بررسی تأثیر روش‌های سنکرون‌سازی بر پایداری سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه

سعید جلالی عاشق آبادی [1] ، دانشجوی دکتری، عباس کتابی[2]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
s.jalali@grad.kashanu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان- ایران
aketabi@kashanu.ac.ir

چکیده: با توجه به استفاده روزافزون از ریزشبکه‌ها، بررسی پایداری آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از معایب منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر نسبت به ژنراتور سنکرون این است که برای اتصال به شبکه، نیاز به داشتن اطلاعات فرکانس و فاز در نقطه اتصال به شبکه در هر لحظه می‌باشد که این کار با استفاده از روش‌های سنکرون‌سازی انجام می‌شود. در این مقاله به بررسی تأثیر روش‌های مختلف سنکرون‌سازی شامل روش‌های SRF-PLL، اینرسی مجازی و K ثابت بر پایداری اینورترهای متصل به شبکه پرداخته شده است. با توجه به اینکه عواملی نظیر هارمونیک‌ها، توالی منفی ولتاژ شبکه، افزایش امپدانس شبکه، تغییرات فرکانس شبکه و تغییرات شدت تابش خورشید از دلایل ناپایداری هستند، یک سناریو کلی شامل این عوامل برای تعیین کمترین مقدار خازن لینک DC با حفظ پایداری سیستم در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی تعریف شده است. تعیین کمترین مقدار خازن لینک DC برای حفظ پایداری سیستم بصورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شده که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل شده و پایداری سیستم با آنالیز مقادیر ویژه بررسی شده است.

واژه های کلیدی: پایداری ریز شبکه، روش‌های سنکرون سازی، روش SRF-PLL، روش K ثابت، روش اینرسی مجازی، مقادیر ویژه.

تاریخ ارسال مقاله ۹۷/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۳/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول : عباس کتابی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – کاشان – کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی – دانشگاه کاشان – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

۱- مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده مانند نیروگاه‌های خورشیدی و بادی به دلایل اقتصادی، زیست محیطی و توسعه فناوری در حال افزایش می‌باشد [۱]. این امر موجب افزایش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود قابلیت اطمینان سیستم و کاهش تلفات انتقال انرژی می‌شود [۲]. از طرفی افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده، رفتار سیستم توزیع را تحت تأثیر قرار داده و بر پایداری و عملکرد دینامیکی آن نیز موثر است [۳-۵].

در [۴، ۶-۱۰] مطالعاتی به منظور بررسی پایداری ولتاژ کوتاه مدت از طریق ترزیق توان راکتیو توسط PV انجام شده است. پایداری گذرای سیستم قدرت در [۱۱-۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه پایداری گذرای یک سیستم قدرت شامل PV در [۱۲و ۱۳] بررسی شده است. در [۱۴] پایداری گذرای ریزشبکه دارای ژنراتور القایی، ژنراتور سنکرون و مبدل‌های الکترونیک قدرت و متصل به شبکه توزیع مطالعه شده است.

در [۱۵] با استفاده از یک روش تحلیل سیگنال کوچک احتمالی، به بررسی تأثیر احتمالی تولید سیستم PV روی پایداری دینامیکی سیستم PV متصل به شبکه و همچنین بررسی حساسیت مقادیر ویژه بحرانی به تغییرات شدت تابش خورشید پرداخته شده است. در [۱۶] بر اساس مدل سیگنال کوچک سیستم قدرت، تأثیر تولید PV بر عملکرد میرایی نوسانات مودهای محلی بررسی شده است. تاثیر عوامل غیر خطی مانند تاخیر زمانی و SRF-PLL با ارائه مدل امپدانسی برای آنها، روی پایداری و کیفیت توان سیستم در [۱۷] بررسی شده است. در [۱۸] و [۱۹] به تحلیل، مدلسازی و طراحی استراتژی کنترلی برای یک سیستم فتوولتائیک سه‌فاز متصل به شبکه توزیع به ترتیب مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ[۱] (VSC) و مبدل منبع جریان[۲] (CSC) در دستگاه مرجع dq پرداخته شده است. بررسی پایداری ولتاژ داخلی VSC (ولتاژ خروجی VSC ناشی از کلیدزنی سوئیچ‌ها) در کنترل ولتاژ لینک DC توسط مدل سیگنال کوچک در [۲۰] انجام شده است. همچنین در [۲۰] از مفاهیم اینرسی، میرایی و سنکرون‌سازی ماشین سنکرون برای کنترل ولتاژ لینک DC در حضور SRF-PLL استفاده شده است.

در [۲۱] و [۲۲] به مدلسازی یک ماشین سنکرون مجازی معادل با نیروگاه PV متصل به شبکه و چگونگی کنترل مبدل توان به عنوان یک ماشین سنکرون مجازی پرداخته شده است. البته با وجود انجام تحقیقات زیادی درباره مزایای کنترل مبدل‌های متصل به شبکه مبتنی بر ماشین سنکرون، با پیروی از ویژگی‌های مهم ماشین سنکرون از جمله سنکرون‌سازی، اینرسی مجازی[۳] و میرایی [۲۱]، تاکنون مطالعه‌ای روی بررسی پایدرای سیستم در برابر تغییرات شرایط و پارامترهای مختلف مانند وجود هارمونیک‌ها و توالی منفی در ولتاژ شبکه، افزایش امپدانس شبکه، تغییرات شدت تابش خورشید و تغییرات فرکانس شبکه مخصوصا در روش‌های سنکرون‌سازی با شبکه مبتنی بر ماشین سنکرون انجام نشده است. بنابراین با اعمال و تطبیق روش‌های ارائه شده در [۲۱] و [۲۲]، در یک سیستم فتولتائیک شامل مبدل VSC متصل به شبکه، می‌توان از ویژگی سنکرون‌سازی ماشین سنکرون، به منظور تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم استفاده نموده و به مقایسه عملکرد و پایداری هر یک از این روش‌ها در برابر تغییرات پارامترهای سیستمی و محیطی شبکه با روش متعارف SRF-PLL در سیستم PV متصل به شبکه پرداخت.

در مطالعات قبلی تاثیر عوامل ناپایدار کننده سیستم مانند تغییرات شدت تابش خورشید، تغییرات فرکانس و تغییرات امپدانس شبکه، هر کدام به تنهایی در شرایط متعادل شبکه بررسی شده است. اما با توجه به وجود هارمونیک و عدم تعادل در شبکه، در نظر گرفتن این عوامل در بررسی پایداری سیستم امری لازم و ضروری است. از طرف دیگر می‌دانیم مقدار خازن لینک DC علاوه بر پایداری در کاهش هزینه مبدل و بهبود قابلیت اطمینان سیستم نقش موثری دارد ولی تاکنون در مقالات قبلی به این موضوع پرداخته نشده است. بنابراین در این مقاله با در نظر گرفتن یک سناریو برای تغییرات عوامل موثر در ناپایداری سیستم از جمله وجود هارمونیک و عدم تعادل در ولتاژ شبکه، تغییرات شدت تابش خورشید، تغییرات فرکانس شبکه و افزایش اندوکتانس شبکه، و با استفاده از یک مساله بهینه‌سازی به تعیین مقدار بهینه خازن لینک DC با شرط حفظ پایداری سیستم پرداخته شده است. همچنین کاربرد وسیع روش SRF-PLL در سیستم‌های قدرت برای سنکرون‌سازی با شبکه، موجب شده است که سایر روش‌های سنکرون‌سازی از جمله روش‌های مبتنی بر ماشین سنکرون کمتر مورد مطالعه قرار گیرند. لذا بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف سنکرون‌سازی شامل روش SRF-PLL، روش K ثابت و روش اینرسی مجازی نیز در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

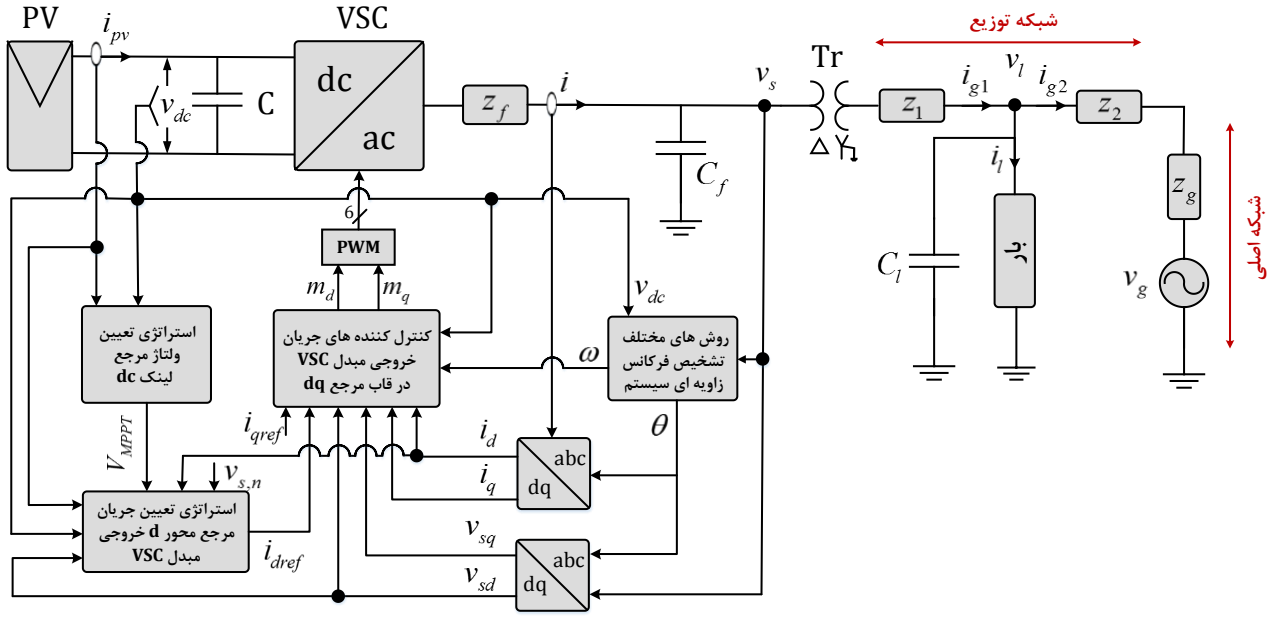
در بخش ۲ مقاله معادلات جبری و دیفرانسیلی حاکم بر بخش‌های مختلف سیستم بیان می‌شود. در بخش ۳ به معرفی روش‌های مختلف سنکرون سازی با شبکه و چگونگی استفاده و تطبیق این روش‌ها با سیستم PV متصل به شبکه پرداخته شده است. روش‌های سنکرون-سازی تعمیم یافته در بخش ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه کاهش مقدار خازن لینک DC دارای توجیه اقتصادی می‌باشد، کمترین مقدار خازن لینک DC به شرط عملکرد صحیح و حفظ پایداری سیستم در روش‌های مختلف سنکرون‌سازی با شبکه، تحت یک مساله بهینه‌سازی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات[۴] (PSO) به ازای یک سناریو کلی از عوامل موثر در ناپایداری سیستم در بخش ۵ بدست آورده شده است. در نهایت در بخش ۶ نتایج حاصل از این مطالعه بیان شده است.

۲- ساختار سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

در این مقاله به تحلیل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه که بلوک

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]



شکل (۱): دیاگرام تک خطی شبکه قدرت شامل سیستم PV

دیاگرام تک خطی آن در شکل (۱) نشان داده شده است، پرداخته می-شود. بدین منظور در ادامه معادلات جبری و دیفرانسیل حاکم بر قسمت‌های مختلف برای مدلسازی سیستم PV متصل به شبکه به صورت سیگنال بزرگ، استخراج می‌شود.

۲-۱- مدلسازی سیستم فتوولتائیک

مشخصه جریان - ولتاژ مجموعه پنل‌های PV به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۸، ۱۹].

$$i_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{rs}\left(e^{\frac{qv_{dc}}{kTAn_s}} - 1\right) \qquad (۱)$$

رابطه (۲) نشان می‌دهد که I_{ph} تابعی از دما است و دارای رابطه خطی با شدت تابش خورشید می‌باشد [۱۸، ۱۹، ۲۳].

$$I_{ph} = \left[I_{scr} + k_T\left(T - T_r\right)\right]\frac{S}{100} \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه (۱) توان تولیدی توسط مجموعه پنل‌های PV به صورت رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$P_{pv} = v_{dc} i_{pv} = n_p I_{ph} v_{dc} - n_p I_{rs} v_{dc}\left(e^{\frac{qv_{dc}}{kTAn_s}} - 1\right) \qquad (۳)$$

که در روابط (۱-۳)، n_p تعداد رشته‌های موازی، n_s تعداد سلول PV سری شده هر رشته، P_{pv} توان تولیدی مجموعه پنل‌های PV، v_{dc} ولتاژ لینک dc، i_{pv} جریان مجموعه پنل‌های PV، I_{ph} جریان اتصال کوتاه یک رشته PV، I_{scr} جریان اتصال کوتاه یک سلول PV در دما و شدت تابش استاندارد، I_{rs} جریان اشباع معکوس پیوند p-n سلول خورشیدی، S شدت تابش خورشید، T دمای پیوند p-n سلول خورشیدی بر حسب کلوین، T_r دمای مرجع سلول PV، k_T ضریب دمایی، A ضریب ایده‌آل پیوند p-n وابسته به تکنولوژی سلول PV، $q = 1.602\times10^{-19}(C)$ بار الکتریکی و $k = 1.38\times10^{-23}(J/K)$ ثابت بولتزمن می‌باشند.

۲-۲- کنترل جریان مبدل VSC

کنترل جریان خروجی مبدل منبع ولتاژ (VSC) و حفاظت آن در برابر اضافه جریان‌ها و همچنین خطاهای احتمالی رخ داده در سیستم، توسط محدود کردن جریان محورهای d و q خروجی مبدل VSC انجام می‌شود. بر اساس [۱۸]، سیگنال‌های کنترلی m_d و m_q به صورت روابط (۴) و (۵) در نظر گرفته می‌شوند:

$$m_d = \frac{2}{v_{dc}}\left(u_d - L\omega i_q + v_{sd}\right) \qquad (۴)$$

$$m_q = \frac{2}{v_{dc}}\left(u_q + L\omega i_d + v_{sq}\right) \qquad (۵)$$

که u_d و u_q به ترتیب با عبور سیگنال‌های خطای $e_d = i_{dref} - i_d$ و $e_q = i_{qref} - i_q$ از یک کنترل کننده PI بدست می‌آیند که روابط آنها در حوزه زمان به صورت روابط (۶) تا (۹) مشخص می‌شوند:

$$\frac{dx_1}{dt} = k_{Iu}\left(i_{dref} - i_d\right) \qquad (۶)$$

$$u_d = k_{Pu}\left(i_{dref} - i_d\right) + x_1 \qquad (۷)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = k_{Iu}\left(i_{qref} - i_q\right) \qquad (۸)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

$$u_q = k_{Pu}\left(i_{qref} - i_q\right) + x_2 \qquad (۹)$$

بنابراین با در نظر گرفتن ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده PI، به ترتیب برابر با $k_{Pu} = \frac{L}{\tau}$ و $k_{Iu} = \frac{R}{\tau}$ می‌توان معادلات محورهای d و q جریان خروجی مبدل VSC را به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) بیان نمود [۱۸، ۲۴].

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(i_{dref} - i_d\right) \qquad (۱۰)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(i_{qref} - i_q\right) \qquad (۱۱)$$

در روابط (۴) تا (۱۱)، v_{sd} و v_{sq} به ترتیب ولتاژ محورهای d و q نقطه PCC[Δ]، τ ثابت زمانی و مقدار آن برابر ۰/۵ میلی ثانیه، i_d و i_q به ترتیب جریان محورهای d و q خروجی مبدل VSC، i_{dref} و i_{qref} به ترتیب جریان مرجع محورهای d و q خروجی مبدل VSC و R و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس امپدانس فیلتر خروجی مبدل VSC می‌باشد. توان حقیقی (P_s) و موهومی (Q_s) دریافتی از سیستم PV در نقطه PCC و در قاب مرجع dq، با تنظیم ولتاژ v_{sq} روی مقدار صفر توسط روش‌های مختلف سنکرون‌سازی با شبکه که در بخش ۳ مطرح خواهند شد، به ترتیب با روابط (۱۲) و (۱۳) مشخص می‌شوند.

$$P_s = \frac{3}{2} v_{sd} i_d \qquad (۱۲)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} v_{sd} i_q \qquad (۱۳)$$

بنابراین با توجه به روابط (۱۲) و (۱۳)، می‌توان توان‌های حقیقی و موهومی دریافتی در نقطه PCC و همچنین ضریب توان سیستم PV را توسط جریان‌های محور d و q خروجی مبدل VSC کنترل نمود.

۲-۳- استراتژی کنترل سیستم PV

دینامیک ولتاژ لینک DC را می‌توان بر اساس تعادل توان DC به صورت رابطه (۱۴) بیان نمود [۱۸، ۲۵] :

$$\frac{C}{2}\frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_{pv} - P_{dc} \qquad (۱۴)$$

که در آن C و P_{dc} به ترتیب خازن لینک DC و توان تحویل داده شده به سمت DC مبدل VSC است. با صرفنظر از تلفات مبدل VSC، توان خروجی سمت AC مبدل VSC برابر با توان P_{dc} می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$P_{dc} \approx P_t = \frac{3}{2}\left(v_{td} i_d + v_{tq} i_q\right) \qquad (۱۵)$$

P_t توان خروجی سمت AC مبدل VSC و v_{td} و v_{tq} به ترتیب ولتاژ محورهای d و q خروجی مبدل VSC است. با توجه به روابط (۱۱) و (۱۳) و همچنین در نظر گرفتن ضریب توان واحد برای سیستم PV در نقطه اتصال به شبکه، با تنظیم i_{qref} در مقدار صفر، مقدار جریان محور q خروجی مبدل VSC در حالت دائمی صفر می‌شود. بنابراین در شرایط عملکرد در ضریب توان واحد، رابطه (۱۵) به رابطه (۱۶) تبدیل می‌شود.

$$P_{dc} \approx P_t = \frac{3}{2} v_{td} i_d \qquad (۱۶)$$

که ولتاژ v_{td} با رابطه (۱۷) بدست می‌آید.

$$v_{td} = v_{sd} + R i_d \qquad (۱۷)$$

روابط (۱۴) تا (۱۷) اهمیت جریان محور d خروجی مبدل VSC، در تنظیم ولتاژ لینک DC را نشان می‌دهند. همچنین رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که تعیین مقدار i_{dref} در تنظیم جریان محور d خروجی مبدل VSC و در نتیجه تنظیم ولتاژ لینک DC و پایداری سیستم نقش موثری دارد. در [۱۸] جریان i_{dref} با رابطه (۱۸) مشخص شده است.

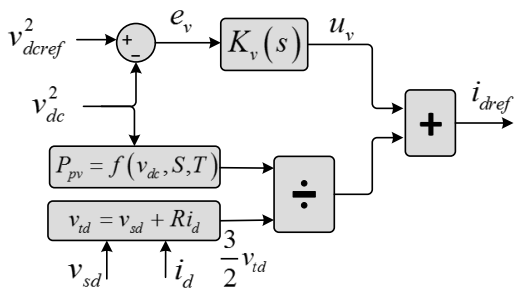
$$i_{dref} = \frac{P_{pv}}{(3/2)v_{td}} + u_v \qquad (۱۸)$$

که در رابطه (۱۸)، u_v با عبور سیگنال خطای ولتاژ لینک DC $\left(e_{v_{dc}} = v_{dcref}^2 - v_{dc}^2\right)$ از یک جبران کننده، بدست می‌آید. این جبران کننده شامل یک کنترل کننده PI، به ترتیب با ضرایب تناسبی و انتگرالی α_1 و α_2 و یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول با قطب تابع انتقال $\alpha_3 = 909$ است. بنابراین سیگنال u_v به کمک روابط (۱۹) و (۲۰) بدست می‌آید.

$$\frac{dx_3}{dt} = \alpha_2\left(v_{dcref}^2 - v_{dc}^2\right) \qquad (۱۹)$$

$$\frac{du_v}{dt} = \alpha_1\left(v_{dcref}^2 - v_{dc}^2\right) + x_3 - \alpha_3 u_v \qquad (۲۰)$$

بلوک دیاگرام تعیین جریان مرجع محور d خروجی مبدل VSC در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): استراتژی تنظیم جریان مرجع محور d خروجی مبدل VSC

با در نظر گرفتن روش MPPT[۶] ضمن بهره‌برداری بهینه از سیستم PV، می‌توان تأثیر عوامل محیطی مختلف از جمله تغییرات شدت تابش خورشید را روی عملکرد و پایداری سیستم PV بررسی نمود. بنابراین در این حالت عملکردی در VSCها خروجی سیستم کنترل

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

MPPT به عنوان ولتاژ مرجع لینک DC در نظر گرفته می‌شود [۲۶، ۲۷]. در نتیجه توان مرجع و ولتاژ مرجع لینک DC سیستم PV در حالت دائمی به ترتیب در P_{MPPT} و V_{MPPT} تنظیم می‌شوند [۲۸].

$$P_{pvref} = P_{MPPT} \quad (۲۱)$$

$$V_{dcref} = V_{MPPT} \quad (۲۲)$$

۲-۴- مدل شبکه توزیع

معادلات دیفرانسیل حاکم بر شبکه شکل ۱ در قاب مرجع dq را می‌توان با روابط (۲۳) تا (۳۱) بیان نمود.

$$C_f \frac{dv_{sd}}{dt} = i_d - Ni_{g1d} + C_f \omega v_{sq} \quad (۲۳)$$

$$C_f \frac{dv_{sq}}{dt} = i_q - Ni_{g1q} - C_f \omega v_{sd} \quad (۲۴)$$

$$C_l \frac{dv_{ld}}{dt} = i_{g1d} - i_{g2d} - i_{ld} + C_l \omega v_{lq} \quad (۲۵)$$

$$C_l \frac{dv_{lq}}{dt} = i_{g1q} - i_{g2q} - i_{lq} + C_l \omega v_{ld} \quad (۲۶)$$

$$\frac{di_{g1d}}{dt} = \frac{-(R_1 + R_{Tr})i_{g1d} + (L_1 + L_{Tr})\omega i_{g1q} + Nv_{sd} - v_{ld}}{(L_1 + L_{Tr})} \quad (۲۷)$$

$$\frac{di_{g1q}}{dt} = \frac{-(R_1 + R_{Tr})i_{g1q} - (L_1 + L_{Tr})\omega i_{g1d} + Nv_{sq} - v_{lq}}{(L_1 + L_{Tr})} \quad (۲۸)$$

$$\frac{di_{g2d}}{dt} = \frac{-(R_2 + R_g)i_{g2d} + (L_2 + L_g)\omega i_{g2q} + v_{ld} - \hat{v}_g \cos(\varphi)}{(L_2 + L_g)} \quad (۲۹)$$

$$\frac{di_{g2q}}{dt} = \frac{-(R_2 + R_g)i_{g2q} - (L_2 + L_g)\omega i_{g2d} + v_{lq} - \hat{v}_g \sin(\varphi)}{(L_2 + L_g)} \quad (۳۰)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 - \omega \quad (۳۱)$$

در روابط (۲۳-۳۱)، v_{ld} و v_{lq} به ترتیب ولتاژ محورهای d و q بار سیستم، i_{ld} و i_{lq} به ترتیب جریان محورهای d و q بار سیستم، i_{g1d} و i_{g1q} به ترتیب جریان محورهای d و q خط توزیع بین نقطه PCC و بار، i_{g2d} و i_{g2q} به ترتیب جریان محورهای d و q خط توزیع بین بار و شبکه اصلی، R_g و L_g به ترتیب مقاومت و اندوکتانس امپدانس شبکه، R_1 و L_1 به ترتیب مقاومت و اندوکتانس بین نقطه PCC و بار، R_2 و L_2 به ترتیب مقاومت و اندوکتانس بین بار و شبکه اصلی، R_{Tr} و L_{Tr} به ترتیب مقاومت و اندوکتانس ترانسفورماتور قدرت Tr، N نسبت تبدیل ترانسفورماتور قدرت Tr، C_f و C_l به ترتیب خازن اصلاح ضریب توان بار و خازن فیلتر خروجی مبدل VSC، $\hat{v}_g$ و θ به ترتیب اندازه و زاویه ولتاژ شبکه اصلی، ω_0 و ω به ترتیب فرکانس زاویه‌ای شبکه و فرکانس زاویه‌ای قاب مرجع dq می‌باشند.

۲-۵- مدل بار RL سری

معادلات فضای حالت جریان بار RL سری در قاب مرجع dq با روابط (۳۲) و (۳۳) بیان می‌شوند [۱۸].

$$L_l \frac{di_{ld}}{dt} = -R_l i_{ld} + v_{ld} + L_l \omega i_{lq} \quad (۳۲)$$

$$L_l \frac{di_{lq}}{dt} = -R_l i_{lq} + v_{lq} - L_l \omega i_{ld} \quad (۳۳)$$

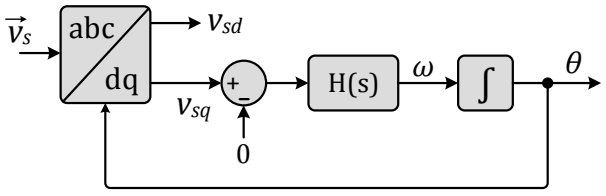
که R_l و L_l به ترتیب مقاومت و اندوکتانس بار سیستم است.

۳- تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم

سیگنال‌های AC سه‌فاز شبکه نشان داده شده در شکل (۱)، در فرکانس ω_0 شبکه با زمان تغییر می‌کنند. بنابراین در صورتی که ω فرکانس زاویه‌ای قاب مرجع dq برابر با ω_0 باشد، متغیرهای قاب مرجع dq در حالت دائمی نسبت به زمان ثابت می‌شوند. برای دست‌یابی به این هدف از سه روش سنکرون‌سازی با شبکه برای تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم استفاده و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۱- روش SRF-PLL

یکی از تکنیک‌های مرسوم و پرکاربرد تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم‌های قدرت برای سنکرون‌سازی با شبکه، استفاده از روش SRF-PLL به دلیل داشتن ساختار ساده و مقاوم می‌باشد[۲۹]. از شکل (۳) که بلوک دیاگرام SRF-PLL را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد در SRF-PLL، ابتدا ولتاژ نقطه اتصال به شبکه یعنی $\vec{v}_s$ به مولفه‌های محور d و q تجزیه شده و سپس با پردازش v_{sq} توسط جبران‌کننده $H(s)$، سرعت زاویه‌ای ω تعیین می‌شود [۱۸، ۱۹]. بنابراین موقعیت زاویه‌ای (θ) قاب مرجع dq با تنظیم مولفه محور q ولتاژ در مقدار صفر توسط حلقه فیدبک، کنترل می‌شود [۳۰].



شکل (۳): بلوک دیاگرام SRF-PLL

جبران کننده $H(s)$ از یک کنترل‌کننده PI و یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع $\beta_3 = 600$ تشکیل شده است. با پیروی از مدل فضای حالت، معادلات حاکم بر SRF-PLL را می‌توان به صورت روابط (۳۴) تا (۳۶) نوشت.

$$\frac{d\zeta}{dt} = \beta_2 v_{sq} \quad (۳۴)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \beta_1 v_{sq} + \zeta - \beta_3 \omega \quad (۳۵)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

$$\frac{d\theta}{dt}=\omega \qquad (۳۶)$$

در روابط (۳۴) تا (۳۶)، $k_{P\omega}=\beta_1/\beta_3$ و $k_{I\omega}=\beta_2/\beta_3$ به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده PI می‌باشند.

۳-۲- روش K ثابت

روش K ثابت و روش اینرسی مجازی از دیگر روش‌های سنکرون‌سازی اینورترها با شبکه می‌باشند. اساس این روش‌های سنکرون‌سازی از مقایسه سیستم PV با ماشین سنکرون بدست می‌آید. هنگامی که یک ژنراتور سنکرون متصل به شبکه می‌باشد، تغییرات فرکانس زاویه‌ای شبکه را با خطای حالت دائمی صفر دنبال می‌کند. این نه تنها ناشی از تنظیم دقیق سرعت توربین بلکه ناشی از ویژگی سنکرون‌سازی ماشین سنکرون می‌باشد. اگر فرکانس زاویه‌ای شبکه ω_0 تغییر کند، این تغییر توسط فرکانس زاویه‌ای رتور ω ژنراتور سنکرون به طور دقیق دنبال می‌شود و دلیل این امر چیزی جز تعادل توان نیست [۲۱]. از طرفی تعادل توان در سیستم PV موجب تنظیم ولتاژ لینک DC می‌شود. بنابراین می‌توان به منظور استفاده از این روش‌های سنکرون‌سازی در سیستم PV از ولتاژ لینک DC برای تشخیص فرکانس زاویه‌ای شبکه استفاده نمود.

در روش K ثابت، ω فرکانس زاویه‌ای سیستم با استفاده از ولتاژ لینک DC به صورت رابطه (۳۷) بدست می‌آید [۲۱].

$$\frac{d\theta}{dt}=\omega \quad , \quad v_{dc}=K\omega \qquad (۳۷)$$

وجود ضریب K در رابطه (۳۷) ناشی از این است که ولتاژ لینک DC، K برابر فرکانس زاویه‌ای شبکه $\left(v_{dc}=K\omega_0\right)$ می‌باشد. بنابراین هر تغییری در فرکانس زاویه‌ای شبکه، تغییر کاملاً مشابهی در ولتاژ لینک DC ایجاد خواهد کرد [۲۲]. عملکرد صحیح این روش به شدت تحت تأثیر مقدار پارامتر K می‌باشد. بنابراین به منظور داشتن عملکرد صحیح، تنظیم پارامتر K به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

با توجه به اینکه انتظار می‌رود فرکانس زاویه‌ای سیستم که توسط این روش تشخیص داده می‌شود، در حالت دائمی برابر فرکانس شبکه یعنی ω_0 باشد و همچنین مقدار ولتاژ لینک DC که توسط توان تولیدی سیستم PV و تعادل توان در شبکه که با تعقیب ولتاژ مرجع لینک DC بدست می‌آید، در حالت دائمی برابر با $v_{dc,ref}$ می‌شود، می‌توان مقدار پارامتر K را به صورت رابطه (۳۸) بدست آورد.

$$K=\frac{v_{dc,ref}}{\omega_0} \qquad (۳۸)$$

یکی از مزایای انتخاب پارامتر K با استفاده از $v_{dc,ref}$ به صورت رابطه (۳۸)، تنظیم خودکار این پارامتر با تغییر شرایط عملکردی سیستم می‌باشد.

۳-۳- روش اینرسی مجازی

روش اینرسی مجازی یکی دیگر از روش‌های سنکرون‌سازی با عملکرد مبتنی بر تعادل توان در سیستم می‌باشد. بر اساس [۲۱] ارتباط ولتاژ لینک DC و فرکانس زاویه‌ای سیستم به صورت رابطه (۳۹) بدست می‌آید.

$$J\frac{d\omega}{dt}=C\frac{dv_{dc}}{dt}+Yv_{dc}-k_f\omega \qquad (۳۹)$$

این روش دارای ۳ پارامتر قابل تنظیم J ، Y و k_f می‌باشد که باید مقدار آنها به طور صحیح تنظیم شوند. با اعمال روش پیشنهادی در زیر می‌توان انتظار عملکردی صحیح در تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم، از این روش داشت.

برای تنظیم صحیح پارامترهای روش اینرسی مجازی، رابطه (۳۹) در حالت دائمی بررسی می‌شود. با توجه به اینکه در حالت دائمی ولتاژ لینک DC و فرکانس زاویه‌ای سیستم به ترتیب برابر با $v_{dc,ref}$ و ω_0 می‌باشند و در نظر گرفتن این نکته که در حالت دائمی مقادیر متغیرها ثابت می‌شوند، بنابراین در حالت دائمی رابطه (۳۹) به رابطه (۴۰) تبدیل می‌شود.

$$0=Yv_{dc,ref}-k_f\omega_0 \quad \Rightarrow \quad k_f=\frac{v_{dc,ref}}{\omega_0}Y \qquad (۴۰)$$

رابطه (۴۰) نشان می‌دهد که پارامترهای Y و k_f به یکدیگر وابسته بوده و با انتخاب یکی از آنها، پارامتر دیگر با استفاده از این رابطه بدست می‌آید. بنابراین تعداد پارامترهای انتخابی این روش به ۲ پارامتر J و Y کاهش می‌یابد که برای انتخاب بهینه این پارامترها با توجه به اهداف سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند PSO استفاده می‌شود.

۴- تعمیم مدل ارائه شده

به منظور شبیه‌سازی سیستم علاوه بر معادلات دینامیکی و جبری حاکم بر بخش‌های مختلف سیستم، به پارامترهای مختلف شبکه نیز نیاز می‌باشد. بنابرین در جدول (۱) مقادیر پارامترهای مختلف شبکه بیان شده است.

از شبیه‌سازی سیستم PV متصل به شبکه با هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی و در شرایط کاملا یکسان برای هر روش، مشاهده می‌شود که علی‌رغم تشخیص صحیح فرکانس زاویه‌ای سیستم توسط هر سه روش سنکرون‌سازی، مقدار ولتاژ محور q نقطه PCC یعنی v_{sq} در سه روش با یکدیگر متفاوت می‌باشد. روش SRF-PLL با تنظیم v_{sq} در مقدار تقریبا صفر و تشخیص صحیح فرکانس زاویه‌ای سیستم عملکرد صحیحی دارد. اما مقدار v_{sq} در هر یک از روش‌های K ثابت و اینرسی مجازی به ترتیب برابر ۶۷/۵- و ۲۵/۳۵- می‌باشند. در حالی که انتظار می‌رود در صورت تشخیص صحیح فرکانس زاویه‌ای سیستم توسط هر یک از روش‌ها، مشابه روش SRF-PLL مقدار v_{sq} برابر صفر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

باشد. برای دست‌یابی به این هدف باید معادلات مربوط به روش‌های سنکرون‌سازی K ثابت و اینرسی مجازی را اصلاح نمود که این کار با پیروی از روش SRF-PLL انجام خواهد شد. بنابراین مشابه روش SRF-PLL برای تشخیص فرکانس زاویه‌ای سیستم، باید در روش‌های K ثابت و اینرسی مجازی نیز به طور مستقیم از v_{sq} استفاده شود و روابط آنها به صورت روابط (۴۱) و (۴۲) اصلاح گردد.

$$\frac{d\rho}{dt}=\omega=\frac{v_{dc}+v_{sq}}{K} \qquad (۴۱)$$

$$J\frac{d\omega}{dt}=C\frac{dv_{dc}}{dt}+Yv_{dc}-k_f\omega+v_{sq} \qquad (۴۲)$$

با بکارگیری روابط تعمیم یافته، مقدار ولتاژ v_{sq} در روش‌های K ثابت و اینرسی مجازی نیز برابر با صفر می‌شود.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای سیستم

ترانسفورماتور قدرت Tr	
توان نامی	$S_n=1.7MVA$
نسبت تبدیل ولتاژ	$V_{n_{HV}}/V_{n_{LV}}=6600/480Volt$
اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ‌ها	$L_{eq}=0.1pu$
مقاومت سیم‌پیچ‌ها	$R_{eq}=0.02pu$
شبکه توزیع	
ولتاژ شبکه	$v_g=6.6kV$
اندوکتانس خط	$L_1=L_2=0.007875H$
نسبت اندوکتانس به مقاومت خط	$X_1/R_1=X_2/R_2=6$
طول خط	$l_e=15km$
سیستم PV	
تعداد رشته‌های موازی PV	$n_p=176$
تعداد سلول‌های PV در هر رشته	$n_s=1500$
ضریب ایده‌آل پیوند p-n سلول	$A=1.92$
دمای مرجع	$T_r=300K$
ضریب دمایی	$k_T=0.0017A/K$
جریان اتصال کوتاه	$I_{scr}=8.03A$
جریان اشباع معکوس	$I_{rs}=1.2\times10^{-7}A$
فیلتر LC خروجی مبدل VSC	
اندوکتانس	$L=100\mu H$
مقاومت	$R=3m\Omega$
خازن موازی	$C_f=300mF$
بار RL سری	
ولتاژ نامی	$v_{ln}=6.6kV$
مقاومت	$R_l=111\Omega$
اندوکتانس	$L_l=95mH$
خازن اصلاح ضریب توان	$C_l=1\mu F$

۵- بررسی پایداری برای روش‌های مختلف سنکرون‌سازی

در این بخش به ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی تحت شرایط مختلف در پایداری سیستم پرداخته می‌شود.

۵-۱- شاخص پایداری

با توجه به بخش‌های ۲ و۳ می‌توان سیستم PV متصل به شبکه را توسط معادلات جبری و دیفرانسیل به صورت رابطه (۴۳) توصیف نمود.

$$\begin{aligned}\dot{x}&=f(x,y,u)\\0&=g(x,y,u)\end{aligned} \qquad (۴۳)$$

x، y و u به ترتیب متغیرهای حالت، جبری و ورودی‌ها؛ f و g به ترتیب بردارهایی از معادلات دیفرانسیلی و جبری هستند.

پایداری سیستم توسط پایداری نقطه کار تعیین می‌شود. نقطه کار سیستم نیز از حل رابطه (۴۳) بدست می‌آید. بررسی پایداری نقطه کار توسط مقادیر ویژه سیستم انجام می‌شود. بدیهی است در صورتی که مقادیر ویژه سیستم سمت چپ محور موهومی باشند، نقطه کار سیستم پایدار می‌باشد. بنابراین برای بدست آوردن مقادیر ویژه باید معادلات رابطه (۴۳) حول نقطه کار سیستم به صورت رابطه (۴۴) خطی سازی شوند.

$$\begin{aligned}\dot{x}&=Ax+Bu\\y&=Cx+Du\end{aligned} \qquad (۴۴)$$

در رابطه (۴۴)، A ماتریس ضرایب می‌باشد که با استفاده از رابطه (۴۳) و متغیرهای حالت سیستم به صورت رابطه (۴۵) بدست می‌آید:

$$A=\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}\\ \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}\end{bmatrix}_{n\times n} \qquad (۴۵)$$

در رابطه (۴۵)، n مرتبه سیستم می‌باشد. مقادیر ویژه سیستم از حل معادله $\det(\lambda I-A)=0$ بدست می‌آید. مدل خطی‌سازی شده، تابعی از شرایط نقطه کار سیستم می‌باشد. نقطه کار سیستم نیز تحت تاثیر پارامترهای فیزیکی مانند ظرفیت خازن، اندوکتانس و پارامترهای کنترلی از جمله ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده‌های PI و عواملی محیطی یا شرایط بهره‌برداری مانند شدت تابش خورشید می‌باشد. در این صورت پایداری سیستم با تغییر نقطه کار توسط تغییرات هر یک از پارامترهای سیستم، پارامترهای کنترلی و شرایط بهره‌برداری، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به عوامل ناپایدار کننده موجود در سیستم‌های قدرت مانند هارمونیک‌ها و توالی منفی ولتاژ و همچنین تغییرات ذاتی اندوکتانس شبکه، فرکانس شبکه و شدت تابش خورشید، سناریویی شامل این عوامل برای بررسی پایداری سیستم تعریف می‌شود. بدین صورت بررسی پایداری در یک نقطه کار خاص سیستم نبوده و در حالت کلی و تحت تاثیر عوامل مختلف می‌باشد. سناریو تعریف شده در این مقاله شامل ۹ مرحله می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

مرحله ۱: حالت نرمال یا عادی سیستم
مرحله ۲: تزریق هارمونیک‌های ولتاژ تا مرتبه ۵۰ و بر اساس استاندارد IEEE-519
مرحله ۳: تزریق توالی منفی ولتاژ به میزان ۵ درصد ولتاژ نامی
مرحله ۴: افزایش ۴ برابری اندوکتانس شبکه نسبت به حالت نرمال
مرحله ۵: کاهش شدت تابش خورشید از ۱۰۰ به ۹۰ درصد
مرحله ۶: افزایش شدت تابش خورشید از ۹۰ به ۱۱۰ درصد
مرحله ۷: افزایش فرکانس شبکه از ۶۰ به ۶۱ هرتز
مرحله ۸: کاهش فرکانس شبکه از ۶۱ به ۵۹ هرتز
مرحله ۹: بازگشت به حالت نرمال یا عادی سیستم

در سناریو تعریف شده ابتدا شبکه در حالت عادی بوده و سپس هر یک از عوامل تاثیرگذار در ناپایداری سیستم به تنهایی اعمال می‌شوند. اما بعد از اعمال هر مرحله، تغییر ایجاد شده حفظ و در حضور آن، تغییر مرحله بعدی انجام می‌شود.

۵-۲- کمترین خازن لینک DC با حفظ پایداری

از آنجایی که داشتن خازن کوچکتر برای لینک DC منجر به کاهش هزینه مبدل و همچنین بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود، در این بخش به تعیین کمترین خازن لینک DC به شرط حفظ پایداری سیستم در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی پرداخته می‌شود. بنابراین خازن لینک DC به عنوان یک پارامتر قابل تنظیم در نظر گرفته می‌شود. از طرفی انتخاب خازن لینک DC به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که با روش‌های مختلف بهینه‌سازی قابل حل می‌باشد که در این مقاله به عنوان نمونه از الگوریتم بهینه‌ساز PSO استفاده شده است.

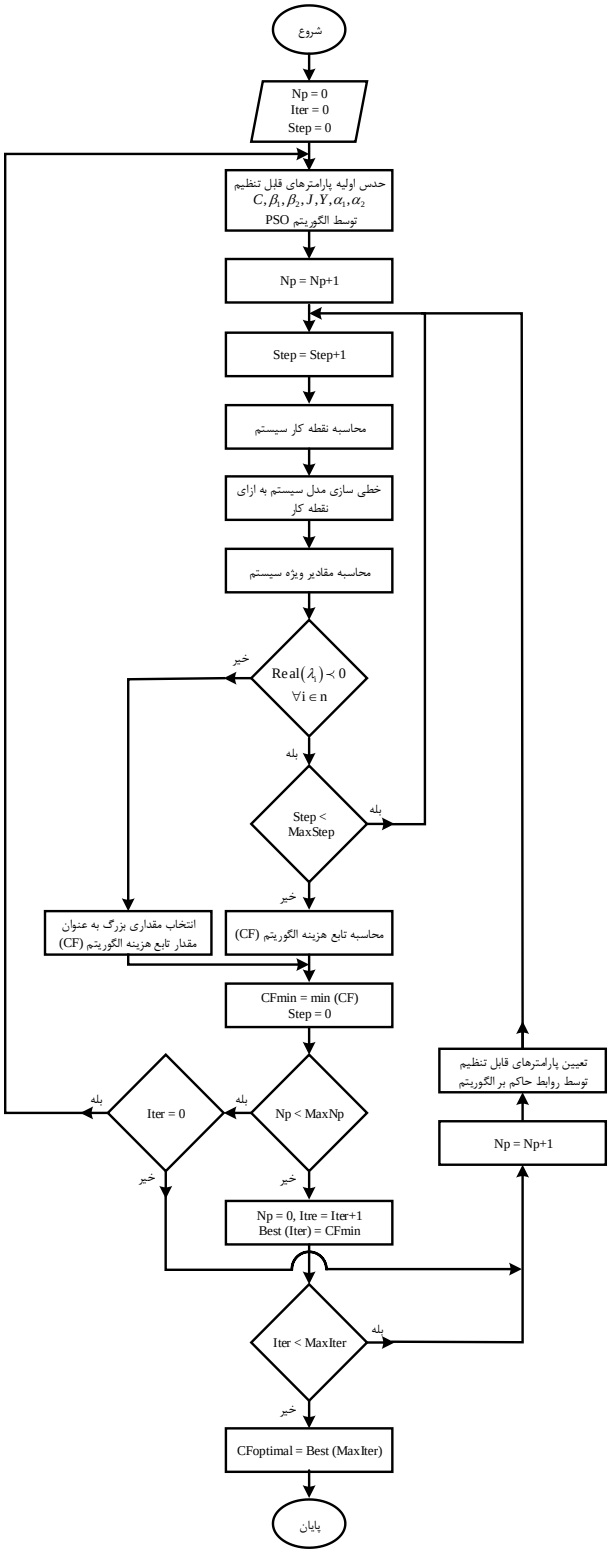
به منظور استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز PSO باید متغیرهای مناسبی برای آن در نظر گرفت. بنابراین با توجه به روابط حاکم بر هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی و همچنین روابط (۱۹) و (۲۰) که در تعیین سیگنال جریان u_v و تنظیم جریان i_{dref} نقش دارند، می‌توان متغیرهای مناسبی برای الگوریتم بهینه‌ساز PSO انتخاب نمود. در نتیجه پارامترهای C، β_1، β_2، α_1 و α_2 در روش SRF-PLL، پارامترهای C، J، Y، α_1 و α_2 در روش اینرسی مجازی و پارامترهای C، α_1 و α_2 در روش K ثابت، متغیرهای الگوریتم بهینه-ساز PSO در نظر گرفته می‌شوند.

هدف الگوریتم بهینه‌ساز PSO تعیین مقادیر بهینه پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم، به منظور کاهش مقدار خازن لینک DC به شرط حفظ پایداری سیستم به ازای سناریو تعریف شده می‌باشد. بنابراین خازن لینک DC مطابق رابطه (۴۶) به عنوان تابع هدف یا تابع هزینه الگوریتم بهینه‌ساز PSO، بکار می‌رود. اما شرط پایداری سیستم با استفاده از مقادیر ویژه به عنوان قید الگوریتم بهینه‌ساز PSO، به صورت رابطه (۴۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$CostFunction = C \qquad (۴۶)$$

$$Real(\lambda_i) \prec 0 \qquad \forall i \in n \qquad (۴۷)$$

شکل (۴) روند کلی بدست آوردن جواب بهینه توسط الگوریتم PSO را نشان می‌دهد.



شکل (۴): روند کلی بهینه‌سازی توسط الگوریتم PSO

در این فرآیند Step، MaxStep به ترتیب شمارنده مرحله-ها و حداکثر مرحله‌های سناریو تعریف شده؛ Np، MaxNp به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

ترتیب شمارنده و حداکثر جمعیت الگوریتم PSO، Iter و MaxIter به ترتیب شمارنده تعداد تکرارها و حداکثر تکرار الگوریتم PSO و CF نیز تابع هزینه الگوریتم PSO می‌باشند.

جدول (۲) مقادیر بهینه پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم بهینه‌ساز PSO را با پیگیری روند کلی بهینه‌سازی شکل (۴)، در روش‌های مختلف سنکرون‌سازی با شبکه نشان می‌دهند.

جدول (۲): مقادیر بهینه پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم PSO برای اعمال سناریو تعریف شده در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی

	روش سنکرون سازی		
پارامتر	SRF-PLL	K ثابت	اینرسی مجازی
C	۴۴۰	۳۸۸	۳۱۷
J یا β_1	۲۲۲/۶۰	-	۰/۷۴
Y یا β_2	۸۹۲/۷۱	-	۱۳/۸۴
α_1	-۲/۲۳	-۱/۸۳	-۱/۴۷
α_2	-۲۲۸/۵۸	-۳۰/۴۵	-۷/۸۸

از جدول (۲) مشاهده می‌شود که روش اینرسی مجازی نسبت به سایر روش‌های سنکرون‌سازی دارای مقدار خازن لینک DC کمتری می‌باشند. مقدار خازن لینک DC روش اینرسی مجازی در مقایسه با روش‌های SRF-PLL و K ثابت به ترتیب ۲۷/۹۵ و ۱۸/۳۰ درصد کمتر می‌باشد.

به منظور تعیین تاثیرگذارترین عامل در تعیین کمترین مقدار خازن لینک DC، نتایج بهینه‌سازی به ازای اعمال فقط یک تغییر در شرایط و پارامترهای سیستم بدست آورده می‌شود. بدین منظور در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی مقادیر پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم PSO به غیر از خازن لینک DC، مقادیر بهینه جدول (۲) در نظر گرفته می‌شوند سپس هر بار با در نظر گرفتن حالت عادی برای سیستم و اعمال فقط یک عامل از عوامل مختلف سناریو تعریف شده، کمترین مقدار خازن لینک DC بدست آورده شده است. البته افزایش و کاهش فرکانس شبکه و همچنین شدت تابش خورشید، به طور پشت سرهم فقط یکبار تحت عنوان تغییرات فرکانس شبکه و تغییرات شدت تابش خورشید انجام شده است. جدول (۳) کمترین مقدار خازن لینک DC به ازای فقط تغییر یک عامل از عوامل مختلف موثر در ناپایداری سیستم در روش‌های مختلف سنکرون‌سازی با شبکه را نشان می‌دهند.

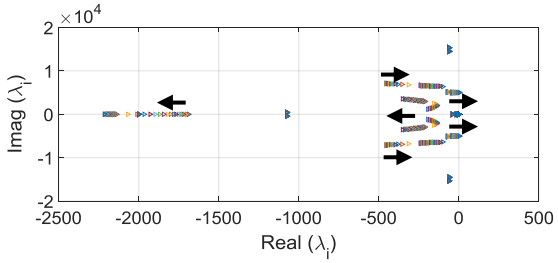
جدول (۳): کمترین مقدار خازن لینک DC بر حسب μF در روش‌های سنکرون‌سازی به ازای اعمال تغییرات عوامل مختلف

عوامل موثر در ناپایداری سیستم	روش سنکرون سازی		
	SRF-PLL	K ثابت	اینرسی مجازی
وجود هارمونیک‌ها	۴۴۰	۳۸۶	۳۱۷
وجود توالی منفی	۲۰۸	۱۹۲	۱۶۷
افزایش اندوکتانس	۲۳۹	۱۹۳	۱۹۶
تغییرات شدت تابش	۴۰۰	۱۹۵	۱۸۵
تغییرات فرکانس	۱۳۷	۱۳۲	۱۱۲

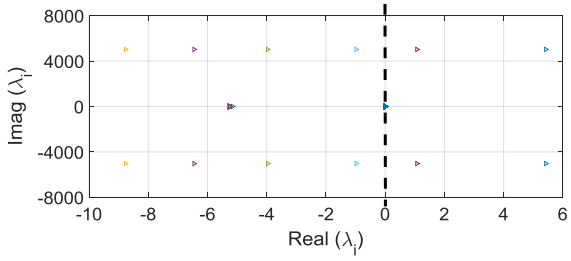
نتایج جدول (۳) نشان می‌دهند که هارمونیک‌های ولتاژ شبکه و تغییرات فرکانس شبکه در تمام روش‌های سنکرون‌سازی، به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر در تعیین کمترین مقدار خازن لینک DC دارند. بنابراین استفاده از فیلترهای پسیو یا اکتیو و حذف برخی از هارمونیک‌های ولتاژ و کاهش THD شبکه، می‌تواند موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار خازن لینک DC مخصوصا در روش‌های K ثابت و اینرسی مجازی شود.

۵-۳- رفتار مقادیر ویژه سیستم در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی

در این بخش رفتار مقادیر ویژه سیستم به ازای تغییرات خازن لینک DC نشان داده می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر بهینه جدول ۲ برای پارامترهای قابل تنظیم سیستم و تغییر خازن لینک DC، نمودار مکان هندسی مقادیر ویژه در هر یک از روش‌های سنکرون‌سازی بدست آورده و در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است.

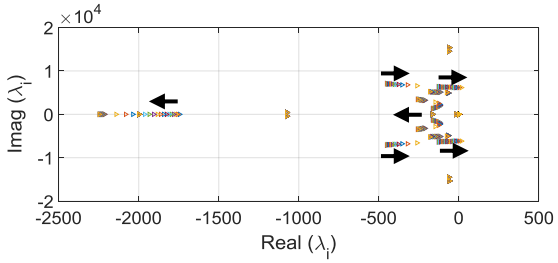


الف) مقادیر ویژه سیستم



ب) عبور مقادیر ویژه از محور موهومی

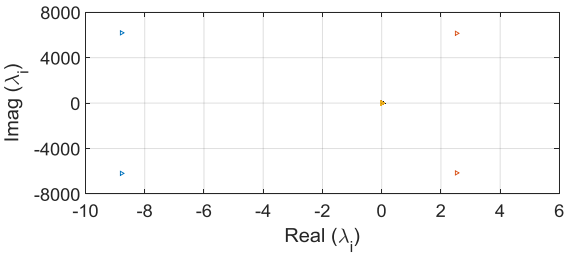
شکل (۵): روند حرکت مقادیر ویژه سیستم در روش SRF-PLL



الف) مقادیر ویژه سیستم

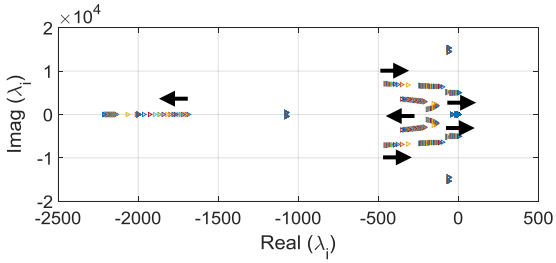
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

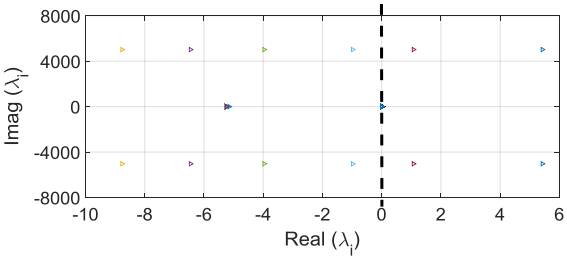


ب) عبور مقادیر ویژه از محور موهومی

شکل (۶): روند حرکت مقادیر ویژه سیستم در روش K ثابت



الف) مقادیر ویژه سیستم



ب) عبور مقادیر ویژه از محور موهومی

شکل (۷): روند حرکت مقادیر ویژه سیستم در روش اینرسی مجازی

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ در شرایطی که سیستم در حالت عادی یا نرمال قرار دارد بدست آمده است. شرایط عادی یعنی شرایطی که ولتاژ شبکه بدون هارمونیک‌ها، توالی منفی می‌باشد و دارای فرکانس نامی است و همچنین امپدانس شبکه مطابق جدول ۱ و شرایط استاندارد برای شدت تابش خورشید می‌باشد. در این شرایط با کاهش خازن لینک DC از یک مقدار بزرگ (۱۰۰۰ میکروفاراد) و بدست آوردن مقادیر ویژه سیستم به ازای هر تغییر روند حرکت مقادیر ویژه بدست آورده شده است. ابتدا به دلیل دور بودن مقادیر ویژه از محور موهومی تغییرات خازن لینک DC با گام‌های بزرگ انجام شده و سپس با نزدیک شدن مقادیر ویژه به محور موهومی به منظور بهتر و دقیق‌تر دیده شدن عبور مقادیر ویژه از محور موهومی، گام تغییرات کوچک شده است. جدول (۴) کمترین مقدار خازن لینک DC در روش‌های مختلف سنکرون‌سازی را نشان می‌دهد که به ازای آن تمام مقادیر ویژه سیستم سمت چپ محور موهومی قرار دارند.

جدول (۴): کمترین مقدار خازن لینک DC با شرط پایداری برحسب مقادیر ویژه سیستم

روش سنکرون سازی	C
SRF-PLL	۱۵۶
K ثابت	۱۳۲
اینرسی مجازی	۱۱۳

از مقایسه جدول‌های (۲) و (۴) مشاهده می‌شود که مقادیر خازن لینک DC در شرایطی که در سیستم عوامل ناپایدار کننده وجود نداشته باشد، بسیار کمتر می‌باشد ولی در هر دو حالت مقدار آن در روش اینرسی مجازی نسبت به دیگر روش‌های سنکرون‌سازی کمتر است.

۶- نتیجه

در این مقاله به بررسی تأثیر روش‌های مختلف سنکرون‌سازی بر پایداری و انتخاب خازن لینک DC پرداخته شده است. به دلیل اینکه کاهش خازن لینک DC منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود، بنابراین داشتن خازن کوچکتر از نظر اقتصادی و همچنین قابلیت اطمینان سیستم مطلوب می‌باشد. محاسبه کمترین مقدار خازن لینک DC با تعریف سناریو کلی از عوامل ناپایدار کننده سیستم و تحت یک مساله بهینه‌سازی و با استفاده الگوریتم PSO بدست آورده شده است. همچنین منفی بودن قسمت حقیقی مقادیر ویژه سیستم به منظور حفظ پایدرای به عنوان قید مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه بدست آمده از سناریو کلی، نشان می‌دهد که روش اینرسی مجازی دارای کمترین مقدار خازن لینک DC می‌باشد. از طرفی تعیین کمترین مقدار خازن لینک DC توسط حرکت مقادیر ویژه به سمت راست موهومی در شرایط عادی سیستم نیز برتری روش اینرسی مجازی را تایید کرد. بنابراین می‌توان از روش اینرسی مجازی به عنوان جایگزین مناسب روش متعارف SRF-PLL در سیستم‌های قدرت استفاده نمود.

مراجع

[1] Xu, Q., Hu, X., Wang, P., Xiao, J., Tu, P., Wen, Ch., and Lee, M. Y., "*A Decentralized Dynamic Power Sharing Strategy for Hybrid Energy Storage System in Autonomous DC Microgrig*", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5930-5941, August 2016.

[2] Johnson, B. B., Dhople, S. V., Cale, J. L., Hamadeh, A. O., and Krein, Ph. T., "*Oscillator-Based Inverter Control for Islanded Three Phase Microgrids*", IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, no. 1, pp. 387-395, Junuary 2014.

[3] Golpîra, H., Seifi, H., and Haghifam, M. R., "*Dynamic Equivalencing of an Active Distribution Network for Large-scale Power System Frequency Stability Studies*", IET Generation. Transmission & Distribution, vol. 9, no. 15, pp. 2245-2254, July 2015.

[4] Kawabe, K., Ota, Y., Yokoyama, A., and Tanaka, K., "*Novel Dynamic Voltage Support Capability of Photovoltaic Systems for Improvement of Short-term Voltage Stability in Power Systems*", IEEE Trans. Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 1796-1804, July 2016.

[5] Ding, K., Liu, J., Wang, Xu., Zhang, X., and Wang, N., "*Research of an Active and Reactive Power Coordinated Control Method for Photovoltaic Inverters to Improve Power System Transient Stability*", in China International Conference on Electricity Distribution (CICED), pp. 1-5, August 2016.

[6] Kawabe, K., and Tanaka, K., "*Impact of Dynamic Behavior of Photovoltaic Power Generation Systems on*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]

[21] Cvetkovic, I., Boroyevivh, D., Burgos, R., Li, Ch., and Mattavelli, P., "*Modeling and Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters Emulating Isotropic and Anisotropic Synchronous Machines*", in IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp. 1-5, July 2015.

[22] Cvetkovic, I., Boroyevich, D., Burgos, R., Chi, L., Jaksic, M., and Mattavelli, P., "*Modeling of a Virtual Synchronous Machine-Based Grid Interface Converter for Renewable Energy Systems Integration*" in IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp. 1-7, June 2014.

[23] Loukriz, A., Haddadi, M., and Messalti, S., "*Simulation and Experimental Design of a New Advanced Variable Step Size Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV Systems*", ISA Transactions, vol. 62, pp. 30-38, May 2016.

[24] Yazdani, A., and Iravani, R., "*An Accurate Model for the DC-side Voltage Control of the Neutral Point Diode Clammed Converter*", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 185-193, January 2006.

[25] Ye, Y., Kazerani, M., and Quintana, V. H., "*Modeling, Control and Implementation of Three-Phase PWM Converters*", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 18, no. 3, pp. 857-864, May 2003.

[26] Agarwal, R. H., Hussain, I., and Singh, B., "*Three-Phase Single-Stage Grid Tied Solar PV Energy Conversion System Using PLL-less Fast Control Techniqye*", IET. Power Electronices, vol. 10, no. 2, pp. 178-188, February 2017.

[27] Joan, J.,and Sekar, R. M., "*Improved Enhanced Version of solar Photo Votaic System*", International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), vol. 4, no. 4, pp. 23-27, April 2017.

[28] Singh, B., J, Ch., and Goel, S., "*ILST Control Algorithm of Single-Stage Dual Purpose Grid Connected Solar PV System*", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 29, n0. 10, pp. 5347-5357, October 2014.

[29] Golestan, S., and Guerrero, J. M., "*Conventional Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop Is an Adaptive Complex Filter*", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol, 62, no. 3, pp. 1679-1682, March 2015.

[30] Rodriguez, P., Pou, J., Bergas, J., Candela, J. I., Burgos, R. P., and Boroyevich, D., "*Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control*", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 584-592, March 2007.

زیرنویس‌ها

[1] Voltage Source Converter
[2] Current Source Converter
[3] Virtual Inertia
[4] Particle Swarm Optimization
[5] Point of Common Coupling
[6] Maximum Power Point Tracking

Short-term Voltage Stability", IEEE Trans. Power Systems, vol. 30, no. 6, pp. 3416–3424, November 2015.

[7] Yan, R., and Saha, T. K., "*Investigation of Voltage Stability for Residential Customers Due to High Photovoltaic Penetrations*", IEEE Trans. Power Systems., vol. 27, no. 2, pp. 651–662, May 2012.

[8] Moursi, M. S. E., Zeineldin, H. H., Kirtley, J. L., and Alobeidli, Kh., "*A Dynamic Master/Slave Reactive Power-Management Scheme for Smart Grids with Distributed Generation*", IEEE Trans. Power Delivery., vol. 29, no. 3, pp. 1157–1167, June 2014.

[9] Varma, R. K., Rahman, S. A., and Vanderheide, T., "*New control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM) for Increasing Grid Power Transmission Limits During Night and Day*", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 755–763, April 2015.

[10] Tafti, H. D. , Maswood, A. I., Lim, Z., Ooi, G. H. P., and Raj, P. H., "*A Review of Active/Reactive Power Control Strategies for PV Power Plants Under Unbalanced Grid Faults*", in IEEE Innovative. Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), pp. 3–6, November 2015.

[11] Yagami, M., Kimura, N., Tsuchimoto, M., and Tamura, J., "*Power System Transient Stability Analysis in The Case of High-Penetration Photovoltaics*", in IEEE Grenoble Conference. France, pp. 1-6, June 2013.

[12] Eftekharnejad, S., Vittal, V., Heydt, G. T., Keel, B., and Loehr, J., "*Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems*", IEEE Trans. Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 893-901, May 2013.

[13] Xyngi, I., Ishchenko, A., Popov, M., and Sluis, L., "*Transient Stability Analysis of a Distribution Network With Distributed Generators*", IEEE Trans. Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 1102-1104, May 2009.

[14] Slootweg, J. G., and Kling, W. L., "*Impacts of Distributed Generation on Power System Transient Stability*", in IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 862-867, July 2002.

[15] Liu, Sh., Liu, P. X., and Wang, X., "*Stochastic Small-Signal Stability Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems*", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 63, no. 2, pp. 1027-1038, August 2015.

[16] Du, W., Wang, H., and Xiao, L. Y., "*Power System Small-Signal Stability as Affected by Grid-Connected Photovoltaic Generation*", European Trans. Electrical Power, vol. 22, no. 5 pp. 688–703, July 2012.

[17] Zhang, Q., Zhou, L., Mao, M., Xie, B., and Zheng, Ch., "*Power quality and stability analysis of large-scale grid-connected photovoltaic system considering non-linear effects*", IET. Power Electronics, vol. 11, no. 11, pp. 1739-1747, August 2018.

[18] Yazdani, A., and Dash, P. P., "*A Control Methodology and Characterization of Dynamics for a Photovoltaic (PV) System Interfaced with a Distribution Network*", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1538–1551, July 2009.

[19] Dash, P. P., and Kazerani, M., "*Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic System*", IEEE Trans. Sustainable Energy, vol. 2, no. 4, pp. 443-450, October 2011.

[20] Huang, Y., Zhai, X., Hu, J., Liu, D., and Lin, Ch., "*Modeling and Stability Analysis of VSC Internal Voltage in DC-Link Voltage Control Timescale*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics. Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 16-28, March 2018.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.5.6]