

## تأثیر اینرسی مجازی و ضریب میرایی در پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی

رامین ارجمندزاده<sup>۱</sup>، مهدی بانژاد<sup>۲</sup> و علی اکبرزاده کلات<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی شاهرود-دانشکده مهندسی برق و رباتیک، arjmandzadeh.73@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی شاهرود-دانشکده مهندسی برق و رباتیک، m.banejad@Shahroodut.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشگاه صنعتی شاهرود-دانشکده مهندسی برق و رباتیک، akbarzadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده - در شبکه‌های سنتی، توان عموماً توسط ژنراتورهای سنکرون تأمین می‌شود که روتورهای آن‌ها دارای وزن می‌باشند و این وزن عامل اصلی اینرسی در شبکه قدرت می‌باشد. اینرسی می‌تواند از تغییرات ناگهانی فرکانس در هنگام اختلال در شبکه جلوگیری کند و از این طریق پایداری سیستم را حفظ کند. امروزه به دلیل نفوذ زیاد منابع تولید پراکنده که توسط ادوات الکترونیک قدرت که فاقد اینرسی می‌باشند به شبکه متصل می‌شوند، اینرسی کل شبکه کاهش می‌یابد و پایداری سیستم به چالش کشیده می‌شود. به تازگی، موضوع ژنراتور سنکرون مجازی به عنوان یک راه‌حل برای تقلید رفتار ژنراتور سنکرون که توسط مبدل‌های dc-ac که توسط مکانیسم کنترلی بازسازی می‌شوند، شناخته شده است. در این مقاله، یک مدل سیگنال کوچک از حلقه کنترل فرکانس-توان اکتیو یک ژنراتور سنکرون مجازی گرفته شده و سپس تأثیر ضریب میرایی و اینرسی مجازی بر عملکرد دینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس براساس نتایج تجزیه و تحلیل، یک استراتژی کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر در این مقاله ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار matlab / Simulink انجام شده است.

کلید واژه- پایداری، ژنراتور سنکرون مجازی، اینرسی مجازی، ضریب میرایی.

سنکرون، منابع فاقد اینرسی مانند یک ژنراتور سنکرون با یک روتور وزن دار و در حال چرخش در شبکه رفتار می‌کنند [۱].

با تنظیم پارامترهایی مانند اینرسی مجازی و ضریب میرایی، می‌توان مشخصات خروجی را تغییر داد. طرح‌های مختلف کنترلی برای مهار نوسانات توان و فرکانس در [۲،۳] مورد بررسی قرار گرفته است. یک استراتژی تطبیقی اینرسی bang\_bang در [۴] ارائه شده است. یک مدل سیگنال کوچک برای طراحی پارامترهای VSG در [۵] ارائه شده است که می‌توان مقادیر بهینه  $J$  و  $D_p$  را بدست آورد. مفهوم اینرسی مجازی سیستم قدرت توزیع برای حل مشکل کاهش اینرسی در شبکه در [۵] ارائه شده است. یک کنترل اینرسی مجازی توزیع شده در [۶] برای افزایش اینرسی شبکه DC و کاهش نرخ تغییرات ولتاژ DC مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر ژنراتور سنکرون مجازی بر نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت در [۷] بحث شده است. پاسخ اینرسی سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر آهنربای دائمی با مفهوم کنترل ژنراتور سنکرون مجازی در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است و تفاوت بین سیستم تبدیل انرژی باد با کنترل اینرسی مجازی و ژنراتور سنکرون بررسی شده است. یک ریزشکبه با چند ژنراتور سنکرون مجازی در [۹] معرفی شده است و انحرافات زاویه ولتاژ ژنراتورها نسبت به زاویه مرکز اینرسی به عنوان

### ۱- مقدمه

در شبکه‌های قدرت سنتی، توان توسط ژنراتورهای سنکرون که روتور آن‌ها دارای وزن و در حال چرخش هستند تأمین می‌شود، چرخش این روتور وزن دار عامل اصلی اینرسی در این شبکه‌ها است. اینرسی بالا عامل اصلی حفاظت سیستم در برابر اختلالات و عدم تعادل در شبکه است و نقش مهمی در پایداری سیستم دارد. علاوه بر اینرسی، یکی از پارامترهای مهم دیگر، ضریب میرایی ناشی از اصطکاک مکانیکی و تلفات الکتریکی در استاتور ژنراتورهای سنکرون می‌باشد. با افزایش منابع تجدیدپذیر، که اغلب توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت که فاقد اینرسی می‌باشند به شبکه متصل می‌شوند، اینرسی کل شبکه را کاهش می‌دهند.

با کاهش اینرسی، شبکه نسبت به اغتشاشات و ناتعادلی‌ها حساس‌تر می‌شود و به آن‌ها سریع‌تر واکنش نشان می‌دهد و در نتیجه پایداری سیستم چالش برانگیز خواهد شد. راه‌حل افزایش پایداری در چنین شرایطی فراهم کردن اینرسی مجازی توسط منابع فاقد اینرسی می‌باشد. اخیراً در جهان، موضوع ژنراتور سنکرون مجازی به عنوان یک راه‌حل شناخته شده است که می‌تواند رفتار یک ژنراتور سنکرون را توسط مبدل‌های dc-ac تقلید کند. با تقلید رفتار ژنراتور

## ۲-۲- مدلسازی ژنراتور سنکرون مجازی

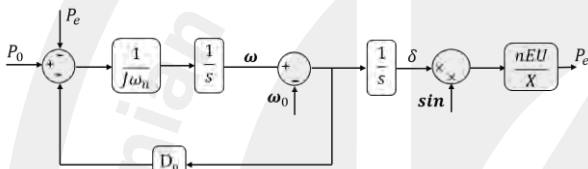
می‌دانیم، رابطه بین  $\omega$ ،  $\omega_0$  و زاویه توان  $\delta$ ، می‌تواند به صورت (۲) بیان شود:

$$\delta = \int (\omega - \omega_0) dt \quad (2)$$

همچنین رابطه بین  $P_e$  و امپدانس خط  $X$ ،  $E$ ،  $\delta$  و  $U$  می‌تواند به صورت (۳) بیان شود:

$$P_e = \frac{nEU}{X} \sin \delta \quad n = (1, 3) \quad (3)$$

از ترکیب معادلات (۱)، (۲) و (۳) حلقه کنترل توان اکتیو فرکانس همانند شکل (۲) بدست می‌آید. توجه داشته باشید که اگر  $n$  برابر ۱ باشد، یک سیستم تک‌فاز را نشان می‌دهد، در حالی که اگر  $n$  برابر ۳ باشد، نشان‌دهنده یک سیستم سه‌فاز است.



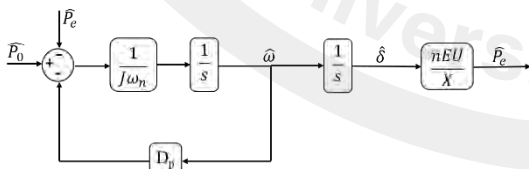
شکل ۲: حلقه کنترل توان اکتیو فرکانس

پس از آن، یک مدل سیگنال کوچک از حلقه کنترل توان اکتیو فرکانس می‌تواند گرفته شود. نقاط عملیاتی حالت ماندگار در (۴) داده شده است. با فرض اینکه هر متغیر حالت  $X$  در (۴) برابر با مقدار حالت ماندگار آن یعنی  $X_n$  است، اضافه کردن یک متغیر ac کوچک  $\hat{x}$ ، یعنی:

$$P_0 = P_{0n} + P_0, P_e = P_{en} + P_e, \delta = \delta_n + \hat{\delta} \quad (4)$$

$$\omega_0 = \omega_{0n} + \hat{\omega}_0, \omega = \omega_n + \hat{\omega}$$

از آنجا که  $\hat{\delta}$  بسیار کوچک است،  $\sin(\hat{\delta}) \approx \hat{\delta}$  تقریباً برابر  $\hat{\delta}$  است، یعنی  $\hat{\delta} \approx \sin(\hat{\delta})$ . فرض بر این است که  $\omega_0$  تقریباً یک مقدار ثابت است، پس  $\hat{\omega} = 0$  است. بنابراین، حلقه کنترل توان اکتیو فرکانس در شکل (۲) با استفاده از مدلسازی سیگنال کوچک، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، خطی می‌شود.



شکل ۳: مدل خطی شده حلقه کنترل توان اکتیو فرکانس

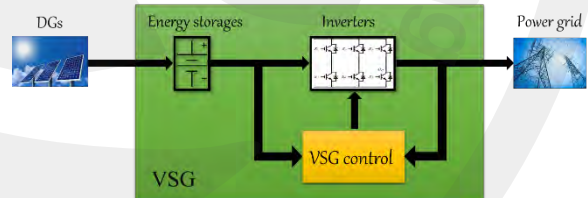
ابزاری برای ارزیابی پایداری گذرای چند ژنراتور سنکرون مجازی تعریف شده است. در این مقاله عملکرد دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی مورد بررسی قرار گرفته و یک استراتژی کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر ارائه شده است. همچنین، یک الگوریتم انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه سوم (TOGI) برای تولید محورهای متعامد  $\alpha\beta$  و محاسبه توان در یک سیستم تک‌فاز با جزئیات ارائه شده است.

بقیه مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲، یک مدل سیگنال-کوچک از حلقه توان اکتیو فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی گرفته شده و مطابق مدل، یک عملیات دامنه زمانی برای تأثیر پارامترهای  $J$  و  $D_p$  بر عملکرد دینامیکی این حلقه در بخش ۳ انجام شده و سپس، با توجه به نتیجه‌گیری‌ها در بخش ۳، یک استراتژی کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر در بخش ۴ ارائه شده است. در بخش ۵، اجرای طرح کنترل پیشنهادی بر روی یک سیستم ژنراتور سنکرون مجازی تک-فاز انجام شده و در انتها، نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه شده است.

## ۲- مفهوم و مدلسازی یک ژنراتور سنکرون مجازی

### ۲-۱- مفهوم ژنراتور سنکرون مجازی

شکل (۱) نمودار کلی یک ژنراتور سنکرون مجازی را نشان می‌دهد. ژنراتور سنکرون مجازی بین منابع تولید پراکنده و شبکه قرار می‌گیرد، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است و شامل سه بخش اصلی اینورتر، سیستم کنترلی و ذخیره انرژی است.



شکل ۱: نمودار کلی یک ژنراتور سنکرون مجازی

ژنراتور سنکرون مجازی معادله نوسان ماشین سنکرون را پیاده‌سازی می‌کند. معادله نوسان می‌تواند به صورت (۱) بیان شود:

$$P_0 - P_e + D_p(\omega_0 - \omega) = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

در اینجا  $P_0$ ،  $P_e$ ،  $D_p$  و  $J$  به ترتیب توان مرجع، توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی، ضریب میرایی توان اکتیو فرکانس و اینرسی را نشان می‌دهند.  $\omega$ ،  $\omega_n$  و  $\omega_0$  به ترتیب نشان دهنده فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی، فرکانس نامی و فرکانس شبکه هستند.

همانطور که از شکل (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب میرایی، زمان پیک کمی افزایش یافته است در حالی که زمان نشست و اضافه جهش به‌طور چشمگیری کاهش یافته‌اند. با کاهش  $D_p$ ، اضافه جهش بزرگ خواهد شد و حتی می‌تواند از محدوده مجاز تجاوز کند که باعث آسیب به سیستم می‌شود، و همچنین زمان نشست طولانی می‌شود که ممکن باعث نوسان در توان شود که ممکن است باعث ناپایداری شود.

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش  $J$ ، تمام مشخصات دینامیکی توان شامل اضافه جهش، زمان نشست و زمان پیک تخریب شده است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش  $J$  برای توان مناسب نیست.

جدول ۱: پارامترهای سیستم

مقدار	پارامتر
۴۰۰۷	ولتاژ باس (DC) $U_{dc}$
۳۱۱۷	ولتاژ شبکه $U_{abc}$
۱۶۰۰ Hz	فرکانس کلیدزنی $f_s$
۵۰ Hz	فرکانس شبکه $f$
۲/۴ mH	اندوکتانس سمت اینورتر $L_1$
۲/۴ mH	اندوکتانس سمت شبکه $L_2$
۴ μf	خازن $C_f$
۰/۰۹۲ Kg.m <sup>2</sup>	$J$ بزرگ
۰/۰۲۳ Kg.m <sup>2</sup>	$J$ کوچک
۱۵۹۲/۳۳ W.rad/s	$D_p$ بزرگ
۷۹۶/۱۶ W.rad/s	$D_p$ کوچک

### ۳-۲- تأثیر ضریب میرایی و اینرسی مجازی بر عملکرد دینامیکی فرکانس

تابع انتقال ورودی  $(P_0)$  به  $\omega$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\hat{\omega}}{\hat{P}_0} \Big|_{\hat{\omega}_0=0} = \frac{XS}{J\omega_n XS^2 + D_p XS + EU} \quad (7)$$

باتوجه به (۷)، پاسخ پله فرکانس با تغییر  $D_p$  و  $J$ ، به ترتیب در اشکال (۶) و (۷) ترسیم شده است.

### ۳- تأثیر ضریب میرایی و اینرسی مجازی بر عملکرد دینامیکی توان و فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی

#### ۳-۱- تأثیر ضریب میرایی و اینرسی مجازی بر عملکرد دینامیکی توان

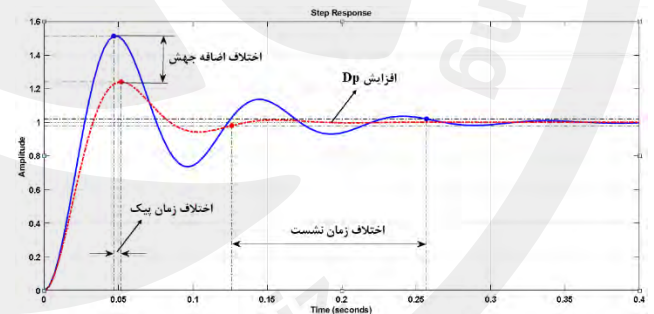
در شکل (۳)، تابع انتقال ورودی  $(P_0)$  به خروجی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\hat{P}_e}{\hat{P}_0} \Big|_{\hat{\omega}_0=0} = \frac{EU}{J\omega_n XS^2 + D_p XS + EU} \quad (5)$$

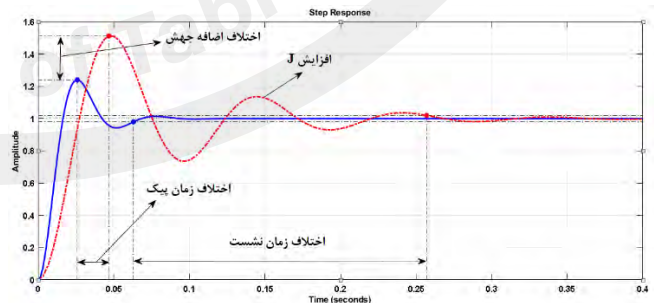
قطب‌های تابع تبدیل در (۵) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$s_{1,2} = \frac{-D_p X \pm \sqrt{D_p^2 X^2 - 4J\omega_n XEU}}{2J\omega_n X} \quad (6)$$

باتوجه به (۶)، قطب‌ها تحت تأثیر  $J$  و  $D_p$  قرار دارند. اگر پارامترها به‌طور نامناسب انتخاب شوند، قطب‌ها به محور موهومی نزدیک می‌شوند، که باعث نوسان توان و فرکانس می‌شود و همچنین باعث تخریب پاسخ دینامیکی توان و فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی مانند زمان پیک، اضافه جهش، زمان نشست و... می‌شود. مطابق با (۵)، پاسخ پله توان باتوجه به تغییر  $D_p$  و  $J$ ، به ترتیب در اشکال (۴) و (۵) ترسیم شده است. مقادیر پارامترهای سیستم در جدول (۱) آورده شده است.

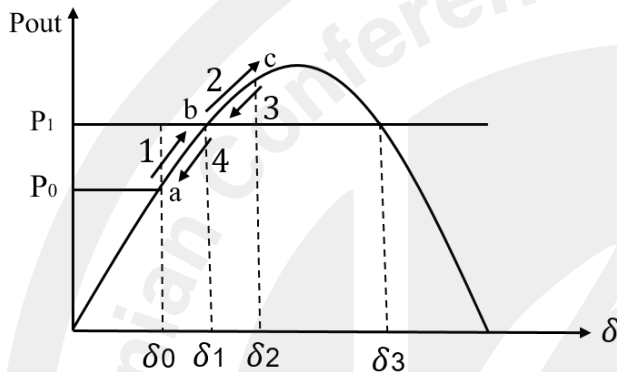


شکل ۴: پاسخ پله توان باتوجه به تغییر  $D_p$



شکل ۵: پاسخ پله توان باتوجه به تغییر  $J$

اینرسی  $J$  دارد. بنابراین برای مهار بهتر نوسانات، می‌توان  $J$  بزرگی را در ناحیه شتاب و یک  $J$  کوچک را در ناحیه کاهش شتاب در نظر گرفت. به‌عنوان مثال در بخش ۱ شکل (۸)، هر دو  $d\omega/dt$  و  $\Delta\omega$  مثبت هستند و در جهت یکسان عمل می‌کنند. بنابراین، این یک دوره شتاب است. درحالی‌که، هنگامی که آن‌ها علامت متفاوت مانند بخش ۲ دارند، یک دوره کاهش شتاب می‌باشد. این پیاده‌سازی را با نام کنترل  $J$  متغیر نام گذاری می‌کنیم که در جدول (۳) خلاصه شده است.



شکل ۸: منحنی زاویه و توان یک ماشین سنکرون معمولی.

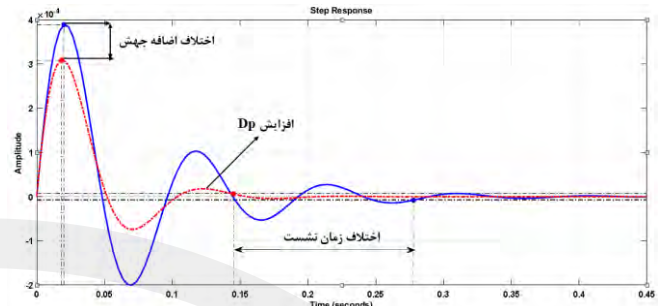
جدول ۳: قوانین  $J$

$J$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega$	بخش
$J$ بزرگ	$d\omega/dt > 0$	$\Delta\omega > 0$	۱
$J$ کوچک	$d\omega/dt < 0$	$\Delta\omega > 0$	۲
$J$ بزرگ	$d\omega/dt > 0$	$\Delta\omega < 0$	۳
$J$ کوچک	$d\omega/dt < 0$	$\Delta\omega < 0$	۴

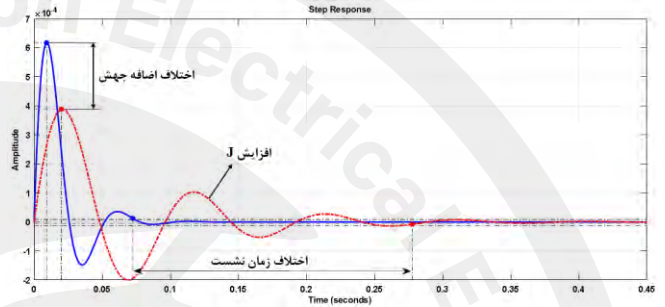
باتوجه به جدول (۲)، ملاحظه می‌شود که  $D_p$  نیز مانند  $J$  بر پاسخ دینامیکی توان و فرکانس تأثیر می‌گذارد. یعنی می‌توانیم با تأثیر دادن همزمان  $J$  و  $D_p$  پاسخ دینامیکی را باز هم بهبود بخشید. این پیاده‌سازی را کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر می‌نامیم که در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ۴: قوانین  $J$  و  $D_p$

$D_p$	$J$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega$	بخش
بزرگ $D_p$	$J$ بزرگ	$d\omega/dt > 0$	$\Delta\omega > 0$	۱
کوچک $D_p$	$J$ کوچک	$d\omega/dt < 0$	$\Delta\omega > 0$	۲
بزرگ $D_p$	$J$ بزرگ	$d\omega/dt > 0$	$\Delta\omega < 0$	۳
کوچک $D_p$	$J$ کوچک	$d\omega/dt < 0$	$\Delta\omega < 0$	۴



شکل ۶: پاسخ پله فرکانس با تغییر  $D_p$ .



شکل ۷: پاسخ پله فرکانس با تغییر  $J$ .

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش  $D_p$ ، زمان نشست و اضافه جهش کاهش می‌یابند، در نتیجه باعث افزایش پایداری سیستم می‌شود. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، هنگام افزایش  $J$ ، زمان پیک و زمان نشست فرکانس افزایش یافته‌اند، درحالی‌که اضافه جهش کاهش یافته است.

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، می‌توان گفت افزایش  $J$  برای عملکرد توان مفید نیست، اما برای مهار اضافه جهش فرکانس مناسب است. در حالی که افزایش  $D_p$  برای هر دو عملکرد فرکانس و توان مناسب است.

بر اساس تجزیه و تحلیل‌های فوق، عملکرد دینامیکی توان و فرکانس با تغییرات  $J$  و  $D_p$  در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول ۲: تأثیر  $D_p$  و  $J$  بر عملکرد دینامیکی توان و فرکانس

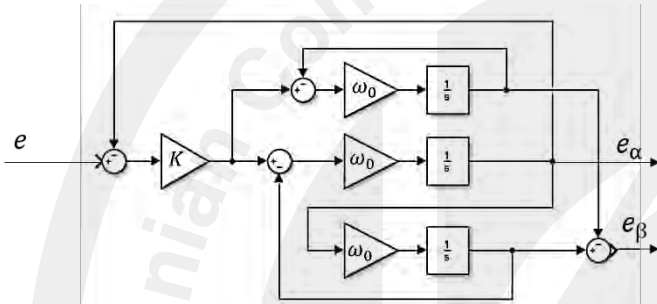
$D_p \uparrow$	$J \uparrow$		
$\downarrow$	$\uparrow$	اضافه جهش	توان
$\downarrow$	$\uparrow$	زمان نشست	
$\uparrow$	$\uparrow$	زمان پیک	
$\downarrow$	$\downarrow$	اضافه جهش	فرکانس
$\downarrow$	$\uparrow$	زمان نشست	
$\downarrow$	$\uparrow$	زمان پیک	

#### ۴- یک استراتژی کنترل $J$ و $D_p$ متغیر

شکل (۸) یک چرخه نوسان توان و زاویه را نشان می‌دهد.  $d\omega/dt$  به‌همراه  $\Delta\omega$  تعریف شتاب یا کاهش شتاب را می‌دهند. با توجه به (۱) مشاهده می‌شود که این شتاب یک رابطه معکوس با



سازي شبکه برای اینورترهای متصل به شبکه استفاده می‌شود و قادر به استخراج مولفه‌های اصلی ولتاژ شبکه با دو خروجی سینوسی متعامد است. با این حال، اگر یک offset-dc در ولتاژهای شبکه وجود داشته باشد، عملکرد SOGI عمومی دیگر قادر به استخراج دقیق مولفه‌ها نخواهد بود و کارایی مناسبی را نخواهد داشت. برای حل این مشکل، یک الگوریتم انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه سوم در [۱۰] ارائه شده است. در این مقاله، از الگوریتم انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه سوم برای تولید محورهای  $\alpha\beta$  و همچنین محاسبه توان ژنراتور سنکرون مجازی همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است استفاده شده است.



شکل ۱۳: انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه سوم برای ژنراتور سنکرون مجازی. اگر جریان ژنراتور سنکرون مجازی را در شکل (۱۳) به جای ولتاژ آن قرار دهیم، مولفه‌های  $iL1\alpha$  و  $iL1\beta$  استخراج می‌شوند. و سپس توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$P_e = \frac{e_\alpha \times i_{L1\alpha} + e_\beta \times i_{L1\beta}}{2}$$

$$Q_e = \frac{e_\alpha \times i_{L1\beta} - e_\beta \times i_{L1\alpha}}{2}$$

(۸)

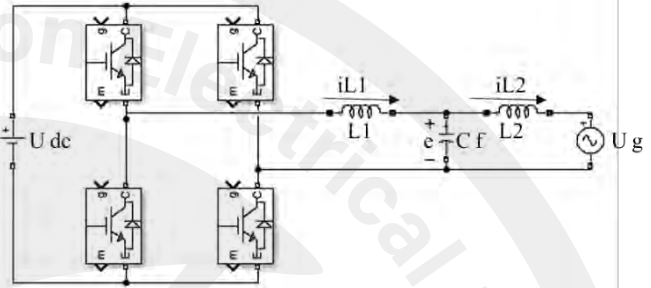
شبیه‌سازی در دو سناریوی مختلف انجام شده است، یکی برای تغییر توان مرجع و دیگری برای تغییر بار، و سپس سه استراتژی کنترلی مختلف، کنترل معمولی با  $J$  ثابت ( $J$  کوچک)، کنترل  $J$  متغیر و کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر انجام شده و باهم مقایسه شده‌اند.

### ۵-۱- تغییر توان مرجع

ناتعادلی در شبکه ناشی از عدم تعادل تولید و مصرف می‌باشد که منجر به انحراف فرکانس می‌شود. تغییر توان مرجع (تولیدی) در ژنراتور سنکرون مجازی باعث انحراف فرکانس می‌شود بنابراین، در این بخش، ژنراتور سنکرون مجازی با هر سه استراتژی کنترلی برای حالتی که توان مرجع تغییر می‌کند بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی هر سه کنترل‌کننده باهم مقایسه شده‌اند. در ابتدا، در زمان  $3/5$  ثانیه به دلیل تغییرات آب و هوا مانند تغییر شدت نور یا سایه، توان ورودی (توان مرجع) از  $1000$  وات به  $2000$  وات افزایش یافته است. نمودار فرکانس برای هر سه استراتژی کنترلی در شکل (۱۴) نشان

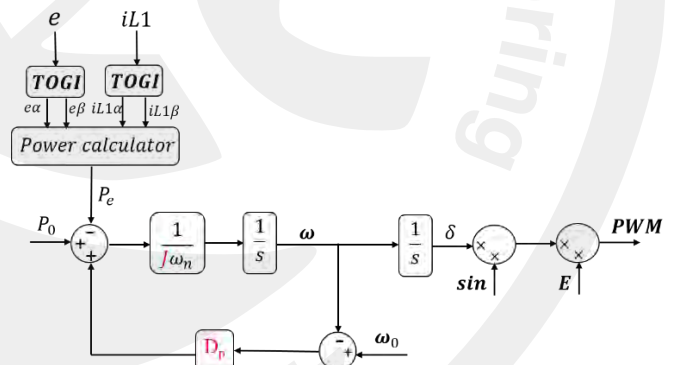
### ۵- اجرای طرح پیشنهادی بر روی سیستم ژنراتور سنکرون مجازی تک‌فاز

نمودار قدرتی یک ژنراتور سنکرون مجازی تک‌فاز در شکل (۹) نشان داده شده است.  $L1$  و  $L2$  نشان‌دهنده خازن فیلتر، اندوکتانس فیلتر در سمت اینورتر و اندوکتانس فیلتر در سمت شبکه هستند. ولتاژ باس DC را نشان می‌دهد.

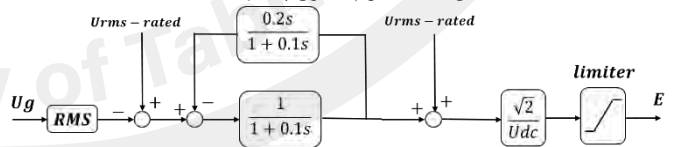


شکل ۹: نمودار قدرتی یک ژنراتور سنکرون مجازی تک‌فاز.

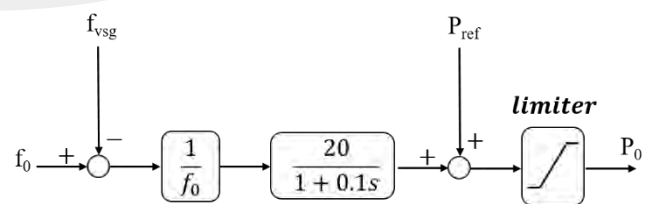
نمودار کنترلی پیشنهادی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ولتاژ ترمینال اینورتر را مشخص می‌کند. از مدل تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR) نشان داده شده در شکل (۱۱) می‌توان برای تولید سیگنال  $E$  استفاده کرد. یک مدل گاورنر برای تنظیم توان ورودی بر اساس انحراف فرکانس نشان داده شده در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۰: دیاگرام کنترل پیشنهادی.



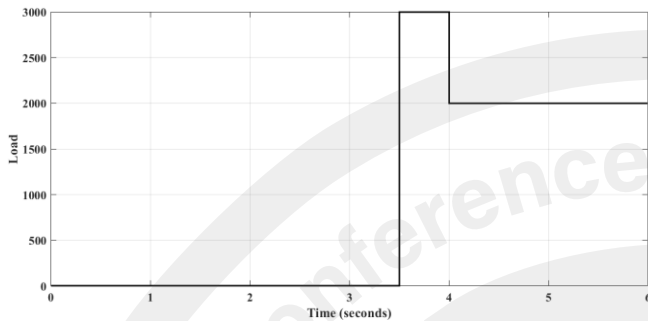
شکل ۱۱: تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک برای تولید



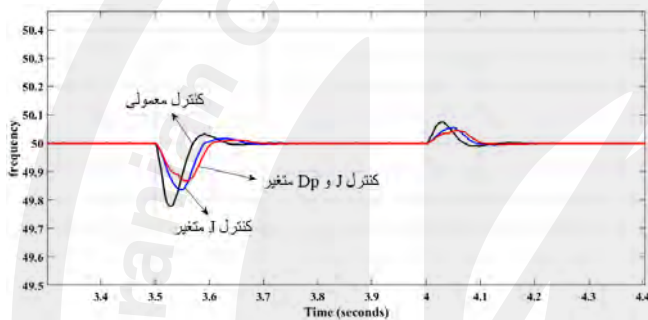
شکل ۱۲: دیاگرام گاورنر.

انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم (SOGI) برای انجام همگام-

سیستم خارج می‌شود. شکل (۱۷) تغییر بار را نشان می‌دهد و شکل (۱۸) شکل موج فرکانس سیستم را برای هر سه استراتژی کنترلی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر در سناریوی دوم نیز از سایر کنترل‌کننده‌ها عملکرد بهتری دارد.



شکل ۱۷: تغییر بار.



شکل ۱۸: فرکانس سیستم با هر سه کنترل‌کننده.

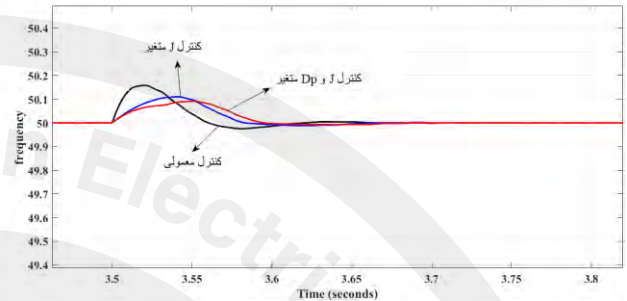
## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر اینرسی مجازی و ضریب میرایی بر نوسانات فرکانس و توان در یک ژنراتور سنکرون مجازی بررسی شد. مشخص شد که یک ضریب میرایی بزرگ می‌تواند نوسانات را مهار کند. برای فرکانس، افزایش  $J$  باعث کاهش اضافه جهش فرکانس شد. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، یک استراتژی کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر ارائه شد که در دو سناریو تغییر توان مرجع و تغییر بار آزمایش شد و مشخص شد که کنترل پیشنهادی در بهبود پاسخ دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی عملکرد بهتری دارد. علاوه بر این، طرح پیشنهادی محدود به سیستم‌های ژنراتور سنکرون مجازی تک‌فاز نیست بلکه می‌تواند برای اجرای ژنراتور سنکرون مجازی سه‌فاز نیز استفاده شود.

## مراجع

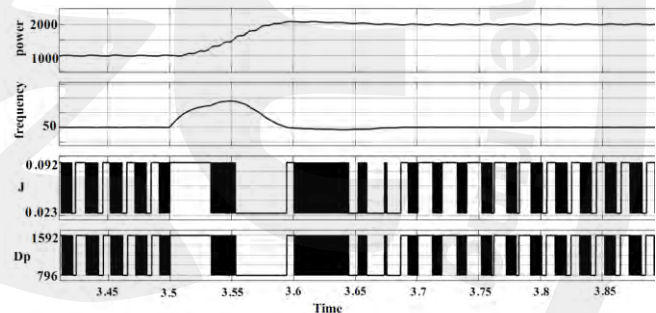
- [1] Bevrani, H., Robust power system frequency control. 2014.
- [2] Y. Xiang-Zhen, S. Jian-Hui, D. Ming, L.-J. Wei, and D. Yan, "Control Strategy for virtual synchronous generator in microgrid," in *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Utility Deregulation Restructuring Power Technol. (DRPT)*, Jul. 2011, pp. 1633-1637.
- [3] N. Xu, Y. Wang, M. Li, W. Wang, N. Wang, J. Li "An optimal control method of virtual angular acceleration to improve transient response based on virtual synchronous generator," *IEEE 3rd International IFEEC 2017 - ECCE Asia*, Jul. 2017.

داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، بهترین پاسخ فرکانس، از نقطه نظر اضافه جهش کوچک و زمان نشست کوتاه، مربوط به کنترل  $J$  و  $D_p$  متغیر است و عملکرد کنترل  $J$  متغیر از کنترل معمولی بهتر است.

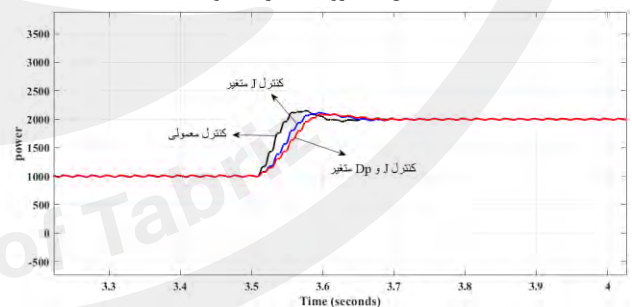


شکل ۱۴: فرکانس سیستم برای هر سه استراتژی کنترلی.

شکل (۱۵) روند تغییرات  $J$  و  $D_p$  را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل، دیده می‌شود که وقتی فرکانس در  $t = 3.5s$  افزایش می‌یابد، یک  $J$  بزرگ برای افزایش اینرسی انتخاب می‌شود و هنگامی که فرکانس به پیک خود می‌رسد، یک  $J$  کوچک انتخاب می‌شود. شکل (۱۶) نمودار توان را نشان می‌دهد. در اینجا نیز عملکرد کنترل کننده  $J$  و  $D_p$  متغیر از سایر کنترل‌کننده‌ها بهتر است.



شکل ۱۵: روند تغییرات  $J$  و  $D_p$ .



شکل ۱۶: توان خروجی ژنراتور سنکرون مجازی با هر سه کنترل‌کننده.

## ۵-۲- تغییر بار

یکی دیگر از عوامل ناعادلی و انحراف فرکانس در شبکه تغییرات ناگهانی بار است. بنابراین در این قسمت، ژنراتور سنکرون مجازی با هر سه کنترل‌کننده برای حالت تغییر بار مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج باهم مقایسه شده‌اند. ابتدا در زمان  $3/5$  ثانیه یک بار  $3000$  وات وارد سیستم شده است و در  $4$  ثانیه  $1000$  وات از

- [4] J. Alipoor, Y. Miura, and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 03, no. 02, pp 451-458, Jun. 2015.
- [5] Fang, J., et al., Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017. **33**(10): p. 8488-8499.
- [6] Zhu, X., et al., Distributed virtual inertia control and stability analysis of dc microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018. **12**(14): p. 3477-3486.
- [7] Huang, L., H. Xin, and Z. Wang, Damping low-frequency oscillations through vsc-hvdc stations operated as virtual synchronous machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018. **34**(6): p. 5803-5818.
- [8] Xi, J., et al., Inertial response analysis of PMSG-based WECS with VSG control. *The Journal of Engineering*, 2017. **2017**(13): p. 897-901.
- [9] Alipoor, J., Y. Miura, and T. Ise, Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016. **9**(2): p. 1462-1471.
- [10] Bevrani, H., T. Ise, and Y. Miura, *Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. **54**: p. 244-254.