبکه $L_g = 4.8mH$ با استراتژی پیشنهادی در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است. اعوجاج هارمونیک کل (THD) جریان سلف سمت شبکه (i_2) در حالیکه ولتاژ نقطه اتصال مشترک ایده‌آل و بدون اعوجاج است، برابر با ۱/۳۵٪ است. ولتاژ نقطه اتصال مشترک و جریان تزریقی به شبکه تحت اندوکتانس شبکه $L_g = 4.8mH$ در شکل (۱۲-ب) بر اساس استراتژی مرسوم (Pan, Donghua, et al.2014) نشان داده شده است. مطابق شکل، به علت محتوای هارمونیکی موجود در جریان تزریقی و عبور این جریان از امپدانس شبکه، ولتاژ نقطه اتصال مشترک (v_{PCC}) حاوی اعوجاج هارمونیکی می‌باشد. در این شرایط اعوجاج هارمونیک کل (THD)جریان سلف سمت شبکه (i_2) برابر با ۲/۶۱٪ حاصل شده است. بنابراین استراتژی پیشنهادی برای کاربرد در شبکه ضعیف با امپدانس شبکه قابل توجه مناسب است.



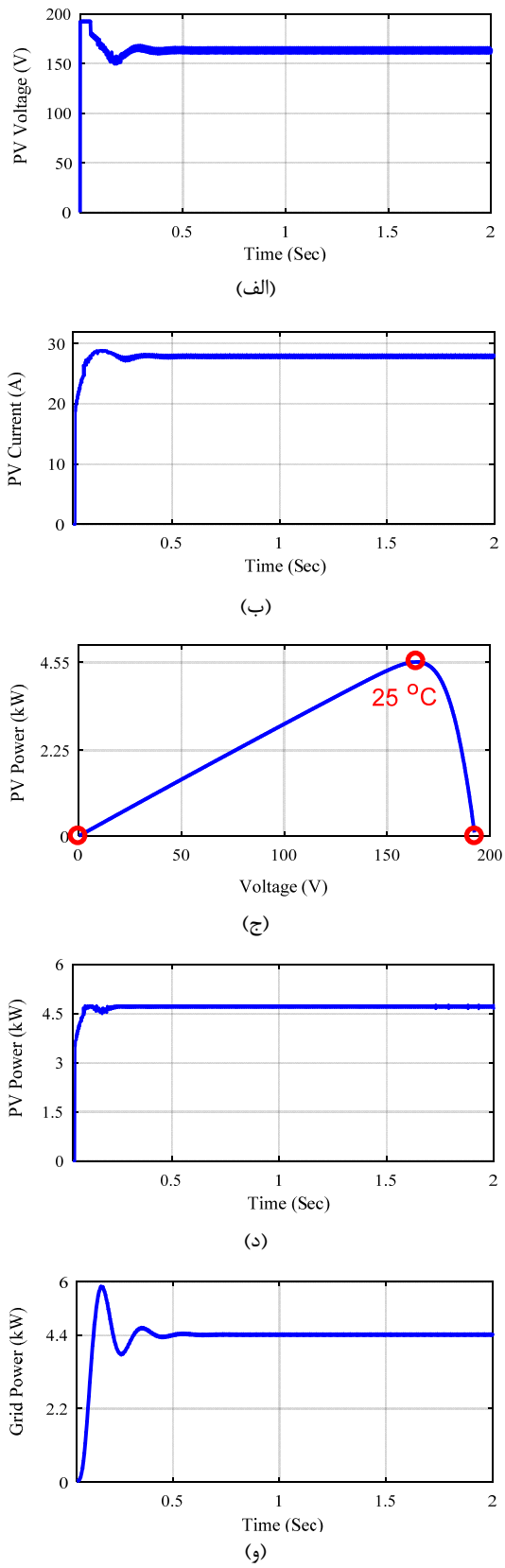
(الف)



(ب)

شکل (۱۲):ولتاژ شبکه و جریان تزریقی توسط اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL، (الف): تحت استراتژی پیشنهادی، (ب): تحت استراتژی مرسوم

ولتاژ و جریان خروجی آرایه فتوولتاییک به ترتیب در شکل (۱۳-الف) و (۱۳-ب) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ولتاژ خروجی آرایه فتوولتاییک بر روی ۱۶۵ ولت تنظیم شده است. بر اساس شکل (۱۳-ج)، حداکثر توان آرایه فتوولتاییک در دمای محیط برابر با ۲۵° به ازای ولتاژ ۱۶۵ ولت حدود ۴/۶ kW حاصل می شود. جهت دستیابی به حداکثر توان باید مبدل DC-DC ولتاژ خروجی خود را در یک مقدار بهینه تنظیم نماید. توان تولیدی آرایه فتوولتاییک بر حسب زمان در شکل (۱۳-د) نشان داده شده است که برابر با حداکثر توان قابل تولید



شکل (۱۳): مشخصات آرایه فتولتاییک تحت بررسی، (الف): ولتاژ خروجی PV، (ب): جریان خروجی PV، (ج): مشخصه P-V، (د): توان خروجی PV، (و): توان تزریقی به شبکه

آرایه فتوولتاییک مطابق با شکل (۱۳-ج) است. توان تزریقی به شبکه توسط اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL در شکل (۱۳-و) نشان داده شده است. مطابق این شکل توان ۴/۴ kW به شبکه تزریق می‌شود.

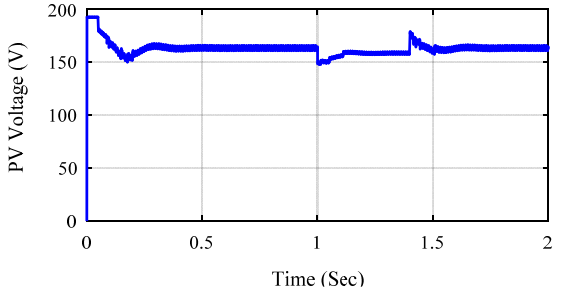
۶-۲- نتایج شبیه‌سازی با تغییر شدت تابش

مشخصه الکتریکی ولتاژ - جریان سلول‌های فتوولتائیک به شدت نور تابیده شده بستگی دارد. حداکثر توان تولیدی یک سلول برابر حاصل‌ضرب ولتاژ و جریان آن در نقطه ماکزیمم توان آن است، در بازه زمانی t = 1sec و t = 1.4sec، شدت تابش از ۱۰۰۰ W/m² به ۸۰۰ W/m² کاهش یافته و عملکرد سیستم فتوولتاییک مورد ارزیابی قرار گرفته است. با کاهش شدت تابش انتظار می‌رود که توان تولیدی آرایه فتوولتاییک کاهش یابد. ولتاژ آرایه فتوولتاییک توسط مبدل DC-DC ثابت نگه داشته می‌شود. شکل (۱۴-الف) این نکته را تایید می‌کند و پس از کاهش لحظه‌ای ولتاژ در لحظه t = 1sec، با عملکرد صحیح مبدل DC-DC مجددا ولتاژ خروجی آرایه فتوولتاییک به ۱۶۵ ولت برمی‌گردد. مطابق شکل (۱۴-ب) و (۱۴-ج)، جریان و توان تولیدی آرایه فتولتاییک متناسب با میزان کاهش تابش کاهش یافته است. با توجه به کاهش توان تولیدی PV، توان تزریقی به شبکه نیز کاهش یافته که در شکل (۱۴-د) نشان داده شده است. در شکل (۱۴-و) ولتاژ لینک DC نشان داده شده است. مطابق این شکل، ناشی از عملکرد صحیح کنترلر G_v و تزریق صحیح توان لینک DC به شبکه، ولتاژ لینک DC مقدار مطلوب و مرجع ثابت نگه داشته می‌شود.

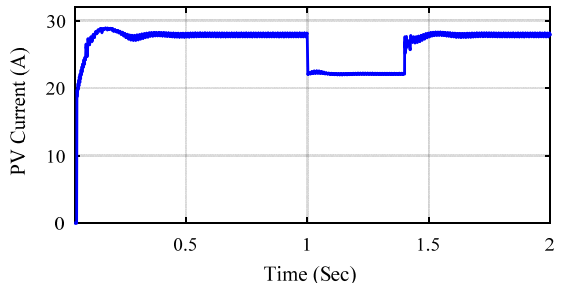
۶-۳- نتایج شبیه‌سازی با تغییر اندوکتانس شبکه

امپدانس شبکه شامل یک سلف و یک مقاومت مدل می‌شود. با توجه به این که مقاومت به پایداری سیستم کمک می‌کند، تنها از یک سلف به عنوان امپدانس شبکه در نظر گرفته می شود تا بدترین حالت مورد بررسی قرار گیرد. عملکرد اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL در شبکه ایده‌آل با $L_g = 0$ تحت استراتژی کنترل پیشنهادی و استراتژی میرایی فعال مرسوم(Pan, Donghua, et al.2014) بر اساس میرایی فعال بازخورد جریان خازن در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مطابق این شکل، THD جریان سمت اینورتر (i_1) و جریان شبکه (i_2)با استراتژی کنترل پیشنهادی به ترتیب ٪۵/۵۴ و ٪۱/۲۵ است که در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) نشان داده شده است. تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم، THD جریان سمت اینورتر و جریان شبکه به ترتیب ٪۵/۶۷ و ٪۱/۷۸ است که در شکل (۱۵-ج) و (۱۵-د) نشان داده شده است. بنابراین THD جریان در استراتژی کنترل پیشنهادی کمتر از استراتژی کنترل مرسوم است.

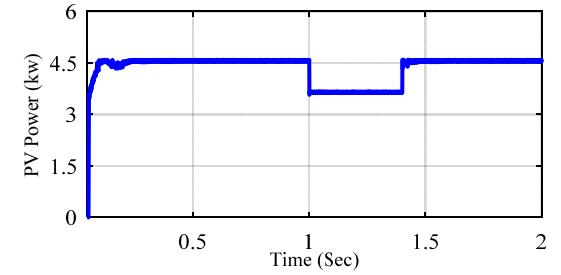
عملکرد اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL در شبکه غیر ایده‌آل با اندوکتانس $L_g = 4.8mH$ تحت استراتژی کنترل پیشنهادی و استراتژی میرایی فعال مرسوم بر اساس بازخورد جریان خازن در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مطابق شکل، THD



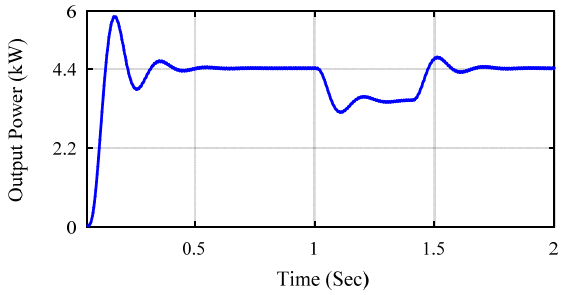
(الف)



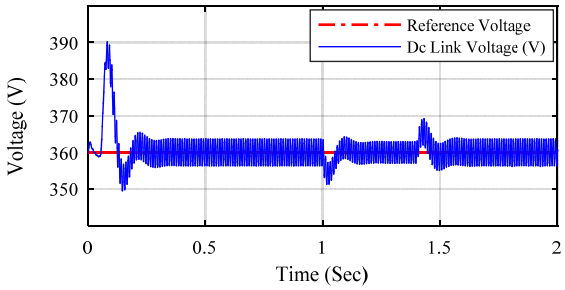
(ب)



(ج)



(د)

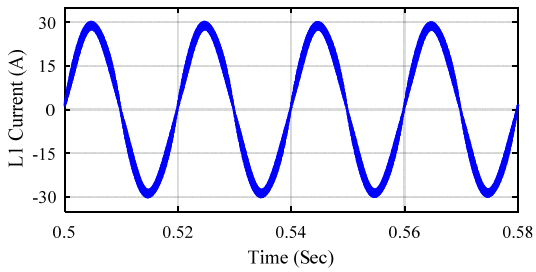


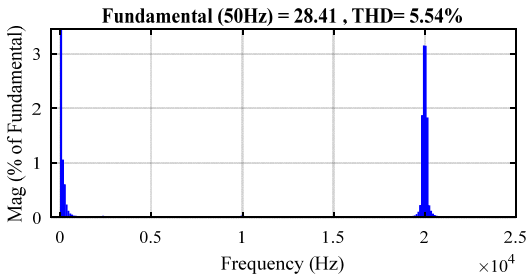
(و)

شکل (۱۴): عملکرد سیستم خورشیدی تحت بررسی به هنگام کاهش میزان تابش، (الف): ولتاژ تولیدی PV (ب): جریان تولیدی PV (پ): توان تولیدی PV (ت) توان تزریقی به شبکه

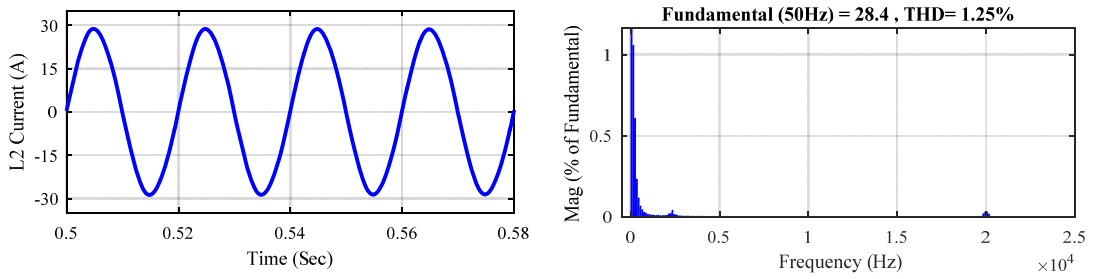
جریان سمت اینورتر (i_1) و جریان سمت شبکه (i_2) با استراتژی کنترل پیشنهادی به ترتیب ٪۵/۵۳ و ٪۱/۳۶ است و تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم به ترتیب ٪۵/۸۰ و ٪۲/۶۱ است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که کیفیت جریان سمت شبکه در شبکه غیر ایده‌آل در روش پیشنهادی کاهش چندانی نسبت به شبکه ایده‌آل نداشته در حالیکه در روش مرسوم، کیفیت جریان سمت شبکه کاهش چشمگیری دارد.

عملکرد اینورتر فتوولتاییک متصل به شبکه با فیلتر LCL در شبکه غیر ایده‌آل با اندوکتانس $L_g = 4.8mH$ تحت استراتژی کنترل پیشنهادی و استراتژی میرایی فعال مرسوم در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مطابق شکل، THD جریان سمت اینورتر (i_1) و سمت شبکه (i_2) با استراتژی کنترل پیشنهادی به ترتیب ٪۵/۵۳ و ٪۱/۳۶ است و تحت استراتژی میرایی فعال مرسوم به ترتیب ٪۵/۸۰ و ٪۲/۶۱ است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که کیفیت جریان سمت شبکه در شبکه غیر ایده‌آل در روش پیشنهادی کاهش چندانی نسبت به شبکه ایده‌آل نداشته است. در حالیکه در روش مرسوم، کیفیت جریان سمت شبکه کاهش چشمگیری نسبت به استراتژی کنترل مرسوم یافته است.

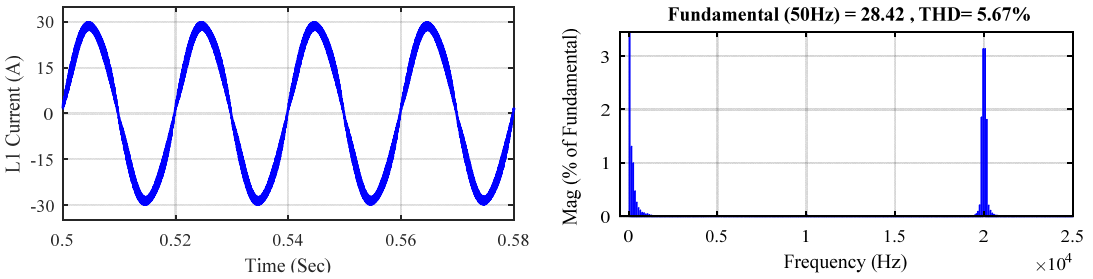




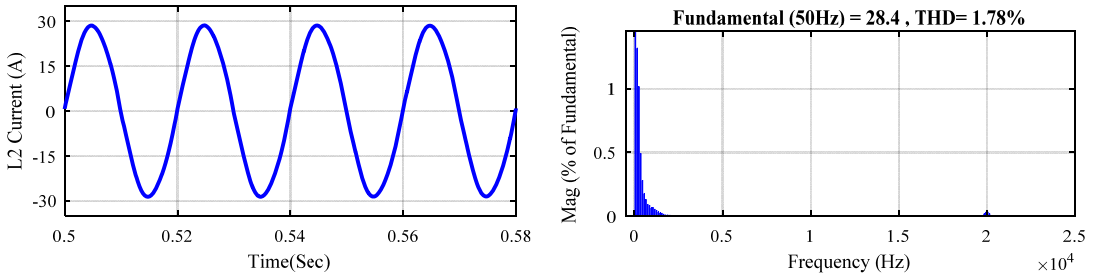
(الف)



(ب)

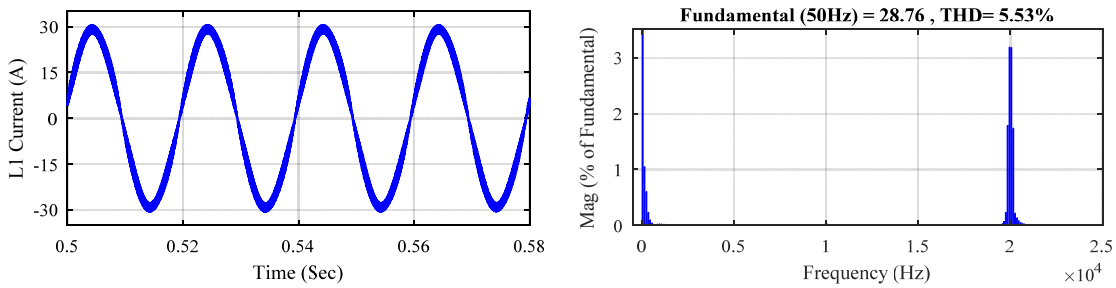


(ج)

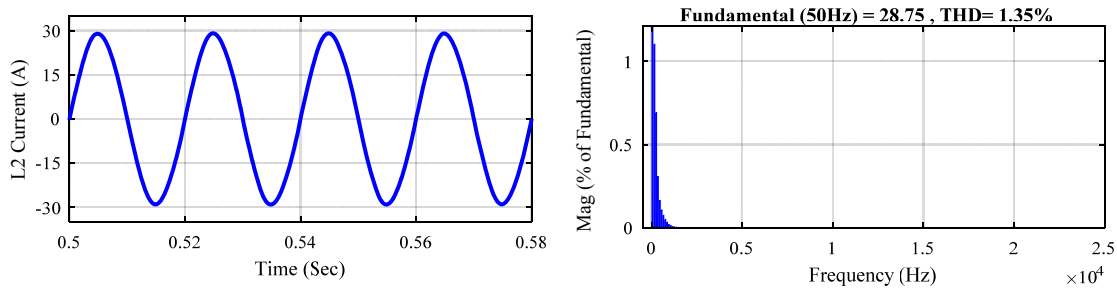


(د)

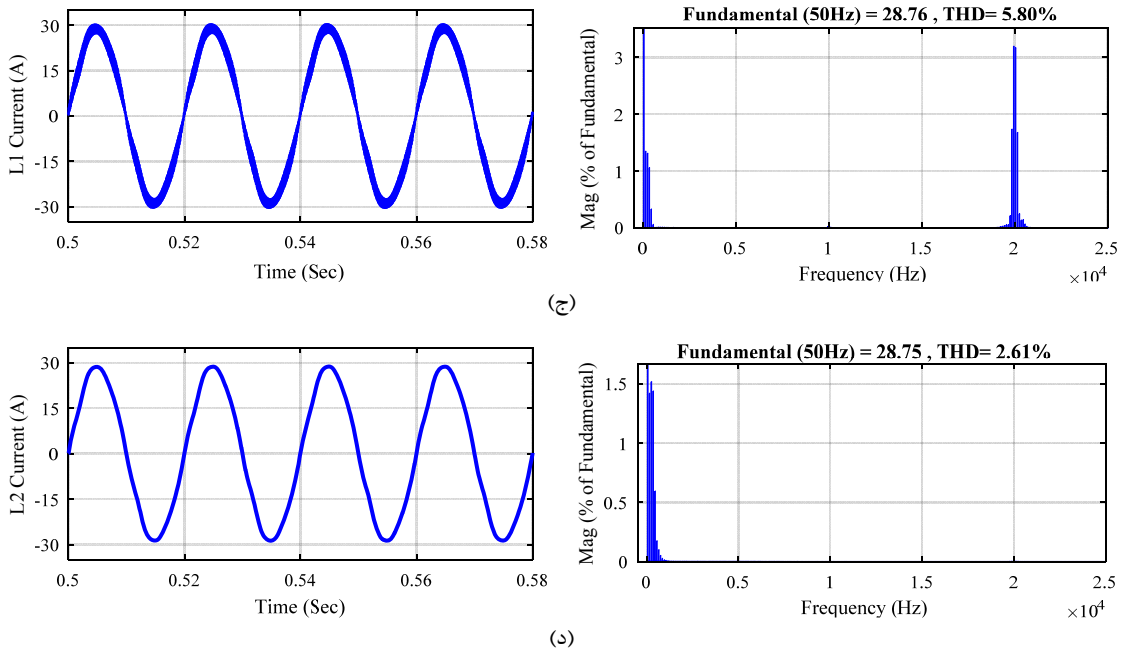
شکل (۱۵): مقایسه جریان سمت شبکه و اینورتر با امپدانس شبکه $L_g = 0$، (الف): جریان سلف سمت اینورتر با استراتژی پیشنهادی، (ب): جریان سلف سمت شبکه با استراتژی پیشنهادی، (ج): جریان سلف سمت اینورتر با استراتژی مرسوم، (د): جریان سلف سمت شبکه با استراتژی مرسوم



(الف)



(ب)



شکل (۱۶): مقایسه جریان سمت شبکه و سمت اینورتر با امپدانس شبکه L_g = 4.8mH، (الف): جریان سلف سمت اینورتر با استراتژی پیشنهادی، (ب): جریان سلف سمت شبکه با استراتژی پیشنهادی، (ج): جریان سلف سمت اینورتر با استراتژی مرسوم، (د): جریان سلف سمت شبکه با استراتژی مرسوم

در انتها مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی با تحقیقاتی که اخیراً در زمینه‌ی بهبود عملکرد سیستم کنترلی اینورتر متصل به شبکه انجام شده است، در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول، مراجع مورد مقایسه از حیث استراتژی کنترلی، بررسی تأخیر در فرایند کنترلی، بررسی پایداری در برابر تغییر امپدانس شبکه و میزان THD جریان تزریقی به شبکه در شرایط مقاله مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مطابق این جدول، برخی از موارد مذکور در مراجع مورد مقایسه لحاظ شده و برخی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در مقاله حاضر تمام موارد مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ضمن میزان THD جریان تزریقی به شبکه تحت شرایط فرض شده مرجع مدنظر نیز در جدول (۳) ارائه شده است. شایان ذکر است، ارائه میزان THD صرفا جهت تکمیل اطلاعات ارائه شده و مقایسه مقادیر THD با یکدیگر به دلیل تفاوت شرایط لحاظ شده در هر مرجع قابل استناد نیست.

جدول ۳. مقایسه روش پیشنهادی با مقالات ارائه شده اخیر

	(Faiz et al, 2020)	(Bimarta and Kim, 2020)	(Kim and Kim, 2019)	(Dragičević et al, 2020)	(حسین‌پور و همکاران، ۱۴۰۱)	روش پیشنهادی
استراتژی کنترلی	فیدبک ولتاژ خازن	کنترل جریان LMI-LQR	فیدبک جریان سمت شبکه	کنترل جریان شبه پیش‌بین	میراساز فعال جریان خازنی	فیدبک جریان سمت شبکه
تاثیر تأخیر	✓	✓	×	✓	✓	✓
بررسی پایداری در برابر تغییر امپدانس شبکه	✓	✓	✓	✓	✓	✓
THD جریان سمت شبکه (گزارش شده در شرایط مرجع مدنظر)	٪ ۳/۴۷	٪ ۲/۴۳	٪ ۴/۸۲	٪ ۲/۱۵	٪ ۱/۳۹	٪ ۱/۲۵

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای کاهش اعوجاج هارمونیکی ولتاژ و جریان تولیدی سلول‌های فتوولتائیک متصل به شبکه از فیلتر LCL استفاده شده

است. برای دستیابی به میرایی تشدید فیلتر LCL از استراتژی کنترل فیدبک جریان سمت اینورتر و جریان سمت شبکه استفاده شده است که علاوه بر میرایی تشدید ناشی از فیلتر LCL، بهبود کیفیت جریان تزریقی نیز حاصل شده است. بر اساس معیار Routh-Hurwitz دامنه پارامترهای تنظیم کننده جریان سیستم کنترل پیشنهادی تعیین شده است. نمودارهای bode سیستم اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با فیلتر LCL، با تغییرات پارامترهای LCL و شبکه ضعیف تحت استراتژی پیشنهادی و استراتژی مرسوم ترسیم شد. با تغییر مقادیر سلف و خازن فیلتر در روش پیشنهادی نشان داده شد که سیستم از پایداری مطلوبی برخوردار است. در شبکه ایده‌ال مقدار THD جریان سمت شبکه در کنترل پیشنهادی ۱۱/۲۵٪ است و همچنین تحت شبکه ضعیف مقدار THD جریان سمت شبکه در کنترل پیشنهادی ۱۱/۳۵٪ است. برای بررسی قابلیت پایداری سیستم و تامین نیازمندی‌های سیستم، سیستم با تأخیر زمانی طراحی شده است. در مقایسه با روش میرایی فعال مرسوم (فیدبک جریان خازن)، روش پیشنهادی حاشیه پایداری بیشتر، THD کمتر جریان‌های سمت شبکه و اینورتر ارائه کرده است. تحلیل پایداری روش کنترل پیشنهادی به ازای تغییرات زیاد اندوکتانس شبکه و همچنین تحلیل حساسیت سیستم تحت بررسی به ازای تغییر مقادیر سلف LCL بیانگر پایداری مناسب سیستم در مقادیر تغییر پارامترهای شبکه و فیلتر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی صحت تجزیه و تحلیل استراتژی پیشنهادی در شبکه ایده‌آل با اندوکتانس شبکه صفر و شبکه غیر ایده‌آل با اندوکتانس شبکه قابل توجه تأیید می کند. استراتژی کنترل پیشنهادی عملکرد مطلوبی در انتقال توان سیستم فتوولتائیک به شبکه دارد و دینامیک مطلوب سیستم کنترلی به ازای تغییرات ورودی آرایه فتوولتاییک در نتایج نشان داده شده است.

مراجع

حسین‌پور مجید، اسد ماهستان، موسوی اقدم سیدرضا. بهبود پایداری سیستم اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL مبتنی بر میراساز فعال جریان خازنی با کاهش تأخیرهای محاسباتی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۴۰۲; ۲۰ (۱): ۱۴۲-۱۲۹

Aalizadeh, F., Hosseinpour, M., Dejamkhooy, A., Shayeghi, H., “Two-Stage Control for Small-Signal Modeling and Power Conditioning of Grid- Connected Quasi-Z-Source Inverter with LCL Filter for Photovoltaic Generation”, Journal of Operation and Automation in Power Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 242-255, 2021.

Banaei, M. R., Bonab, H. A. F., “A Novel Structure for Single-Switch Non isolated Trans former less Buck–Boost DC–DC Converter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, pp. 198-205, 2017.

Bhattacharyya, Shamik, Susovon Samanta, and Sukumar Mishra. "Steady output and fast tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC algorithms." IEEE Transactions on Sustainable Energy 12.1 (2020): 293-302.

Bimarta R., and K.-H. Kim, “A Robust Frequency-Adaptive Current Control of a Grid-Connected Inverter Based on LMI-LQR Under Polytopic Uncertainties,” IEEE Access, vol. 8, pp. 28756-28773, 2020.

Chen, T., Lee, C. K., Hui, S. R., “A General Design Procedure for Multi-Parallel Modular Grid-Tied Inverters System to Prevent Common and Interactive Instability”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 7, pp. 6025 - 6030, 2019.

Ding, Xin, et al. "Robust Delay Compensation Strategy for LCL-Type Grid-Connected Inverter in Weak Grid." IEEE Access 10 (2022): 67639-67652.

Dragičević, T., C. Zheng, J. Rodriguez, and F. Blaabjerg, “Robust Quasi-Predictive Control of LCL-Filtered Grid Converters”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 2, 2020, pp.1934-1946.

Faiz, M. T., M.M. Khan, X. Jianming, M. Ali, S. Habib, K. Hashmi, and H. Tang, “Capacitor Voltage Damping Based on Parallel Feedforward Compensation Method for LCL Filter Grid-Connected Inverter,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 1, 2020, pp. 837-849.

Fang, T., Shen, S., Zhang, L., Jin, Y., & Huang, C. (2021). Capacitor current feedback with phase-lead compensator to eliminate resonant frequency forbidden region for LCL-type grid-connected inverter in weak grid. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9(5), 5

Guan, Y., Wang, Y., Xie, Y., Liang, Y., Line, A., Wang, X., “The Dual-Current control Strategy of Grid-Connected Inverter With LCL Filter”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5940 - 5952, 2019.

He, Yuying, et al. "Hybrid active damping combining capacitor current feedback and point of common coupling voltage feedforward for LCL-type grid-connected inverter." IEEE Transactions on Power Electronics 36.2 (2020): 2373-2383.

Hou, T., Zhang, C. Y., Niu, H. X., “Quasi-Z source inverter control of PV grid-connected based on fuzzy PCI”, Journal of Electronic Science and Technology, vol. 19, no. 3, pp. 1-12, 2021.

Kim, Y.J., and H. Kim, “Optimal design of LCL filter in grid-connected inverters”. IET Power Electronics, Vol. 12, No. 7, 2019, pp.1774-1782.

Kumar, A. N., Raglend, I. J., “Multi-objective Control of Multi-Operational Grid-Integrated Inverter for PV Integration and Power Quality Service”, Ain Shams Engineering Journal, vol. 12, no. 3, pp. 2859-2874, 2021.

Li, Shaojie, and Hua Lin. "A capacitor-current-feedback positive active damping control strategy for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness." IEEE Transactions on Power Electronics 37.6 (2021): 6462-6474.

Liu, B., Wei, Q., Zou, C., Duan, S., “Stability analysis of LCL-type grid- connected inverter under single-loop inverter-side current control with capacitor voltage feedforward”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, pp. 691–702, 2018.

Ma, Wenjie, et al. "Active disturbance rejection control based single current feedback resonance damping strategy for LCL-type grid-connected inverter." IEEE Transactions on Energy Conversion 36.1 (2020): 48-62.

Pan, Donghua, et al. "Optimized controller design for $ LCL $-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid-impedance variation." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62.3 (2014): 1537-1547.

Rasekh, N., Hosseinpour, M., "LCL filter design and robust converter side current feedback control for grid-connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell system", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 23, pp.13055-13067, 2020.

Rasekh, N., Hosseinpour, M., Dejamkhooy, A., Akbarimajd, A., "Robust power conditioning system based on LCL-type quasi-Y-source inverter for grid connection of photovoltaic arrays" International Journal of Automation and Control, vol. 15, no. 6, pp. 692-709, 2021.

Rasekh, N., Hosseinpour, M., "Adequate tuning of LCL filter for robust performance of converter side current feedback control of grid connected modified–Y-source inverter", International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization, vol. 3, no. 3, pp. 365-378, 2020.

Xie, Chuan, et al. "Passivity-based stabilization of LCL-type grid-connected inverters via a general admittance model." IEEE Transactions on Power Electronics 35.6 (2019): 6636-6648.

Zhao, Tieying, Junran Li, and Ning Gao. "Capacitor-Current-Feedback With Improved Delay Compensation for LCL-Type Grid-Connected Inverter to Achieve High Robustness in Weak Grid." IEEE Access 10 (2022): 127956-127968.

Zhang, Hao, et al. "Capacitor voltage full feedback scheme for LCL-type grid-connected inverter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics." IEEE Transactions on Power Electronics 36.3 (2020): 2996-3006.