

بِسْمِ خُدا



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

بهینه‌سازی مشخصه‌ی افتی برای بهبود رفتار دینامیکی ریزش‌بکه

نگارنده:

مهدی نیکخواه

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علی اکبرزاده کلات

شهریور ۱۳۹۹

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد
گران‌قدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر مهدی بانژاد، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.
همچنین از جناب آقای دکتر علی اکبرزاده کلات که راهنمایی‌های ارزنده ایشان
کمال بزرگی در پیشبرد این پایان‌نامه داشتند، کمال تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب مهدی نیکخواه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده مهندسی

برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی مشخصه افتی برای بهبود رفتار

دینامیکی ریزش‌بکه تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده‌است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده‌است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده‌است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده‌است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده‌است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه با رشد جمعیت نیاز به انرژی بیشتر از گذشته احساس می‌شود، از این‌رو با توجه به کاهش و مضرات منابع انرژی تجدیدناپذیر استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر مورد توجه جوامع قرار گرفته است. برای بهره‌مندی بیشتر از انرژی‌های نو جهت تأمین انرژی مصرف‌کنندگان، تحلیل و کنترل صحیح این منابع بسیار حائز اهمیت است.

در این پژوهش تمرکز بر روی بهینه‌سازی مشخصه‌ی افتی برای بهبود رفتار دینامیکی یک ریزشبکه مستقل می‌باشد. در این راستا یک سیستم شامل دو منبع تولید پراکنده به بارهای مشترک از طریق اینورتر، فیلتر، اندوکتانس ترویج و امپدانس خط متصل شده‌اند. طرح ریزشبکه بر اساس مشخصه‌ی افتی ارائه شده است. سپس برای بررسی رفتار ریزشبکه مورد مطالعه، بر اساس معادلات دیفرانسیل در فضای حالت، ابتدا مدل سیگنال کوچک تمام اجزای آن به‌صورت جدا تبیین شده و سپس با ترکیب معادلات، یک مدل نهایی تعیین شده است. برای بررسی مقادیر ویژه سیستم نسبت به ضرایب مشخصه‌ی افتی و ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان، یک ماتریس کلی از سیستم ارائه شده است. با تعیین پارامترهای مؤثر مذکور، جهت بررسی رفتار سیستم، یک روش بهینه‌سازی برای بهینه کردن مقادیر ضرایب مشخصه‌ی افتی و ضرایب مؤثر تناسبی انتگرالی کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان بر اساس یک تابع هدف ترکیبی متشکل از دو تابع هدف از دو جنس متفاوت ارائه شده و با توجه به ضرایب وزنی متفاوت، نتایج مورد بررسی قرار گرفته و رفتار سیستم با توجه به ضرایب بهینه‌شده مورد ارزیابی خواهد گرفت. ابزار بهینه‌سازی استفاده شده جهت عملیات بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات موسوم به (PSO) می‌باشد. ارزیابی نتایج جهت رؤیت کارایی مدل مطرح شده در نرم‌افزار سیمولینک متلب ارائه شده است.

کلیدواژه: پایداری سیگنال کوچک، ریزشبکه جزیره‌ای، کنترل افتی، بهینه‌سازی کنترل افتی.

فهرست مطالب

فصل اول:	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ انگیزه‌های تحقیق	۲
۳-۱ بیان مسئله	۳
۴-۱ اهداف تحقیق	۴
۵-۱ روش کار	۴
۶-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم:	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ ریز شبکه	۹
۳-۲ کنترل مبدل‌های موازی	۱۰
۴-۲ کنترل ارباب-برده (Master – Slave)	۱۰
۵-۲ کنترل تقسیم جریان	۱۱
۶-۲ مشخصه‌ی اف‌تی	۱۲
۷-۲ نیاز به روش‌های بهینه‌سازی در ریز شبکه	۱۶
۱-۷-۲ بهینه‌سازی مشخصه اف‌تی	۱۷

۲-۷-۲	مروری بر کاربرد بهینه‌سازی مشخصه‌ی اف‌تی	۱۷
۸-۲	پایداری ریزشبکه در حالت متصل به شبکه	۱۹
۹-۲	پایداری ریزشبکه در حالت مستقل از شبکه اصلی	۲۰
۱-۹-۲	پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه در حالت مستقل از شبکه اصلی	۲۰
۱۰-۲	مروری بر مطالعات گذشته	۲۱
۱۱-۲	جمع‌بندی	۲۹
	فصل سوم:	۳۱
۱-۳	مقدمه	۳۲
۲-۳	تشریح روش مبتنی بر مشخصه‌ی اف‌تی	۳۲
۳-۳	کنترل ریزشبکه در حالت مستقل از شبکه	۳۶
۱-۳-۳	کنترل‌کننده‌ی توان و کنترل‌کننده‌ی مشخصه‌ی اف‌تی	۳۷
۲-۳-۳	کنترل‌کننده‌ی ولتاژ	۴۰
۳-۳-۳	کنترل‌کننده‌ی جریان	۴۲
۴-۳-۳	فیلتر LC و مدل اندوکتانس تزویج	۴۳
۵-۳-۳	مدل کامل رابط‌های تولید پراکنده	۴۴
۶-۳-۳	مدل ترکیبی دو اینورتر موازی	۴۵
۷-۳-۳	مدل شبکه و مدل بار امپدانس ثابت	۴۸
۸-۳-۳	مدل ریزشبکه کامل	۵۰

۴-۳ بهینه‌سازی مشخصه‌ی افتی در بهبود رفتار دینامیکی	۵۱
۵-۳ روش بهینه‌سازی	۵۲
۶-۳ توابع هدف	۵۴
۱-۶-۳ تابع هدف اول	۵۴
۲-۶-۳ تابع هدف دوم	۵۵
۳-۶-۳ تابع هدف ترکیبی	۵۵
۷-۳ جمع‌بندی	۵۶
فصل چهارم:	۵۷
۱-۴ مقدمه	۵۸
۲-۴ ریزش‌بکه مورد مطالعه	۵۸
۳-۴ اطلاعات ریزش‌بکه مورد مطالعه	۵۸
۴-۴ نتایج شبیه‌سازی	۵۹
۱-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی مدل سیگنال کوچک سیستم جهت تعیین ضرایب مؤثر	۶۰
۲-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان در سیمولینک متلب	۶۷
۱-۲-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی	
..... $W1=0.1, W2=0.9$	۶۹
۲-۲-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی	
..... $W1=0.5, W2=0.5$	۷۱

۳-۲-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی

۷۳ $W1=0.9, W2=0.1$

۷۵ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان در مقادیر ضریب غیر بهینه

۵-۲-۴-۴ بررسی پایداری سیستم با ضرایب وزنی متفاوت با در نظر گرفتن نسبت X/R در حالت

۷۸ بهینه و حالت غیر بهینه

۵-۴ جمع‌بندی ۸۲

۸۵ فصل پنجم:

۱-۵ نتیجه‌گیری ۸۶

۲-۵ کارهای آینده ۸۶

۸۷ پیوست

۱- مروری بر الگوریتم PSO برای حل مسائل بهینه‌سازی ۸۷

۲- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ۹۳

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ۹۵

۹۸ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: دو اینورتر موازی [۵]..... ۱۰
- شکل ۲-۲: مدل معادل دو اینورتر موازی در یک باس مشترک [۱۱]..... ۱۴
- شکل ۳-۲: نمودار فازور [۱۱]..... ۱۴
- شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام کنترل افقی مرسوم [۱۱]..... ۱۵
- شکل ۵-۲: مشخصه افت $P-\omega$ و $Q-E$ [۱۱]..... ۱۶
- شکل ۱-۳: مدل منابع مبتنی بر اینورتر [۷۱]..... ۳۷
- شکل ۲-۳: کنترل کننده توان و کنترل کننده افقی در حالت مستقل از شبکه اصلی [۷۰]..... ۳۸
- شکل ۳-۳: کنترل کننده ولتاژ [۷۰]..... ۴۱
- شکل ۴-۳: کنترل کننده جریان [۷۰]..... ۴۳
- شکل ۱-۴: سیستم مورد مطالعه..... ۵۹
- شکل ۲-۴: مقادیر ویژه سیستم به ازای تغییر K_{pc} در بازه‌ی [۰ ۱۰۰۰]..... ۶۲
- شکل ۳-۴: مقادیر ویژه سیستم با توجه به بازه‌ی تغییر ضریب K_{pu} در [۰ ۵۰]..... ۶۲
- شکل ۴-۴: مقادیر ویژه سیستم با توجه به تغییر ضریب K_{ic} در بازه [۰ ۵۰]..... ۶۳
- شکل ۵-۴: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب K_{iu} در بازه‌ی [۰ ۱۰۰۰]..... ۶۳
- شکل ۶-۴: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی m_p در بازه‌ی [۰/۰۰۰۰۰۰۱ ۰/۰۱]..... ۶۴
- شکل ۷-۴: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی n_q در بازه‌ی [۰/۰۰۰۰۰۰۱ ۰/۰۱]..... ۶۵

شکل ۴-۸: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی m_p در بازه‌ی $[۰/۰۰۰۰۰۴ \ ۰/۰۰۰۰۰۸۷]$

۶۶

شکل ۴-۹: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی n_q در بازه‌ی $[۰/۰۰۰۰۰۱ \ ۰/۰۰۰۰۰۷۳]$

شکل ۴-۱۰: مقادیر ویژه سیستم با توجه به بازه‌ی تغییر ضریب K_{pu} در $[۱ \ ۲۳/۲]$ ۶۶

شکل ۴-۱۱: مقادیر ویژه سیستم با توجه به تغییر ضریب K_{ic} در بازه $[۰ \ ۰/۹]$ ۶۷

شکل ۴-۱۲: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.1$

$W2=0.9$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۰/۱۳$ ۷۰

شکل ۴-۱۳: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.1$

$W2=0.9$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۳/۴۸$ ۷۱

شکل ۴-۱۴: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.5$

$W2=0.5$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۰/۱۳$ ۷۲

شکل ۴-۱۵: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.5$

$W2=0.5$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۳/۴۸$ ۷۳

شکل ۴-۱۶: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.9$

$W2=0.1$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۰/۱۳$ ۷۴

شکل ۴-۱۷: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.9$

$W2=0.1$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=۳/۴۸$ ۷۵

شکل ۴-۱۸: ولتاژ خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه ۷۶

شکل ۴-۱۹: توان اکتیو خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه ۷۷

شکل ۴-۲۰: فرکانس خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه ۷۷

شکل ۴-۲۱: توان راکتیو خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه ۷۸

شکل ۴-۲۲: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.1, W2=0.9$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0.13$ ۷۹

شکل ۴-۲۳: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.5, W2=0.5$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0.13$ ۷۹

شکل ۴-۲۴: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.9, W2=0.1$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0.13$ ۸۰

شکل ۴-۲۵: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.1, W2=0.9$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$ ۸۰

شکل ۴-۲۶: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.5, W2=0.5$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$ ۸۱

شکل ۴-۲۷: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.9, W2=0.1$ و با

در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$ ۸۱

شکل ۴-۲۸: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم در حالت ضرایب غیر بهینه ۸۲

شکل ۱: طرح تکرار یادگیری ذرات [۸۳] ۹۲

شکل ۲: فلوچارت الگوریتم PSO [۸۳] ۹۴

شکل ۳: فلوچارت الگوریتم MOPSO [۹۰] ۹۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱: مشخصات ریزش‌بکه و مقادیر اولیه ۶۰

جدول ۴-۲: مقادیر X و R خطوط و نسبت X/R [۷۸، ۷۹] ۶۸

جدول ۴-۳: بهترین جواب ممکن از نمودار همگرایی با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط ۶۸

جدول ۴-۴: مقادیر ضرایب کنترل‌کننده‌ها در حالت بهینه با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط ۶۹

جدول ۴-۵: مقادیر ضرایب کنترل‌کننده‌ها در حالت بهینه با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط ۶۹

فهرست نمادها و متغیرها

فرکانس قطع فیلتر پایین گذر	ω_c
فاکتور تبدیل لاپلاس	s
ولتاژهای خروجی در مرجع dq	u_{od}, u_{oq}
جریان‌های خروجی در مرجع dq	i_{oq}, i_{od}
بهره‌های افقی ثابت	m_p, n_q
فرکانس زاویه‌ای مبنای مشترک	ω_{com}
بهره (PI) ولتاژ	K_{iu}, K_{pu}
خازن هر فاز فیلتر LC	C_f
بهره کنترل	G
بهره (PI) جریان	K_{pc}, K_{ic}
جریان فیلتر در مبنای dq	i_{ld}, i_{lq}
اندوکتانس هر فاز	L_f
ولتاژ باس محور dq	u_{bq}, u_{bd}
ولتاژ اینورتر محور dq	u_{id}, u_{iq}
مقادیر حالت ماندگار در نقطه کار اولیه	$\omega_o, I_{ld}, I_{lq}, U_{od}, U_{oq}, I_{od}, I_{oq}$
نقطه‌ی اتصال تولید پراکنده به گره‌های ریزشبکه	M_{INV}
نقطه‌ی اتصال خطوط به گره‌ها	M_{LOAD}

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

از دهه‌های گذشته بسیاری از متخصصین و پژوهشگران در حوزه‌ی انرژی با مسائل مربوط به انرژی‌های تجدیدناپذیر نظیر سوخت‌های فسیلی که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به زغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت خام اشاره کرد و همچنین معایب مربوط به آن نظیر آلودگی‌های زیست‌محیطی، روبه‌رو شده‌اند [۱، ۲]. از این‌رو استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی بادی، انرژی خورشیدی، سلول‌های سوختی و ... به دلیل مزایای تجدیدپذیر و عدم آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. امروزه این منابع تجدیدپذیر به‌صورت واحدهای تولید کوچک در نزدیکی مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند که اصطلاحاً به آن‌ها تولید پراکنده^۱ گفته می‌شوند. از این‌رو به‌عنوان یک پشتیبان و حتی یک جایگزین قابل‌اعتماد برای سیستم‌های قدرت گسترده محسوب می‌شوند. اکثر این منابع دارای ماهیت جریان مستقیم (DC)^۲ می‌باشند و به این دلیل که شبکه‌های قدرت و مصرف‌کنندگان از نوع سیستم‌های جریان متناوب می‌باشند، منابع تولید پراکنده باید از طریق تجهیزات الکترونیک قدرت نظیر اینورترها به شبکه متصل شوند [۳، ۴]. این منابع مبتنی بر اینورتر می‌توانند به‌صورت موازی که شامل چندین منبع نیز باشند، جهت تأمین نیاز مصرف‌کنندگان نیازمند به یک سیستم کنترلی می‌باشند. استراتژی‌های کنترلی متفاوتی نظیر تقسیم جریان، مشخصه‌ی افتی و کنترل ارباب-برده جهت کنترل این منابع بکار گرفته شده است.

۱-۲ انگیزه‌های تحقیق

در حال حاضر، با توجه به دیدگاه بلندمدت کشورها جهت حفظ تنوع در سبد انرژی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر از دیدگاه مسائل زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هرگونه تغییرات در ساختار شبکه‌های برق باعث مطرح‌شدن مسائل زیادی در امتداد خود می‌شود. این منابع که به‌صورت

^۱ Distributed Generation

^۲ Direct Current

واحدهای تولید کوچک مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، به منابع تولید پراکنده شناخته می‌شوند. این منابع با توجه به ساختار شبکه جهت تأمین نیاز مصرف‌کنندگان، نیازمند بهره‌گیری از تجهیز الکترونیک قدرت اینورتر می‌باشند. همچنین جهت تأمین انرژی، بهره‌گیری از چندین واحد تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر به صورت موازی مورد توجه می‌باشد. جهت کنترل این واحدها روش‌های کنترلی متفاوتی توسط متخصصین عنوان شده است که یکی از روش‌های کنترلی که طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، روش کنترل اکتی می‌باشد. از مهم‌ترین مزایای این روش کنترلی می‌توان به عدم نیاز ارتباط بین اینورترها جهت کنترل شبکه اشاره کرد. از این رو بهینه‌سازی مشخصه‌ی اکتی تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورترهای موازی جهت تأمین نیاز مصرف‌کنندگان به صورت مطلوب می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی مهم عنوان شود.

۱-۳ بیان مسئله

با توجه تجدیدنپذیری و آلودگی منابع سوخت‌های فسیلی، بهره‌گیری از منابع تولید انرژی کوچک در نزدیکی محل مصرف مورد توجه قرار گرفته است. این منابع تولید انرژی الکتریکی که عموماً در ظرفیت‌های کوچک می‌باشند در اصطلاح تولیدات پراکنده نامیده می‌شوند و به شبکه‌هایی که دربرگیرنده‌ی منابع تولیدات پراکنده می‌باشند، ریزشبکه گفته می‌شود. به صورت کلی ریزشبکه‌ها در دو حالت متصل و مستقل از شبکه اصلی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. به ریزشبکه‌ای که در حالت مستقل کار می‌کند، ریزشبکه در حالت جزیره‌ای نیز گفته می‌شود. در ریزشبکه مستقل از شبکه‌ی اصلی امکان تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان به صورت مستقل با کاهش هزینه‌ی تولید انرژی و فراهم‌سازی تنوع انرژی وجود دارد [۵].

علاوه بر ویژگی‌های عنوان شده، ریزشبکه‌ها در فرآیند بهره‌برداری با چالش‌هایی نیز روبرو خواهند شد که از جمله‌ی این چالش‌ها می‌توان به ناپایداری سیستم، تغییرات بار، خطا، کیفیت توان، تنظیم ولتاژ و فرکانس و دیگر موارد از مهم‌ترین آن‌ها تبیین یک سیستم کنترلی مناسب جهت تضمین بهره‌برداری مطلوب

از سیستم می‌باشد. مشخصه‌ی اف‌تی به دلیل عدم نیاز به ارتباط بین کنترل‌کننده‌ها برای تنظیم سیگنال ورودی اینورترها جهت بهره‌برداری، امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است. اساس کار مشخصه‌ی اف‌تی عنوان شده در این پژوهش به صورت اف‌ت (فرکانس-توان اکتیو و ولتاژ-توان راکتیو) می‌باشد. انتخاب مناسب ضرایب تقسیم توان و پارامترهای کنترل‌کننده برای بهبود عملکرد کنترل سیستم در صورت بروز هرگونه خطا یا تغییر شرایط بار در ریزشبه لازم است. از طریق چندین روش آزمون و خطا، می‌توان انتخاب مناسبی از پارامترهای کنترل را انجام داد، اما با این حال، این روش‌ها می‌توانند پیچیدگی بیشتری را تحمیل کرده و زمان بیشتری را هنگام کار با تعداد بیشتری کنترل‌کننده در سیستم ریزشبه تحمیل کنند. از این رو استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر اساس ابزار بهینه‌سازی الگوریتم‌های فرا تکاملی می‌تواند انتخاب بسیار خوبی جهت تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ها باشند. در نهایت می‌توان با بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده ریزشبه در مواقع بروز خطا و انتخاب دقیق این ضرایب توسط ابزارهای بهینه‌سازی به یک رفتار دینامیکی مناسب دست یافت.

۴-۱ اهداف تحقیق

در این پژوهش مطالعه بر روی مسئله‌ی بهینه‌سازی مشخصه‌ی اف‌تی برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم ریزشبه در حالت مستقل صورت گرفته است. با توجه به اینکه در کنترل به روش اف‌تی به دلیل عدم نیاز به پیوندهای ارتباطی پیچیده بین منابع می‌توان نیازهای مصرف‌کننده را تأمین نمود، انتخاب ضرایب بهینه برای مشخصه‌ی اف‌تی و کنترل‌کننده‌ی ولتاژ و جریان می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی مهم در نظر گرفته شود.

۵-۱ روش کار

با توجه به اینکه مسئله بهبود رفتار دینامیکی سیستم در مواقع خطا و تغییرات بار یک مسئله‌ی اساسی می‌باشد، در این پژوهش ابتدا یک ریزشبه (AC) با دو واحد تولید پراکنده متصل به سه بار ارائه شده است

و روش کنترل افی مبتنی بر افت (فرکانس-توان اکتیو) و (ولتاژ-توان راکتیو) پیاده‌سازی می‌شود. سپس جهت بررسی پارامترهای افی مؤثر بر رفتار دینامیکی سیستم ابتدا یک مدل سیگنال کوچک از کل سیستم ارائه خواهد شد. سپس با بررسی پارامترهای مشخصه‌ی افی و دیگر کنترل‌کننده‌ها تأثیر این ضرایب بر رفتار سیستم مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و در همین حال ضرایب مؤثر بر رفتار سیستم تعیین خواهند شد. سپس یک تابع هدف ترکیبی بر اساس توان و فرکانس سیستم ارائه خواهد شد و با توجه به ضرایب وزنی در مقادیر متفاوت مقادیر ضرایب مؤثر بر رفتار سیستم به دست آورده خواهد شد. ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات جهت تعیین مقادیر بهینه‌ی ضرایب مشخصه‌ی افی و دیگر ضرایب بر اساس تابع هدف ترکیبی ارائه‌شده و پیاده‌سازی خواهد شد. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار سیمولینک متلب انجام خواهد شد. در این پژوهش نشان داده خواهد شد که بهینه‌سازی پارامترهای مشخصه‌ی افی و دیگر پارامترهای مؤثر در کنترل‌کننده‌ها می‌توانند تأثیر زیادی بر رفتار دینامیکی سیستم داشته باشند.

۱-۶ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم به بررسی مطالب مرتبط با کنترل‌کننده‌های مرسوم در ریزشبکه‌ها، همچنین مشخصه‌ی افی و نحوه عملکرد مشخصه‌ی افی، مسائل مرتبط با بهینه‌سازی و کاربرد بهینه‌سازی در مشخصه‌ی افی، مفاهیم پایداری در ریزشبکه‌های متصل و مستقل و پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه‌های مستقل و مروری بر کارهای انجام‌شده در حوزه‌ی کنترل و پایداری و بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های ریزشبکه پرداخته می‌شود. در فصل سوم با تشریح روش افی به‌طور کامل و همچنین بررسی مدل تمام اجزای شبکه، به مدل سیگنال کوچک کل اجزای شبکه پرداخته خواهد شد و ماتریس سیستم به دست آورده خواهد شد. همچنین جهت حل مسئله بهینه‌سازی، ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه‌شده و مزیت‌های این ابزار تبیین شده است. در انتها یک تابع هدف ترکیبی بر اساس دو تابع هدف از جنس‌های مختلف ارائه‌شده و با توجه روش ارائه‌شده

با ضرایب وزنی متفاوت، در شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت که این شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی در فصل چهارم ارائه شده است. در فصل پنجم به بررسی نتایج و پیشنهادات پرداخته خواهد شد.

فصل دوم:

ریز شبکه و مشخصه‌ی افتی

۱-۲ مقدمه

کاهش تدریجی سوخت‌های فسیلی، راندمان پایین انرژی و مشکلات زیست‌محیطی که در سراسر جهان منجر به ترویج منابع انرژی جایگزین مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی، سلول‌های سوختی، سیستم‌های گرمایشی و میکرو توربین‌ها را برخلاف منابع معمولی ترویج کرده است. علاوه بر این، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)^۱ در شبکه برق موجود به عنوان یک راه حل مطمئن و قوی برای سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های اصلی سیستم برق سنتی این است که کل شبکه باهم به یک شبکه بزرگ متصل می‌شوند، مهم‌ترین مزیت آن توانایی بهره‌وری کامل از مصرف انرژی است، مهم‌ترین معایب آن هزینه‌های بالا، مشکلات عملیاتی، پاسخگویی به نیازهای فزاینده کاربران برای ایمنی و قابلیت اطمینان دشوار است. به خصوص در سال‌های اخیر، پس از چندین سری خاموشی بزرگ، آسیب‌پذیری شبکه برق کاملاً در معرض دید بوده است؛ بنابراین، محققان شروع به جستجوی روش‌های دیگری برای توسعه سیستم قدرت کردند. کارشناسان پس از خاموشی در آمریکای شمالی در سال ۲۰۰۳ به این نتیجه رسیده اند که توسعه تولیدات پراکنده بسیار آسان‌تر و سریع‌تر از اصلاح شبکه برای تقویت امنیت است.

در تولید پراکنده از انرژی‌های متنوعی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی محلی برای تولید نیرو استفاده می‌شود. تولید پراکنده دارای مزایای مانند آلودگی کمتر، راندمان انرژی بالاتر، انعطاف در محل نصب و... در مقایسه با تولید برق به روش سنتی می‌باشد که می‌تواند موجب صرفه‌جویی در منابع انتقال و توزیع، کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش تلفات خط انتقال شود. همچنین می‌تواند ظرفیت کلی شبکه برق را کاهش داده و قابلیت اطمینان منبع تغذیه را بهبود بخشد، در نتیجه یک مکمل قوی و پشتیبانی

^۱ Renewable Energy System

مؤثر از شبکه برق است. در ۳۰ سال گذشته، بیشتر کشورها در دستور کار خود تولید پراکنده را قرار داده‌اند، محققان شروع به مطالعه دقیق مزایای بالقوه سیستم تولید پراکنده کرده‌اند.

با استفاده از فناوری‌های جدید، به‌ویژه توسعه رابط‌های الکترونیک قدرت و نظریه کنترل مدرن، مفهوم ریزشبکه پدیدار شد. ریزشبکه یک سیستم کوچک‌تر و مستقل می‌باشد که از فناوری مدرن زیادی استفاده می‌کند. توربین‌های گازی، انرژی باد، انرژی خورشیدی، سلول‌های سوختی، دستگاه‌های ذخیره انرژی را در کنار هم قرار می‌دهد و به‌طور مستقیم به کاربر متصل می‌شود.

۲-۲ ریزشبکه

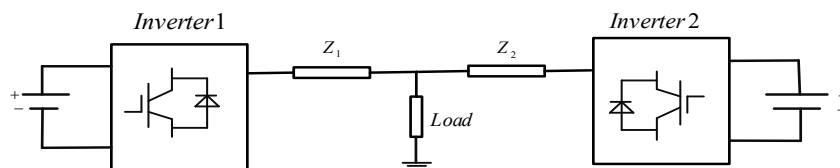
ریزشبکه یک سیستم توزیع انرژی الکتریکی شامل بارها و منابع انرژی توزیع شده می‌باشد که می‌توانند به‌صورت کنترل شده و هماهنگ در حالت متصل به شبکه و در حالت جزیره‌ای (جدا از شبکه) کار کنند. انواع مختلفی از منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان مثال سلول‌های خورشیدی (PV)^۱، توربین‌های بادی کوچک و غیره به‌عنوان تولیدکننده توان در ریزشبکه استفاده می‌شود. تولید پراکنده (DG)^۲، دستگاه‌های ذخیره کننده انرژی و بارهای قابل کنترل معمولاً توسط اینورترهای منبع ولتاژ به شبکه وصل می‌شوند [۶،۷]. به دلیل کنترل انعطاف‌پذیر اینورتر رابط شبکه، انعطاف‌پذیری کنترل ریزشبکه و حالت عملکرد ریزشبکه افزایش می‌یابد. با این حال، ساختار شبکه و ویژگی‌های عملیاتی ریزشبکه با ساختار شبکه سنتی بسیار متفاوت است. در همین حال، اینرسی شبکه کاهش می‌یابد و این باعث می‌شود مشکل حفظ تعادل انرژی و ثبات شبکه افزایش یابد؛ بنابراین، طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل روش پایداری شبکه سنتی نمی‌تواند ویژگی‌های ریزشبکه را به‌طور دقیق توصیف کند. در نتیجه تحقیقات پایداری ریزشبکه به یک مسئله مهمی تبدیل شده است. در ادامه به بررسی پایداری در ریزشبکه پرداخته می‌شود.

^۱ Photovoltaic Power

^۲ Distributed Generation

۳-۲ کنترل مبدل‌های موازی

مبدل‌ها یا اینورترها به‌عنوان رابط بین شبکه و منابع تولید پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از وظایف اینورترها پردازش توان خروجی با دامنه‌ی ولتاژ قابل کنترل و همچنین فرکانس خروجی قابل قبول می‌باشد. سپس این توان خروجی پردازش شده از منابع مختلف به یک ریزشبه تغذیه می‌شود که می‌تواند هم‌زمان به شبکه اصلی متصل یا مستقل از آن کار کند. این امر همان‌طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است زمانی تحقق می‌یابد که اینورترها به‌صورت موازی باهم قرار گرفته باشند. این قابلیت کارکرد موازی می‌تواند قابلیت اطمینان مطلوب و امکان ارتقاء سیستم را بدون هیچ تجدید ساختاری فراهم کند. این امر نیازمند یک سیستم کنترل قوی می‌باشد که بتواند اندازه‌ی فرکانس و ولتاژ خروجی در شرایط بحرانی در محدوده‌ی مجاز کارکرد اینورترها قرار دهد. از دهه‌های گذشته روش‌های کنترل متفاوتی جهت بهره‌برداری از اینورترها توسط محققین ارائه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش کنترل ارباب-برده یا (Master-Slave)، روش کنترل تقسیم جریان و مشخصه‌ی اف‌تی اشاره کرد. در ادامه به تبیین روش‌های ذکر شده پرداخته خواهد شد.



شکل ۱-۲: دو اینورتر موازی [۵]

۴-۲ کنترل ارباب-برده (Master – Slave)

همان‌طور که از نام این روش پیداست، در این روش یک اینورتر به‌عنوان ارباب یا استاد در محوریت دیگر اینورترها عمل می‌کند. اینورتر استاد در حالت ولتاژ کنترل شده به‌گونه‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد

که ولتاژ خروجی دیگر اینورترهایی را که در حالت جریان کنترلی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد را، کنترل کند. این روش درواقع از اینورترهای کنترل‌شده جریان به‌صورت موازی با یک اینورتر منبع ولتاژی به‌عنوان استاد قرار می‌گیرد. این روش در مواقع تعداد بالای اینورترهای موازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مشکلات اساسی این روش قابلیت اطمینان پایین آن به دلیل وابسته بودن کل سیستم به اینورتر استاد می‌باشد، به‌طوری‌که با خارج شدن اینورتر استاد، کل سیستم دچار فروپاشی خواهد شد. از دیگر معایب این روش وابستگی سیستم به یک پهنای باند بالا جهت ارتباط بین اینورتر استاد و دیگر اینورترها می‌باشد که این امر هزینه‌های بسیاری برای سیستم به همراه خواهد داشت. راه‌حل‌های متعددی جهت حل مشکلات مذکور در این روش ارائه شده است که می‌توان به انتخاب اتفاقی اینورتر استاد، انتخاب خودکار یک اینورتر استاد بر اساس شکست اینورتر استاد قبلی و انتخاب یک اینورتر استاد بر اساس بالاترین مقدار توان آن نام برد [۸، ۹].

۲-۵ کنترل تقسیم جریان

در این روش کنترلی کلیه‌ی اینورترها اطلاعات مربوط به جریان خود را باهم تقسیم خواهند کرد. چندین استراتژی جهت تعیین این جریان وجود دارد که تقسیم جریان میانگین، تقسیم جریان بیشینه ازجمله‌ی آن‌ها می‌باشد. با توجه به چند ورودی و چند خروجی بودن سیستم‌های مبتنی بر این روش، چندین طرح برای تقسیم جریان ارائه شده است که یک مورد از آن‌ها می‌توان به تقسیم برابر بارها در بین اینورترها جهت شناسایی جریان نامتعادل اشاره کرد [۱۰].

۶-۲ مشخصه‌ی اف‌تی

هماهنگی بین واحدهای تولیدی پراکنده (DG) برای رفع نیاز روزافزون به برق ضروری است. بسیاری از استراتژی‌های کنترل مانند کنترل اف‌تی، کنترل ارباب-برده، کنترل تقسیم جریان^۱ متوسط به‌طور گسترده در سراسر جهان برای کار با اینورترهای موازی جهت بارگذاری در شبکه DG به کار گرفته شده است. در میان این روش‌ها، روش کنترل اف‌تی به دلیل عدم وجود پیوندهای ارتباطی مهم در بین اینورترهای موازی، برای هماهنگی واحدهای تولید پراکنده در یک ریزشبه به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است.

سیستم‌های تولید پراکنده برای تأمین انرژی الکتریکی بسیار قابل اطمینان مناسب هستند. از طرفی، اتصال مستقیم منابع تولید انرژی، مانند سلول‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی و میکرو توربین‌ها به یک شبکه دشوار است. در نتیجه ریزشبه واسط بین منابع تجدیدپذیر و شبکه است. علاوه بر این، ریزشبه را می‌توان به‌طور جداگانه اداره کرد یا به یک سیستم توزیع اصلی متصل کرد. همچنین، در مقایسه با یک واحد تولید پراکنده تنها، یک ریزشبه از ظرفیت و انعطاف‌پذیری کنترل بالایی برای تحقق الزامات مربوط به کیفیت توان برخوردار است [۱۱].

با توجه به اینکه، انرژی الکتریکی حاصل از منابع تجدیدپذیر در شکل جریان مستقیم (DC) است و توسط یک اینورتر به جریان متناوب (AC)^۲ تبدیل می‌شود؛ بنابراین، اینورتر یک مؤلفه مهم در ریزشبه است. علاوه بر این، یک اینورتر به‌عنوان واسط بین واحد تولید پراکنده، بار و شبکه عمل می‌کند [۱۲]. از اینورترها به‌طور موازی با یک ریزشبه نیز برای بهبود کارایی استفاده می‌شود. کار موازی اینورترها، اغلب قابلیت اطمینان بالایی را فراهم می‌کند، زیرا در صورت خرابی اینورتر، ماژول‌های باقیمانده همچنان می‌توانند قدرت لازم را به بار تحویل دهند. چندین روش کنترلی برای عملکرد مناسب اینورترهای موازی در

^۱ Average Current Sharing

^۲ Alternating Current

ریزشبکه ارائه شده است. در بین این روش‌ها، کنترل افقی ولتاژ و فرکانس محبوبیت زیادی به دست آورده و به عنوان روشی کاملاً تثبیت شده در نظر گرفته شده است [۱۱]. همان طور که در بالا عنوان شده است، ویژگی اصلی این روش کنترلی، کنترل توان اکتیو و توان راکتیو توسط کنترل فرکانس و اندازه ولتاژ خروجی می باشد. مدار معادل دو اینورتر که به طور موازی به یک باس مشترک متصل شده اند، در شکل (۲-۲) نشان داده شده است و نمودار فازور در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در یک سیستم القایی، توان اکتیو فعال و راکتیو که از هر اینورتر به باس منتقل می شود به شرح زیر می تواند بیان شود [۱۱]:

$$P_i = \frac{E_i V_i \sin \alpha_i}{x_i} \quad (۱-۲)$$

$$Q_i = \frac{E_i V_i \cos \alpha_i - V_i^2}{x_i} \quad (۲-۲)$$

که در آن E و V به ترتیب دامنه ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ باس مشترک هستند، α زاویه توان است و x راکتانس خروجی اینورتر است.

طبق معادلات (۱-۲) - (۲-۲) و زاویه توان کوچک α ($\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = \alpha$)، توان اکتیو تزریقی از اینورتر به باس مشترک عمده‌تاً تحت تأثیر زاویه توان است. در مقابل، توان راکتیو به شدت وابسته به اختلاف دامنه E و V است. علاوه بر این، فاز ولتاژ خروجی اینورتر را می توان با تغییر فرکانس ولتاژ خروجی اینورتر تغییر داد. در نتیجه، کنترل بی سیم اینورترهای موازی در درجه اول از افت فرکانس و افت ولتاژ خروجی برای کنترل توان خروجی اینورتر استفاده می کند. بلوک دیاگرام کنترل افقی مرسوم در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. علاوه بر این، معادلات $P-\omega$ و $Q-E$ در شکل (۵-۲) به صورت زیر می باشد:

$$\omega_K = \omega^* - m_K P_K, \quad (۳-۲)$$

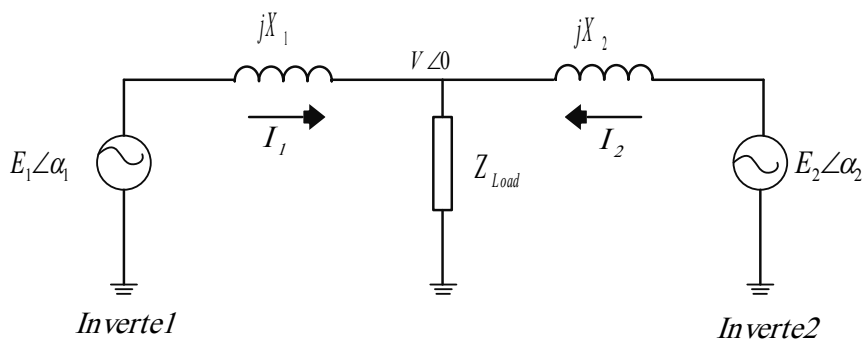
$$E_K = E^* - n_K Q_K, \quad (۴-۲)$$

که n_K, m_K, Q_K, P_K به ترتیب توان اکتیو حقیقی خروجی، توان راکتیو حقیقی خروجی، ضریب افت فرکانس و ضریب افتی ولتاژ k-امین اینورتر می‌باشد؛ بنابراین، ω^* و E^* فرکانس و دامنه ولتاژ اندازه‌گیری شده می‌باشد. ضرایب افت ولتاژ و فرکانس از معادلات (۲-۳) و (۲-۴) به‌صورت زیر می‌باشد:

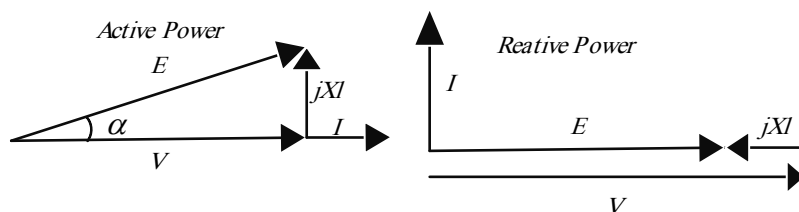
$$m_K = \frac{\Delta\omega}{P_{K \max}}, \quad (۲-۵)$$

$$n_K = \frac{\Delta E}{Q_{K \max}}, \quad (۲-۶)$$

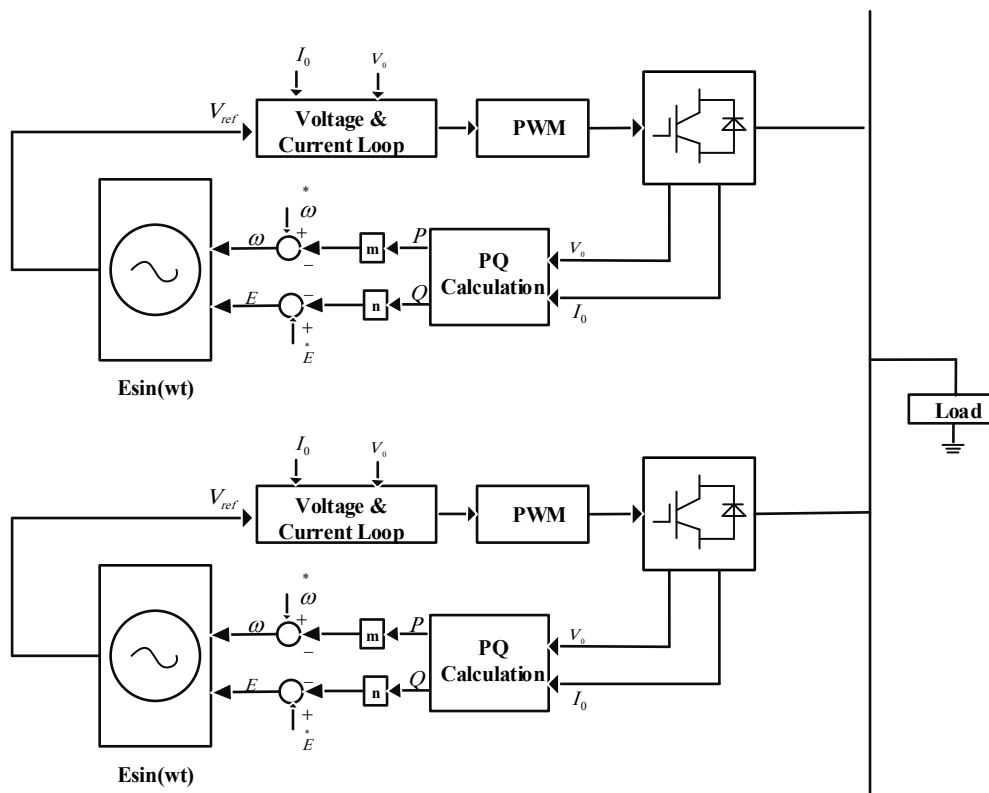
که در آن $\Delta\omega$ و ΔE به ترتیب بیشینه مقادیر انحراف فرکانس و ولتاژ می‌باشد. $P_{K \max}$ و $Q_{K \max}$ ولتاژ نامی اکتیو و راکتیو تأمین‌شده توسط سیستم می‌باشد.



شکل ۲-۲: مدل معادل دو اینورتر موازی در یک باس مشترک [۱۱]

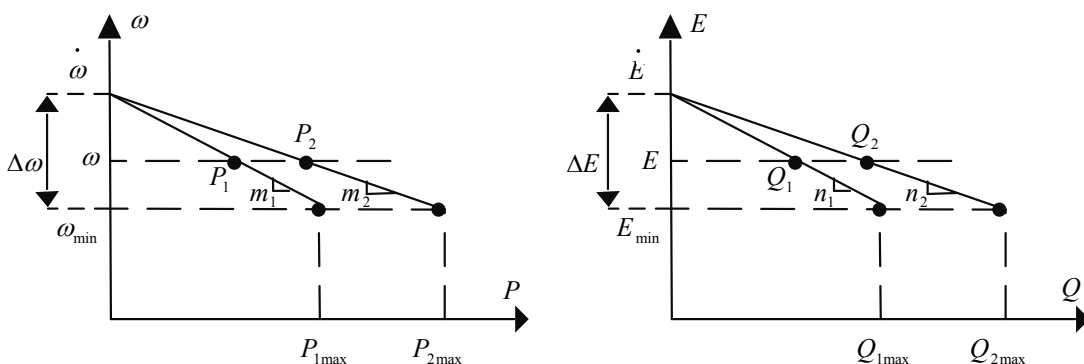


شکل ۲-۳: نمودار فازور [۱۱]



شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام کنترل افی مرسوم [۱۱]

افزایش ضرایب اف می‌تواند منجر به تقسیم توان مطلوب شود. مهم‌ترین مزیت روش کنترل اف، اجتناب از پیوندهای ارتباطی بحرانی بین اینورترهای موازی است. فقدان پیوندهای ارتباطی بین اینورترهای موازی، انعطاف‌پذیری قابل توجه و قابلیت اطمینان بالایی را فراهم می‌کند. با این حال، روش مرسوم کنترل افی دارای چندین مشکل، مانند پاسخ گذرا آهسته، تبادل بین تنظیم ولتاژ و تقسیم بار، هارمونیک ضعیف بین اینورترهای موازی در مورد بارهای غیرخطی، عملکرد ضعیف با منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد [۱۱].



شکل ۵-۲: مشخصه افت $P-\omega$ و $Q-E$ [۱۱]

۷-۲ نیاز به روش‌های بهینه‌سازی در ریزشبه

در یک ریزشبه ولتاژ پایین، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر PI^۱ معمولاً در VSI^۲ منابع DG مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب مناسب ضرایب تقسیم توان و پارامترهای کنترل‌کننده برای بهبود عملکرد کنترل سیستم در صورت بروز هرگونه آشفتگی یا تغییر شرایط بار در ریزشبه لازم است. از طریق چندین روش آزمون و خطا، می‌توان انتخاب مناسبی از پارامترهای کنترل را انجام داد [۱۳]. با این حال، این روش‌ها می‌توانند پیچیدگی بیشتری را تحمیل کرده و زمان بیشتری را هنگام کار با تعداد بیشتری کنترل‌کننده در سیستم قدرت ریزشبه تحمیل کنند. به‌طور کلی، به دلیل عدم وجود اینرسی و تأثیر عملکرد کنترل‌کننده اینورتر مبتنی بر PI در شرایط گذرا، می‌توان انتظار داشت که در ریزشبه جزیره‌ای در مقایسه با حالت متصل به شبکه، میزان تغییر توان و تغییر ولتاژ و سطح فرکانس بیشتر باشد؛ بنابراین، به‌منظور بهبود عوامل PQ در ریزشبه علاوه بر مدیریت هماهنگ توان و استراتژی کنترل تقسیم قدرت، می‌توان روش‌های بهینه‌سازی

^۱ Integral-Derivative Controller

^۲ Voltage Source Inverter

را در سیستم کنترل اینورتر اجرا کرد [۱۴]. بهبود کلی عملکرد قابل اعتماد و پایدار سیستم ریزشبه را می توان با استفاده از روش های کنترل بهینه تضمین کرد [۱۵، ۱۶].

روش های مدرن ابتکاری با استفاده از الگوریتم های جستجوی مبتنی بر هوش مصنوعی^۱ از جمله الگوریتم ژنتیک^۲، بهینه سازی ازدحام ذرات^۳، بهینه سازی کلنی^۴، جستجوی انتشار تصادفی^۵ و ارزیابی دیفرانسیل^۶ و غیره را می توان برای برنامه های سیستم قدرت برای حل مشکلات بهینه سازی به صورت مؤثر استفاده کرد [۱۷، ۱۸، ۱۹].

۲-۷-۱ بهینه سازی مشخصه افتی

ریزشبه از چندین منابع تولید پراکنده (DG) تشکیل شده است که به طور معمول از طریق مبدل های الکترونیک قدرت یکپارچه می شوند. وجود دستگاه های با اینرسی پایین همراه با ماهیت دینامیکی بار، ثبات یک ریزشبه و اثربخشی کنترل کننده را به چالش می کشد، عمدتاً وقتی در حالت جزیره ای کار می کند. در نتیجه بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده برای افزایش کارایی آن در شرایط مختلف عملیاتی ضروری است [۱۹].

۲-۷-۲ مروری بر کاربرد بهینه سازی مشخصه افتی

در [۲۰]، یک روش بهینه سازی تطبیقی کاملاً غیرمتمرکز برای اینورترها برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی در ریزشبه های جزیره ای یکپارچه شده با سیستم های فتوولتاییک خورشیدی و باتری ذخیره کننده

¹ Artificial Intelligence (AI)

² Genetic Algorithm (GA)

³ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Ant-colony Optimization (ATO)

⁵ Stochastic diffusion search (SDS)

⁶ Differential Evaluation (DE)

انرژی پیشنهاد شده است. روش ارائه شده مانند روشی کاملاً غیرمتمرکز و بدون هیچ گونه بار یا اطلاعات توپولوژیکی عمل می کند.

در [۲۱]، بهینه سازی پارامتر کنترل افقی و کنترل مدل داخلی (IMC)^۱ بر اساس یک مدل دقیق سیگنال کوچک برای ریزشبه با اینورتر ارائه شده است. به منظور دستیابی به عملکرد کنترل مقاوم در شرایط مختلف بار، یک رویکرد چهار مرحله ای پیشنهاد شده است: (۱) یک مدل سیگنال کوچک دقیق از یک سیستم چند اینورتر موازی تهیه شده است که با کنترل کننده مدل داخلی کار می کند. مدل سیگنال کوچک توسعه یافته دقیق تر است زیرا دینامیک فیلتر و حلقه قفل شده فاز^۲ را در نظر می گیرد. (۲) بررسی پارامترهای کنترل بحرانی افت کلی و کنترل کننده مدل داخلی که بر پایداری سیستم تأثیر می گذارد، انجام می شود و دامنه پایداری مربوطه آن ها از طریق تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه شناسایی می شود (۳) نتیجه به دست آمده تحت اختلالات مختلف بار تأیید می شود. به دنبال روش فوق، شبیه سازی دامنه زمان انجام می شود که ثابت می کند طرح پیشنهادی پاسخ دینامیکی DG-ها را بهبود می بخشد و به طور همزمان تقسیم توان را بهبود می بخشد. مدل پیشنهادی همچنین با کنترل کننده افتادگی معمولی مبتنی بر PI مقایسه می شود که اثربخشی طرح پیشنهادی را نشان می دهد.

مشکل بهینه سازی برای ریزشبه های جزیره ای مبتنی بر افت در سال های اخیر تا حدی بررسی شده است، به طور معمول با هدف کاهش هزینه های عملیاتی DG-ها، به عنوان مثال مصرف سوخت [۲۲]، ساخت توابع افت خطی و غیر خطی بر اساس هزینه تولید برق برای دستیابی به حداکثر منافع اقتصادی در [۲۳] - [۲۵] ارائه شده است. با این وجود، بهینه سازی هزینه تولید لزوماً اتلاف برق را به حداقل نمی رساند، زیرا

^۱ Internal Model Control

^۲ Phase-locked Loop

دستیابی به اقتصادی‌ترین راه‌حل از شبکه می‌تواند منجر به یک وضعیت با کارایی کمتر (از نظر اتلاف برق) اما ارزان‌تر از پیکربندی توزیع اقتصادی توان سیستم قدرت شود.

۲-۸ پایداری ریزشبه در حالت متصل به شبکه

هنگامی که ریزشبه با یک شبکه موازی شد، ولتاژ خروجی و فرکانس آن توسط شبکه حفظ می‌شود؛ بنابراین، مطالعات پایداری برای واحدهای تولید پراکنده یا ریزشبه‌ها با ظرفیت‌های کوچک معمولاً موردنیاز نیست. در نتیجه تحقیقات پیرامون "پایداری اغتشاش کوچک بر تأثیر بهره‌افتی" و "نوسان بار بر پایداری ولتاژ ریزشبه" متمرکز شده است. با تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک یک ریزشبه، می‌توان بهره کنترل اف‌تی مطلوب را به شرط حفظ پایداری ریزشبه انتخاب کرد. وقتی اختلال بزرگی از قبیل اتصال کوتاه رخ می‌دهد، پاسخ دینامیکی انواع مختلف واحدهای تولید پراکنده، سهم واحدهای تولید پراکنده از خطا با استراتژی‌های کنترل مختلف و ویژگی‌های پخش بار در ریزشبه معمولاً مورد بحث قرار می‌گیرد.

در مقایسه با شبکه توزیع، ظرفیت یک ریزشبه بسیار اندک است، در نتیجه اختلالات در یک ریزشبه به ندرت می‌تواند بر تنظیم فرکانس شبکه تأثیر بگذارد؛ بنابراین، پایداری فرکانس و زاویه روتور در یک ریزشبه متصل به شبکه در نظر گرفته نشده است.

زمانی که واحدهای تولید پراکنده دچار اختلال بزرگی مانند اتصال کوتاه می‌شوند، حجم زیاد جریان ورودی در هنگام خطا ممکن است امنیت اینورترها را در عرض چند میلی‌ثانیه تهدید کند؛ بنابراین، پایداری گذرا در شبکه‌ی متصل به ریزشبه به دو دسته پدیده‌های بسیار کوتاه‌مدت و پدیده‌های کوتاه‌مدت تقسیم می‌شود [۲۶].

۹-۲ پایداری ریزشبه در حالت مستقل از شبکه اصلی

با توجه به ویژگی‌های عملکرد ریزشبه، پایداری آن در حالت جزیره‌ای عمدتاً به ساختار ریزشبه، استراتژی کنترل واحدهای تولید پراکنده و غیره بستگی دارد. سرعت پاسخگویی منابع انرژی اولیه مانند PV، توان باد، میکرو توربین‌های گازی کم است، اما قدرت خروجی توسط اینورتر واسط تنظیم می‌شود. در این حالت متفاوت از شبکه سنتی، پایداری ریزشبه در دو دسته پایداری ولتاژ و پایداری فرکانس طبقه‌بندی می‌شود. مشابه تجزیه و تحلیل پایداری ریزشبه در حالت متصل به شبکه، در اینجا تحقیقات در مورد پایداری سیگنال کوچک ریزشبه در حالت جزیره‌ای به‌طور عمده در زمینه‌های تأثیر بهره کنترل، نوسانات بار و تغییرات امپدانس خط بر ولتاژ و فرکانس خروجی واحد تولید پراکنده می‌باشند. پایداری گذرا ریزشبه جزیره عمدتاً شامل تأثیر اختلالات بزرگ مانند خطاهای اتصال کوتاه، مدار باز، از دست دادن واحدهای تولید پراکنده و بارها و غیره بر روی عملکرد ریزشبه می‌باشد. با استفاده از روش تجزیه و تحلیل پایداری گذرا، هنگام بروز اختلال بزرگ می‌توان توانایی ریزشبه برای حفظ پایداری را مورد بحث قرار داد.

پایداری سیگنال کوچک ریزشبه جزیره‌ای به دو دسته پدیده‌های کوتاه‌مدت و پدیده‌های بلندمدت طبقه‌بندی می‌شود و پایداری گذرا به دو دسته‌ی پدیده‌های کوتاه‌مدت و پدیده‌های بلندمدت تقسیم می‌شود [۱۱].

۹-۲-۱ پایداری سیگنال کوچک ریزشبه در حالت مستقل از شبکه اصلی

پایداری سیگنال کوچک (اختلال کوچک) توانایی سیستم در حفظ همگام‌سازی تحت اغتشاشات کوچک مانند تغییرات کوچک بارها و تولیدات می‌باشد [۲۷]. کنترل اُفتی و تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک ابتدا در سیستم‌های برق اضطراری بدون وقفه (UPS)^۱ نشان داده شده است، سپس از این روش در

^۱ Uninterruptible Power Supply

ریزشبکه‌ها استفاده شد. پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه‌ها با یک مدل خطی از شبکه، واحدهای تولید پراکنده، واحدهای کنترل DG-ها و بارها بررسی می‌شود. در حالت خطی، مقادیر ویژه هنگام کار ریزشبکه در نقاط عملکردی مختلف می‌تواند به دست آید. می‌توان رابطه بین مقادیر ویژه با متغیرهای حالت را مورد بررسی قرار داد و مهم‌ترین متغیرهای حالت را برای مقدار ویژه خاص را پیدا کرد که برای بهبود پایداری سیگنال کوچک مفید خواهد بود.

۲-۱۰ مروری بر مطالعات گذشته

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های PI در اینورتر منابع DG در ریز شبکه با استفاده از الگوریتم‌های PSO تنظیم و بهینه‌سازی شده‌اند و این کنترل‌کننده‌های بهینه‌شده با الگوریتم‌های PSO در مقایسه با کنترل‌کننده‌های معمولی PI عملکرد برتر را نشان می‌دهند. در [۲۸] برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های PI غیرخطی VSI متصل به سیستم قدرت ریزشبکه، در حالت مستقل، یک مسئله بهینه‌سازی محدود با روش PSO فرموله شده است. به همین ترتیب، در [۲۹] از روش PSO برای تنظیم کنترل‌کننده‌های PI اینورتر PV متصل به شبکه از طریق یک شبیه‌ساز دیجیتال در زمان واقعی (RTDS)^۱ استفاده شده است. کنترل‌کننده‌های PI بهینه‌شده اینورتر PV پاسخ دینامیکی سیستم PV را در محدوده عملیاتی گسترده‌ای از شرایط تابش خورشید افزایش می‌دهند. الگوریتم PSO همچنین در مرجع [۳۰] برای تنظیم بهره‌ی کنترل ترمینال با برآورد کننده فازی منبع تغذیه بدون وقفه (UPS) مورد استفاده قرار گرفت که منجر به افزایش عملکرد اینورتر UPS با پاسخ دینامیکی بالاتر در شرایط بارگذاری گذرا می‌شود. برای تنظیم کنترل‌کننده PI اینورتر قدرت در سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (HRES)^۲ از روش

^۱ Real Time Digital Simulator

^۲ Hybrid Renewable Energy System

خودتنظیم PSO به صورت فعال^۱ و غیرفعال^۲ در [۳۱] استفاده شده است. در میان دو روش، کمترین شاخص خطا و کاهش سطح فعلی اعوجاج هارمونیکی کل^۳ برای تنظیم خودکار PSO آنلاین در مقایسه با خط خارج مشاهده شد. نتایج حاصل از مطالعه مرجع [۳۲] نشان می‌دهد که اجرای رویکرد بهینه‌سازی PSO، مشکلات قطعی و احتمالی مدیریت انرژی و بهره‌برداری (EOM^۴) را تحت محدودیت‌های عملیاتی از جمله ماهیت تصادفی انرژی‌های نو از جمله باد و خورشید، عدم قطعیت محدودیت‌هایی مانند تعادل نیرو، ذخیره چرخشی، حد توان خروجی واحدهای DG با توجه به نقش عملکردی آن‌ها در ریز شبکه جزیره‌ای، زمان شروع / توقف واحدهای DG حل می‌کند. الگوریتم پیشنهادی PSO با بهبود دوام باتری و سطح استفاده از منبع انرژی تجدیدپذیر در ریز شبکه قادر به کاهش هزینه سوخت و حد انتشار بود. جدا از تنظیم کنترل کننده‌های PI در ریز شبکه، الگوریتم PSO به صورت بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO^۵) در سیستم ترکیبی (بادی خورشیدی) استفاده می‌شود که در آن توابع هدف برای به دست آوردن بهترین تنظیمات سیستم، اندازه‌گیری مناسب اجزای سازنده همراه با پیش‌بینی کمترین افت احتمال منبع تغذیه (LPSP^۶) و کمترین هزینه برق در شبکه است. در مرجع [۳۳] مدل سیگنال کوچک را برای تمامی زیر سیستم‌ها در دستگاه محلی به دست آورده و آنالیز مقادیر ویژه آن نشان می‌دهد که حالت‌های فرکانس پایین غالب نسبت به پارامترهای مذکور در مدل کلی سیگنال کوچک، بسیار حساس هستند هرچند که مدل سازی در این مرجع بسیار پیچیده بوده و نیاز به ساده سازی دارد. مراجع [۳۴] و [۳۵] رابطه بین پایداری سیستم و پارامترهای مؤثر از جمله بهره‌افتی بار^۷ و امپدانس معادل را بررسی کرده است و هیچ‌گونه بهینه‌سازی را برای پارامترهای به دست آمده انجام نداده است. مرجع [۳۶] با استفاده

^۱ Online

^۲ Offline

^۳ Total Harmonic Distortion

^۴ Energy and Operation Management

^۵ Multi Objective Particle Swarm Optimization

^۶ Loss of Power Supply Probability

^۷ Loads Droop Gain

از الگوریتم PSO پارامترهای بهینه‌شده کنترل را برای ریزشبه به دست آورده است اما محدودیت‌های جستجوی بهترین مقادیر پارامترها بدون مدل سیگنال کوچک بسیار دشوار است. مرجع [۳۷] الگوریتم بهینه‌سازی PSO را تنها برای ضرایب PI کنترل‌کننده ولتاژ و جریان انجام داده است و این باعث شد که بهینه‌سازی انجام‌شده بر روی پارامترها به‌طور کامل انجام نشده و باعث می‌شود که آنالیز کاملی برای پایداری سیستم صورت نپذیرد. از دیگر سو الگوریتم‌های کنترلی متفاوتی برای کنترل ریزشبه وجود دارد که هرکدام مدل سیگنال کوچک خاص خود را برای تحلیل عملکرد گذرا و پایدار سیستم دارند لذا با آنالیز مدل سیگنال کوچک و محاسبه پارامترهای مناسب برای آن، تحلیل پایداری سیستم بسیار بهتر انجام می‌پذیرد.

به‌طور کلی کنترل ریزشبه‌ها از سه طریق کنترل PQ، ولتاژ-فرکانس و یا کنترل افتی انجام می‌پذیرد. مراجع [۳۸] و [۳۹] کنترل افتی ریزشبه را ارائه داده‌اند می‌تواند در دو حالت متصل به شبکه و یا مستقل بررسی شود و توزیع بار هر تولیدکننده پراکنده را بدون داشتن ارتباط با یکدیگر تضمین می‌کند که این مسئله از نوسان‌های گذرا در حین کلید زنی بین دو حالت کاری جلوگیری می‌کند. در تحقیقات اخیر موضوع اصلی در ریزشبه‌ها، تخصیص یکسان توان بین تولیدکننده‌های پراکنده و در نتیجه جریان گردشی کم بین آن‌هاست. لذا استراتژی کنترل سلسله مراتبی شکل گرفت [۴۰]. الگوریتم کنترل تطبیقی افتی بر پایه ضرایب افتی کنترل در [۴۱] و نیز کنترل افتی سه لایه در [۴۲] ارائه شده است. در [۴۳] یک الگوریتم کنترل افتی جدید با در نظر گرفتن امپدانس مختلط به‌منظور تخصیص توان بهتر ارائه شده است. در [۴۴] یک مدل سیگنال کوچک ارائه شده است و با آنالیز سیستم به دست آمده، پارامترهای بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شده است.

در مرجع [۴۵] یک کنترل سلسله مراتبی بر پایه کنترل افتی ولتاژ-جریان (V-I) برای مدیریت انرژی ریزشبه‌ها انجام شده است. در مرجع [۴۶] یک کنترل افتی دو مرحله‌ای برای اشتراک جریان میان

تبدیل‌کننده‌های DC-DC طراحی شده است که باعث حفظ پایداری می‌شود. در مرجع [۴۷] ترکیبی از کنترل‌کننده PI و کنترل افقی برای کنترل ولتاژ-فرکانس استفاده شده است و این طرح کنترلی فقط محدود به ریز شبکه‌های نوع DC است. در مرجع [۴۸] یک ساختار دو سطحی برای اشتراک توان اکتیو و توان راکتیو بر پایه کنترل افقی V-I تطبیقی در ریز شبکه‌ها ارائه شده است. هدف از این ساختار حذف هارمونیک‌های ولتاژ است. در مرجع [۴۹] یک کنترل افقی برای ریز شبکه‌های ولتاژ پایین بر پایه فرکانس توان AC به منظور بهبود اشتراک بار و مشخصات ولتاژ طراحی شده است.

مرجع [۵۰] به منظور استفاده از انعطاف‌پذیری و دینامیک سریع اینورتر ولتاژ یک کنترل‌کننده جدید که ترکیبی از کنترل افقی، ولتاژ و جریان است را ارائه می‌دهد که در آن کنترل جریان و ولتاژ، به منظور ردیابی ولتاژ و جریان مرجع، انتخاب شده‌اند. آنالیز کنترل‌کننده فیدبک حالت تزویج متقاطع^۱ در طراحی حلقه جریان به منظور میرا کردن نوسانات در یک ریز شبکه مجزا در [۵۱] بیان شده که نشان می‌دهد خطای حالت ماندگار در این روش افزایش می‌یابد. در [۵۲] و [۵۳] به ترتیب دو روش کنترل فیدبک حالت جداکننده^۲ به منظور کاهش خطای ناشی از تأخیر محاسبات دیجیتال و تأخیر PWM^۳ و نیز به منظور بهبود پاسخ گذرا ارائه شده است.

عملکرد موازی ماژول‌های اینورتر، راهکاری برای افزایش قابلیت اطمینان و بازده اینورترها در ریز شبکه‌ها می‌گردد. تقسیم بار در بین اینورترها در تولیدات پراکنده یک مشکل اساسی است. در [۵۴] امکان توزیع توان بین تولیدات پراکنده موازی با استفاده از یک روش کنترل دوگانه (روش‌های کنترل افقی و کنترل PQ بهبودیافته) در حالت جزیره‌ای از یک ریز شبکه بررسی شده است. مهم‌ترین مزیت این روش کنترل دوگانه، امکان کردن عملکرد بدون هیچ‌گونه ارتباطی بین DG-های موازی است.

¹ Cross-Coupling

² Feedback Decoupling State

³ Puls-Width Modulation

در [۵۵] یک مدل سیگنال کوچک برای اینورتر تک فاز متصل به شبکه ارائه شده است. تأثیر پارامترهای کنترل بر رفتار سیستم با استفاده از مدل معادله حالت پیشنهادی که از آنالیز سیگنال کوچک به دست آمده قابل مطالعه است. نتایج این مدل با صحت سنجی عددی سیستم غیرخطی مقایسه شده است.

یک مدل سیگنال کوچک از یک سیستم ریزشبه اینورتر چندگانه در حالت جزیره‌ای در [۵۶] ارائه می‌شود. این مدل غیرخطی است که رفتار دینامیکی سیستم را توصیف می‌کند. این معادلات غیرخطی سپس در اطراف نقاط عملیاتی پایدار خطی می‌شوند تا مدل سیگنال کوچک را توسعه دهند. نوسان بار برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم انجام می‌شود. صحت مدل از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی ارزیابی می‌شود.

مرجع [۵۷] یک روش کنترل را توصیف می‌کند که برای عملکرد ریزشبه در حالت متصل و جزیره ای استفاده می‌شود. روش توصیف‌شده، دو الگوریتم کنترل را برای عملکرد در حالت متصل به شبکه و عملکرد در حالت جزیره‌ای پیشنهاد می‌کند. به‌طور خاص، در این مقاله یک الگوریتم برای بارزدایی هوشمند در حالت جزیره‌ای و الگوریتم همگام‌سازی برای اتصال مجدد شبکه پیشنهاد شده است.

در [۵۸] روش پیشنهادی اتصال اجزا (CCM)^۱ در حوزه فرکانس برای تجزیه و تحلیل پایداری در محور $d-q$ ، با ارائه یک روش استخراج ماتریس امپدانس از شبکه‌های اتصال سیستم‌های قدرت AC مبتنی بر اینورتر معرفی شده است.

طراحی بهینه‌سازی فیلتر LCL با در نظر گرفتن پایداری اینورترهای درون ریزشبه متصل به شبکه در [۵۹] ارائه و روش PSO با فاکتور تراکم‌پذیری برای یافتن راه‌حل بهینه استفاده شده است. با توجه به تحلیل مقایسه‌ای و نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در این مقاله، روش طراحی پیشنهادی می‌تواند هزینه و کارایی

^۱ Continuous-Conduction Mode

فیلتر را به خوبی متوازن کند و حاشیه پایداری را افزایش دهد، به خصوص برای طراحی پارامترهای فیلتر LCL در ریزشبه مناسب است.

در [۶۰] نشان داده شده است که برخی از بارهای موجود در سیستم‌های توزیع AC می‌توانند سیستم را ناپایدار کنند. این بارها مبدل‌های الکترونیک قدرت و درایورهای موتور تنظیم‌شده هستند. بیشتر این بارها کنترل‌شده یا کنترل نشده یکسو شده هستند. علاوه بر این، بارهای توان ثابت AC بررسی و مدل‌سازی شده است. تأثیرات این بارها در سیستم‌های توزیع AC معمولی مورد مطالعه قرار گرفته و شرایط لازم و کافی برای پایداری سیگنال کوچک فراهم شده است.

در مرجع [۶۱] یک روش مدل‌سازی جدید مبنی بر مدار معادل تونن برای مبدل‌های منبع ولتاژ در ریزشبه در حالت جزیره‌ای ارائه شده است. روش پیشنهادی، کل شبکه متصل به مبدل منبع ولتاژ را با یک مدار معادل تونن تخمین می‌زند. مدار معادل ابتدا با یک امپدانس غیر پویا در نظر گرفته می‌شود. این مدل ساده است اما پاسخ موقت خوبی را ارائه نمی‌دهد. برای مقابله با این مسئله، یک مدار معادل دینامیکی تونن با پویایی شبیه به یک شاخه مقاومت و القاء سری در نظر گرفته شده است. هر دو مدل غیر پویا و پویا با استفاده از یک سیستم تست ریزشبه شبیه‌سازی شده‌اند.

یک روش برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده ریزشبه در حالت جزیره‌ای در [۶۲] ارائه شده است. پارامترهای بهینه کنترل‌کننده با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به دست آمده است. این کار بر اساس به حداقل رساندن خطاها در کنترل‌کننده‌های جریان و ولتاژ انجام می‌شود. سرانجام، برای ارزیابی اثربخشی کنترل‌کننده بهینه‌سازی، شبیه‌سازی انجام شده است.

یک روش بهینه‌سازی جدید برای یافتن پارامترهای کنترل اکتی مطلوب در [۶۳] ارائه شده است، به گونه‌ای که اثر امپدانس‌های خط به حداقل برسد. این مسئله بهینه‌سازی به همراه محدودیت‌های مورد نیاز

به‌عنوان ترکیبی از خطاهای تقسیم جریان و همچنین تخریب ولتاژ برای شرایط بارگیری مختلف فرمول بندی شده است. سپس از روش ازدحام ذرات (PSO) برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. عملکرد کنترل‌کننده اف‌تی با پارامترهای اف‌ت مطلوب از طریق یک مطالعه موردی شبیه‌سازی که در محیط MATLAB/ Simulink انجام شده، تأیید می‌شود.

در [۶۴] الگوریتم PSO برای بهبود کیفیت منبع تغذیه در ریزشبکه پیشنهاد شده است. این الگوریتم برای پیاده‌سازی روش خودتنظیم در زمان واقعی در کنترل‌کننده توان قرار گرفته است؛ بنابراین، یک روش بهینه‌سازی در کنترل‌کننده توان، ولتاژ و فرکانس برای واحد DG مبنی بر اینورتر در ریزشبکه تعبیه شده است. نتایج در این مقاله نشان می‌دهد که الگوریتم PSO، عملکرد بالایی از تنظیم ولتاژ و فرکانس ریزشبکه را در حد قابل قبولی ارائه می‌دهد.

روشی برای تجزیه و تحلیل ریزشبکه کنترل‌شده به روش اف‌تی در [۶۵] ارائه شده است. روش پیشنهادی برای هر ساختار متصل‌کننده منابع و بارها قابل استفاده است. مدل سیستم خطی با مرتبه کاهش یافته جهت تجزیه و تحلیل توسعه یافته است. با استفاده از این مدل، شرایط کافی برای عملکرد پایدار سیستم به دست می‌آید. حداکثر مقدار افت فشار یک گره به ولتاژ و جریان بار آن گره بستگی دارد. علاوه بر این، از مدل سیستم برای پیش‌بینی حرکت قطب‌های سیستم به‌عنوان پارامترهای سیستم استفاده می‌شود. حرکت قطب‌ها نیز توسط شبیه‌سازی در MATLAB نشان داده شده است.

در [۶۶] ابتدا روش کنترل اینورتر در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت عملکردی جزیره ای، اینورتر از کنترل اف‌تی معکوس بهبود یافته استفاده می‌کند. علاوه بر این، در حالت عملکردی متصل به شبکه، اینورتر توسط حلقه دوگانه قدرت و جریان کنترل می‌شود. سپس، روش کنترل سوئیچینگ اینورتر به/از حالت‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای در این مقاله طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل اف‌تی معکوس می‌تواند ولتاژ و فرکانس سیستم را به‌طور مؤثرتری کنترل کند.

در [۶۷] یک مدل فضای حالت سیگنال کوچک خطی شده پویا و تجزیه و تحلیل پایداری یک ریزشبه AC جزیره‌ای ارائه شده است. این ریزشبه AC دارای چهار DG با اینورتر دارای اینرسی پایین می‌باشد. برای به دست آوردن مدل به صورت اصولی، کل سیستم ریزشبه AC به سه واحد اینورتر، شبکه و بار تقسیم شده است. تمام زیر واحدها در یک محور مرجع مشترک باهم جمع می‌شوند. ماتریس حالت حاصل از سیستم ریزشبه AC جزیره‌ای برای به دست آوردن مقادیر ویژه استفاده شده است.

تجزیه و تحلیل پایداری یک ریزشبه جزیره‌ای را با بار توان ثابت (CPL)^۱ و بار توان ثابت پویا در [۶۸] ارائه شده است. مدل سیگنال کوچک کل سیستم در ابتدا توسعه داده شده است، سپس بر اساس آن، تحلیل‌های پایداری سیگنال کوچک و حساسیت پارامتری سیستم بر اساس قضیه مقادیر ویژه ساخته شده است. نتایج در این مقاله نشان داده است که اگرچه هر زیرسیستم می‌تواند در دامنه اسمی خود بسیار خوب عمل کند، ممکن است کل سیستم به دلیل تعامل جدی بین زیرسیستم‌ها ناپایدار شود. بهینه‌سازی پارامتر ممکن است یکی از راه‌های ثبات سیستم باشد.

تجزیه و تحلیل کامل بر روی یک ریزشبه با بار توان ثابت انجام در [۶۹] انجام شده است. بارهای با توان ثابت باعث می‌شود که سیستم به دلیل ویژگی‌های منفی مقاومت آن‌ها ناپایدار باشد و این با استفاده از مدل فضای حالت سیگنال کوچک برای سیستم و سپس مشاهده محل قطب‌های سیستم، برای ریزشبه ثابت شده است. سپس، تجزیه و تحلیل حساسیت ارائه شده است، برای بررسی اینکه آیا با تنظیم ولتاژ و مقادیر بهره کنترل‌کننده جریان اینورتر ریزشبه، می‌توان ناپایداری سیستم را از بین برد.

در [۷۰] یک مدل دقیق سیگنال کوچک از یک ریزشبه شامل کنترل افقی، شبکه و بارها به دست آمده است. پارامترهای اصلی کنترل اینورتر و دامنه بهینه آن‌ها که تا حد زیادی بر فرکانس میرایی اجزای نوسانی

^۱ Constant Power Loads

در پاسخ گذرا تأثیر می‌گذارند، از طریق تجزیه و تحلیل مقدار ویژه به دست می‌آیند. علاوه، الگوریتم ژنتیک برای جستجوی تنظیمات بهینه پارامترهای کلیدی در هنگام شبیه‌سازی در متلب معرفی شده است.

۲-۱۱ جمع‌بندی

برای بهره‌برداری از ریز شبکه، کنترل‌کننده‌ها باید تنها اطلاعات محلی را به منظور کنترل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و منابع کوچک استفاده کنند. اینورترهای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باید قادر به پاسخگویی به هرگونه تغییر در بار در یک شیوه از پیش تعیین شده به‌طور خودکار باشد. با توجه به مطالب گفته شده، مشخصه‌ی اف‌تی به عنوان یک کنترل‌کننده‌ی محلی بدون نیاز به ارتباط در سیستم می‌تواند در کنترل سیستم نقش بسزایی ایفا کند. از این‌رو تعیین مقادیر بهینه‌ی آن می‌تواند بسیار بر رفتار سیستم تأثیرگذار باشد. از این‌رو در فصول بعدی به مدل‌سازی مسئله و ارائه‌ی یک مدل سیگنال کوچک جهت آنالیز ضرایب مشخصه‌ی اف‌تی و دیگر ضرایب اشاره شده است. سپس جهت تبیین رفتار دینامیکی سیستم یک تابع هدف ترکیبی ارائه شده است. بهینه‌سازی مسئله‌ی مورد نظر با استفاده از ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات صورت خواهد گرفت.

فصل سوم:

بهینه‌سازی مشخصه افتی

۳-۱ مقدمه

مشخصه‌ی اف‌تی با توجه به خصوصیت عدم نیاز به ارتباط می‌تواند یک عامل مهم در تعیین رفتار دینامیکی سیستم مطرح شود. از این رو شناخت و تبیین این روش بسیار می‌تواند به ما در درک مسئله بهبود رفتار سیستم کمک کند. در این فصل ابتدا به تشریح روش اف‌تی و تبیین روابط مرتبط با آن پرداخته می‌شود. سپس با ارائه‌ی مدل سیگنال کوچک مشخصه و دیگر اجزای شبکه به یک مدل سیگنال کوچک کامل جهت بررسی آنالیز مقادیر ویژه خواهیم رسید. سپس ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت حل مسئله تابع هدف ترکیبی سیستم با تمام جزییات ارائه شده است. یک تابع هدف ترکیبی بر اساس جنس انرژی و فرکانس در انتهای فصل ارائه شده است.

۳-۲ تشریح روش مبتنی بر مشخصه‌ی اف‌تی

روش اف‌تی یک روش تقلیدی از رفتار یک ژنراتور سنکرون در سیستم‌های قدرت چند ژنراتوری می‌باشد. با توجه به نحوه‌ی عملکرد ژنراتورهای سنکرون در مواقع تغییر بار، عملکرد آن به این گونه می‌باشد که افت فرکانس همراه با افت مشخصه‌ی اف‌تی گاورنر صورت می‌گیرد. این مسئله جهت پیاده‌سازی در اینورها به این گونه پیاده‌سازی خواهد شد که هرگونه تغییر در توان اکتیو و راکتیو می‌تواند از طریق افت فرکانس و افت دامنه‌ی ولتاژ پاسخ داده شود.

با توجه به شکل (۲-۲) یک منبع شامل دو منبع تولید و یک بار ارائه شده است. در اینجا مسئله مشخصه اف‌تی تشریح می‌شود. با توجه به رابطه‌ی (۱-۳) توان کل منبع i -ام با قرار گرفتن ولتاژ دو سر مصرف‌کننده می‌تواند فرمول‌بندی شود. [۷۱]:

$$S_i = P_i + jQ_i = E_i < S_i \frac{(E_i < S_i - V)^*}{Z_i^*} \quad i = 1, 2 \quad (1-3)$$

با بسط دادن رابطه‌ی قبل می‌توان مقادیر توان اکتیو و توان راکتیو را به‌صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$P_i = \frac{E_i^2}{|Z_i|} \cos(\theta_i) - \frac{V \cdot E_i}{|Z_i|} \cos(\theta_i + \delta_i) \quad (۲-۳)$$

$$Q_i = \frac{E_i^2}{|Z_i|} \sin(\theta_i) - \frac{V \cdot E_i}{|Z_i|} \sin(\theta_i + \delta_i) \quad (۳-۳)$$

که در آن θ_i زاویه امپدانس Z_i و δ_i اختلاف زاویه منبع i -ام نسبت به ولتاژ مصرف‌کننده است،

(زاویه توان منبع i -ام). اگر زاویه توان منبع را کوچک در نظر بگیریم، خواهیم داشت [۷۱]:

$$\cos(\theta_i + \delta_i) \approx \cos(\theta_i) - \sin(\theta_i) \cdot \delta_i \quad (۴-۳)$$

$$\sin(\theta_i + \delta_i) \approx \sin(\theta_i) + \cos(\theta_i) \cdot \delta_i \quad (۵-۳)$$

با قرارگیری روابط (۴-۳) و (۵-۳) در (۲-۳) و (۳-۳)، روابط پخش توان اکتیو و توان راکتیو برای

منبع i -ام به‌صورت زیر نگاشته می‌شود [۷۱]:

$$P_i = \frac{E_i (E_i - V)}{|Z_i|} \cos(\theta_i) + \frac{V \cdot E_i \cdot \sin(\theta_i)}{|Z_i|} \delta_i \quad (۶-۳)$$

$$Q_i = \frac{E_i (E_i - V)}{|Z_i|} \sin(\theta_i) - \frac{V \cdot E_i \cdot \cos(\theta_i)}{|Z_i|} \delta_i \quad (۷-۳)$$

برحسب تغییرات اندازه‌ی ولتاژ و زاویه توان، تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو منبع i -ام به‌صورت زیر

حاصل خواهد شد [۷۱]:

$$\Delta P_i = \frac{(2E_i - V) \cos(\theta_i)}{|Z_i|} \Delta E_i + \frac{V \cdot E_i \cdot \sin(\theta_i)}{|Z_i|} \Delta \delta_i \quad (۸-۳)$$

$$\Delta Q_i = \frac{(2E_i - V) \sin(\theta_i)}{|Z_i|} \Delta E_i - \frac{V \cdot E_i \cdot \cos(\theta_i)}{|Z_i|} \Delta \delta_i \quad (9-3)$$

روابط بالا با توجه به مقادیر زاویه توان صفر در نقطه‌ی کار سیستم به دست آورده شده‌اند. همچنین این روابط با در نظرگیری اجتناب از تغییرات ولتاژ دو سر مصرف‌کننده عنوان شده است. با توجه به اینکه در مشخصه‌ی افتی فقط به متغیرهای داخلی دسترسی داریم، در روابط بررسی شده اختلاف توان اکتیو منبع مرتبط با اختلاف مقادیر اندازه و فاز ولتاژ موردتوجه قرار گرفته شده است. با استفاده از روابط بالا، تغییرات اندازه ولتاژ و منبع و زاویه توان برحسب تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو منبع به‌صورت زیر نوشته خواهد شد [۷۱]:

$$\Delta \delta_i = k_{i1} \Delta P_i + k_{i2} \Delta Q_i \quad (10-3)$$

$$\Delta E_i = k_{i3} \Delta P_i + k_{i4} \Delta Q_i \quad (11-3)$$

که در آن:

$$k_{i1} = \frac{|Z_i| \sin(\theta_i)}{V \cdot E_i} \quad k_{i2} = -\frac{|Z_i| \cos(\theta_i)}{V \cdot E_i} \quad (12-3)$$

$$k_{i3} = \frac{|Z_i| \cos(\theta_i)}{(2E_i - V)} \quad k_{i4} = \frac{|Z_i| \sin(\theta_i)}{(2E_i - V)} \quad (13-3)$$

مسئله‌ی اساسی در ارتباط با روابط (۱۰-۳) و (۱۱-۳)، به این صورت می‌باشد که ضرایب

$k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}$ وابستگی محسوسی به نقطه کار منبع ندارند و مقادیر آنها تقریباً با توجه به

نقاط کار مختلف می‌تواند ثابت باقی بماند [۷۱].

با توجه به روابط بالا می‌توان مشخصه‌ی افتی در ریزش‌بکه را تشریح کرد.

تقاضای تقسیم بار بین منابع به صورت رابطه معکوس توان تولیدی منابع صورت خواهد گرفت به طوری که کاهش توان تولیدی منبع با تولید بیشتر و افزایش توان تولیدی منبع با تولید کمتر صورت خواهد گرفت. معادلات مشخصه‌ی افی توان برای منبع i -ام به صورت زیر فرمول بندی خواهند شد [۷۱].

$$\Delta\delta_i = m_{pi}\Delta P_i + m_{qi}\Delta Q_i \quad (۱۴-۳)$$

$$\Delta\delta_i = -n_{pi}\Delta P_i - n_{qi}\Delta Q_i \quad (۱۵-۳)$$

که در آن $n_{qi}, n_{pi}, m_{qi}, m_{pi}$ ضرایب افی مشخصه‌های افی می‌باشند. ضرایب $n_{qi}, n_{pi}, m_{qi}, m_{pi}$ را می‌توان به ترتیب همانند با ضرایب $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}$ انتخاب کرد [۷۱].

$$m_{pi} \propto \frac{|Z_i|\sin(\theta_i)}{V.E_i} \quad m_{qi} \propto \frac{|Z_i|\cos(\theta_i)}{V.E_i} \quad (۱۶-۳)$$

$$n_{pi} \propto \frac{|Z_i|\cos(\theta_i)}{(2E_i - V)} \quad n_{qi} \propto \frac{|Z_i|\sin(\theta_i)}{(2E_i - V)} \quad (۱۷-۳)$$

با انتخاب ضرایب $n_{qi}, n_{pi}, m_{qi}, m_{pi}$ در مقدار کمتر از یک می‌توان به پایداری حلقه‌ی کنترل توان دست یافت. با توجه به وابسته نبودن ضرایب افی مشخصه‌ی افی به نقطه کار منبع، انتخاب این ضرایب برای همه نقاط کار منبع مقادیری ثابت خواهد شد. مشخصه‌ی افی خطی برای منبع i -ام به صورت زیر به دست آورده می‌شود [۷۱]:

$$\delta_i = \delta_{in} - m_{pi}(P_i - P_{in}) + m_{qi}(Q_i - Q_{in}) \quad (۱۸-۳)$$

$$E_i = E_{in} - n_{pi}(P_i - P_{in}) + n_{qi}(Q_i - Q_{in}) \quad (۱۹-۳)$$

در این حالت نسبت بین ضرایب مشخصه‌های کنترل توان منبع به صورت زیر است:

$$\frac{m_{pi}}{m_{qi}} = \tan(\theta_i) = \frac{x_i}{R_i} = \mu_i \quad \frac{n_{qi}}{n_{pi}} = \tan(\theta_i) = \mu_i \quad (۲۰-۳)$$

در این حالت نسبت بین ضرایب افقی به صورت نسبت راکتانس به مقاومت امپدانس منبع و خط μ_i است. فرکانس زاویه‌ای بجای زاویه توان به دلیل اینکه زاویه توان به صورت محلی قابل اندازه‌گیری نیست جهت تقسیم توان مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در حالت کلی مشخصه‌ی افقی فرکانس برای منبع i -ام این گونه به دست خواهد آورده شد [۷۱]:

$$w_i = w_{in} - m'_{pi}(P_i - P_{in}) + m'_{qi}(Q_i - Q_{in}) \quad (۲۱-۳)$$

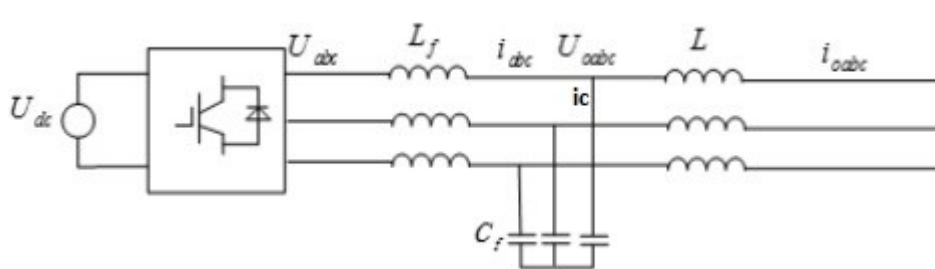
که در روابط بالا m'_{pi} و m'_{qi} ضرایب مشخصه کنترل افقی می‌باشند. با توجه به وجود نسبت μ_i بین ضرایب مشخصه‌ی افقی انتخاب آن‌ها بر اساس ظرفیت نامی منابع و تغییرات قابل قبول فرکانس صورت می‌گیرد. با توجه به رابطه‌ی (۱۸-۳) و (۲۰-۳) و (۲۱-۳) اگر امپدانس تزویج به صورت سلفی باشد آنگاه مقدار μ_i بزرگ بوده و می‌توان از عبارت توان راکتیو صرف نظر نمود. اگر امپدانس تزویج مقاومتی باشد μ_i کوچک می‌شود و می‌توان از جمله توان اکتیو صرف نظر کرد. در رابطه‌ی (۱۹-۳) برای امپدانس تزویج سلفی از عبارت توان اکتیو و برای امپدانس تزویج مقاومتی از عبارت توان راکتیو می‌توان صرف نظر کرد [۷۲].

۳-۳ کنترل ریز شبکه در حالت مستقل از شبکه

خطا و یا برنامه‌ریزی از قبل در ریز شبکه‌ها با توجه به حفظ هدف مورد نظر منجر به مستقل شدن آن تعیین می‌گردد. در این حالت عملکرد، ریز شبکه هیچ اتصالی با شبکه اصلی ندارد؛ بنابراین استراتژی کنترلی این حالت عملکرد باید اهداف زیر را برآورده کند.

- تنظیم مناسب ولتاژ ریز شبکه
- تسهیم مناسب توان‌های راکتیو و اکتیو منابع تولید پراکنده
- فرکانس خروجی مناسب

در شکل (۱-۳) مدل منبع مبتنی بر اینورتر را که در این پژوهش ارائه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: مدل منابع مبتنی بر اینورتر [۷۱]

۱-۳-۳ کنترل کننده ی توان و کنترل کننده ی مشخصه ی اف تی

با توجه به مفاهیم ارائه شده در قسمت قبل در خصوص تشریح روش اف تی شکل (۲-۳) یک طرح کامل به صورت بلوکی که شامل محاسبه گر توان و فیلتر پایین گذر و کنترل اف تی توان با فرض امپدانس تزویج سلفی را نشان می دهد. با استفاده از مقادیر جریان و ولتاژ خروجی اینورتر در خروجی، توان های اکتیو و راکتیو خروجی محاسبه می شوند. فیلتر پایین گذر جهت حذف نوسان ها و به دست آوردن مقدار اصلی^۱ توان های خروجی استفاده می شود [۷۳].

مؤلفه های abc توسط تبدیل پارک به مؤلفه های dq0 تبدیل خواهد شد. این تبدیل در زیر آورده

عنوان شده است [۷۱].

$$F_i = T_{INVi} F_i \quad \text{where} \quad T_{INVi} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

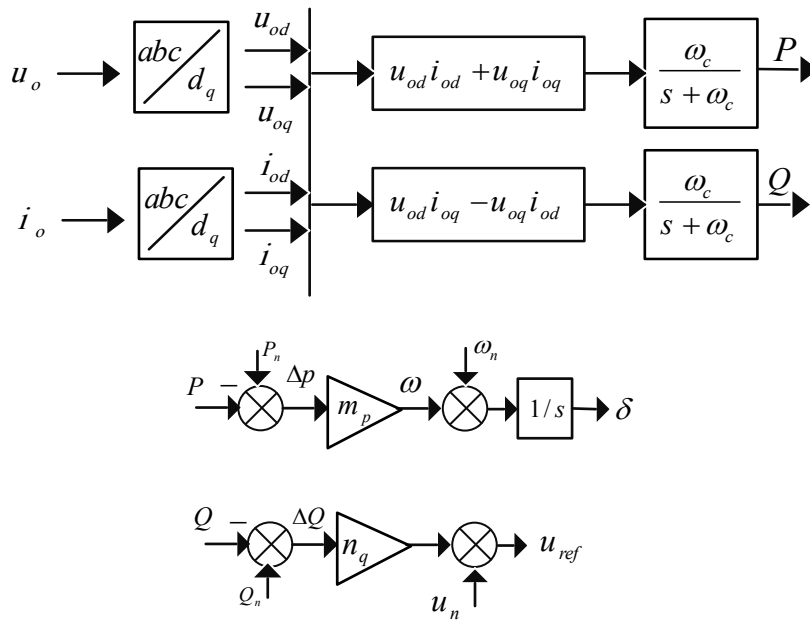
¹ Fundamental

که در آن F می‌تواند ولتاژ، جریان و یا شامل متغیرهای مختلف باشد.

با استفاده از جریان و مقادیر ولتاژ خروجی مرجع، مقادیر توان در محوره‌های d و q محاسبه خواهد

شد. با توجه به تبدیلات Tdq مقدار توان اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۳-۲۳) هستند [۷۰].

$$\begin{cases} P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq}) \\ Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (u_{od}i_{oq} - u_{oq}i_{od}) \end{cases} \quad (۳-۲۳)$$



شکل ۳-۲ کنترل کننده توان و کنترل کننده‌ی افی در حالت مستقل از شبکه اصلی [۷۰]

u_{od} و i_{od} مقادیر ولتاژ و جریان خازن در خروجی منبع و در راستای محور d پس از تبدیل پارک می

باشد و همین‌طور u_{oq} و i_{oq} ولتاژ و جریان خازن در راستای q و به‌منظور از بین بردن اثر هارمونیک‌ها از

به‌عنوان فیلتر پایین گذر استفاده می‌شود. $\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$

برای تقسیم توان صحیح بین اینورترها، یک کنترل کننده ی اف تی با توجه به تشریح روش اف تی به کنترل کننده ی توان متصل شده است که به صورت زیر ارائه شده است:

$$\omega = \omega_n - m_p(P - P_n) \quad (24-3)$$

$$u_{ref} = u_n - n_q(Q - Q_n) \quad (25-3)$$

که ω_n و u_n فرکانس و ولتاژ نامی سیستم می باشند. m_p و n_q ضرایب مشخصه ی اف تی فرکانس و ولتاژ هستند. ولتاژ مرجع خروجی که از روش اف تی به دست می آید، به محور d اختصاص داده شده و مرجع محور q را برابر صفر قرار داده است. این مقادیر مرجع ورودی های کنترل ولتاژ می باشند. با توجه روابط بالا مدل دینامیکی سیگنال کوچک کنترل کننده ی توان به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \Delta \dot{P} = -\omega_c \Delta P + \omega_c (I_{od} \Delta u_{od} + I_{oq} \Delta u_{oq} + U_{od} \Delta i_{od} + U_{oq} \Delta i_{oq}) \\ \Delta \dot{Q} = -\omega_c \Delta Q + \omega_c (I_{oq} \Delta u_{od} - I_{od} \Delta u_{oq} - U_{oq} \Delta i_{od} + U_{od} \Delta i_{oq}) \end{cases} \quad (26-3)$$

مدل سیگنال کوچک کنترل کننده ی اف تی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \Delta \omega = -m_p \Delta P \\ \Delta u_{od}^* = -n_q \Delta Q \\ \Delta u_{oq}^* = 0 \end{cases} \quad (27-3)$$

به منظور تبدیل تمامی متغیرها از هر مبنای اینورتر به یک مبنای مشترک، اختلاف زاویه بین مبنای

dq هر اینورتر با مبنای مشترک D-Q به صورت زیر تعریف شده است:

$$\delta = \int (\omega - \omega_{com}) dt \quad (28-3)$$

ω_{com} فرکانس زاویه ای مبنای مشترک داده شده توسط اولین اینورتر می باشد. مدل سیگنال کوچک به صورت

زیر می باشد [۷۴]:

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \omega - \Delta \omega_{com} = -m_p \Delta P - \Delta \omega_{com} \quad (29-3)$$

۳-۳-۲ کنترل کننده ی ولتاژ

با اعمال قانون KCL به مدار شکل (۱-۳) معادلات زیر حاصل خواهد شد.

$$i_{abc} = i_c + i_{oabc} \quad (30-3)$$

$$i_c = C_f \frac{dV_0}{dt} \quad (31-3)$$

با اعمال تبدیل پارک به معادلات بالا روابط زیر به دست آورده خواهند شد.

$$i_d = i_{cd} + i_{od} \quad (32-3)$$

$$i_q = i_{cq} + i_{oq} \quad (33-3)$$

$$i_{od} = C_f \frac{du_{od}}{dt} - \omega_n C_f u_{oq} \quad (34-3)$$

$$i_{cq} = C_f \frac{du_{oq}}{dt} + \omega_n C_f u_{od} \quad (35-3)$$

برای تنظیم ولتاژ، کنترل کننده ولتاژ خروجی بر اساس معادلات (۳۴-۳) - (۳۵-۳) طراحی شده است.

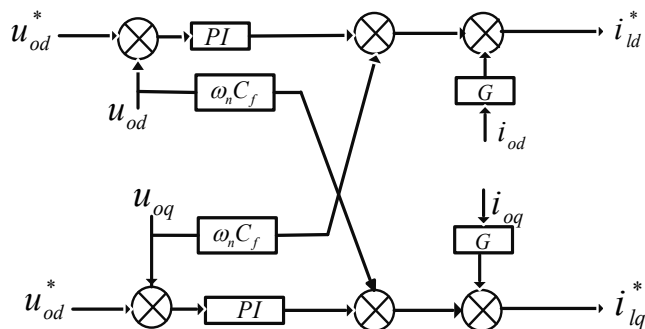
شکل (۳-۳) این کنترل کننده را نشان داده است. این کنترل کننده برای تولید جریان های مرجع از کنترل

کننده PI استفاده می کند. مشخصه ی خروجی کنترل کننده ولتاژ به صورت زیر بیان شده است [۷۱].

$$i_{od} = (K_{pu} + \frac{K_{iu}}{S})(u_{od}^* - u_{od}) - \omega C_f u_{oq} + G i_{od} \quad (36-3)$$

$$i_{oq} = (K_{pu} + \frac{K_{iu}}{S})(u_{oq}^* - u_{oq}) + \omega C_f u_{od} + G i_{oq} \quad (37-3)$$

که K_{pu} و K_{iu} بهره های تناسبی و انتگرالی کنترل کننده PI هستند.



شکل ۳-۳: کنترل کننده ولتاژ [۷۰]

معادلات حالت مربوط به کنترل کننده ولتاژ به صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} \frac{d\phi_d}{dt} = u_{od}^* - u_{od} \\ \frac{d\phi_q}{dt} = u_{oq}^* - u_{oq} \end{cases} \quad (38-3)$$

$$\begin{cases} i_{ld}^* = K_{iu}\phi_d^* + K_{pu}(u_{od}^* - u_{od}) - \omega_n C_f u_{oq} + G i_{od} \\ i_{lq}^* = K_{iu}\phi_q^* + K_{pu}(u_{oq}^* - u_{oq}) + \omega_n C_f u_{od} + G i_{oq} \end{cases} \quad (39-3)$$

مدل سیگنال کوچک کنترل کننده ولتاژ به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\Delta\phi_d} = \Delta u_{od}^* - u_{od} \\ \dot{\Delta\phi_q} = \Delta u_{oq}^* - u_{oq} \end{cases} \quad (40-3)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{ld}^* = K_{iu}\Delta\phi_d^* + K_{pu}\Delta u_{od}^* - K_{pu}\Delta u_{od} - \omega_n C_f \Delta u_{oq} + G \Delta i_{od} \\ \Delta i_{lq}^* = K_{iu}\Delta\phi_q^* + K_{pu}\Delta u_{oq}^* + \omega_n C_f \Delta u_{od} - K_{pu}\Delta u_{oq} + G \Delta i_{oq} \end{cases} \quad (41-3)$$

۳-۳-۳ کنترل کننده ی جریان

با اعمال قانون KVL به مدار شکل (۳-۱) معادله ولتاژ سیستم به صورت زیر به دست آورده شده است [۷۱].

$$u_{abc} = u_{oabc} + L_f \frac{di_{abc}}{dt} \quad (۳-۴۲)$$

با اعمال تبدیل پارک به معادله بالا روابط زیر به دست آورده خواهد شد [۷۱].

$$u_d = u_{od} + L_f \frac{di_{od}}{dt} - \omega L_f i_{oq} \quad (۳-۴۳)$$

$$u_q = u_{oq} + L_f \frac{di_{oq}}{dt} + \omega L_f i_{od} \quad (۳-۴۴)$$

بعد از کنترل ولتاژ و جریان های مرجع کنترل کننده جریان از کنترل کننده PI برای تنظیم جریان استفاده می کند. شکل کنترل کننده جریان را نشان می دهد. خروجی کنترل کننده جریان با معادلات زیر بیان شده است.

$$u_{id} = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{S})(i_{ld}^* - i_{ld}) - \omega L_f i_{oq} + u_{od} \quad (۳-۴۵)$$

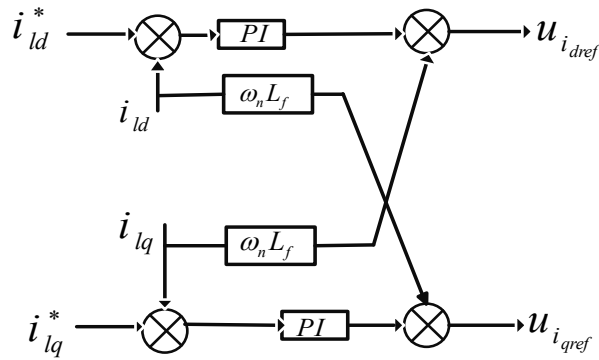
$$u_{iq} = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{S})(i_{lq}^* - i_{lq}) + \omega L_f i_{od} + u_{oq} \quad (۳-۴۶)$$

که K_{pc} و K_{ic} بهره های تناسبی و انتگرالی کنترل کننده PI هستند.

مشابه با حلقه کنترل ولتاژ، کنترل کننده ی جریان حداقل خطای جریان را با استفاده از کنترل کننده PI جهت مقایسه با فیلتر نمونه گیر جریان و مقدار مبنا داده شده توسط کنترل کننده ولتاژ مطابق شکل (۳-۴) ارائه می دهد. مدل سیگنال کوچک کنترل کننده ی جریان به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\Delta\gamma_d} = \Delta i_{ld}^* - \Delta i_{ld} \\ \dot{\Delta\gamma_q} = \Delta i_{lq}^* - \Delta i_{lq} \end{cases} \quad (47-3)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{id}^* = K_{ic} \Delta\gamma_d + K_{pc} \Delta i_{ld}^* - K_{pc} \Delta i_{ld} - \omega_n L_f \Delta i_{lq} \\ \Delta u_{iq}^* = K_{ic} \Delta\gamma_q + K_{pc} \Delta i_{lq}^* + \omega_n L_f \Delta i_{ld} - K_{pc} \Delta i_{lq} \end{cases} \quad (48-3)$$



شکل ۳-۴: کنترل کننده جریان [۷۰]

۳-۴-۳ فیلتر LC و مدل اندوکتانس تزویج

اینورتر متصل شده به شبکه توسط فیلتر LC و اندوکتانس تزویج می تواند موج هارمونیک نزدیک به

فرکانس سوئیچ را حذف کند. مدل سیگنال کوچک خطی شده به صورت زیر است [۷۰]:

$$\begin{cases} \dot{\Delta i_{ld}} = -\frac{R_f}{L_f} \Delta i_{ld} + \omega_o \Delta i_{lq} - \frac{1}{L_f} \Delta u_{od} + \frac{1}{L_f} \Delta u_{id} + I_{lq} \Delta \omega \\ \dot{\Delta i_{lq}} = -\omega_o \Delta i_{ld} - \frac{R_f}{L_f} \Delta i_{lq} - \frac{1}{L_f} \Delta u_{oq} + \frac{1}{L_f} \Delta u_{iq} - I_{ld} \Delta \omega \end{cases} \quad (49-3)$$

$$\begin{cases} \dot{\Delta u}_{od} = \frac{1}{C_f} \Delta i_{ld} + \omega_o \Delta u_{oq} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{od} + U_{oq} \Delta \omega \\ \dot{\Delta u}_{oq} = \frac{1}{C_f} \Delta i_{lq} - \omega_o \Delta u_{od} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{oq} - U_{od} \Delta \omega \end{cases} \quad (50-3)$$

$$\begin{cases} \dot{\Delta i}_{od} = \frac{1}{L_c} \Delta u_{od} - \frac{R_c}{L_c} \Delta i_{od} + \omega_o \Delta i_{oq} - \frac{1}{L_c} \Delta u_{bd} + I_{oq} \Delta \omega \\ \dot{\Delta i}_{oq} = \frac{1}{L_c} \Delta u_{oq} - \omega_o \Delta i_{od} - \frac{R_c}{L_c} \Delta i_{oq} - \frac{1}{L_c} \Delta u_{bq} - I_{od} \Delta \omega \end{cases} \quad (51-3)$$

۵-۳-۳ مدل کامل رابط‌های تولید پراکنده

متغیرهای خروجی i_{oDQ} و متغیرهای ورودی u_{odq} می‌توانند به مبنای مشترک DQ با استفاده از ماتریس تبدیل زیر با توجه به رابطه‌ی تبدیل پارک انتقال یابند [۷۰]:

$$[i_{oDQ}] = [T] [i_{odq}] = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} [i_{odq}] \quad (52-3)$$

$$[u_{bdq}] = [T^{-1}] [u_{bDQ}] = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} [u_{bDQ}] \quad (53-3)$$

با خطی سازی معادلات بالا حول نقطه کار:

$$[\Delta i_{oDQ}] = \begin{bmatrix} \cos(\delta_0) & -\sin(\delta_0) \\ \sin(\delta_0) & \cos(\delta_0) \end{bmatrix} [\Delta i_{odq}] + \begin{bmatrix} -I_{od} \sin(\delta_0) - I_{oq} \cos(\delta_0) \\ I_{od} \cos(\delta_0) - I_{oq} \sin(\delta_0) \end{bmatrix} [\Delta \delta] \quad (54-3)$$

$$[\Delta u_{bdq}] = \begin{bmatrix} \cos(\delta_0) & \sin(\delta_0) \\ -\sin(\delta_0) & \cos(\delta_0) \end{bmatrix} [\Delta u_{bDQ}] + \begin{bmatrix} -U_{bd} \sin(\delta_0) + U_{bQ} \cos(\delta_0) \\ -U_{bd} \cos(\delta_0) - U_{bQ} \sin(\delta_0) \end{bmatrix} [\Delta \delta] \quad (55-3)$$

با ترکیب مدل‌های فضای حالت نشان داده شده در معادلات (۳-۴۰) الی (۳-۵۵)، با انتخاب متغیرهای ۱۳ حالت با یک معادله فضای حالت سیگنال کوچک مرتبه ۱۳ کامل و معادله‌ی خروجی یک واحد اینورتر مجزا بر مبنای مشترک می‌تواند به دست آید که مدل اینورتر استاندارد بدین گونه است [۷۰]:

$$[\Delta \dot{x}_{inv}] = A_{INV} [\Delta x_{inv}] + B_{INV} [\Delta u_{bDQ}] + B_{i\omega com} [\Delta \omega_{com}] \quad (۳-۵۶)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta i_{oDQi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{INV \omega i} \\ C_{INV ci} \end{bmatrix} [\Delta x_{inv}] \quad (۳-۵۷)$$

که در آن به صورت $[\Delta x_{inv}]$ زیر هست:

$$[\Delta x_{inv}] = [\Delta \delta_i \quad \Delta P_i \quad \Delta Q_i \quad \Delta \phi_{di} \quad \Delta \phi_{qi} \quad \Delta \gamma_{di} \quad \Delta \gamma_{qi} \quad \Delta i_{ldi} \quad \Delta i_{lqi} \quad \Delta u_{odi} \quad \Delta u_{oqi} \quad \Delta i_{odi} \quad \Delta i_{oqi}]^T \quad (۳-۵۷-الف)$$

۳-۳-۶ مدل ترکیبی دو اینورتر موازی

بر اساس مدل ارائه شده برای هر اینورتر در معادلات (۳-۵۶) و (۳-۵۷)، مدل سیگنال کوچک برای دو اینورتر ارائه شده در شکل (۲-۲) می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$[\Delta \dot{x}_{INV}] = A_{INV} [\Delta x_{INV}] + B_{INV} [\Delta u_{bDQ}] \quad (۳-۵۸)$$

$$[\Delta i_{oDQ}] = C_{INVc} [\Delta x_{INV}]$$

که در آن:

$$[\Delta x_{INV}] = [\Delta x_{inv1} \quad \Delta x_{inv2}]^T [\Delta u_{bDQ}] = [\Delta u_{bDQ1} \quad \Delta u_{bDQ2}]^T \quad (۳-۵۸-الف)$$

$$A_{INV} = \begin{bmatrix} A_{INV1} + B_{1\omega com} C_{INV \omega 1} & \\ B_{2\omega com} C_{INV \omega 1} & A_{INV2} \end{bmatrix}; \quad (۳-۵۸-ب)$$

$$B_{INV} = \begin{bmatrix} B_{INV1} & \\ & B_{INV2} \end{bmatrix}; C_{INVc} = \begin{bmatrix} C_{INVc1} & \\ & C_{INVc2} \end{bmatrix} \quad (3-58 \text{ پ})$$

در اینجا یک ماتریس حالت A_{INV} ارائه شده است که در معادله (3-59) نشان داده شده است [70].

$$A_{INV} = \begin{bmatrix} A_{INV1} + B_{1\omega com} C_{INV\omega1} & \\ & A_{INV2} + B_{2\omega com} C_{INV\omega2} \end{bmatrix} \quad (3-59)$$

که در آن:

$$B_{INVi} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & -\frac{\cos \delta_0}{L_c} & -\frac{\sin \delta_0}{L_c} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\sin \delta_0}{L_c} & -\frac{\cos \delta_0}{L_c} \end{bmatrix}_{2 \times 13}^T; B_{i\omega com} = [-1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13}^T; \quad (3-59 \text{ الف})$$

$$C_{INV\omega i} = \begin{cases} [0 \ -m_p \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13} & i = 1 \\ [0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13} & i \neq 1 \end{cases}; \quad (3-59 \text{ ب})$$

$$C_{INVci} = \begin{bmatrix} -I_{od} \sin \delta_0 - I_{oq} \cos \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \cos \delta_0 & -\sin \delta_0 \\ I_{od} \cos \delta_0 - I_{oq} \sin \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \end{bmatrix}_{2 \times 13}; \quad (3-59 \text{ پ})$$

در اینجا فرکانس زاویه‌ای خروجی اینورتر اول را به عنوان فرکانس زاویه‌ای مشترک کل سیستم انتخاب شده است که $\Delta\omega_{com} = \Delta\omega_1 = C_{INV\omega1}\Delta x_{inv1}$ را بیان می‌کند؛ بنابراین ماتریس حالت به آسانی برقرار می‌شود، چون کار تبدیل به صورت عمده کنار گذاشته می‌شود. ماتریس حالت A_{INV} در معادله (۵۸-۳) بیشتر و دقیق‌تر تأثیر عمده متغیرهای حالت اینورتر مشترک بر روی دیگر اینورترها را توصیف می‌کند. باین حال که $C_{INV\omega2}$ نیاز به محاسبه در A_{INV} ندارد، به طور عمده مقدار محاسبات را خصوصاً در ریزشکه‌های شامل تعداد زیادی از منابع تولید پراکنده کاهش می‌دهد [۷۰].

۳-۳-۷ مدل شبکه و مدل بار امیدانس ثابت

برای یک ریزشکه مدل سیگنال کوچک می‌تواند مشابه با عملیات خطی سازی فیلتر LC ارائه شده از قبل به دست آید، در نتیجه مدل در مبنای DQ به صورت زیر است [۷۰]:

$$[\Delta \dot{i}_{lineDQ}] = A_{NET} [\Delta i_{lineDQ}] + B_{1NET} [\Delta u_{bDQ}] + B_{2NET} \Delta \omega \quad (۶۰-۳)$$

$$[\Delta \dot{i}_{loadDQ}] = A_{LOAD} [\Delta i_{loadDQ}] + B_{1LOAD} [\Delta u_{bDQ}] + B_{2LOAD} \Delta \omega \quad (۶۱-۳)$$

که در آن:

$$A_{NET} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{line1}}{L_{line1}} & \omega_0 & & \\ -\omega_0 & -\frac{R_{line1}}{L_{line1}} & & \\ & & -\frac{R_{line2}}{L_{line2}} & \omega_0 \\ & & -\omega_0 & -\frac{R_{line2}}{L_{line2}} \end{bmatrix}; \quad (۶۰-۳-الف)$$

$$B_{1NET} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{line1}} & -\frac{1}{L_{line1}} & & & \\ & \frac{1}{L_{line1}} & -\frac{1}{L_{line1}} & & \\ & & \frac{1}{L_{line2}} & -\frac{1}{L_{line2}} & \\ & & & \frac{1}{L_{line2}} & -\frac{1}{L_{line2}} \\ & & & & \frac{1}{L_{line2}} \end{bmatrix}; \quad (3-60-ب)$$

$$B_{2NET} = \begin{bmatrix} I_{line1q} \\ -I_{line1d} \\ I_{line2q} \\ -I_{line2d} \end{bmatrix}; \quad (3-60-پ)$$

$$A_{Load} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{load1}}{L_{load1}} & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_{load1}}{L_{load1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{load2}}{L_{load2}} & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_0 & -\frac{R_{load2}}{L_{load2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_{load3}}{L_{load3}} & \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_0 & -\frac{R_{load3}}{L_{load3}} \end{bmatrix}; \quad (3-61-الف)$$

$$B_{1Load} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{load1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{load1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{load2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{load2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{load3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{load3}} \end{bmatrix}; \quad (3-61-ب)$$

$$B_{2Load} = \begin{bmatrix} I_{load1q} \\ -I_{load1d} \\ I_{load2q} \\ -I_{load2d} \\ I_{load3q} \\ I_{load3d} \end{bmatrix}; \quad (3-61 \text{ پ})$$

۳-۳-۸ مدل ریزشبه کامل

با تغییر متغیرهای ورودی u_{bDQ} ، یک مقدار کافی از مقاومت مجازی r_N بین گره و زمین فرض شده است که می‌تواند تأثیر پایداری دینامیکی را کاهش دهد. مدل سیگنال کوچک گره با توجه به شکل (۴-۱) به صورت زیر است [۷۰]:

$$[\Delta u_{bDQ}] = R_N (M_{INV} [\Delta i_{oDQ}] + M_{LOAD} [\Delta i_{loadDQ}] + M_{NET} [\Delta i_{lineDQ}]) \quad (3-62)$$

$$R_N = \begin{bmatrix} r_N & \dots \\ \dots & r_N \end{bmatrix}_{2m \times 2m}; M_{INV} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \\ & & 1 & & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}_{2m \times 2s}; \quad (3-62 \text{ الف})$$

$$M_{LOAD} = \begin{bmatrix} -1 & \dots \\ \dots & -1 \end{bmatrix}_{2m \times 2p}; \quad (3-62 \text{ ب})$$

$$M_{NET} = \begin{bmatrix} -1 & & & & \\ 0 & -1 & & & \\ 1 & 0 & -1 & & \\ & 1 & 0 & -1 & \\ & & 1 & 0 & \\ & & & 1 & \end{bmatrix}_{2m \times 2n}; \quad (3-62 \text{ پ})$$

بر اساس معادلات (۳-۵۸) الی (۳-۶۲) می‌توان مدل سیگنال کوچک مرتبه $(2n + 2p + 13s) = 36$ کامل

داشته باشیم. ماتریس A_{sys} به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x}_{INV} \\ \dot{\Delta i}_{lineDQ} \\ \dot{\Delta i}_{loadDQ} \end{bmatrix} = A_{sys} \begin{bmatrix} \Delta x_{INV} \\ \Delta x_{lineDQ} \\ \Delta x_{loadDQ} \end{bmatrix} \quad (۳-۶۳)$$

$$A_{sys} = \begin{pmatrix} A_{INV} + B_{INV} R_N M_{INV} C_{INVc} & B_{INV} R_N M_{NET} & B_{INV} R_N M_{LOAD} \\ B_{1NET} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2NET} C_{INVw} & A_{NET} + B_{1NET} R_N M_{NET} & B_{1NET} R_N M_{LOAD} \\ B_{1LOAD} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2LOAD} C_{INVw} & B_{1LOAD} R_N M_{NET} & A_{LOAD} + B_{1LOAD} R_N M_{LOAD} \end{pmatrix} \quad (۳-۶۴)$$

A_{sys} ماتریس کلی سیستم جهت تحلیل مدل سیگنال کوچک کل سیستم بکار برده می‌شود [۷۰]. در شکل

(۴-۱) $s = 2$ دو واحد تولید پراکنده، $n = 2$ تعداد خطوط $p = 3$ بارها، $m = 3$ تعداد گره‌ها می‌باشند.

۳-۴ بهینه‌سازی مشخصه‌ی اف‌تی در بهبود رفتار دینامیکی

همان‌طور که اشاره شد خطا و یا برنامه‌ریزی از قبل در ریزشبه‌ها با توجه به حفظ هدف موردنظر منجر به مستقل شدن آن تعیین می‌گردد. در این حالت عملکرد، ریزشبه هیچ اتصالی با شبکه اصلی ندارد؛ بنابراین استراتژی کنترلی این حالت عملکرد باید اهداف زیر را برآورده کند. انتخاب مناسب ضرایب تقسیم توان و پارامترهای کنترل‌کننده برای بهبود عملکرد کنترل سیستم در صورت بروز هرگونه آشفتگی یا تغییر شرایط بار در ریزشبه لازم است. از طریق چندین روش آزمون و خطا، می‌توان انتخاب مناسبی از پارامترهای کنترل را انجام داد [۱۳]. با این‌حال، این روش‌ها می‌توانند پیچیدگی بیشتری را تحمیل کرده و زمان بیشتری را هنگام کار با تعداد بیشتری کنترل‌کننده در سیستم قدرت ریزشبه تحمیل کنند. به‌طورکلی، به

دلیل عدم وجود اینرسی و تأثیر عملکرد کنترل‌کننده اینورتر مبتنی بر PI در شرایط گذرا، می‌توان انتظار داشت که در ریزشبهه مستقل در مقایسه باحالت متصل به شبکه، تغییر توان و تغییر ولتاژ و سطح فرکانس بیشتر باشد؛ بنابراین، به منظور بهبود عوامل مؤثر همانند توان، فرکانس و ولتاژ خروجی در ریزشبهه می‌توان روش‌های بهینه‌سازی را در سیستم کنترل اینورتر اجرا کرد [۱۴]. روش‌های مدرن ابتکاری با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی مبتنی بر هوش مصنوعی را می‌توان برای برنامه‌های سیستم قدرت برای حل مشکلات بهینه‌سازی به‌صورت مؤثر استفاده کرد [۱۷، ۱۸، ۱۹]. از آنجاکه روش بهینه‌سازی PSO در این پایان‌نامه به‌منظور بهبود عوامل مؤثر همانند توان، فرکانس و ولتاژ خروجی در ریزشبهه از اهمیت برخوردار است، اصول الگوریتم PSO و مزایای آن در پیوست بحث شده است.

۳-۵ روش بهینه‌سازی

همان‌طور که از قسمت‌های قبل عنوان شده است، هرگونه خطا در ریزشبهه‌ها به دلیل اینرسی پایین ریزشبهه‌ها در حالت مستقل از شبکه منجر به ایجاد تغییرات در توان، فرکانس و ولتاژ خواهد شد. این مسئله می‌تواند با پیاده‌سازی یک روش بهینه‌سازی جهت کنترل ضرایب مشخصه‌ی افتی و همچنین ضرایب مؤثر کنترل‌کننده‌ی ولتاژ و کنترل‌کننده‌ی جریان صورت بگیرد. روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) تک هدفه با توجه به مزایای زیر مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. الگوریتم‌های PSO را می‌توان برای برنامه‌های کنترل زیر مانند کنترل و تنظیم بهینه ولتاژ و فرکانس، بهینه‌سازی جریان و کنترل توان، بهبود PQ، بهینه‌سازی انرژی و مدیریت عملکرد، به حداقل رساندن اتلاف توان و غیره در ریزشبهه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷، ۷۵، ۷۶]. عملکرد بهینه‌سازی PSO تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد حتی اگر اندازه مشکل بزرگ و غیرخطی باشد. در مقایسه با GA، PSO با توجه به مزایای زیر بهترین راه‌حل را ارائه می‌دهد [۱۷، ۱۸].

- مشکل همگرایی زودرس را محدود می‌کند و قابلیت جستجوی پیشرفته را ارائه می‌دهد.

• اجرای آن آسان است و تنظیمات آن به پارامترهای کمتری نیاز دارد.

• به دلیل استفاده از قوانین انتقال احتمالی، انعطاف‌پذیر و مقاوم‌تر از سایر روش‌های مرسوم است.

• از ظرفیت حافظه مؤثرتری نسبت به GA برخوردار است.

با توجه به مباحث ارائه‌شده در قسمت مدل‌سازی سیستم، برای بهینه‌سازی مشخصه‌ی اف‌تی در سیستم ریزشبکه ابتدا یک مدل کامل سیگنال کوچک از کل سیستم ارائه شده است. با توجه به ماتریس کل سیستم دیده شده است که ضرایب مشخصه‌ی اف‌تی m_p و n_q که به ترتیب ضریب اف‌ت فرکانس و ضریب اف‌ت ولتاژ نامیده می‌شوند و همچنین ضرایب بهره تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده‌ی ولتاژ برای تولید جریان‌های مرجع که به ترتیب K_{pu} و K_{iu} نامیده می‌شوند و همچنین ضرایب بهره تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده‌ی جریان برای تولید ولتاژ مرجع ورودی به سیستم که به ترتیب K_{pc} و K_{iu} در نظر گرفته شده است، می‌توانند به‌عنوان ضرایب مؤثر بر عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گیرند. پس این ضرایب می‌توانند به‌عنوان ورودی سیستم مورد استفاده قرار گیرند؛ اما با در نظر گرفتن این مسئله که این ضرایب به چه گونه‌ای می‌توانند بر عملکرد سیستم مؤثر باشند و با توجه به ماتریس کل سیستم، می‌توانیم با در نظر گرفتن بازه‌ی مقادیر برای این ضرایب با توجه به تأثیر آن‌ها بر پایداری سیستم، ضرایب تأثیرگذار بر رفتار سیستم را شناسایی کرده و به‌عنوان ضرایب هدف مورد استفاده برای ورودی سیستم قرار دهیم که این مسئله در فصل شبیه‌سازی نشان داده شده است. با توجه به مباحث عنوان‌شده در بالا انتخاب یک تابع هدف جهت تحقق بهبود رفتار دینامیکی سیستم امری ضروری به نظر می‌رسد.

سیستم‌های کنترل مدرن پیچیده معمولاً نیازمند معیارهای عملکرد پیچیده‌تری می‌باشند. زمان و خطا می‌توانند معیارهای مهمی برای شاخص رفتار سیستم در نظر گرفته شوند. یک شاخص عملکرد، یک اندازه مجزا از رفتار سیستم می‌باشد که می‌تواند بر خصوصیات پاسخی که به‌عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته

می‌شود، تأکید کند. با توجه نوع عملکرد سیستم می‌توان شاخص‌های عملکرد متفاوتی نظیر انتگرال قدر مطلق خطا (IAE)^۱، انتگرال مجذور خطا (ISE)^۲، انتگرال مقدار زمان در قدر مطلق خطا (ITAE)^۳ و انتگرال زمان در مجذور خطا (ITSE)^۴ را در نظر گرفت که در این پژوهش شاخص عملکرد انتگرال زمان در مجذور خطا مطابق با رابطه‌ی (۶۵-۳) در نظر گرفته شده است [۷۷].

$$ITSE: F = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (۶۵-۳)$$

۳-۶-۲ توابع هدف

با توجه به شاخص عملکرد عنوان‌شده در قسمت قبل تبیین یک تابع هدف مناسب که بتواند انتظارات بهره‌بردار از سیستم را برآورده سازد، بسیار ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش مسئله‌ی بهینه‌سازی مشخصه‌افتی عنوان شده است، انتخاب یک تابع هدف که بتواند رفتار دینامیکی سیستم را بهبود ببخشد در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶-۱ تابع هدف اول

در تابع هدف اول، کمینه‌سازی تفاوت توان اکتیو لحظه‌ای با توان اکتیو نامی و توان راکتیو لحظه‌ای با توان راکتیو نامی آن سیستم می‌باشد. از آنجایی که جنس این تابع از نوع انرژی می‌باشد لذا صورت تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

$$F_1 = \int_{t_0}^t (t - t_0)[(P(t) - P_0(t))^2 + (Q(t) - Q_0(t))^2] dt \quad (۶۶-۳)$$

^۱ Integral Absolute Error

^۲ Integral Square Error

^۳ Integral Time Absolute Error

^۴ Integral Time Square Error

که در اینجا t_0 زمان شروع و t زمان قطع، $P(t)$ مقدار توان اکتیو لحظه‌ای و P_0 مقدار توان اکتیو نامی، $Q(t)$ مقدار توان راکتیو لحظه‌ای و Q_0 مقدار توان راکتیو نامی می‌باشد.

۳-۶-۲ تابع هدف دوم

هدف تابع هدف دوم، کمینه‌سازی اختلاف فرکانس لحظه‌ای سیستم (فرکانس تولیدی از ضریب افت-فرکانس سیستم) با فرکانس مرجع سیستم می‌باشد. لذا صورت تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

$$F_2 = \int_{t_0}^t (t - t_0) [f - f_0]^2 dt \quad (۳-۶۷)$$

۳-۶-۳ تابع هدف ترکیبی

همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، دو نوع تابع هدف از جنس متفاوت معرفی شده است که برای به وجود آوردن یک تابع هدف ترکیبی از ضرایب وزنی w_1 و w_2 به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$F_T = w_1 \frac{F_1}{F_{1base}} + w_2 \frac{F_2}{F_{2base}} \quad (۳-۶۸)$$

در واقع F_{1base} مقادیر خطای تابع هدف اول به صورت مجزا و w_1 ضریب وزنی مرتبط با تابع هدف اول و F_1 مقادیر تابع هدف اول در خطاگیری به صورت تابع هدف ترکیبی می‌باشد. در واقع چون دو تابع هدف با دو جنس متفاوت ارائه شده است، با روابط بالا این مقادیر به صورت هم واحد درآمده و از یک جنس می‌شوند. این مسائل برای F_{2base} و w_2 و F_2 نیز صادق است. باید خاطر نشان کرد که در این تابع هدف ترکیبی، مجموع ضرایب وزنی برابر با مقدار یک می‌باشد.

۷-۳ جمع‌بندی

با توجه مفاهیم ارائه‌شده در این فصل یک روش کنترل‌کننده مبتنی بر مشخصه افتی به‌صورت تئوری مدل‌سازی شده است و همچنین جهت تحقق پارامترهای مؤثر بر رفتار سیستم یک مدل سیگنال کوچک معرفی‌شده و همچنین جهت بهبود عملکرد سیستم یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات پیاده‌سازی شده است. در انتها جهت ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم یک تابع هدف ترکیبی متشکل از دو تابع هدف ارائه شده است. در فصل بعد کارایی روش ارائه شده جهت بهبود رفتار دینامیکی سیستم نشان داده خواهد شد.

فصل چهارم:

شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای
بهینه‌سازی مشخصه افتی

۴-۱ مقدمه

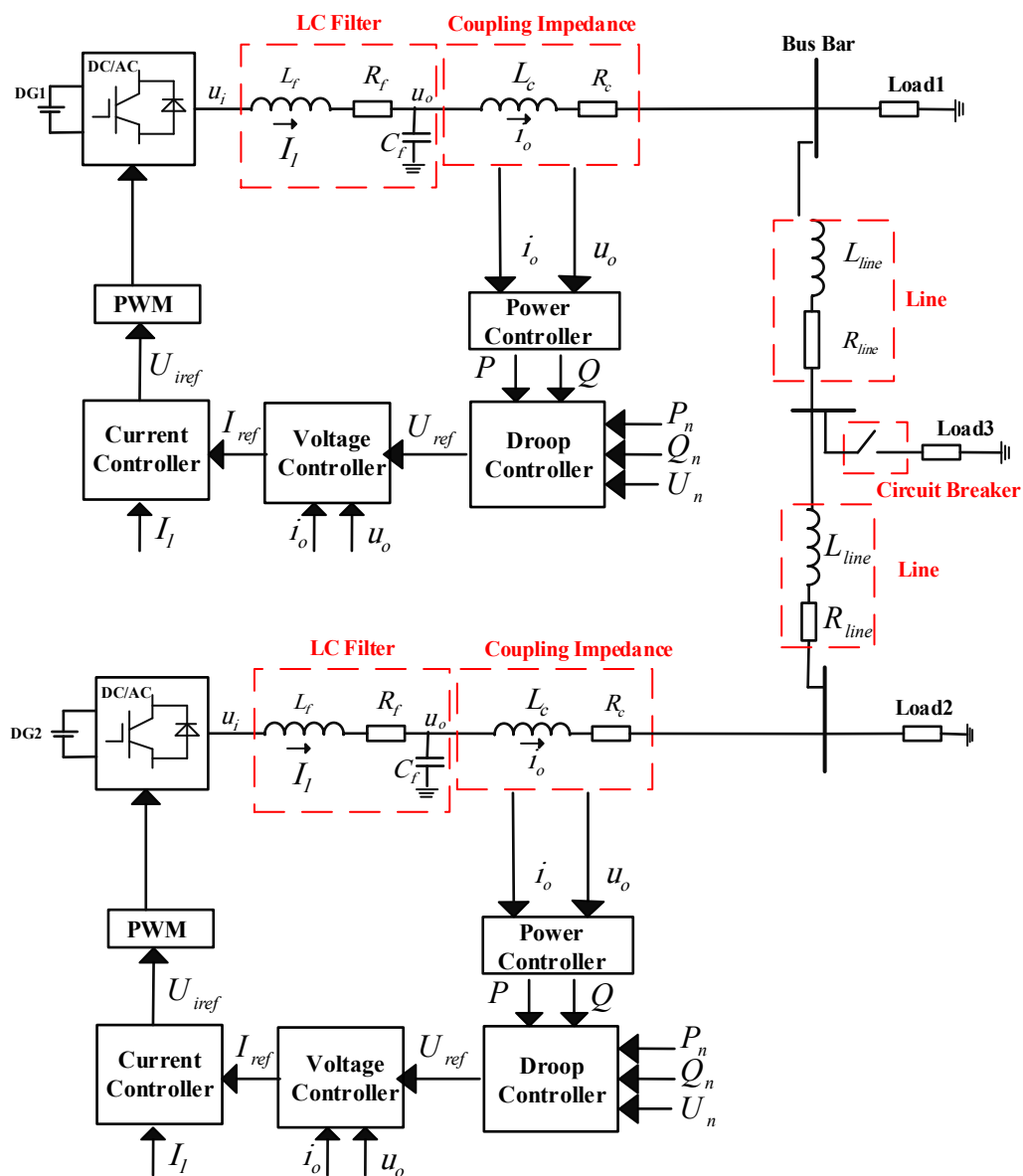
در فصل قبل یک مدل کامل از ریزشبکه مبتنی بر مشخصه‌ی افتی ارائه شده است. جهت آنالیز رفتار دینامیکی سیستم یک مدل کامل سیگنال کوچک از کل اجزای سیستم ارائه شد که هدف از ارائه این مدل تبیین آنالیز مقادیر ویژه سیستم جهت بررسی ضرایب مؤثر بر رفتار سیستم بوده است که ازجمله‌ی این ضرایب می‌توان بر ضرایب کنترل‌کننده مبتنی بر مشخصه‌ی افتی اشاره کرد. سپس ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت حل مسئله‌ی تابع هدف ترکیبی ارائه شد. لذا در این فصل به پیاده‌سازی مباحث عنوان‌شده پرداخته می‌شود و کارایی روش‌های مطرح‌شده مورد ارزیابی خواهد گرفت.

۴-۲ ریزشبکه مورد مطالعه

در این پایان‌نامه از روش کنترل مشخصه‌ی افتی استفاده می‌شود که روش انجام آن به این گونه است که ابتدا مدل مداری ریزشبکه در محیط نرم‌افزاری شبیه‌سازی شده و سپس یک مدل سیگنال کوچک بر اساس معادلات استخراج شده و نهایتاً به یک مدل فضای حالت برای سیستم دست یافته می‌شود. سیستم مورد مطالعه بصورت شکل (۴-۱) می‌باشد. زیر سیستم‌های تشکیل‌دهنده ریزشبکه شامل اینورتر، فیلتر، امپدانس تزویج، کنترل‌کننده‌ی توان، کنترل افتی، کنترل‌کننده‌ی ولتاژ، کنترل‌کننده‌ی جریان، مدولاسیون پهنای پالس (PWM)، خط و بار می‌باشند.

۴-۳ اطلاعات ریزشبکه مورد مطالعه

مشخصات سیستم مورد مطالعه ازجمله پارامترهای شبکه، بار شبکه و... در جدول (۴-۱) ارائه می‌شود.



شکل ۴-۱: سیستم مورد مطالعه

۴-۴ نتایج شبیه سازی

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی برای بهینه سازی مشخصه ی افتی برای بهبود رفتار دینامیکی

ریزشبکه تشریح و تفسیر می گردد.

۴-۴-۱ نتایج شبیه‌سازی مدل سیگنال کوچک سیستم جهت تعیین ضرایب مؤثر

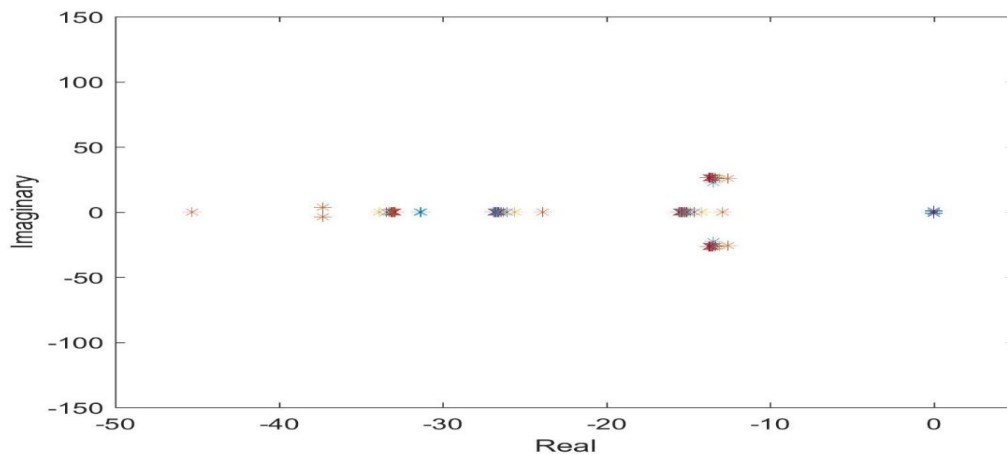
جهت ارزیابی نقطه‌ی کار سیستم در حالت ماندگار یک مدل نمونه مطابق شکل (۴-۱) در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. همچنین برای تحلیل مدل سیگنال کوچک سیستم ماتریس (۳-۶۴) مورد بررسی و تأثیر ضرایب کنترل‌کننده‌ی مشخصه‌ی افتی که شامل دو ضریب (m_p ضریب افت فرکانس -توان اکتیو و n_q ضریب افت ولتاژ-توان راکتیو) می‌باشند به همراه ضرایب بهره تناسبی و انتگرالی

جدول ۴-۱: مشخصات ریزشبه و مقادیر اولیه

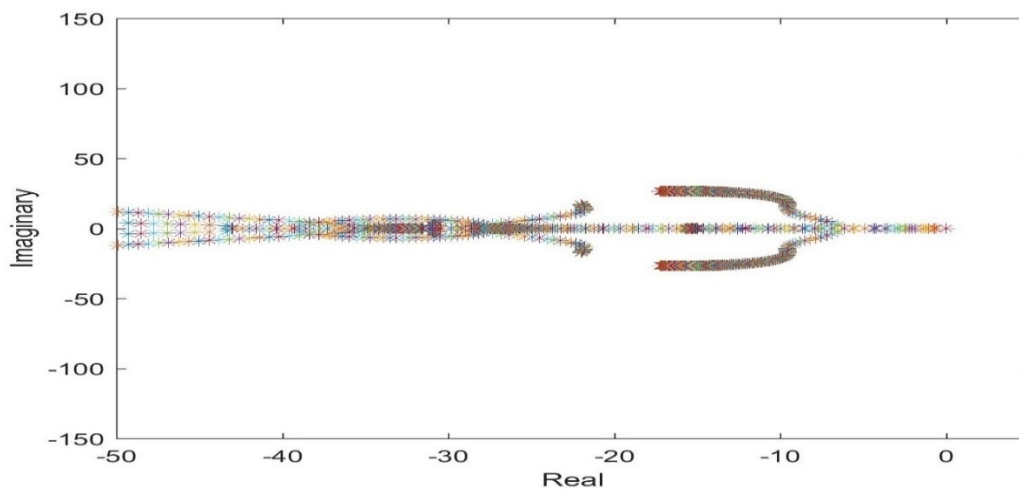
پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر
L_f	$۱/۵ \times ۱۰^{-۳}$	m_p	$۱/۰.۳ \times ۱۰^{-۵}$
R_f	$۰/۱۵$	n_q	$۲/۹۵ \times ۱۰^{-۴}$
C_f	۱۵۰۰×۱۰^{-۶}	k_{pu}	$۱۰/۱۱$
L_c	$۰/۵ \times ۱۰^{-۳}$	k_{iu}	۱۰۰
R_c	$۰/۰.۵$	k_{pc}	۱۰
r_N	$۱۰^{-۳}$	k_{ic}	$۰/۰.۱$
R_{load1}	$۱۰^۳$	G	$۰/۷$
L_{load1}	$۱۰^{-۳}$	w_c	$۳۱/۴$
R_{load2}	$۱۰^۳$	w_0	۳۱۴
L_{load2}	$۱۰^{-۳}$	s_0	$[۰ \ ۰/۰۰۰۱۹]$
R_{load3}	$۱۰^۳$	u_{od}	$[۳۱۱/۲ \ ۳۱۱/۶]$
L_{load3}	$۱۰^{-۳}$	u_{oq}	$[۰ \ ۰]$
I_{load1d}	$۰/۱۷۸$	I_{od}	$[۲۱/۲ \ ۲۱/۲]$
I_{load1q}	$-۰/۰۰۱۶$	I_{oq}	$[-۰/۳۴ \ -۱/۰.۵]$
I_{load2d}	$۰/۱۷۸$	I_{ld}	$[۲۱/۲ \ ۲۱/۲]$
I_{load2q}	$-۰/۰۰۰۷$	I_{lq}	$[-۱۴/۳ \ -۱۱/۳]$
I_{load3d}	$۰/۱۷۸$	u_{bd}	$[۳۰.۸/۷ \ ۳۰.۸/۵ \ ۳۰.۸]$
I_{load3q}	$-۰/۰۰۰۸$	u_{bq}	$[-۲/۸ \ -۱/۳ \ -۱/۵]$
I_{line1d}	$-۷/۸$	I_{line2d}	$-۵/۳$
I_{line1q}	$۱/۴$	I_{line2q}	$۰/۷$

ولتاژ (که به ترتیب K_{pu} و K_{iu}) می‌باشند و ضرایب بهره تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده‌ی جریان (که به ترتیب K_{pc} و K_{ic}) می‌باشند مورد آنالیز قرار خواهند گرفت. هدف از آنالیز در اینجا وضعیت مقادیر سیستم در یک بازه‌ی مشخص به‌طوری‌که این بازه‌ی ضریب موردنظر، وضعیت مقادیر ویژه سیستم از لحاظ

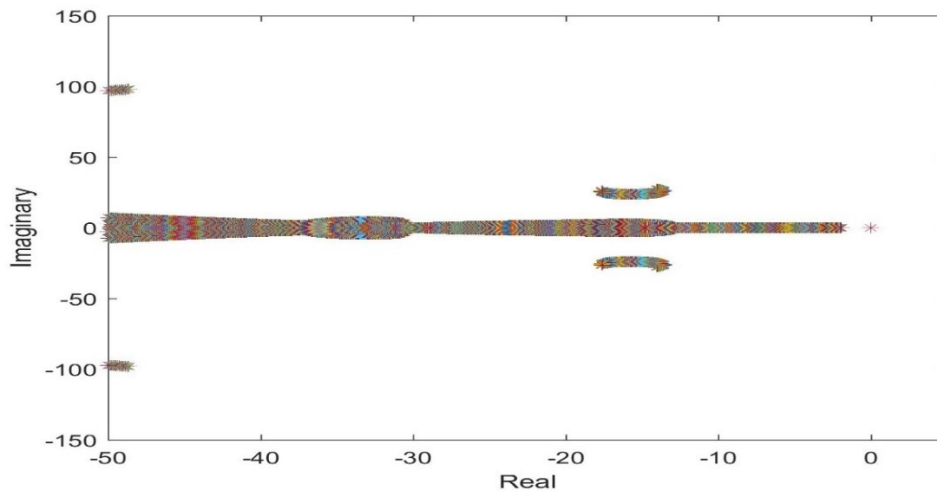
پایداری را، به چه وضعیتی خواهد برد. شکل (۲-۴)-(۵-۴) مکان اولیه مقادیر ویژه سیستم در حالتی که ضریب K_{iu} و K_{pc} در بازه‌ی [۰ ۱۰۰۰] و همچنین ضرایب K_{ic} و K_{pu} در بازه‌ی [۰ ۵۰] تغییر کند.



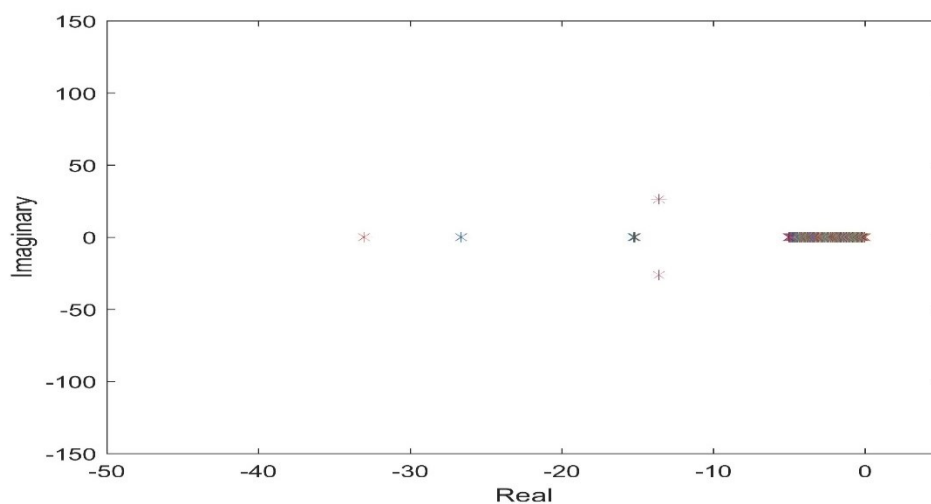
شکل ۲-۴: مقادیر ویژه سیستم به ازای تغییر K_{pc} در بازه‌ی [۰ ۱۰۰۰]



شکل ۳-۴: مقادیر ویژه سیستم با توجه به بازه‌ی تغییر ضریب K_{pu} در [۰ ۵۰]



شکل ۴-۴: مقادیر ویژه سیستم با توجه به تغییر ضریب K_{ic} در بازه $[0 \ 50]$



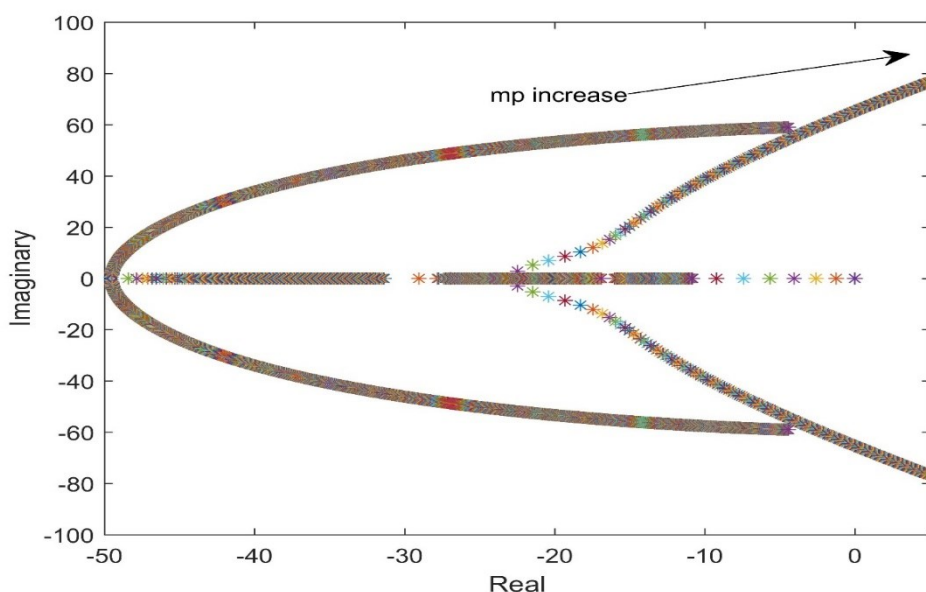
شکل ۴-۵: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب K_{iu} در بازه $[0 \ 1000]$

با توجه به شکل‌های بالا به ترتیب با تغییر پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ به ترتیب در بازه‌های $[50]$

$[0]$ و $[0 \ 1000]$ درمی‌یابیم که با تغییر ضریب K_{pc} با توجه به بازه تغییرات تأثیر چندانی بر پایداری

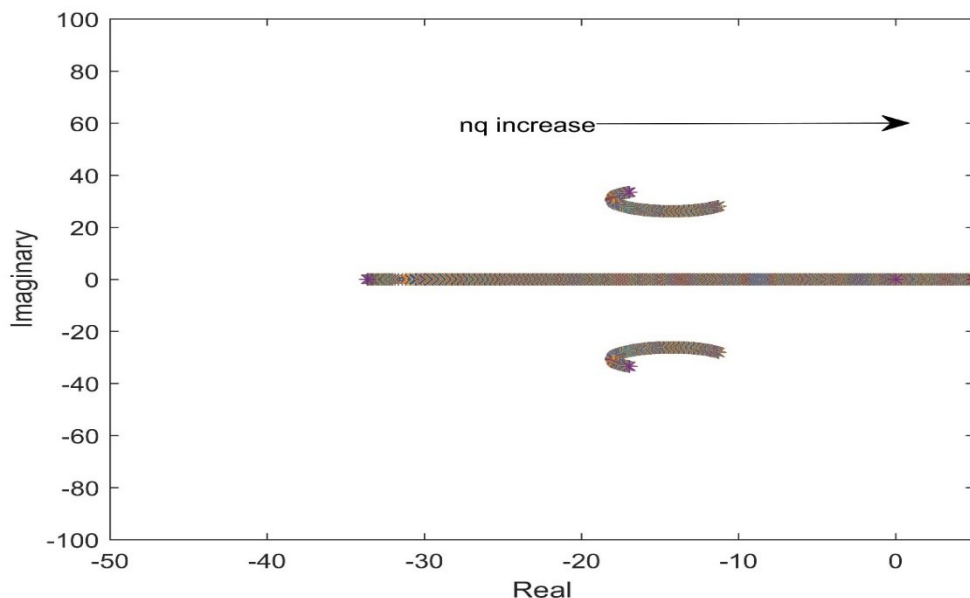
سیستم ندارد، اما ضریب K_{pu} با توجه به بازه تغییرات سیستم را به سمت ناپایداری حرکت دهد. همچنین

برای کنترل‌کننده‌ی جریان ضریب K_{iu} نیز با توجه به بازه‌ی تغییرات تأثیر چندانی در پایداری سیستم ندارد، ولی این موضوع برای ضریب K_{ic} صدق نمی‌کند و این ضریب با توجه به بازه‌ی تغییرات به سمت ناپایداری حرکت می‌کند. حال با توجه به شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) ضرایب کنترل‌کننده‌ی افقی m_p و n_q به ترتیب در بازه‌های $[0.000001 \ 0.01]$ تغییر پیدا کرده‌اند.



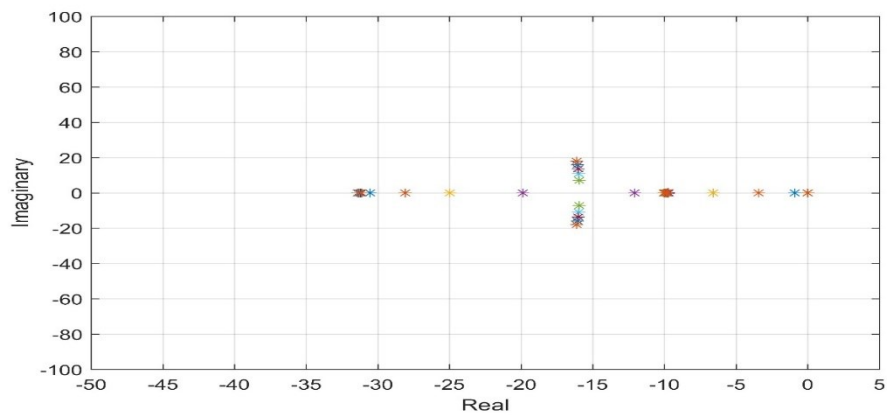
شکل ۴-۶: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل‌کننده افقی m_p در بازه‌ی $[0.000001 \ 0.01]$

با توجه به شکل (۴-۷) مشاهده می‌شود که وقتی m_p کوچک است، چندین زوج ریشه‌ی مختلط، دور از محور موهومی هستند، باین حال زمان پاسخ دینامیکی آن طولانی و خطای حالت ماندگار وجود دارد. با افزایش m_p ، مقادیر ویژه به تدریج با دور شدن از محور حقیقی رفتار دینامیکی را بهبود می‌بخشد، باین حال با نزدیک شدن به محور موهومی نرخ میرایی سیستم را کاهش داده و سیستم ناپایدار می‌شود.

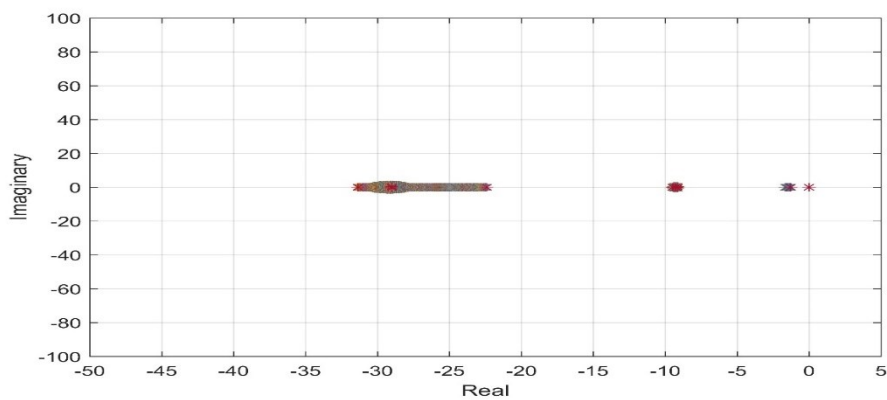


شکل ۴-۷: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی n_q در بازه‌ی $[0.000001 \ 0.01]$

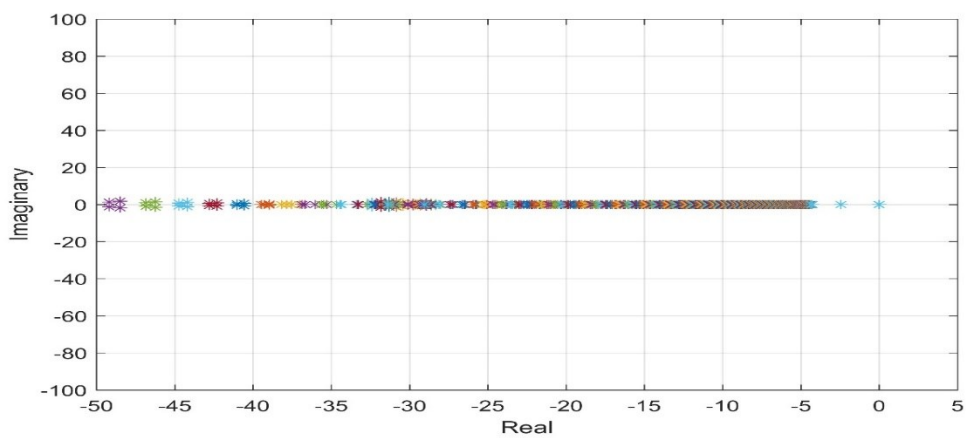
شکل (۴-۸) نشان می‌دهد که n_q همانند دیگر ضریب افقی تأثیر زیادی بر رفتار دینامیکی سیستم دارد، اما وقتی مقادیر بسیار بزرگ باشند، ریشه‌ها به ناحیه‌ی ناپایداری حرکت می‌کنند که موجب نوسانی‌تر شدن سیستم و ناپایداری آن می‌گردند. از این رو با انتخاب یک بازه‌ی صحیح تغییرات که سیستم در ناحیه‌ی پایداری قرار بگیرد بسیار ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به مباحث ارائه‌شده بازه تغییرات برای چهار پارامتر تأثیرگذار m_p و n_q و K_{pu} و K_{ic} به ترتیب در بازه‌های $[0.000087 \ 0.000004]$ ، $[0.00073]$ ، $[0.0001 \ 1.23/2]$ و $[0.0/9]$ در شکل‌های (۴-۸) تا (۴-۱۱) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. این اشکال نشان می‌دهند که بازه‌ی موردنظر به سمت چپ محور موهومی حرکت کرده و برای تعیین مقادیر بهینه آن‌ها کاملاً در ناحیه‌ی پایداری قرار دارد.



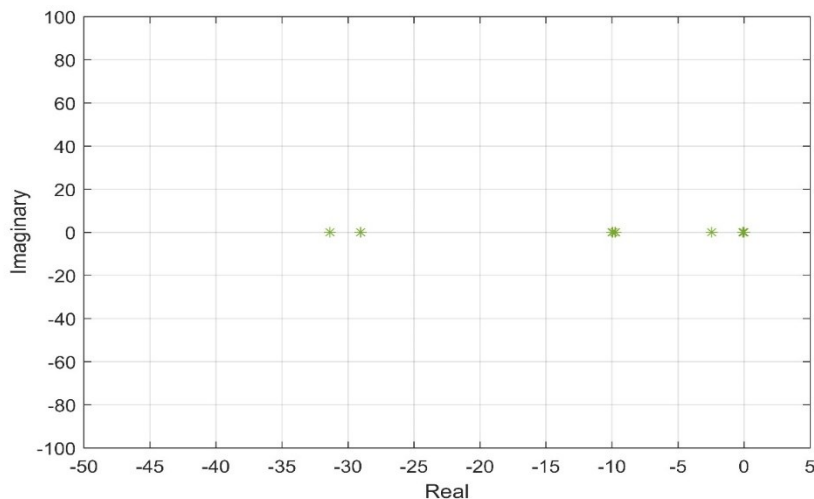
شکل ۴-۸: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی m_p در بازه‌ی $[۰/۰۰۰۰۰۴ \ ۰/۰۰۰۰۰۸۷]$



شکل ۴-۹: مقادیر ویژه سیستم با تغییر ضریب کنترل کننده افقی n_q در بازه‌ی $[۰/۰۰۰۰۰۱ \ ۰/۰۰۰۰۷۳]$



شکل ۴-۱۰: مقادیر ویژه سیستم با توجه به بازه‌ی تغییر ضریب K_{pu} در $[۱ \ ۲۳/۲]$



شکل ۴-۱۱: مقادیر ویژه سیستم با توجه به تغییر ضریب K_{ic} در بازه $[0, 0.9]$

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان در سیمولینک متلب

همان‌طور که در فصل قبل مطرح‌شده بود هدف این پژوهش بهینه‌سازی مشخصه‌ی اف‌تی برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم هست. از این‌رو با تبیین نحوه‌ی تأثیرگذاری ضرایب مشخصه‌ی اف‌تی و دیگر کنترل‌کننده‌ها بر ناپایداری سیستم با توجه به بازه‌های آن‌ها، تنظیم صحیح این ضرایب در سیستم کنترلی به شرطی که سیستم در تبیین یک هدف موردنظر دچار ناپایداری نشود، نیازمند بهینه‌سازی آن‌ها با توجه به یک تابع هدف که بتواند نیازهای سیستم را برطرف کند، می‌باشد. جهت تحقق این امر ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) با توجه به تابع هدف (۳-۶۸) در طول سناریوهای متفاوت ارائه شده است. جهت ارزیابی سیستم کنترل و تابع هدف ارائه‌شده در دو بخش بدون و با حضور مقادیر بهینه، شبیه‌سازی انجام‌گرفته است که در بخش مقادیر بهینه شبیه‌سازی با توجه به نسبت X/R خطوط بررسی شده است. با توجه به تابع هدف ارائه‌شده در این پژوهش، شبیه‌سازی در دوره‌ی زمانی ۲ ثانیه در مقادیر وزنی متفاوت در سیمولینک متلب صورت گرفته است و سناریو زمان به این صورت می‌باشد که در بازه‌ی زمانی $[1/2-1]$

[۰/۷] بار شماره ۳ جدا می‌گردد. مشخصات اولیه ابزار بهینه‌سازی ازدحام ذرات به این صورت می‌باشد که اندازه جمعیت اولیه بر روی ۴۰ و ضریب وزنی اینرسی W بر روی ۱ و ضریب شتاب شناختی C_1 بر روی ۲ و ضریب شتاب اجتماعی C_2 بر روی ۲ تنظیم شده‌اند. ماکزیمم تکرار بر روی ۴۰ قرار دارد. این روش، روش بهینه‌سازی آفلاین بوده و به تدریج به راه‌حل بهینه همگرا می‌شود. در ادامه خروجی مربوط به پارامترهای توان اکتیو، توان راکتیو، فرکانس، ولتاژ خروجی ریزشبه که را در سناریوهای مرتبط با وزن‌های مختلف تابع هدف ترکیبی با توجه به نسبت X/R را مشاهده خواهیم کرد. در جدول (۲-۴) مقادیر مقاومت و راکتانس برای نسبت X/R در مقادیر متفاوت ارائه شده است. در جدول (۳-۴) بهترین جواب از نمودار همگرایی مربوط به هر نسبت X/R و مقدار ضریب وزنی مربوط به آن ارائه شده است. در جدول (۴-۴) مقدار بهینه‌ی ضرایب کنترل‌کننده با توجه به نسبت X/R در ضرایب وزنی متفاوت مورد ارائه شده است.

جدول ۲-۴: مقادیر X و R خطوط و نسبت X/R [۷۸، ۷۹]

نسبت X/R / مقادیر خطوط	$\frac{X}{R} = ۳/۴۸$	$\frac{X}{R} = ۰/۱۳$
R_{line1}	۰/۱۴۷	۰/۶۴۷
R_{line2}	۰/۱۱	۰/۶۴۷
X_{line1}	۰/۵۱۱۸۲	۰/۰۸۳
X_{line2}	۰/۳۹۲۵	۰/۰۸۳

جدول ۳-۴: بهترین جواب ممکن از نمودار همگرایی با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط

نسبت X/R / ضرایب وزنی	بهترین جواب	
	$\frac{X}{R} = ۳/۴۸$	$\frac{X}{R} = ۰/۱۳$
$W1=0.1, W2=0.9$	۰/۲۷۱۰۵	۱۰۱۲۶/۱۵۹۸
$W1=0.5, W2=0.5$	۳۵۵/۹۲۸	۵۶۶۶/۵۴۸۷
$W1=0.9, W2=0.1$	۱۲/۳۱۶	۱۲۸۰/۱۱۸۴

جدول ۴-۴: مقادیر ضرایب کنترل‌کننده‌ها در حالت بهینه با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط

نسبت X/R	$\frac{X}{R} = 3/48$			
ضرایب کنترل‌کننده ضرایب وزنی	m_p	n_q	k_{pu}	k_{ic}
W1=0/1, W2=0/9	4×10^{-6}	4769×10^{-7}	16/0.54	0/8285
W1=0/5, W2=0/5	4×10^{-6}	$6/72111 \times 10^{-5}$	12/8348	0/662862
W1=0/9, W2=0/1	4×10^{-6}	354572×10^{-9}	12/6236	.

جدول ۴-۵: مقادیر ضرایب کنترل‌کننده‌ها در حالت بهینه با توجه به ضرایب وزنی متفاوت و نسبت X/R خطوط

نسبت X/R	$\frac{X}{R} = 0/13$			
ضرایب کنترل‌کننده ضرایب وزنی	m_p	n_q	k_{pu}	k_{ic}
W1=0/1, W2=0/9	4×10^{-6}	136901×10^{-9}	14/292	0/83254
W1=0/5, W2=0/5	4×10^{-6}	$5/58962 \times 10^{-5}$	14/3475	0/824111
W1=0/9, W2=0/1	4×10^{-6}	$4/018 \times 10^{-5}$	14/3629	0/9

۴-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی

$$W1 = 0.1, W2 = 0.9$$

در شکل (۴-۱۲) مقادیر خروجی فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی

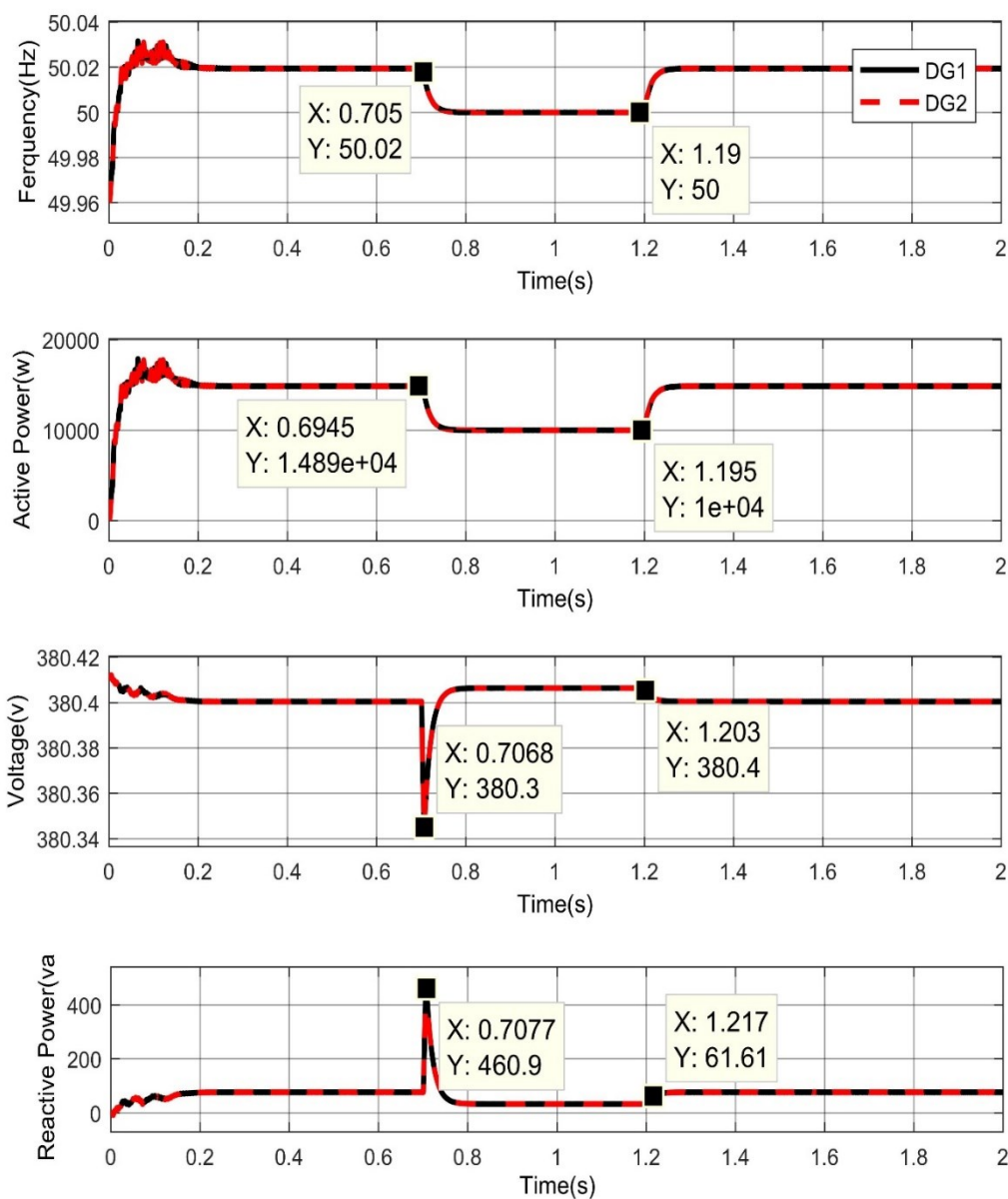
W1=0.1, W2=0.9 با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0/13$ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با توجه ضریب

وزنی موردنظر بیشتر بودن سهم تابع هدف دوم تقسیم توان مناسب و همچنین فرکانس خروجی مطلوب و

افت ولتاژ خروجی کمتر و همچنین در لحظه‌ی شروع قطع بار سوم توان راکتیو پیک کمتری خواهد داشت؛

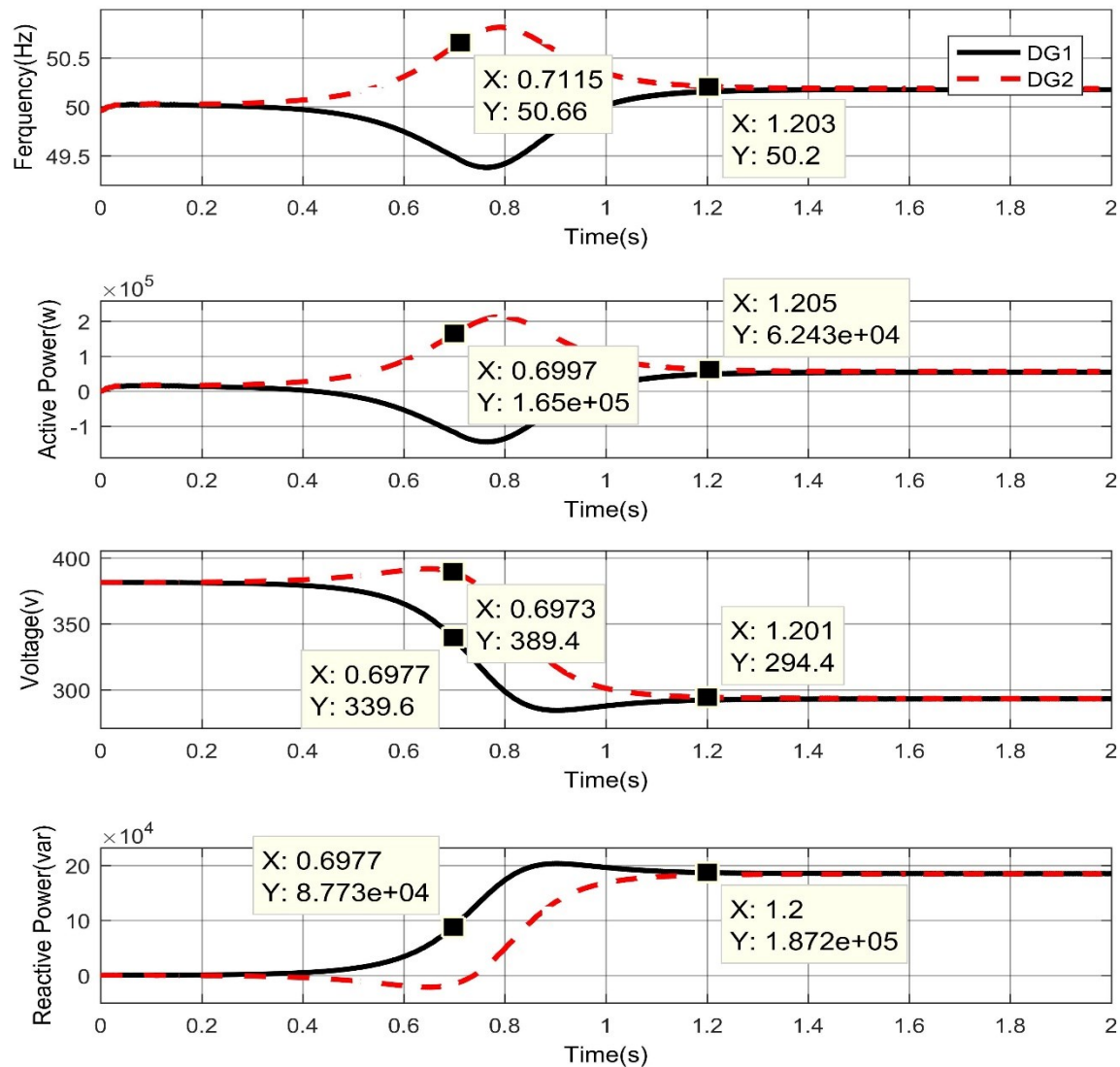
اما در شکل (۴-۱۳) با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$ دیده می‌شود که در زمان اجرای سناریو مقادیر

ولتاژ خروجی بسیار افت کرده و توان راکتیو به صورت مطلوب نمی‌باشند.



شکل ۴-۱۲: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.1$, $W2=0.9$ با در

$$\frac{X}{R} = 0.13 \text{ نظر گرفتن نسبت}$$



شکل ۴-۱۳: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.1$, $W2=0.9$ با در

$$\frac{X}{R} = 3/48 \text{ نسبت گرفتن}$$

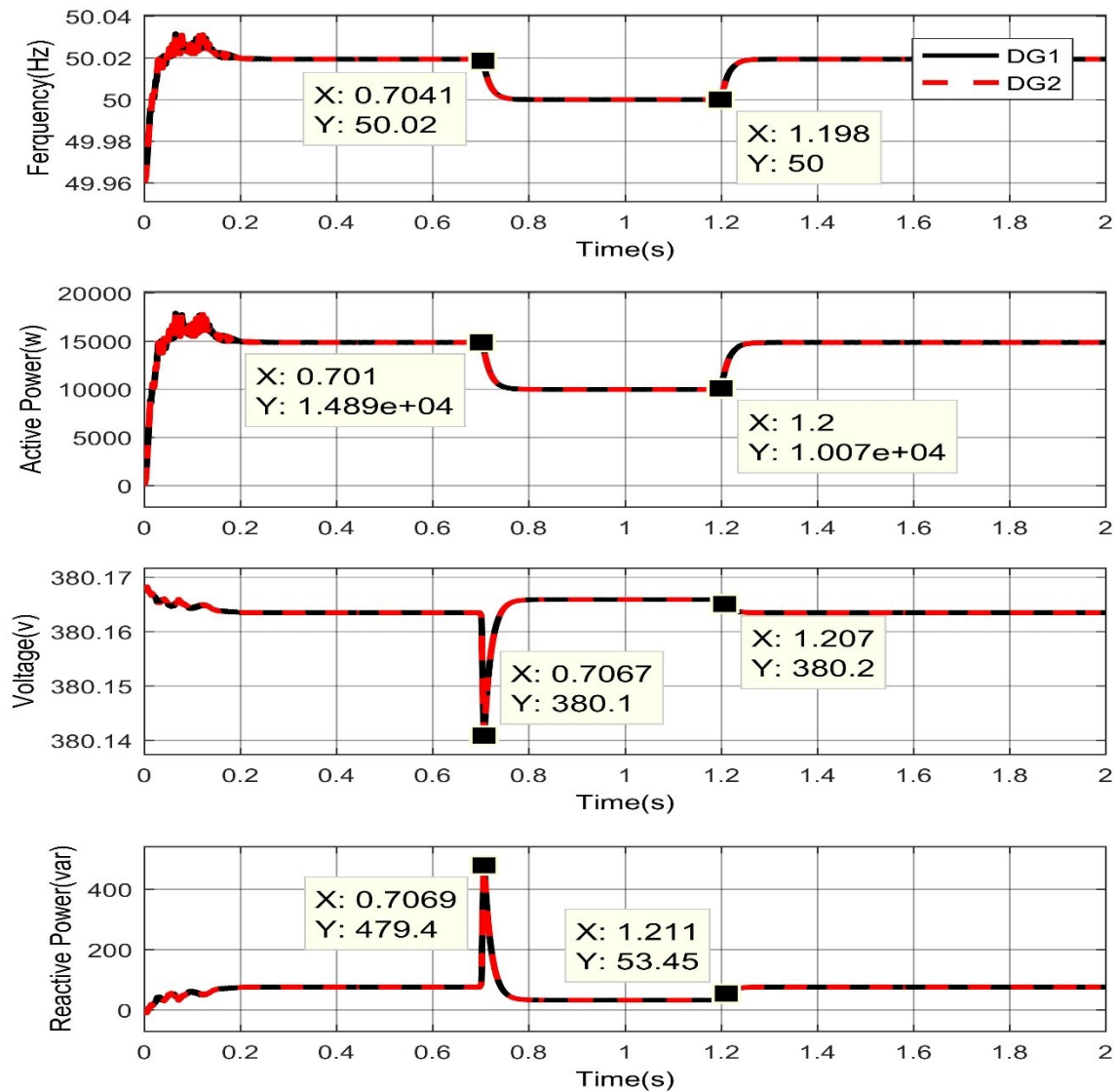
۴-۲-۲ نتایج شبیه سازی در حوزه ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی

$$W1=0.5, W2=0.5$$

در شکل (۴-۱۴) مقادیر خروجی فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی

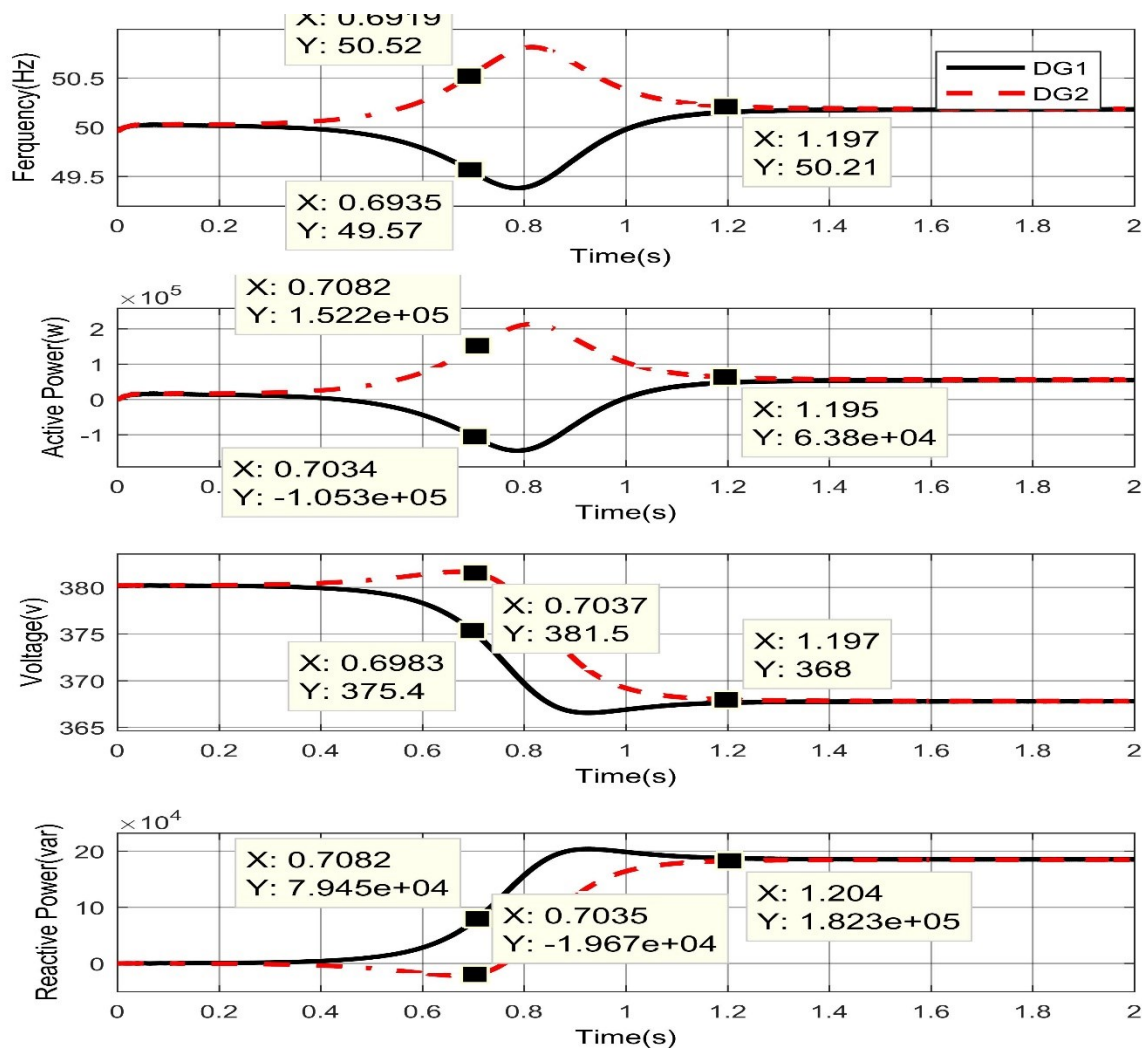
$W1=0/5$, $W2=0/5$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R}=0/13$ ارائه شده است. با توجه ضریب وزنی موردنظر

تقسیم توان مناسب و همچنین فرکانس مطلوب می‌باشند. به نسبت برابر بودن سهم هر دو تابع هدف افت ولتاژ کمی بیشتر بوده و پیک توان راکتیو در لحظه‌ی قطع بار بیشتر می‌باشد؛ اما در شکل (۴-۱۵) با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$ دیده می‌شود که در زمان اجرای سناریو مقادیر ولتاژ خروجی بسیار افت کرده و توان راکتیو و اکتیو در لحظه‌ی قطع و وصل بار به صورت مطلوب نمی‌باشند.



شکل ۴-۱۴: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.5$, $W2=0.5$ با در

$$\frac{X}{R} = 0/13 \text{ نظر گرفتن نسبت}$$



شکل ۴-۱۵: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.5$, $W2=0.5$ با در

$$\frac{X}{R} = 3/48 \text{ نسبت گرفتن}$$

۴-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان با در نظر گرفتن نسبت X/R در مقادیر ضریب وزنی

$$W1=0.9, W2=0.1$$

در شکل (۴-۱۶) مقادیر خروجی فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی

$W1=0.9$, $W2=0.1$ با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0/13$ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با توجه

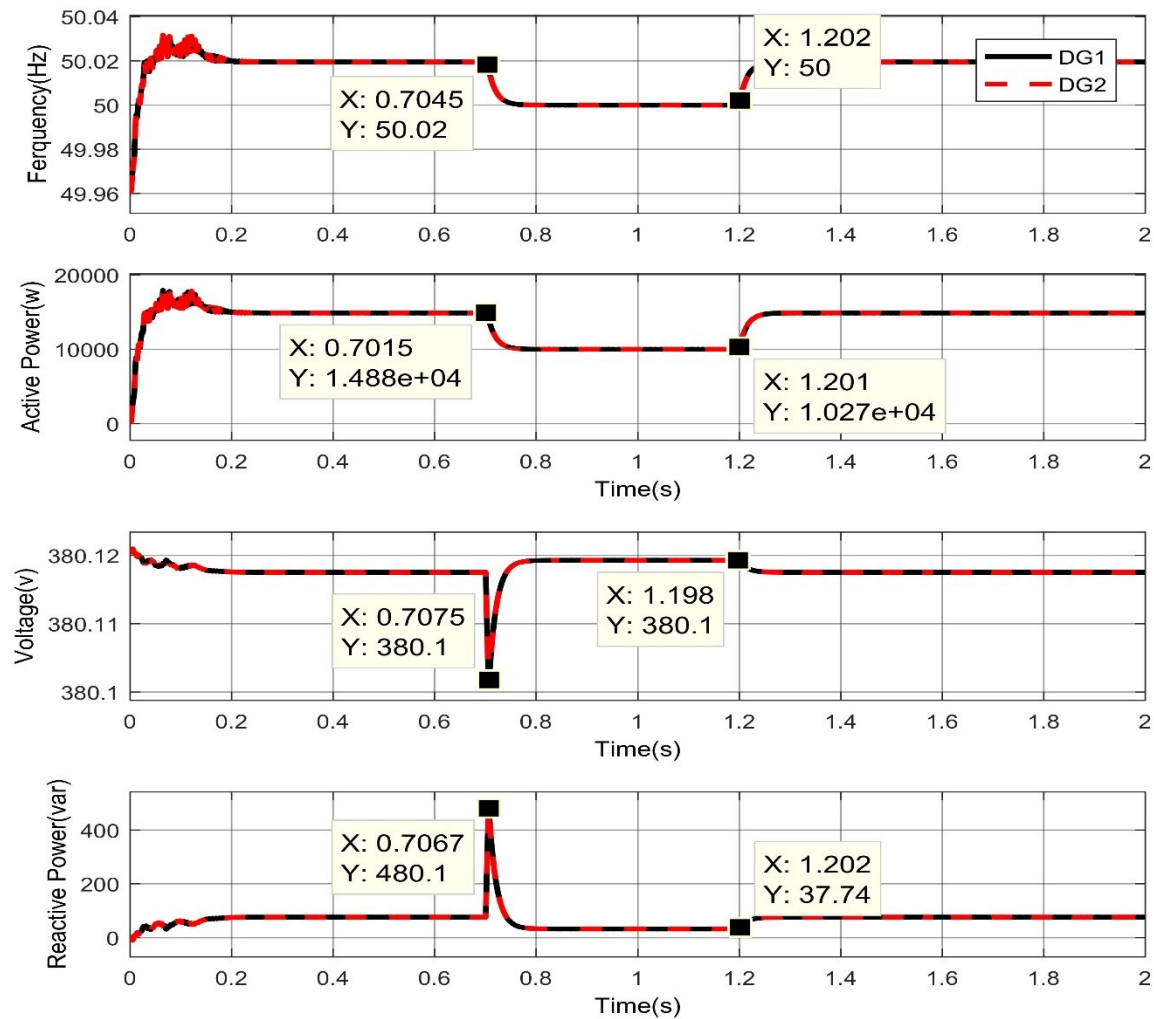
به ضریب وزنی موردنظر تقسیم توان مناسب و همچنین فرکانس خروجی به‌صورت مطلوب می‌باشند. با

توجه به قابل قبول بودن ولتاژ خروجی، افت ولتاژ به نسبت افزایش سهم تابع هدف اول کمی بیشتر بوده و

همچنین توان اکتیو دارای پیک بیشتری می باشد؛ اما در شکل (۴-۱۷) با در نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 3/48$

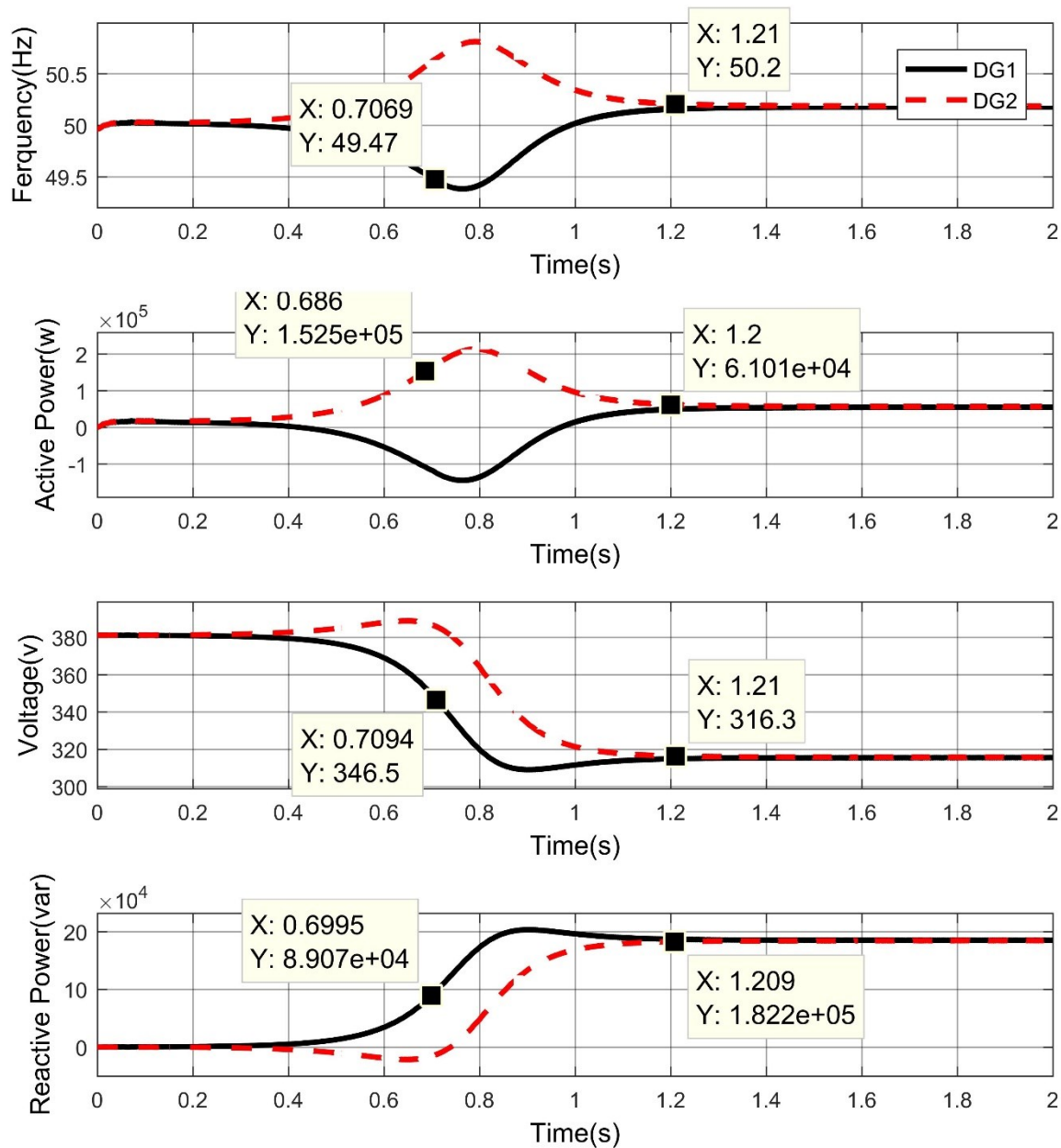
دیده می شود که در زمان اجرای سناریو مقادیر ولتاژ خروجی بسیار افت کرده و توان راکتیو به صورت مطلوب

نمی باشند.



شکل ۴-۱۶: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.9$, $W2=0.1$ با در

نظر گرفتن نسبت $\frac{X}{R} = 0/13$



شکل ۴-۱۷: به ترتیب مقادیر فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ، توان راکتیو سیستم در ضرایب وزنی $W1=0.9$, $W2=0.1$ با در

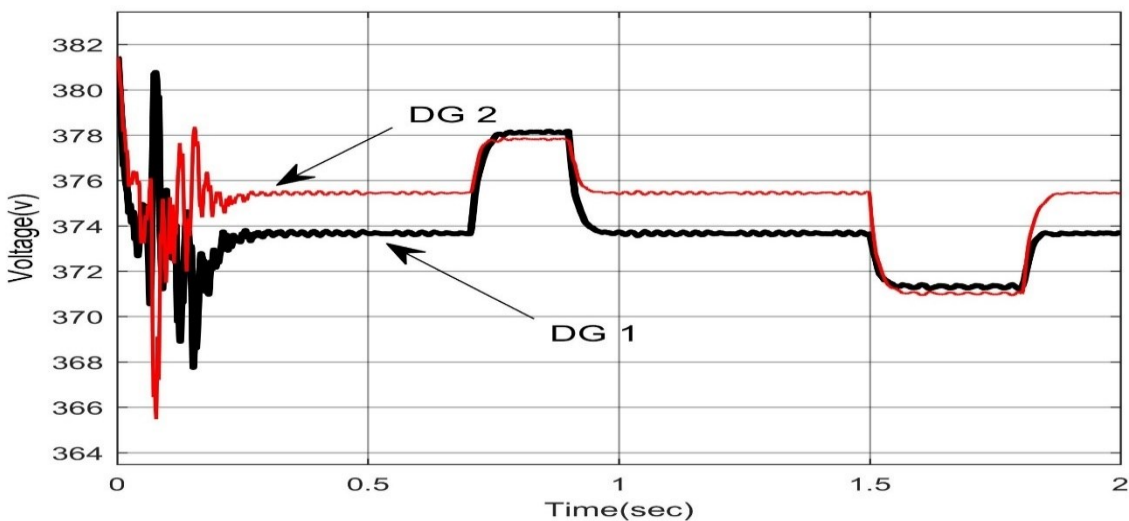
$$\frac{X}{R} = \frac{3}{48} \text{ نسبت گرفتن}$$

۴-۲-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان در مقادیر ضریب غیر بهینه

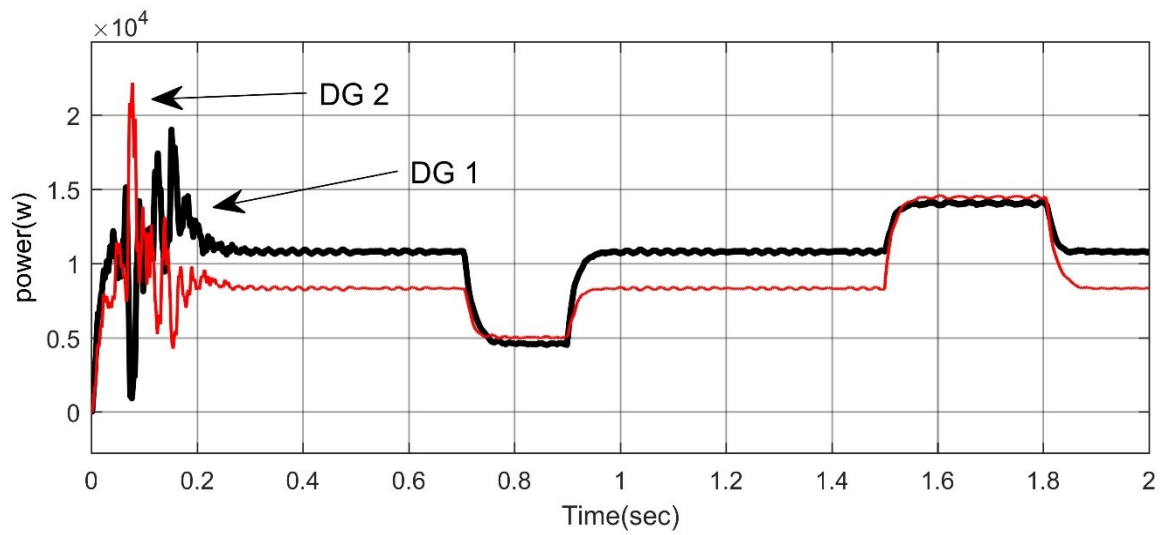
با توجه به مباحث ارائه‌شده در قسمت قبل سناریو ضریب وزنی با مقادیر ذکرشده انجام گرفته است.

در شکل (۴-۱۸)-(۴-۲۱) نمودار ولتاژ خروجی، توان اکتیو، فرکانس و توان راکتیو ارائه شده است. در این

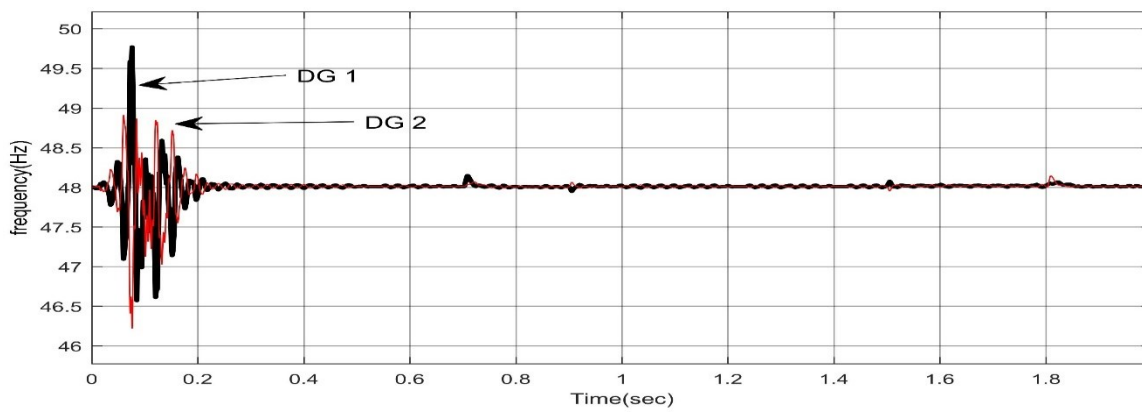
قسمت مشاهده خواهد شد که ضرایب غیر بهینه و خارج از دامنه‌ی پایداری چگونه بر رفتار دینامیکی سیستم تأثیر مخرب خواهد گذاشت. مقادیر افت ولتاژ بسیار زیاد در شروع فرآیند و همچنین افت فرکانس محسوس گویای این امر می‌باشد.



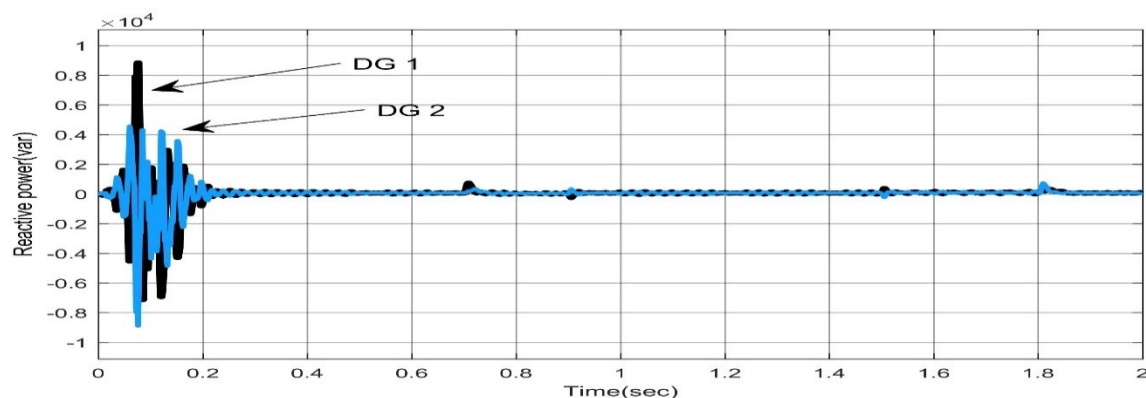
شکل ۴-۱۸: ولتاژ خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه



شکل ۴-۱۹: توان اکتیو خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه



شکل ۴-۲۰: فرکانس خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه



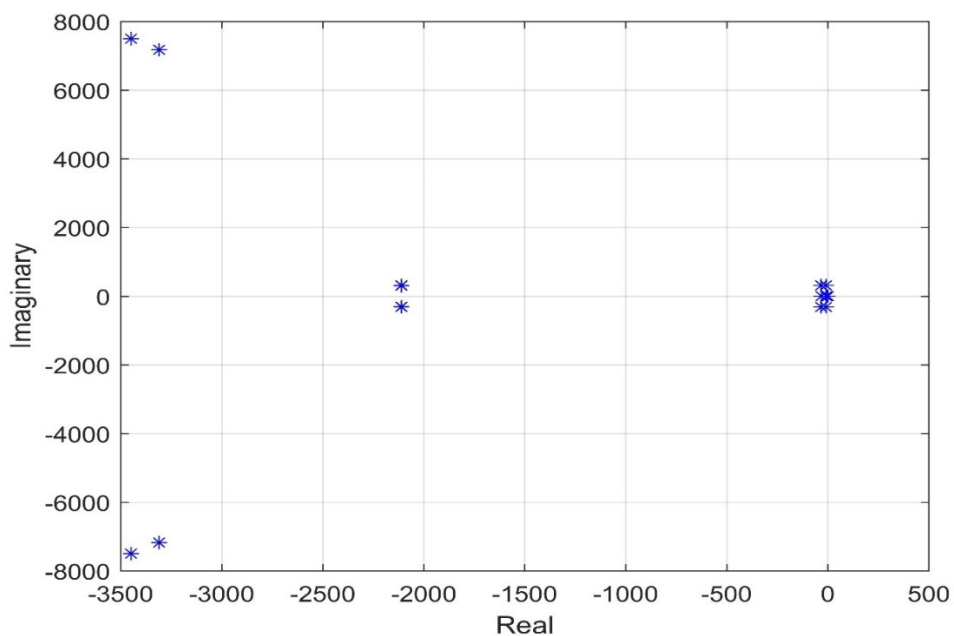
شکل ۴-۲۱: توان راکتیو خروجی در حالت ضرایب غیر بهینه

با توجه مقادیر خروجی در حالت بهینه، متغیرهای سیستم در زمان شروع و همچنین در زمان اجرای سناریو مربوط به ضرایب وزنی متفاوت تابع هدف درخواهیم یافت که با سنگین شدن وزن تابع فرکانسی مقادیر به مراتب بهتر خواهد شد و در مقابل با مقایسه با مقادیر غیر بهینه شده دارای مشخصه‌های عالی می‌باشند که این نشان از کارایی الگوریتم پیاده‌سازی شده دارد.

۴-۲-۵ بررسی پایداری سیستم با ضرایب وزنی متفاوت با در نظر گرفتن نسبت X/R در حالت

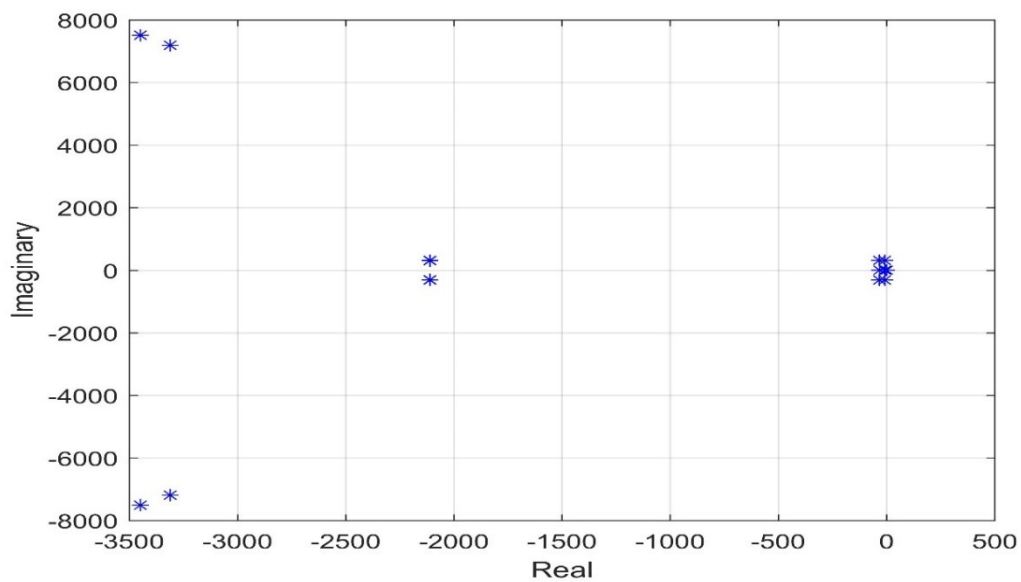
بهینه و حالت غیر بهینه

با بررسی ماتریس مقادیر ویژه سیستم نشان داده شده است که مقادیر انتخابی از ضرایب وزنی متفاوت با در نظر گرفتن نسبت X/R در محدوده‌ی پایداری سیستم قرار دارند که نشان از کارایی الگوریتم ارائه شده برای این سیستم دارد. همچنین مقادیر ویژه سیستم به ازای مقادیر غیر بهینه نیز ارائه شده است که با قرار گرفتن مقادیر سیستم در سمت راست محور موهومی نشان می‌دهد سیستم به سمت ناپایداری خواهد رفت. در شکل‌های (۴-۲۲) تا (۴-۲۷) مقادیر ویژه سیستم به ازای مقادیر بهینه شده با در نظر گرفتن نسبت X/R ارائه شده و در شکل (۴-۲۸) مقادیر ویژه سیستم به ازای مقادیر غیر بهینه ارائه شده است.



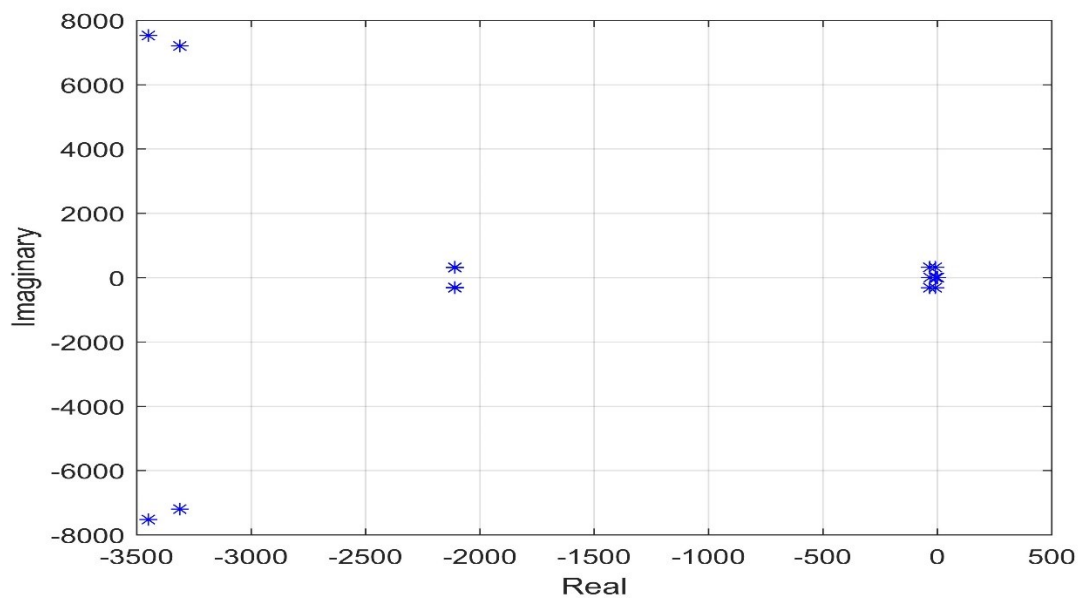
شکل ۴-۲۲: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W_1=0.1$, $W_2=0.9$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = 0.13 \text{ نسبت}$$



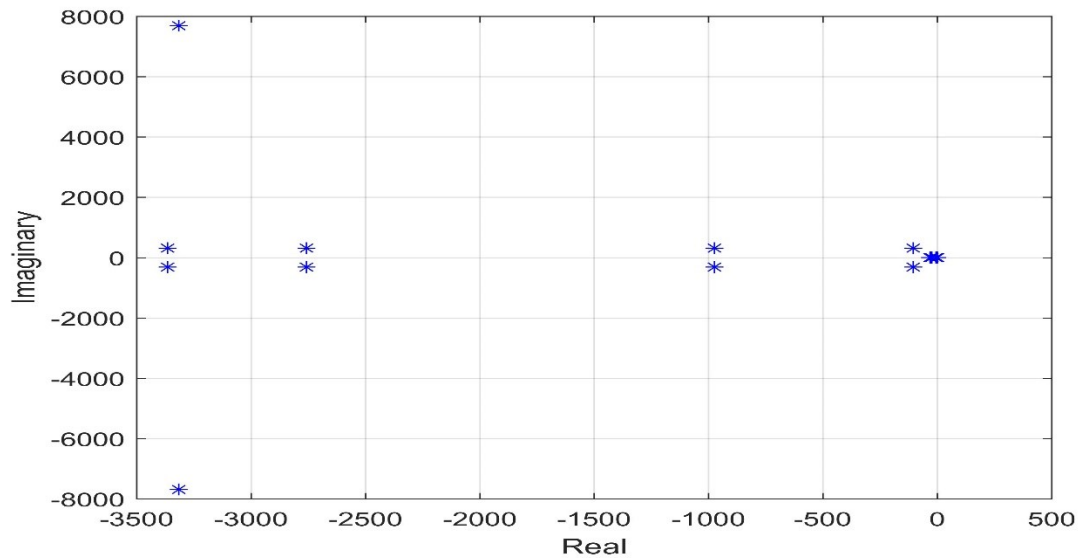
شکل ۴-۲۳: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W_1=0.5$, $W_2=0.5$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = 0.13 \text{ نسبت}$$



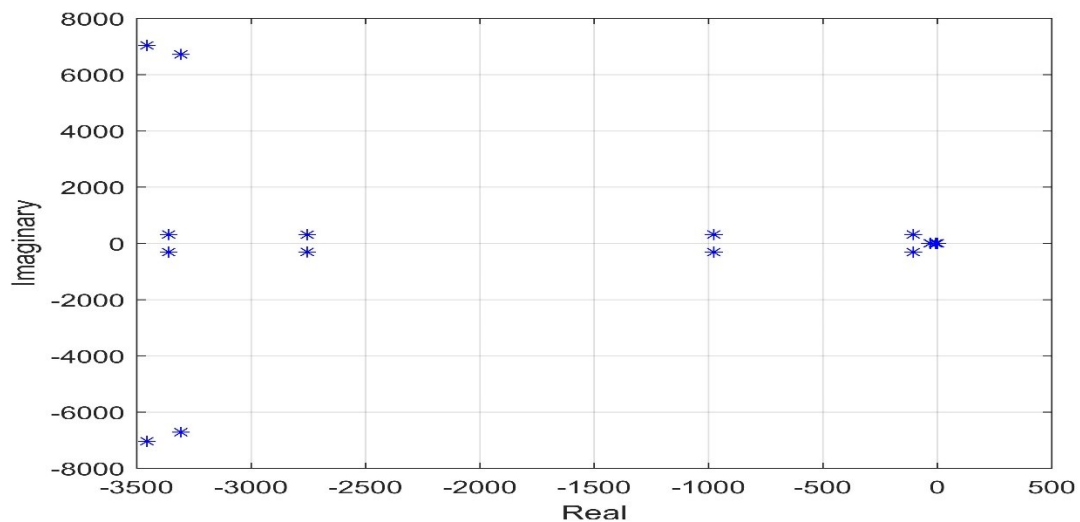
شکل ۴-۲۴: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.9$, $W2=0.1$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = 0.13 \text{ نسبت}$$



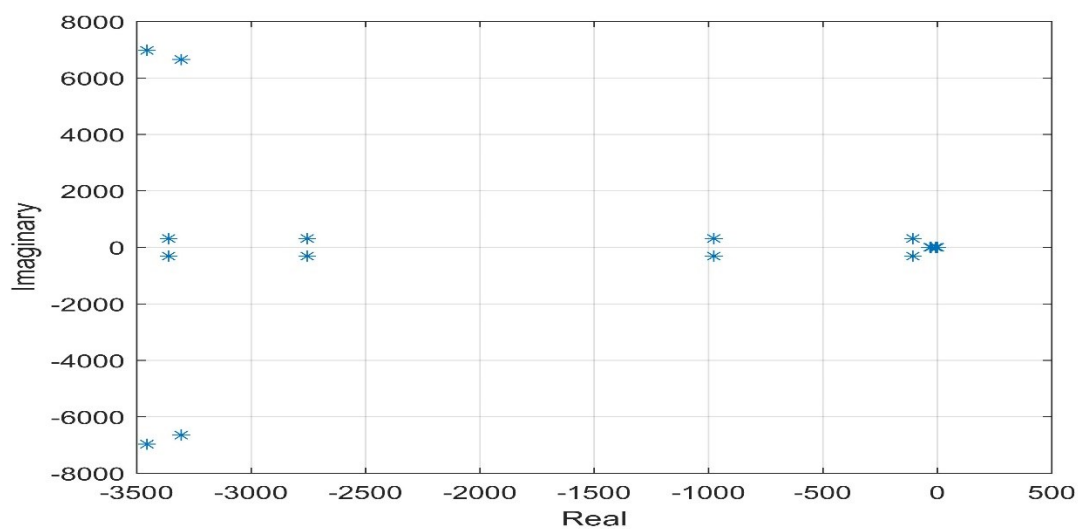
شکل ۴-۲۵: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.1$, $W2=0.9$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = 3.48 \text{ نسبت}$$



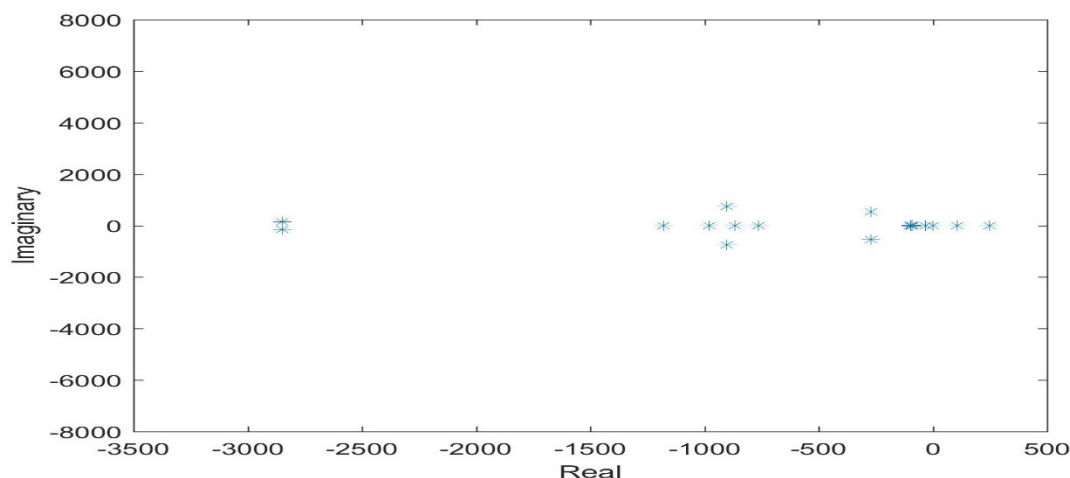
شکل ۴-۲۶: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.5$, $W2=0.5$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = \text{نسبت } 3/48$$



شکل ۴-۲۷: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم با در نظر گرفتن ضرایب وزنی $W1=0.9$, $W2=0.1$ و با در نظر گرفتن

$$\frac{X}{R} = \text{نسبت } 3/48$$



شکل ۴-۲۸: آنالیز پایداری و مقادیر ویژه سیستم در حالت ضرایب غیر بهینه

در این آنالیز نشان داده شده است که فرکانس این مقادیر ویژه در سه دسته پراکنده شده است. مقادیر ویژه فرکانس پایین نزدیک به محور موهومی غالب تر و بحرانی تر برای پایداری سیستم می باشند، در حالی که مقادیر ویژه نزدیک به محور حقیقی بر رفتار دینامیکی و خواص میرایی سیستم تأثیر خواهد داشت. از این رو با انتخاب ناصحیح پارامترهای کنترل کننده در شکل (۴-۲۸) نشان داده شده است که سیستم ناپایدار می گردد.

۴-۵ جمع بندی

با توجه به مفاهیم ارائه شده در فصول قبل یک ریزشکه مبتنی بر مشخصه‌ی اف‌تی در این فصل پیاده سازی شده است. با بررسی پارامترهای کنترل کننده، تأثیر ضرایب کنترل کننده‌ها اف‌تی، ولتاژ و جریان بر رفتار و پایداری سیستم مشاهده شده است. الگوریتم ارائه شده با توجه به خطای برنامه ریزی شده از قبل، و همچنین تابع هدف ترکیبی در ضرایب وزنی متفاوت در دو نسبت X/R متفاوت ارائه شده است. در زمانی که نسبت X/R کوچک تر از یک باشد، با افزایش وزن تابع هدف فرکانسی به مراتب افت ولتاژ کمتر و پیک

توان راکتیو کمتری نیز خواهیم داشت؛ اما در حالتی که نسبت X/R بزرگ‌تر از یک باشد، به‌مراتب دیده شده است که افت ولتاژ بسیار شدیدی رخ داده و عملکرد دروپ نامناسب می‌باشد. همچنین با بررسی مقادیر سیستم با توجه به ماتریس کل سیستم نتیجه شده از مدل کلی سیگنال کوچک نشان‌دهنده‌ی پایداری مطلوب سیستم با ضرایب بهینه دارد. با توجه به خروجی‌های سیستم در حالت غیر بهینه نتیجه‌گیری می‌شود که پارامترهای خروجی بسیار به ضرایب کنترل‌کننده وابسته می‌باشند، به‌طوری‌که عدم تنظیم دقیق این پارامترها منجر به کنترل نامناسب ریزش‌بکه، عدم رفتار دینامیکی مناسب و درنهایت منجر به ناپایداری آن می‌شود.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

کنترل ریزش‌بکه‌ها یکی از احتیاجات ضروری برای عملکرد سیستم در حالت مستقل از شبکه اصلی می‌باشد، از این‌رو در این پژوهش جهت بررسی رفتار دینامیکی ریزش‌بکه، یک مدل کلی فضای حالت سیگنال کوچک دقیق از ریزش‌بکه که بر اساس استراتژی کنترل افقی که شامل دینامیک اینورتر، شبکه و بار می‌باشد، ارائه شده است. با استفاده از آنالیز مقادیر ویژه نشان داده شد که رفتار و پایداری سیستم بسیار به پارامترهای کنترل‌کننده که شامل m_p, n_q, K_{pu}, K_{ic} حساس هستند که در همین حال با در نظر گرفتن بازه‌های مدنظر از آنالیز مقادیر ویژه آن‌ها، یک تابع هدف ترکیبی از دو تابع هدف با دو جنس متفاوت ارائه شده که با توجه ضرایب وزنی مطرح شده، مقادیر بهینه‌ی آن‌ها توسط ابزار الگوریتم PSO به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر کلیدی تابع هدف ترکیبی بر بهبود رفتار دینامیکی و همچنین تأثیر بهینه‌سازی مقادیر بر خروجی سیستم دارد. روش ارائه شده با توجه به ضرایب وزنی متفاوت در دو وضعیت نسبت X/R خطوط بر روی یک شبکه فشار ضعیف ارائه شده است که با بررسی مقادیر خروجی در حالتی که نسبت X/R کوچکتر از یک باشد مقادیر بصورت مطلوب می‌باشند، اما با افزایش نسبت X/R به مقادیر بزرگتر از یک دیده شده است که مقادیر خروجی نامطلوب بوده و روش افقی موافق کارایی لازم نداشته است. با توجه به پژوهش‌هایی ارائه شده می‌توان از روش‌هایی همچون روش افقی مخالف جهت تنظیم ضرایب در حالت X/R بزرگتر از یک بهره جست. همچنین با بررسی مقادیر ویژه کل سیستم با توجه به مدل کلی سیگنال کوچک، پایداری مطلوب سیستم با ضرایب بهینه نشان داده شده است.

۵-۲ کارهای آینده

۱- بهینه‌سازی ضرایب افقی در ریزش‌بکه‌ها در حالت متصل به شبکه‌ی اصلی

۲- اعمال روش پیشنهادی به ریزش‌بکه‌ی DC

۱- مروری بر الگوریتم PSO^۱ برای حل مسائل بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک روش فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت است. این روش برای اولین بار توسط کندی و ابره‌ارت در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است [۸۰، ۸۱]. الگوریتم PSO رفتار اجتماعی حیوانات را از جمله حشرات، گله‌ها، پرندگان و ماهی‌ها شبیه‌سازی می‌کند. این دسته‌ها از یک راه مشترک برای یافتن غذا پیروی می‌کنند، هر یک از اعضای این گروه با توجه به تجربیات یادگیری خود و سایر اعضای گروه، الگوی جستجو را تغییر می‌دهند.

به‌منظور نشان دادن زمینه تولید و توسعه الگوریتم PSO، در اینجا ابتدا مدل ساده اولیه، یعنی مدل "بوید"^۲ معرفی می‌شود [۸۲]. این مدل برای شبیه‌سازی رفتار پرندگان طراحی شده است و همچنین منبع مستقیمی از الگوریتم PSO است.

ساده‌ترین مدل را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. هر یک از پرندگان با یک نقطه در سیستم مختصات دکارتی نشان داده می‌شوند که به‌طور تصادفی با سرعت و موقعیت اولیه تعیین می‌شوند. سپس برنامه را مطابق با "قانون نزدیک‌ترین همسان‌سازی سرعت در همسایگی" اجرا کنید، به‌طوری‌که سرعت یک پرنده با نزدیک‌ترین همسایه خود برابر باشد. با تکرار به همین ترتیب، همه نقاط سرعت یکسانی خواهند داشت [۸۳].

از آنجا که این مدل بسیار ساده و دور از موارد واقعی است، یک متغیر تصادفی به مورد سرعت اضافه می‌شود. به عبارت دیگر، به هر سرعت یک متغیر تصادفی اضافه می‌شود که باعث می‌شود کل شبیه‌سازی

^۱ Particle Swarm Optimization

^۲ Bird-oid (Boid)

برای نزدیک شدن به مورد واقعی انجام شود. برای شبیه‌سازی رفتار جستجوی گله پرندگان "مدل مزرعه ذرت" در [۸۴] طراحی شده است. در این مدل پرندگان برای یافتن محل غذا، طبق قوانین زیر حرکت کردند.

ابتدا فرض می‌شود که مختصات موقعیت مزرعه ذرت (x_0, y_0) است و مختصات موقعیت و سرعت هر پرنده به ترتیب (x, y) و (v_x, v_y) هستند. فاصله بین موقعیت فعلی و مزرعه ذرت برای اندازه‌گیری عملکرد موقعیت فعلی و سرعت استفاده می‌شود. هرچه فاصله تا "مزرعه ذرت" بیشتر باشد، عملکرد بهتری دارد و برعکس. فرض کنید که هر پرنده توانایی حافظه را دارد و می‌تواند بهترین موقعیتی را که تاکنون رسیده را حفظ کند که به‌عنوان pbest نشان داده می‌شود. a ثابت تنظیم سرعت است، rand یک عدد تصادفی را در بازه [۰، ۱] نشان می‌دهد، تغییر در مورد سرعت را می‌توان طبق قوانین زیر تنظیم کرد [۸۳]:

$$\begin{cases} x > pbest\ x & v_x = v_x - rand \times a \\ otherwise & v_x = v_x + rand \times a \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} y > pbest\ y & v_y = v_y - rand \times a \\ otherwise & v_y = v_y + rand \times a \end{cases} \quad (۲)$$

سپس فرض کنید که پرندگان می‌توانند به طریقی با یکدیگر ارتباط برقرار کند و هر فرد قادر است تاکنون بهترین مکان (به‌عنوان gbest) را شناخته و حفظ کند؛ و b ثابت تنظیم سرعت است. سپس، بعد از اینکه مورد سرعت مطابق با قوانین فوق تنظیم شد، باید طبق قوانین زیر نیز به‌روز شود [۸۳].

$$\begin{cases} x > gbest\ x & v_x = v_x - rand \times b \\ otherwise & v_x = v_x + rand \times b \end{cases} \quad (۳)$$

$$\begin{cases} y > gbest\ y & v_y = v_y - rand \times b \\ otherwise & v_y = v_y + rand \times b \end{cases} \quad (۴)$$

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وقتی a/b نسبتاً بزرگ باشد، همه افراد به سرعت در مزارع ذرت جمع می‌شوند. برعکس، اگر a/b کوچک باشد، ذرات به‌طور ناپایدار و به آرامی در اطراف "ذرت" جمع می‌شوند. از طریق این شبیه‌سازی ساده، می‌توان فهمید که ازدحام می‌تواند به سرعت نقطه بهینه را پیدا کند. کندی و ابره‌ارت [۸۵] با الهام از این مدل، الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی را ابداع کردند، پس از یک آزمایش و خطا، سرانجام الگوریتم اساسی را به شرح زیر اصلاح کردند:

$$v_x = v_x + 2 * rand * (pbestx - x) + 2 * rand * (gbestx - x) \quad (۵)$$

$$x = x + v_x \quad (۶)$$

آن‌ها هر فرد را به‌عنوان ذره‌ای بدون جرم و حجم، فقط با سرعت و موقعیت جمع کردند، بنابراین این الگوریتم را "الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات" نامیدند. بر این اساس، الگوریتم PSO می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود [۸۳]:

الگوریتم PSO نوعی فرایند جستجو بر اساس ازدحام است که در آن هر فرد ذره‌ای نامیده می‌شود که به‌عنوان یک راه‌حل بالقوه از مسئله بهینه‌شده در فضای جستجوی D بعدی تعریف شده است و می‌تواند موقعیت بهینه ازدحام و موقعیت خاص خود و همچنین سرعت را به خاطر بسپارد. در هر نسل، اطلاعات ذرات باهم ترکیب می‌شوند تا سرعت هر بُعد را که برای محاسبه موقعیت جدید ذره استفاده می‌شود، تنظیم کنند. ذرات به‌طور مداوم در فضای جستجوی چندبعدی حالت خود را تغییر می‌دهند تا زمانی که به تعادل یا حالت بهینه یا فراتر از حد محاسبه برسند. ارتباط منحصربه‌فرد در میان ابعاد مختلف فضای مسئله از طریق توابع هدف ایجاد می‌شود. بسیاری از شواهد تجربی نشان داده‌اند که این الگوریتم یک ابزار بهینه‌سازی مؤثر است. فلوچارت الگوریتم PSO در شکل (۳۷) نشان داده شده است [۸۳].

در ادامه توضیحات نسبتاً کاملی از الگوریتم PSO ارائه می‌شود. در سیستم مختصات فضای پیوسته، از نظر ریاضی، PSO را می‌توان توصیف کرد. فرض کنید که اندازه ازدحام N باشد، بردار موقعیت هر ذره در فضای D بعدی $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$ ، بردار سرعت $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ ، موقعیت مطلوب فرد (یعنی موقعیت بهینه‌ای که ذره تجربه کرده است) $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$ ، ازدحام موقعیت مطلوب (یعنی موقعیت بهینه‌ای که هر فرد در این گروه تجربه کرده است) به صورت $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gD})$ نشان داده می‌شود. بدون از دست دادن عمومیت، به عنوان مثال برای مسئله به حداقل رساندن، در نسخه اولیه الگوریتم PSO، فرمول به روزرسانی موقعیت مطلوب فرد عبارت است از [۸۳]:

$$p_{i,t+1}^d = \begin{cases} x_{i,t+1}^d, & \text{if } f(x_{i,t+1}) < f(P_{i,t}) \\ p_{i,t+1}^d & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

موقعیت بهینه ازدحام شامل همه موقعیت‌های بهینه فرد است. فرمول به روزرسانی سرعت و موقعیت به ترتیب به شرح زیر مشخص می‌شود:

$$v_{i,t+1}^d = v_{i,t}^d + c_1 * rand * (p_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + c_2 * rand * (p_{g,t}^d - x_{i,t}^d) \quad (8)$$

$$x_{i,t+1}^d = x_{i,t}^d + v_{i,t+1}^d \quad (9)$$

از آنجا که نسخه اولیه PSO در مسئله بهینه‌سازی چندان مؤثر نبود، بلافاصله پس از پیشنهاد الگوریتم اولیه، الگوریتم اصلاح شده ظاهر شد [۸۴]. در نتیجه وزن اینرسی برای به روزرسانی سرعت معرفی شد و فرمول جدید به روزرسانی سرعت به صورت زیر شد:

$$v_{i,t+1}^d = \omega * v_{i,t}^d + c_1 * rand * (p_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + c_2 * rand * (p_{g,t}^d - x_{i,t}^d) \quad (10)$$

اگرچه این الگوریتم اصلاح شده پیچیدگی تقریباً مشابهی با نسخه اولیه دارد، اما عملکرد الگوریتم را بسیار بهبود بخشیده است. به طور کلی، الگوریتم اصلاح شده الگوریتم متعارف PSO و نسخه اولیه آن الگوریتم

PSO اصلی نامیده می‌شود. با تجزیه و تحلیل رفتار همگرایی الگوریتم PSO، در [۸۶] گونه‌ای از الگوریتم PSO را با ضریب انقباض χ معرفی کردند که همگرایی را تضمین می‌کند و سرعت همگرایی را بهبود می‌بخشد. سپس، فرمول به‌روزرسانی سرعت به‌صورت زیر بیان شده است:

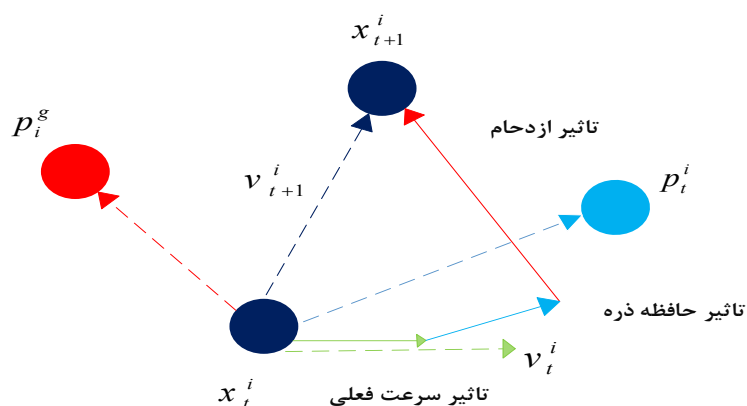
$$v_{i,t+1}^d = \chi(v_{i,t}^d + \phi_1 * rand * (p_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + \phi_2 * rand * (p_{g,t}^d - x_{i,t}^d)) \quad (11)$$

بدیهی است که هیچ تفاوت اساسی بین فرمول‌های تکرار (۱۰) و (۱۱) وجود ندارد. در صورت انتخاب پارامترهای مناسب، دو فرمول یکسان هستند [۸۳].

الگوریتم PSO دو نوع دارد که به ترتیب نوع سراسری و نوع محلی نامیده می‌شوند. در نوع سراسری، دو حالت که ذرات ردیابی می‌کنند، موقعیت بهینه برای خود و موقعیت بهینه برای گروه است. بر این اساس در نوع محلی، جدا از ردیابی pbest موقعیت بهینه خود، ذرات موقعیت بهینه gbest را ردیابی نمی‌کند، در عوض همه موقعیت مطلوب ذرات nbest را در همسایگی توپولوژی خود ردیابی می‌کند. برای نوع محلی، معادله به‌روزرسانی سرعت (۱۰) تبدیل می‌شود:

$$v_{i,t+1}^d = \omega * v_{i,t}^d + c_1 * rand * (p_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + c_2 * rand * (p_{l,t}^d - x_{i,t}^d) \quad (12)$$

که در آن p_l موقعیت بهینه محلی بود. در هر نسل، روش تکرار هر ذره در شکل (۱) ارائه داده شده است. با تجزیه و تحلیل فرمول به‌روزرسانی سرعت از منظر جامعه‌شناسی، می‌توان دریافت که در این فرمول به‌روزرسانی، قسمت اول تأثیر سرعت قبلی ذره است. این بدان معناست که ذره به حالت متحرک فعلی خود اطمینان دارد و حرکت اینرسی را با توجه به سرعت خود انجام می‌دهد، بنابراین پارامتر ω وزن اینرسی نامیده می‌شود. قسمت دوم به فاصله بین موقعیت فعلی ذره و موقعیت مطلوب آن بستگی دارد که مورد "شناختی" نامیده می‌شود. این به معنای تفکر خود ذرات است، یعنی حرکت ذرات ناشی از تجربه خودش [۸۳].



شکل ۱: طرح تکرار یادگیری ذرات [۸۳]

بنابراین، پارامتر C_1 را عامل یادگیری شناختی می‌نامند (عامل شتاب شناختی نیز نامیده می‌شود). بخش سوم به فاصله بین موقعیت فعلی ذره و موقعیت بهینه سراسری (یا محلی) در ازدحام متکی است که عامل "اجتماعی" نامیده می‌شود. این به معنای اشتراک اطلاعات و همکاری بین ذرات است، یعنی حرکت ذرات ناشی از تجربه ذرات دیگر در ازدحام است. این حرکت ذرات خوب را از طریق شناخت شبیه‌سازی می‌کند، بنابراین به پارامتر C_2 فاکتور یادگیری اجتماعی گفته می‌شود (عامل شتاب اجتماعی نیز گفته می‌شود) [۸۳].

از آنجاکه الگوریتم PSO پیشنهاد شده است، به دلیل زمینه بصری، اجرای ساده و آسان و همچنین سازگاری گسترده با انواع مختلف توابع، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در بیست سال گذشته، هر دو تئوری و کاربرد الگوریتم PSO پیشرفت زیادی داشته‌اند. محققان درک اولیه‌ای از این اصل داشته‌اند و کاربرد آن در حوزه‌های مختلف محقق شده است.

PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی و موازی است. مزایای آن را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد: به عملکردهای بهینه‌شده دیفرانسیل، مشتق و مداوم نیاز ندارد. میزان همگرایی آن سریع است؛ و اجرای الگوریتم از طریق برنامه‌نویسی ساده و آسان است. از طرفی الگوریتم PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا

ابتکاری است و تاکنون هیچ مبانی نظریه دقیق وجود ندارد. این فقط از طریق ساده‌سازی و شبیه‌سازی پدیده جستجو در برخی از ازدحامات طراحی شده است، اما نه دلیل مؤثر بودن این الگوریتم را توضیح می‌دهد و نه دامنه کاربردی آن را مشخص می‌کند؛ بنابراین، الگوریتم PSO (شکل ۲) به‌طور کلی برای دسته‌ای از مشکلات بهینه‌سازی که ابعادی بالا هستند و نیازی به دریافت راه‌حل‌های بسیار دقیق ندارند، مناسب است [۸۳].

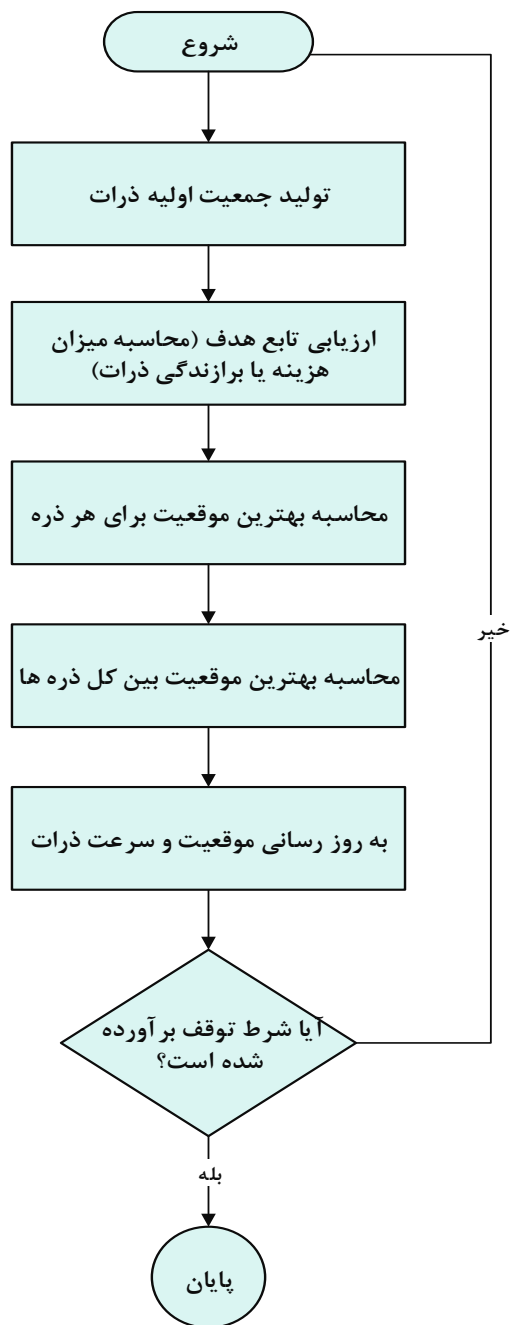
۲- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه مسئله‌ای کاملاً رقابتی است که به‌طور طبیعی در اکثر مشکلات دنیای واقعی پدیدار می‌شود. این مربوط به بهینه‌سازی اهداف متناقض در مشکلات چندهدفه است. مسئله چندهدفه با راه‌حل‌های مبادله‌ای به‌منظور برآوردن همه اهداف عمل می‌کند. طیف گسترده‌ای از الگوریتم‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ایجاد شده است. بهینه‌سازی چندهدفه یک چالش واقعی است که توجه محققان علمی در رشته‌های مختلف به‌ویژه در مهندسی و علوم را به خود جلب می‌کند. برای حل مشکلات چندهدفه (MOP^1) بسیاری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت ارائه شده‌اند. این الگوریتم‌ها در دو مجموعه اصلی گنجانده شده‌اند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکامل و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکامل چندهدفه، استراتژی محاسبات تکاملی را که شبیه‌سازی تکامل‌های بیولوژیکی مانند شبیه‌سازی، جهش، جفت‌گیری و انتخاب است، اتخاذ می‌کنند. با هدف حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، طیف قابل توجهی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی شرح داده شد. درحالی‌که الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش ازدحام چندهدفه از الگوی هوش محاسباتی در تقلید از رفتار

¹ Multi-Objective Optimization

ازدحام با تنظیم موقعیت و سرعت برای هر ذره و همچنین همسایگان آن پیروی می کنند. چندین الگوریتم مبتنی بر هوش در بهینه سازی چندهدفه بررسی شده است.



شکل ۲: فلوچارت الگوریتم PSO [۸۳]

بهینه‌سازی چندهدفه علاقه‌مند به حل مسائلی است که عملکردهای مختلف گوناگونی دارند تا هم‌زمان با همان مجموعه راه‌حل‌ها بهینه شوند. چنین مشکلاتی نه‌تنها به یک راه‌حل منفرد مطلوب بلکه به معاملات بین اهداف مختلف علاقه‌مند هستند. این مشکلات را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۸۶]:

$$Min.or Max. | x \in \Omega \{ F(x) \in \Delta \} \quad (۱۳)$$

جایی که $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ ، Ω و Δ به ترتیب فضاهای حل و هدف هستند و F یک بردار تابع هدف است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

اصل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۱ در شکل (۳۶) و (۳۸) نشان داده شده است. در این الگوریتم t نشانگر شاخص تولید، p_t جمعیت و در بایگانی در نسل t است. ابتدا، جمعیت p_t مقداردهی اولیه می‌شود که شامل ذرات اولیه، موقعیت‌های آن‌ها x_t^i و سرعت اولیه آن‌ها v_t است. در مرحله بعدی پس از ارزیابی p_t جمعیت، بایگانی اولیه A_t با راه‌حل‌های غیر غالب در p_t تولید می‌شود. تابع $Findlb(A_{t+1}, x_t^i)$ بهترین راهنمای محلی $p_t^{i,g}$ ، g را از مجموعه غیر غالب ذخیره‌شده در بایگانی A_t برای هر ذره i می‌یابد. نحوه انتخاب راهنمای محلی از بایگانی تأثیر بسزایی در همگرایی و تنوع راه‌حل دارد که در آن روش‌های مختلفی توسط محققان معرفی شده است [۸۷]–[۸۹]. پرواز مهم‌ترین مرحله در روش‌های MOPSO است. در این مرحله سرعت و موقعیت هر ذره i به‌صورت زیر به‌روز می‌شود:

$$v_{j,t+1}^i = wv_{j,t}^i + c_1 * rand_1 * (p_{j,t}^i - x_{j,t}^i) + c_2 * rand_2 * (p_{j,t}^{i,g} - x_{j,t}^i) \quad (۱۴)$$

$$x_{j,t+1}^i = x_{j,t}^i + v_{j,t+1}^i \quad (۱۵)$$

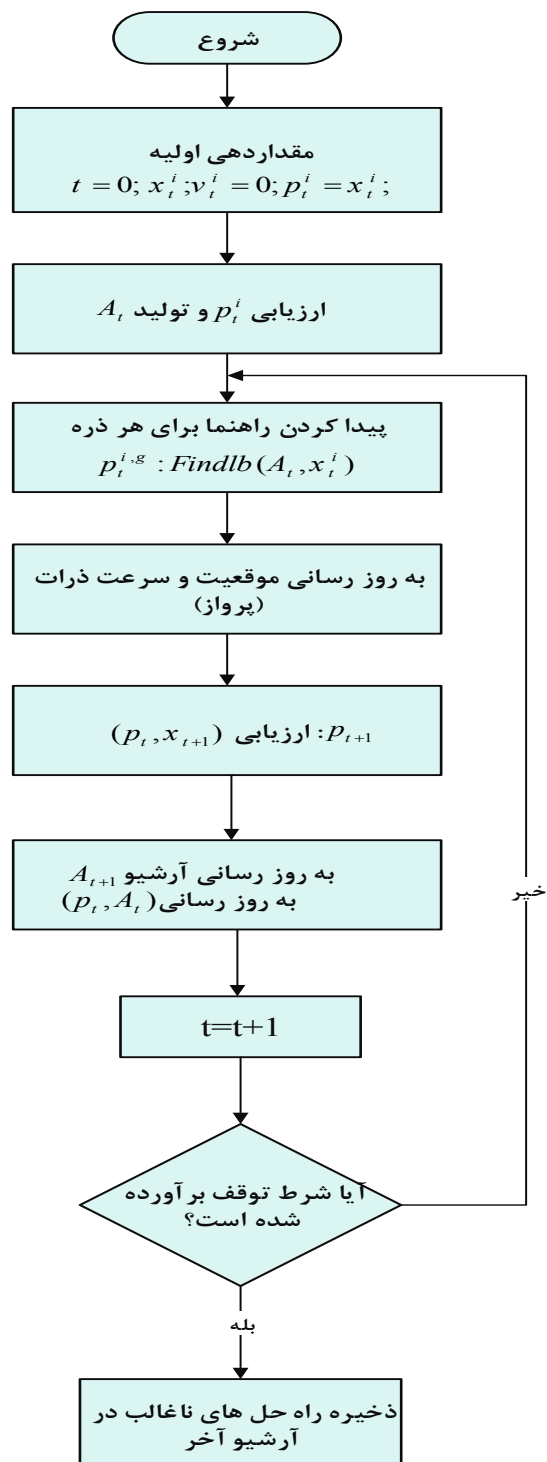
^۱ Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

جایی که $j = 1, \dots, n$ ، وزن اینرسی ذره است، c_1, c_2 ثابت مثبت هستند و $rand_1, rand_2$ مقادیر تصادفی در محدوده $[0, 1]$ است [۹۰].

طبق (۱۴) و (۱۵)، هر ذره باید موقعیت x_t^i خود را نسبت به موقعیت یک راهنمای محلی $p_t^{i,g}$ و بهترین موقعیت شخصی خود که در p_t ذخیره شده است، تغییر دهد. ذرات موجود در p_t جمعیت با استفاده از عملکرد ارزیابی می‌شوند. در این معادله، p^i برای حافظه ذره i مانند یک حافظه است و با مقایسه موقعیت جدید x_{t+1}^i در فضای هدف با p_t^i ، جایی که p_t^i آخرین نامحدود نیست، موقعیت غالب نشده (بهترین) ذره را حفظ می‌کند. موقعیت ذره i ، در پایان مرحله پرواز، یک مقدار تصادفی معروف به عامل تلاطم R_T به موقعیت فعلی هر ذره اضافه می‌شود تا تغییرات ناگهانی در جمعیت به شرح زیر انجام شود [۹۰]:

$$x_{j,t+1}^i = x_{j,t}^i + R_T x_{j,t+1}^i \quad (۱۶)$$

که در آن $R_T \in [0, 1]$ یک مقدار تصادفی است که به احتمال زیاد به موقعیت به‌روز شده هر ذره اضافه می‌شود. تابع $update(A_t, p_t)$ بایگانی را به‌روز می‌کند و راه‌حل‌های غیر غالب را در میان p_t و A_t در بایگانی ذخیره می‌کند. تابع $update$ مقایسه می‌کند که آیا اعضای جمعیت فعلی p_t غیر غالب نیستند، با توجه به اعضای بایگانی A_t . به‌منظور حفظ بایگانی بدون تسلط، در حین اجرای عملکرد به‌روزرسانی، راه‌حل‌های غالب باید حذف شوند [۹۱]. الگوریتم MOPSO به‌صورت تکراری تکرار می‌شود تا زمانی که شرط خاتمه را برآورده کنید. خروجی روش MOPSO مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیر غالب (پارتو بهینه) است که در بایگانی نهایی ذخیره می‌شود.



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم MOPSO [۹۰]

- [1] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sep. 2004.
- [2] C. Wang, X. Yang, Z. Wu, Y. Che, L. Guo, S. Zhang, et al., "A highly integrated and reconfigurable microgrid testbed with hybrid distributed energy sources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 451-459, Jan. 2014.
- [3] H. Minxiao, S. Xiaoling, L. Shaobo, and Z. Zhengkui, "Transient analysis and control for microgrid stability controller," *IEEE Grenoble Conference*, 2013, pp. 1-6.
- [4] C. Rubbia, "Today the world of tomorrow? The energy challenge," *Energy Convers. Manage.*, vol. 47, no. 17, pp. 2695-2697, Oct. 2006.
- [5] N. Hatziargyriou, Microgrids: architectures and control: *John Wiley & Sons*, 2014.
- [6] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, et al., "White paper on integration of distributed energy resources. the certs microgrid concept, consortium for electric reliability technology solutions (certs)," *LBNL-50829. Certs*, Apr. 2002.
- [7] Y. Mohamed, "New control algorithms for the distributed generation interface in grid-connected and micro-grid systems," 2008.
- [8] T. Caldognetto and P. Tenti, "Microgrids Operation Based on Master-Slave Cooperative Control," *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 1081-1088, Dec. 2014.
- [9] J. Yang, W. Yuan, Y. Sun, H. Han, X. Hou, and J. M. Guerrero, "A novel quasi-master-slave control frame for PV-storage independent microgrid," *Int J Electr Power Energ Syst*, vol. 97, pp. 262-274, Apr. 2018.
- [10] A. M. Roslan, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Improved instantaneous average current-sharing control scheme for parallel-connected inverter considering line impedance impact in microgrid networks," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 26, no. 3, pp. 702-716, Dec. 2010.
- [11] U. B. Tayab, M. A. B. Roslan, L. J. Hwai, and M. Kashif, "A review of droop control techniques for microgrid," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 76, pp. 717-727, Sep. 2017.
- [12] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, and L. Vandevelde, "A control strategy for islanded microgrids with dc-link voltage control," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 703-713, Jun. 2011.
- [13] M. S. Mahmoud and M. Fouad, Control and optimization of distributed generation systems: *Springer*, May. 2015.
- [14] A. Abraham and S. Das, Computational intelligence in power engineering vol. 302: *Springer*, 2010.

- [15] L. I. Minchala-Avila, L. E. Garza-Castañón, A. Vargas-Martínez, and Y. Zhang, "A review of optimal control techniques applied to the energy management and control of microgrids," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, pp. 780-787, Jan. 2015.
- [16] A. M. Abdel-Hamed, A. E.-E. K. Ellissy, A. S. El-Wakeel, and A. Y. Abdelaziz, "Optimized Control Scheme for Frequency/ Power Regulation of Microgrid for Fault Tolerant Operation," *Electr. Pow. Compo. and Sys.*, vol. 44, pp. 1429-1440, Aug. 2016.
- [17] W. A. B. Al-Saedi, "Optimal Control of Power Quality in Microgrids Using Particle Swarm Optimisation," 2013.
- [18] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications," 2010.
- [19] M. Hassan and M. Abido, "Optimal design of microgrids in autonomous and grid-connected modes using particle swarm optimization," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 26, no. 3, pp. 755-769, Dec. 2010.
- [20] N. Vazquez, S. S. Yu, T. K. Chau, T. Fernando, and H. H.-C. Iu, "A fully decentralized adaptive droop optimization strategy for power loss minimization in microgrids with PV-BESS," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 1, pp. 385-395, Oct. 2018.
- [21] V. N. Kumar and S. K. Parida, "Parameter Optimization of Universal Droop and Internal Model Controller for Multi Inverter-Fed DGs Based on Accurate Small-Signal Model," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101928-101940, Jul. 2019.
- [22] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 673-681, May. 2005.
- [23] I. U. Nutkani, P. C. Loh, P. Wang, and F. Blaabjerg, "Linear decentralized power sharing schemes for economic operation of ac microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 225-234, Jan. 2016.
- [24] F. Chen, M. Chen, Q. Li, K. Meng, Y. Zheng, J. M. Guerrero, and D. Abbott, "Cost-based droop schemes for economic dispatch in islanded microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 63-74, Jan. 2017.
- [25] A. Elrayyah, F. Cingoz, and Y. Sozer, "Construction of nonlinear droop relations to optimize islanded microgrid operation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3404-3413, Jan. 2015.
- [26] Z. Shuai, Y. Sun, Z. J. Shen, W. Tian, C. Tu, Y. Li, et al., "Microgrid stability: Classification and a review," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 58, pp. 167-179, May. 2016.
- [27] M. J. Gibbard, D. J. Vowles, and P. Pourbeik, Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems: University of Adelaide press, 2015.

- [28] M. Hassan and M. Abido, "Dynamic performance improvement of an inverter-based grid-connected microgrid," *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2013, pp. 522-527.
- [29] A. Arzani, P. Arunagirinathan, and G. K. Venayagamoorthy, "Development of optimal PI controllers for a grid-Tied photovoltaic inverter," *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, 2015, pp. 1272-1279.
- [30] E.-C. Chang, Z. Su, Z. Xu, and R.-C. Wu, "Particle swarm optimization tuned fuzzy terminal sliding mode control for UPS inverters," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2483-2488, Jan. 2015.
- [31] P. García-Triviño, A. J. Gil-Mena, F. Llorens-Iborra, C. A. García-Vázquez, L. M. Fernández-Ramírez, and F. Jurado, "Power control based on particle swarm optimization of grid-connected inverter for hybrid renewable energy system," *Energy Convers. Manage.*, vol. 91, pp. 83-92, Feb. 2015.
- [32] Y. Ma, P. Yang, Z. Zhao, and Y. Wang, "Optimal economic operation of islanded microgrid by using a modified pso algorithm," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, Jan. 2015.
- [33] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [34] Z. X. Xiao, C. S. Wang, and S. X. Wang, "Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources," *Autom. Elect. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 81-85, Mar. 2009.
- [35] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, "Small-signal dynamic model of a microgrid including conventional and electronically interfaced distributed resources," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 369-378, May 2007.
- [36] M. A. Hassan and M. A. Abido, "Optimal design of microgrids in autonomous and grid-connected modes using particle swarm optimization," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 755-769, Mar. 2011.
- [37] I.-Y. Chung, W. Liu, D. A. Cartes, E. G. Collins, Jr., and S.-I. Moon, "Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1078-1088, May. 2010.
- [38] Y. A.-R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2806-2816, Nov. 2008.
- [39] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy management in autonomous microgrid using stability constrained droop control of inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2346-2352, Sep. 2008.

- [40] T. Dragicevic, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and D. Skrlec, "Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 695–706, Feb. 2014.
- [41] S. Augustine, M. K. Mishra, and N. Lakshminarasamma, "Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 132–141, Jan. 2015.
- [42] L. Meng, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Tertiary and secondary control levels for efficiency optimization and system damping in droop controlled DC-DC converters," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2615–2626, Nov. 2015.
- [43] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z.-M. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 576–588, Feb. 2011.
- [44] L. Che and M. Shahidehpour, "DC microgrids: Economic operation and enhancement of resilience by hierarchical control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2517–2526, Aug. 2014.
- [45] M. Srinivasan and A. Kwasinski, "Autonomous hierarchical control of dc microgrids with constant-power loads," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 2808–2815.
- [46] M. Ramezani and S. Li, "Voltage and frequency control of islanded microgrid based on combined direct current vector control and droop control," *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1–5.
- [47] M. S. Golsorkhi, D. Lu, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "A GPS-based control method for load sharing and power quality improvement in microgrids," *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 3734–3740.
- [48] S. Peyghami, H. Mokhtari, and F. Blaabjerg, "Decentralized load sharing in a low-voltage direct current microgrid with an adaptive droop approach based on a superimposed frequency," *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 3, pp. 1205–1215, Feb. 2017.
- [49] Y. Sun, G. Shi, X. Li, W. Yuan, M. Su, H. Han, et al., "An fP/Q droop control in cascaded-type microgrid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1136–1138, Sep. 2017.
- [50] A. M. Bouzid, M. S. Golsorkhi, P. Sicard, and A. Chériti, "H ∞ structured design of a cascaded voltage/current controller for electronically interfaced distributed energy resources," *Tenth international conference on ecological vehicles and renewable energies (EVER)*, 2015, pp. 1–6.

- [51] F. de Bosio, M. Pastorelli, L. d. S. Ribeiro, M. Lima, F. Freijedo, and J. M. Guerrero, "Current control loop design and analysis based on resonant regulators for microgrid applications," *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 005322-005327.
- [52] F. De Bosio, L. A. de Souza Ribeiro, F. D. Freijedo, M. Pastorelli, and J. M. Guerrero, "Effect of state feedback coupling and system delays on the transient performance of stand-alone VSI with LC output filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 4909-4918, Apr. 2016.
- [53] F. De Bosio, L. A. de Souza Ribeiro, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Control design of VSIs to enhance transient performance in microgrids," *18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, 2016, pp. 1-8.
- [54] A. J. Kulkarni and K. Tai, "A probability collectives approach for multi-agent distributed and cooperative optimization with tolerance for agent failure," in *Agent-Based Optimization*, ed: Springer, 2013, pp. 175-201.
- [55] A. J. Kulkarni, G. Krishnasamy, and A. Abraham, Cohort intelligence: a socio-inspired optimization method: Springer, 2017.
- [56] Y. Eren, İ. B. Küçükdemiral, and İ. Üstüoğlu, "Introduction to optimization," in *Optimization in Renewable Energy Systems*, ed: Elsevier, 2017, pp. 27-74.
- [57] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*: MIT press, 1992.
- [58] M. Ünal, A. Ak, V. Topuz, and H. Erdal, *Optimization of PID controllers using ant colony and genetic algorithms* vol. 449: Springer, 2012.
- [59] K. De Jong, "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," Ph.D dissertation, Univ. Michigan, 1975.
- [60] S. Mirjalili, "Evolutionary algorithms and neural networks," *Studies in Computational Intelligence*, 2019.
- [61] M. Čepin, "Genetic algorithm," *Assessment of power system reliability*, ed: Springer, 2011, pp. 257-269.
- [62] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [63] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in ac distribution systems using the generalized state-space averaging method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct. 2004.
- [64] D. P. Ariyasinghe and D. M. Vilathgamuwa, "Stability analysis of microgrids with constant power loads," *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 2008, pp. 279-284.

- [65] K. Yu, Q. Ai, S. Wang, J. Ni, and T. Lv, "Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 695-705, Nov. 2015.
- [66] S. Haider, G. Li, and K. Wang, "A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, no. 1, p. 10, Dec. 2018.
- [67] H. J. Avelar, W. A. Parreira, J. B. Vieira, L. C. G. de Freitas, and E. A. A. Coelho, "A state equation model of a single-phase grid-connected inverter using a droop control scheme with extra phase shift control action," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 3, pp. 1527-1537, Aug. 2011.
- [68] M. Rasheduzzaman, J. A. Mueller, and J. W. Kimball, "An accurate small-signal model of inverter-dominated islanded microgrids using dq reference frame," *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 1070-1080, Jul. 2014.
- [69] I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang, U. Supatti, and F. Z. Peng, "Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 147-157, Jan. 2010.
- [70] K. Yu, Q. Ai, S. Wang, J. Ni and T. Lv, "Analysis and Optimization of Droop Controller for Microgrid System Based on Small-Signal Dynamic Model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 695-705, Mar. 2016.

[۷۱] هاران، ندیمی. "کنترل ولتاژ مبنی بر مشخصه افتی در شبکه‌های کوچک مستقل"، پایان نامه کارشناسی ارشد،

دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۳۹۵.

- [72] W. Cao, Y. Ma, L. Yang, F. Wang, and L. M. Tolbert, "D-Q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 6017-6028, Jul. 2017.
- [73] T. Chen, P. Zhang, L. Luo, and L. Pan, "LCL-filter Optimization Design Considering Stability of Grid-Connected Inverters in Microgrid," 2018.
- [74] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in ac distribution systems using the generalized state-space averaging method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct. 2004.
- [75] W. Al-Saedi, S. W. Lachowicz, D. Habibi, and O. Bass, "Voltage and frequency regulation based DG unit in an autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 742-751, 2013.
- [76] J. Radosavljević, M. Jevtić, and D. Klimenta, "Energy and operation management of a microgrid using particle swarm optimization," *Engineering Optimization*, vol. 48, no. 5, pp. 811-830, May 2016.
- [77] A. Vinayagam, "Power quality analysis and automatic intelligent control strategy for solar PV microgrid," PhD thesis, School of Engineering, Deakin University, 2017.

- [78] X. Hou, Y. Sun, W. Yuan, H. Han, C. Zhong, and J. M. Guerrero, "Conventional P- ω /QV droop control in highly resistive line of low-voltage converter-based AC microgrid," *Energies*, vol. 9, no. 11, p. 943, Nov. 2016.
- [79] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, and M. Datta, "Analyzing the Effect of X/R ratio on Dynamic Performance of Microgrids," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 2019, pp. 1-5.
- [80] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 39-43.
- [81] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942-1948.
- [82] C. W. Reynolds, "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model," *14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1987, pp. 25-34.
- [83] D. Wang, D. Tan, and L. Liu, "Particle swarm optimization algorithm: an overview," *Soft Computing*, vol. 22, no. 2, pp. 387-408, Jan. 2018.
- [84] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, Aug. 2002.
- [85] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," *IEEE international conference on evolutionary computation proceedings*. 1998, pp. 69-73.
- [86] S. Sedarous, S. M. El-Gokhy, and E. Sallam, "Multi-swarm multi-objective optimization based on a hybrid strategy," *Alex. Eng. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 1619-1629, Sep. 2018.
- [87] J. E. Fieldsend and S. Singh, "A multi-objective algorithm based upon particle swarm optimisation, an efficient data structure and turbulence," 2002.
- [88] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Particle swarm optimization method in multiobjective problems," *ACM symposium on Applied computing*, 2002, pp. 603-607.
- [89] C. C. Coello and M. S. Lechuga, "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization," *Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600)*, 2002, pp. 1051-1056.
- [90] S. Mollazei, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour and K. Y. Lee, "Multi-objective Optimization of Power System Performance with TCSC Using the MOPSO Algorithm," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, 2007, pp. 1-8.
- [91] S. Mostaghim and J. teach, "The role of α -dominance in multi objective particle swarm optimization methods," *IEEE Evolutionary Computation (CEC, 2003)*, Canberra, Australia, Vol. 3, pp. 1764-1771.

Abstract

Today, with the growth of population, the need for energy is more necessary than before, therefore, due to the reduction and harm of non-renewable energy sources, the use of new and renewable energy has been considered by communities. Proper analysis and control of these resources is very important for further utilization of new energies to supply energy to consumers.

In this study, the focus is on optimizing the droop characteristic to improve the dynamic behavior of an independent microgrid. In this regard, a system consisting of two distributed generation sources are connected to common loads through inverter, filter, coupling inductance and line impedance. The microgrid design is performed based on the droop characteristic. Then, to study the behavior of the microgrid, based on the differential equations in the state space, at first the small signal model of all network components is determined separately and then by combining the equations, state space model of whole system is determined. A general matrix of the system is presented to investigate the system eigenvalues to droop coefficients and the proportional and integral coefficients of voltage and current controllers. By determining the effective parameters, to optimize the system behavior, an optimization method to optimize the values of droop characteristic coefficients and effective proportional integral coefficients of voltage and current controllers based on a combined objective function consisting of two objective functions of two different type is presented. by different weighting coefficients, the results are examined and the behavior of the system will be evaluated according to the optimized coefficients. The optimization tool used for the optimization operation is a particle swarm algorithm (PSO). Evaluate the results to see the performance of the proposed model in MATLAB Simulink software.

Keywords: Small Signal Stability, Islanded Microgrid, Droop Control, Droop Control Optimization.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Robotics

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Considering Droop Characteristic Optimization for Microgrid Dynamic Performance Improvement

By:

Mahdi Nikkhah

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Advisor:

Dr. Ali Akbarzadeh

Sep 2020