

بهبود پایداری دینامیکی ریز شبکه‌های DC با استفاده از سیستم کنترل غیر متمرکز منابع ترکیبی

عاطفه گودرزی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهدی سرادارزاده^۲، استادیار؛ محسن حمزه^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران- a.goodarzi@jsu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران- saradar@jsu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران- mohsenhamzeh@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک راهبرد کنترلی غیرمتمرکز که مبتنی بر جداسازی کنترلی-دینامیکی واحدهای تولید انرژی می‌باشد، به منظور بهره‌برداری پایدار و بهبود رفتار دینامیکی ریز شبکه dc ارائه می‌گردد. با اعمال راهبرد کنترلی پیشنهادی، واحدهای سلول سوختی (FC) و ابرخازن (SC) که در قالب یک منبع تولید پراکنده ترکیبی قرار دارند، به طور هم‌زمان کنترل می‌شوند؛ درحالی‌که، این واحدها کنترل‌کننده‌های مستقل و در پی آن عمل کرد دینامیکی مستقلی دارند. هم‌چنین، در این راهبرد کنترلی، جهت حفظ اصول عمل کرد واحد SC یک بلوک تنظیم‌کننده حالت شارژ (SOC) نیز به کار گرفته می‌شود. در نتیجه، جداسازی دینامیکی واحدهای انرژی رفتار دینامیکی کل ریز شبکه dc را تحت تأثیر قرار داده و فاکتور میرایی سیستم را بهبود می‌بخشد. این مطلب با استفاده از روش تحلیل مکان‌هندسی مقادیر ویژه سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هم‌چنین مطالعات شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار PSCAD/IEMTDC عمل کرد مناسب طرح پیشنهادی را تأیید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: ریز شبکه dc، جداسازی دینامیکی، میرایی نوسانات فرکانس پایین، کنترل droop، حالت شارژ ابرخازن (SC SOC).

The Improvement of Dynamic Stability of DC Microgrids Using Decentralized Control System of Hybrid DG

Atefeh Goodarzi¹, MSc student; Mehdi Saradarzadeh², Assistant Professor; Mohsen Hamzeh³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: a.goodarzi@jsu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: saradar@jsu.ac.ir

3- School of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mohsenhamzeh@ut.ac.ir

Abstract: In this paper, a decentralized control strategy based on the separation of the energy generation control unit is presented, which leads to stable operation and improve the DC micro-grid (MG) dynamic behavior. By applying the proposed control strategy, the fuel cell (FC) and supercapacitor (SC) units, which form a hybrid distributed generation (DG) source, are simultaneously controlled with independent controllers suggesting independent dynamic control performance. Moreover, in this control strategy, the SC unit, is supplied with a state-of-charge (SOC) regulator block to keep its proper performance. Accordingly, the dynamic separation of energy units affects the dynamic behavior of the overall DCMG and improves the system damping factor. By using the location analysis method of system eigenvalues, the proposed control strategy performance is evaluated. Also, the simulation studies in the PSCAD/IEMTDC software environment confirm the feasibility and proper performance of the proposed scheme.

Keywords: DC microgrid, dynamic separation, low frequency oscillations, droop control, supercapacitor (SC) state of charge (SOC).

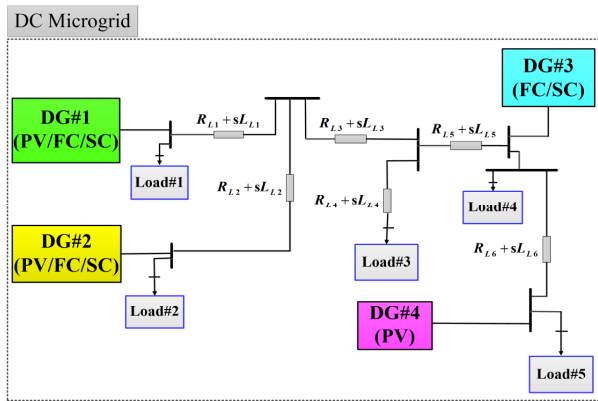
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

نام نویسنده مسئول: مهدی سرادارزاده

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.



شکل ۱: طرح نموداری ریزشبه dc مورد بررسی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بهره‌برداری گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر به شکل تولیدپراکنده^۱ (DG)، توجه بیشتری یافته‌است [۱]. از آنجایی که یک پارچه‌سازی این منابع تجدیدپذیر با شبکه‌های توزیع ممکن است مشکلات بسیاری را در زمینه بهره‌برداری، کنترل و حفاظت در پی داشته‌باشد، مفهوم ریزشبه به‌عنوان یک راه‌حل مناسب و گزینه قابل دوام ارائه می‌شود [۲-۴]. ریزشبه‌ها شامل انواع مختلف واحدهای DG، بارهای ac و یا dc می‌باشند و این قابلیت را دارند که در دو مد متصل به شبکه و مستقل (سیستم جزیره‌ای) عمل کنند [۵، ۶]. با توجه به ماهیت dc اکثر منابع انرژی تجدیدپذیر همراه با ظهور بارهای الکترونیکی مدرن، ریزشبه‌های dc برای جلوگیری از تبدیلات اضافی dc-ac-dc اهمیت بسیاری یافته‌اند [۷-۱۰]. این ریزشبه‌ها می‌توانند جهت تضمین قابلیت اطمینان و پاسخ به تقاضای توان بارها، به‌صورت متصل به زیرساخت‌های ac موجود از طریق رابط مبدل dc-ac [۱۱] و یا متصل به هم [۱۲] قرار گیرند.

در ریزشبه dc، ولتاژ dc باید در یک محدوده تغییر قابل قبول حفظ شود؛ چراکه، یک ولتاژ غیر عادی می‌تواند عمل کرد کل سیستم را مختل نماید. علاوه بر این، توان تقاضاشده بارها باید به‌خوبی میان منابع تولید انرژی تقسیم گردد. از این‌رو، عمل کرد ریزشبه dc، به‌خصوص در مد جزیره‌ای، باید کنترل شود. به‌منظور بهره‌برداری پایدار از ریزشبه dc راهبردهای کنترلی مؤثر و متعددی ارائه شده‌است که از این دست می‌توان به روش‌های کنترل افتی و انواع آن اشاره کرد [۱۳-۲۰]. کنترل افتی، یک روش کنترل غیرمتمرکز است که برای هر واحد DG به‌صورت جداگانه اعمال می‌گردد. بنابراین، بدون نیاز به ارتباط فیزیکی میان واحدهای DG می‌توان این واحدها را هماهنگ نمود. برخی از مراجع ارائه‌شده به بررسی ریزشبه dc تک‌شینه می‌پردازند [۱۵-۱۳] و [۲۰-۱۹]. اما، انتخاب نوع پیکربندی ریزشبه dc برای برنامه‌های کاربردی، ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های ذاتی یک ریزشبه dc تک‌شینه، استفاده از تکنیک‌های کنترلی گوناگون را با محدودیت همراه می‌سازد. علاوه بر این، معمولاً واحدهای DG به‌صورت منابع ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند [۱۸-۱۶] و [۲۰]؛ در حالی که استفاده از واحدهای تولید انرژی به فرم ترکیبی^۲ همراه با کنترل‌کننده‌های جداگانه‌ای که می‌توانند به طور هم‌زمان عمل نمایند، امکان بهره‌برداری یک‌جا از ویژگی‌های مؤثر این واحدها را فراهم می‌نماید.

هدف اصلی کنترل افتی تقسیم توان/جریان میان واحدهای DG می‌باشد؛ در حالی که، ممکن است به نوسانات فرکانس پایینی در توان/جریان ریزشبه dc منجر گردد [۲۱]. برای میرایی نوسانات فرکانس پایین توان/جریان ناشی از واحد تقسیم جریان در ریزشبه dc کنترل‌شده به‌صورت افتی، دو دسته روش میرایی تحت عنوان‌های میرایی پس‌پیو^۳ و میرایی اکتیو^۴ ارائه شده‌است. به‌طور معمول، می‌توان از روش افزایش امپدانس خط که به‌عنوان یک روش میرایی پس‌پیو دیده

می‌شود، استفاده کرد [۱۶]، [۲۱] و [۲۲]. اما، این راه‌کار همیشگی نیست. زیرا امپدانس خط بر عمل کرد کنترل افتی و در نتیجه، مدیریت توان سیستم تأثیرگذار است. هم‌چنین، با افزایش امپدانس خط، تلفات کل سیستم افزایش یافته و بازده کاهش می‌یابد.

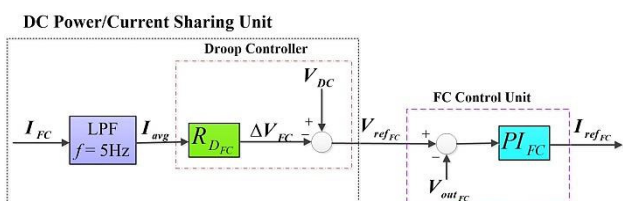
به‌منظور حل مشکل فوق، مطابق با روش میرایی اکتیو گزارش‌شده در [۲۱]، استفاده از یک حلقه امپدانس اندوکتیو مجازی که متشکل از یک مقاومت و یک اندوکتانس مجازی است، گزینه مناسبی به‌نظر می‌رسد که به‌واسطه آن مدیریت توان نیز به‌خوبی انجام می‌گیرد. در مقاله مذکور، ترکیبی موازی از یک سلول سوختی (FC^۵)، یک ابرخازن (SC^۶) و یک سیستم خورشیدی (PV^۷) به‌عنوان سیستم توان ترکیبی استفاده می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که برای هر واحد FC به جهت جبران‌سازی پاسخ کند دینامیکی آن، یک واحد SC قرار داده می‌شود. اما، در رابطه با حالت شارژ-دشارژ (SOC^۸) واحد SC بحث نشده‌است. از طرفی، کنترل‌کننده طراحی‌شده جریان خروجی سیستم ترکیبی را کنترل می‌نماید و در واقع کنترل‌کننده واحدهای FC و SC از نقطه‌نظر دینامیکی مستقل از هم نیستند.

در این مقاله، با هدف بهره‌برداری پایدار و بهبود رفتار دینامیکی ریزشبه dc، یک راه‌برد کنترلی غیرمتمرکز، مبتنی بر جداسازی کنترلی-دینامیکی واحدهای تولید انرژی، ارائه می‌گردد. با به‌کارگیری طرح کنترلی پیشنهادی، واحدهای FC و SC که در قالب یک DG ترکیبی قرار دارند، به‌طور هم‌زمان و جداگانه کنترل می‌شوند. به‌عبارت دیگر، این واحدها کنترل‌کننده‌های مستقل و در پی آن عملکرد کنترلی-دینامیکی مستقلی دارند. علاوه بر این، برای واحد SC یک حلقه تنظیم‌کننده حالت شارژ (SOC) نیز در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو، واحدهای FC و SC به حالت ایده‌آل خود نزدیک‌تر می‌باشند. بدین ترتیب، رفتار دینامیکی کل ریزشبه dc تحت تأثیر قرار گرفته و فاکتور میرایی سیستم بهبود می‌یابد.

مقاله پیش‌رو شامل شش بخش می‌باشد. بخش دوم مقاله به توصیف ریزشبه dc می‌پردازد. در بخش سوم، راه‌برد کنترلی پیشنهادی ارائه می‌گردد. نحوه استخراج مدار معادل سیستم و آنالیز پایداری ریزشبه dc با به‌کارگیری طرح کنترلی پیشنهادی در بخش چهارم مورد بحث

جدول ۱: پارامترهای ریزشبه dc

مقدار	پارامتر	پارامتر
۴۸ V	ولتاژ ریزشبه dc	V_{DC}
۲, ۰/۶, ۲ kW	توان DG_1	$P_{FC1}, P_{PV1}, P_{SC1}$
۱, ۰/۸, ۱ kW	توان DG_2	$P_{FC2}, P_{PV2}, P_{SC2}$
۰/۵, ۰/۵ kW	توان DG_3	P_{FC3}, P_{SC3}
۰/۸ kW	توان DG_4	P_{PV4}
۷۰-۱۵۰ V	ولتاژ MPPT	V_{PV}
۸۰ V	ولتاژ FC	V_{FC}
۵۵-۶۵ V	ولتاژ SC	V_{SC}
۲۰ kHz	فرکانس کلیدزنی	f_{sw}
$۲/۵$ mH, $۰/۰۱$ Ω , μ ۵۰F	پارامترهای مبدل SC	L_{SC}, R_{SC}, C_{SC}
$۲/۵$ mH, $۰/۰۱$ Ω , μ ۵۰F	پارامترهای مبدل FC	L_{FC}, R_{FC}, C_{FC}
$۷/۵$ mH, μ ۵۰۰F	پارامترهای مبدل POL	L_{POL}, C_{POL}
پارامترهای خط		
$۵, ۱۵, ۱$ (m Ω)	مقاومت‌های خط	R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}
$۱, ۲, ۱$ (m Ω)	مقاومت‌های خط	R_{L4}, R_{L5}, R_{L6}
$۱, ۳, ۰/۴$ (H)	اندوکتانس‌های خط	L_{L1}, L_{L2}, L_{L3}
$۰/۲, ۰/۴, ۰/۴$ (H)	اندوکتانس‌های خط	L_{L4}, L_{L5}, L_{L6}



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل واحد FC

توجه گردد که فیلتر پایین‌گذری که در مسیر جریان خروجی قرار دارد، برای ازبین‌بردن ریبیل جریان خروجی و افزایش کیفیت توان استفاده شده‌است. معادله افتی معمولی به بیان ریاضی مطابق ۱ تعریف می‌شود:

$$V_{ref_i} = V_{DC} - R_{D_{FC}} \cdot I_{oi} \quad (1)$$

که V_{ref_i} مقدار مرجع ولتاژ dc برای خروجی مبدل FC شماره i است، V_{DC} مقدار نامی ولتاژ dc، $R_{D_{FC}}$ امپدانس مجازی و I_{oi} جریان خروجی مبدل است. مقدار امپدانس مجازی را می‌توان براساس حداکثر تغییرات مجاز ولتاژ درحالتی که مبدل FC بیش‌ترین توان خود (P_{FC}) را انتقال می‌دهد، تعیین نمود. در این مقاله، حداکثر تغییرات مجاز ولتاژ برابر با ۵% مقدار نامی ولتاژ dc در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، $R_{D_{FC}}$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_{D_{FC}} = \frac{(۰/۰۵) V_{DC}^2}{P_{FC}} \quad (2)$$

قرار می‌گیرد. بخش پنجم به ارائه نتایج شبیه‌سازی اختصاص داده شده‌است و بخش ششم، نتیجه‌گیری حاصل از این مقاله می‌باشد.

۲- توصیف ریزشبه dc مورد مطالعه

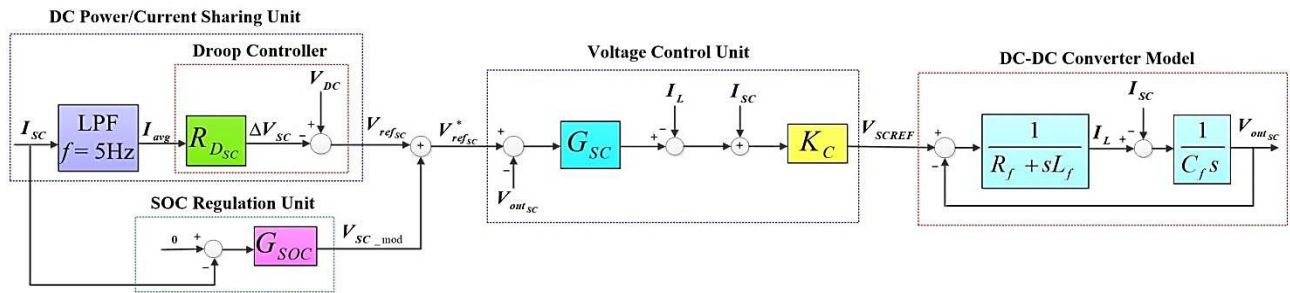
ریزشبه مورد بررسی در این مقاله، یک ریزشبه dc چندشینه با ولتاژ نامی ۴۸ ولت می‌باشد که طرح نموداری آن در شکل ۱ نشان داده شده‌است. این ریزشبه dc شامل چهار واحد DG و پنج عدد بار امپدانس ثابت است. واحدهای DG_1 و DG_2 به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده و شامل ترکیبی موازی از سه واحد انرژی FC، SC و PV می‌باشند. همچنین، DG_3 متشکل از یک واحد FC موازی با یک واحد SC بوده و DG_4 تنها یک واحد PV است. توجه شود که واحدهای FC و PV به عنوان منابع اصلی تأمین توان و نیز، واحدهای SC به عنوان ذخیره‌ساز انرژی جهت پاسخ‌گویی به تقاضاهای گذرای بار، مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، لازم به ذکر است که به دلیل عمل کرد واحدهای FC و SC در سطوح ولتاژی متفاوت، این واحدها به ترتیب، از طریق مبدل‌های باک dc- dc یک طرفه و دوطرفه به باس dc ریزشبه متصل می‌گردند. ضمن در نظر گرفتن دینامیک واحدهای انرژی، هر DG ترکیبی به صورت یک منبع ولتاژ ایده‌آل سری با امپدانس خروجی مربوطه مدل می‌گردد که نحوه استخراج این مدار معادل حلقه بسته در بخش ۴ شرح داده می‌شود. پارامترهای ریزشبه dc، اعم از پارامترها و ظرفیت‌های منابع و همچنین پارامترهای خطوط اتصال، در جدول ۱ درج شده‌است.

۳- ارائه راهبرد کنترلی پیشنهادی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، راهبرد کنترلی پیشنهادی مبنی بر جداسازی دینامیکی کنترل‌کننده واحدهای FC و SC می‌باشد. به این منظور، برای هر کدام از این واحدهای انرژی، سیستم کنترلی جداگانه‌ای تعریف و طراحی می‌گردد. واحدهای PV نیز در حالت ردیابی نقطه توان بیشینه قرار می‌گیرند. به این دلیل که با بهره‌برداری بیشینه از واحدهای PV، ضمن تأمین بخشی از توان تقاضاشده سیستم، مصرف سوخت واحدهای FC کاهش یابد.

۳-۱- کنترل‌کننده واحد FC

از آنجایی که یک FC ایده‌آل پاسخ دینامیکی کندی دارد، در این مقاله، واحد FC به صورت یک منبع جریان کنترل‌شده در نظر گرفته می‌شود که خروجی آن به واسطه یک مبدل باک dc-dc یک طرفه به سیستم منتقل می‌گردد. لذا، با استفاده از روش کنترل افتی معمولی می‌توان این واحد را کنترل نمود. شکل ۲ بلوک دیاگرام کنترل FC را نشان می‌دهد که متشکل از یک حلقه امپدانس مجازی جهت حفظ تقسیم جریان مطلوب و یک کنترل‌کننده تناسبی-انترگرالی (PI^I) برای تنظیم دینامیک واحد FC می‌باشد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترلی واحد SC

جدول ۲: پارامترهای کنترل کننده‌ها

مقدار پارامتر	کنترل کننده
$K_{pfc}=1, K_{ifc}=10$	کنترل کننده PI واحد FC
$K_{C_1}=10, K_{pSC_1}=14, K_{iSC_1}=200$	کنترل کننده ولتاژ واحد SC ₁
$K_{pSOC_1}=0.01, K_{iSOC_1}=0.05$	تنظیم شارژ SC ₁
$K_{C_2}=10, K_{pSC_2}=14, K_{iSC_2}=200$	کنترل کننده ولتاژ واحد SC ₂
$K_{pSOC_2}=0.01, K_{iSOC_2}=0.08$	تنظیم شارژ SC ₂
$K_{C_3}=10, K_{pSC_3}=14, K_{iSC_3}=200$	کنترل کننده ولتاژ واحد SC ₃
$K_{pSOC_3}=0.01, K_{iSOC_3}=0.1$	تنظیم شارژ SC ₃
$R_{D_{e1}}=0.0576, R_{D_{e2}}=0.1152, R_{D_{e3}}=0.2304$	ضرایب افتی واحدهای FC
$R_{D_{e1}}=0.0576, R_{D_{e2}}=0.1152, R_{D_{e3}}=0.2304$	ضرایب افتی واحدهای SC

۲-۲- نحوه تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ها

همان‌طور که اشاره شد، یک واحد FC ایده‌آل دینامیک کندی دارد. بنابراین، کنترل کننده PI مربوطه نیز باید برای پاسخ‌گویی به تقاضای توان در یک ولتاژ مجاز dc، دینامیک کندی داشته‌باشد. از طرفی، کنترل کننده PI بلوک تنظیم ولتاژ در سیستم کنترلی واحد SC باید به اندازه کافی سریع باشد تا حاشیه پایداری مطلوب و پهنای باند مناسبی برای سیستم حلقه بسته به دست آید. همچنین، لازم است میان کنترل کننده‌های PI بلوک تنظیم کننده حالت شارژ SC و PI واحد FC مصالحه‌ای برقرار گردد. به عبارت دیگر، دینامیک کنترل کننده PI بلوک تنظیم کننده حالت شارژ باید طوری تعیین گردد که عمل کرد واحد SC متناسب با سرعت پاسخ‌گویی واحد FC باشد. با افزایش بار سیستم، واحد FC به کندی تولید خود را افزایش می‌دهد. لذا، دشارژ شدن SC باید متناسب با سرعت تولید انرژی واحد FC باشد تا قابلیت اطمینان سیستم حفظ شود. در نتیجه، جریان خروجی DG ترکیبی و یا جریان مورد نیاز بار به‌طور پیوسته فراهم می‌گردد. جدا از این، در سیستم‌های کنترلی، فاکتور میرایی بین ۰/۴ تا ۰/۸ منجر به بهترین پاسخ می‌شود که یک مقدار استاندارد از این جهت، فاکتور میرایی ۰/۷۰۷ می‌باشد. براساس مقادیر استاندارد فاکتور میرایی و جهش قطب‌های غالب حلقه جریان که به ترتیب ۰/۷ و ۵٪ در نظر گرفته می‌شوند، KC به طور دقیق تعیین می‌شود. در نتیجه، ضمن در نظر گرفتن ملاحظات فوق، ضرایب

۳-۱- کنترل کننده واحد SC

واحد SC که به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی با سرعت پاسخ‌گویی سریع در تأمین توان عمل می‌کند، دارای یک سیستم کنترلی با دینامیک بالا است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، کنترل کننده واحد SC متشکل از سه بلوک کنترلی با عنوان‌های «واحد تقسیم جریان/توان»، «واحد کنترل ولتاژ» و «واحد تنظیم کننده حالت شارژ» می‌باشد. از آنجایی که ریزشکبه dc مورد بررسی دارای چندین واحد SC با ظرفیت‌های متفاوت می‌باشد، لازم است که در شرایط گذرا جریان/توان تقاضا شده میان SC های متعدد تقسیم گردد. به این منظور یک حلقه امیدانس مجازی که ناشی از کنترل droop معمولی می‌باشد، طراحی شده‌است. مقدار امیدانس مجازی را می‌توان براساس توضیحاتی که در بخش ۲-۱ بیان گردید، محاسبه نمود.

واحد کنترل ولتاژ یک بلوک سه‌حلقه‌ای آنباشی است که با هدف تنظیم ولتاژ ریزشکبه dc طراحی شده‌است. حلقه خارجی این بلوک، حلقه ولتاژ می‌باشد که با استفاده از یک کنترل کننده PI ولتاژ خروجی را با ولتاژ مرجع (خروجی واحدهای تقسیم جریان/توان و تنظیم کننده حالت شارژ) مقایسه می‌نماید. حلقه داخلی که حلقه جریان نامیده می‌شود، می‌تواند توسط یک کنترل کننده PI دیگر کنترل شود. اما، از آنجایی که حلقه ولتاژ باید برای ردیابی دقیق مرجع، یک پاسخ دینامیکی بسیار کندتر نسبت به حلقه جریان داشته‌باشد، از یک تنظیم کننده تناسبی استفاده می‌شود که به صورت یک بهره مثبت، KC، قرار داده شده‌است و به کاهش امیدانس خروجی مبدل و بهبود پایداری کمک می‌کند. حلقه سوم نیز یک حلقه تغذیه به جلو برای کاهش اثرات دینامیکی بار است.

اصول عملکرد واحد SC متناسب با توان تقاضا شده سیستم در شرایط گذرا می‌باشد. به عبارت دیگر، واحد SC می‌تواند در مد عمل کرد شارژ، دشارژ و یا غیرفعال قرار گیرد. بنابراین، یک بلوک تنظیم کننده حالت شارژ که متشکل از یک کنترل کننده PI است و جریان خروجی SC را تنظیم می‌نماید، به کار گرفته شده‌است. بدین ترتیب با تنظیم ضرایب این کنترل کننده، حالت عمل کرد SC متناسب با سرعت پاسخ‌گویی واحد FC خواهد بود و در طول حالت کار دائمی واحد SC دخالتی در عملکرد شبکه نخواهد داشت.

$$V_{out}(s) = V_{SC}(s) - Z_{SC}^*(s) \cdot I_{SC}(s) \quad (9)$$

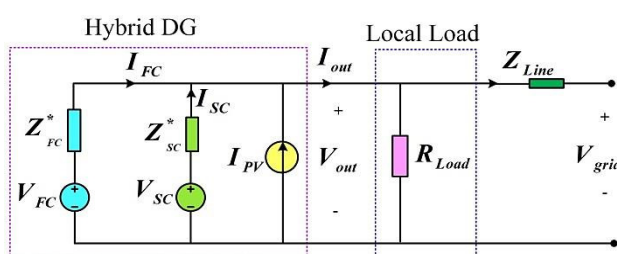
$$V_{SC}(s) = H_{SC}(s) \cdot V_{ref_{SC}}(s) \quad (10)$$

$$Z_{SC}^*(s) = \frac{\omega_c \cdot R_{d_{SC}}}{s + \omega_c} H_{SC}(s) + Z_{SC}(s) + H_{SC}(s) \cdot G_{SOC}(s) \quad (11)$$

در نتیجه، واحد SC به صورت یک منبع ولتاژ سری با یک امپدانس مدل می‌شود. به طور مشابه، واحد FC نیز به صورت منبع ولتاژ سری با امپدانس مربوطه، مطابق با (۱۲)، مدل می‌گردد.

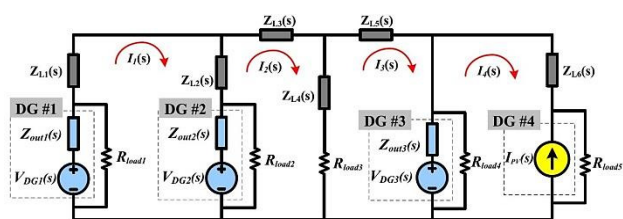
$$V_{out}(s) = V_{FC}(s) - Z_{FC}^*(s) \cdot I_{FC}(s) \quad (12)$$

با مدل‌سازی واحد PV به صورت یک منبع جریان ثابت و همچنین، با استفاده از (۹) و (۱۲)، مدل حلقه بسته DG ترکیبی استخراج می‌شود که در شکل ۴ نمایش داده شده است. پارامتر V_{grid} را می‌توان به طور تقریبی معادل با ولتاژ تونن سایر قسمت‌های ریزشبه dc قرار داد.



شکل ۴: مدل حلقه بسته DG ترکیبی همراه با بار محلی

با توجه به مدل حلقه بسته DGهای ریزشبه و همچنین بارهای محلی سیستم که از نوع امپدانس ثابت هستند، مدل مداری ریزشبه dc استخراج و در شکل ۵ نشان داده شده است. امپدانس خروجی هر DG ترکیبی، $Z_{out_i}(s)$ ، معادل با $Z_{FC_i}^*(s) \parallel Z_{SC_i}^*(s)$ می‌باشد.



شکل ۵: مدل مداری ریزشبه dc [۲۱]

۴-۲- آنالیز پایداری

برای بررسی تأثیر طرح کنترلی پیشنهادی بر میرایی نوسانات فرکانس پایین، روش تحلیل دینامیکی مقادیر ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، با تحلیل مکان‌هندسی موده‌های غالب فرکانس پایینی که از معادله مشخصه به دست می‌آیند، پایداری سیستم ارزیابی می‌گردد. در نهایت، رفتار دینامیکی سیستم مورد مطالعه در این مقاله با سیستم ارائه شده در [۲۱]، بدون استفاده از ضریب افتی دینامیکی، مقایسه می‌شود.

بر اساس شکل ۴، می‌توان محاسبه نمود که:

کنترل‌کننده‌ها به گونه‌ای تنظیم می‌گردند که فاکتور میرایی مناسبی برای ریزشبه dc حاصل شود. در جدول ۲ پارامترهای مربوط به کنترل‌کننده‌ها درج شده است. لازم به ذکر است که هر کنترل‌کننده PI به صورت $(K_P + K_I/s)$ تعریف می‌شود.

۴- استخراج مدل مداری و آنالیز پایداری ریزشبه dc

۴-۱- مدل سازی ریزشبه dc

برای مدل‌سازی ریزشبه dc، باید واحدهای DG و بارهای سیستم را با در نظر گرفتن دیگرام‌های کنترلی ارائه شده، مدل‌سازی نمود. در این راستا، لازم است که ابتدا هر کدام از واحدهای انرژی (PV و FC و SC) به صورت خطی و حلقه بسته مدل‌سازی گردند تا مدل DG ترکیبی در حضور بار محلی به دست آید. باید توجه داشت که تحلیل‌های غیرخطی به دلیل تعداد بالای معادلات دیفرانسیل، بیش از حد پیچیده هستند و نیز، دید خوبی در مورد چگونگی اثر متقابل متغیرهای مؤثر بر پایداری ایجاد نمی‌گردد. لذا، مدل خطی ریزشبه dc تهیه می‌شود.

با توجه به طرح کنترلی واحد SC که در شکل ۳ نشان داده شده است، خروجی حلقه بسته سیستم کنترلی این واحد به شرح زیر خواهد بود:

$$V_{out}(s) = H_{SC}(s) \cdot V_{ref_{SC}}^*(s) - Z_{SC}(s) \cdot I_{SC}(s) \quad (3)$$

که $V_{out}(s)$ و $I_{SC}(s)$ به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی مبدل SC هستند. توابع انتقال $H_{SC}(s)$ و $Z_{SC}(s)$ نیز به این قرارند:

$$H_{SC}(s) = \left. \frac{V_{out}(s)}{V_{ref_{SC}}^*(s)} \right|_{I_{SC}(s)=0} \quad (4)$$

$$Z_{SC}(s) = \left. \frac{V_{out}(s)}{I_{SC}(s)} \right|_{V_{ref_{SC}}^*(s)=0} \quad (5)$$

$V_{ref_{SC}}^*(s)$ ولتاژ مرجع می‌باشد و مطابق با خروجی واحد تقسیم جریان توان و حلقه تنظیم‌کننده حالت شارژ قابل محاسبه است:

$$V_{ref_{SC}}^*(s) = V_{ref_{SC}}(s) + V_{SC-mod}(s) \quad (6)$$

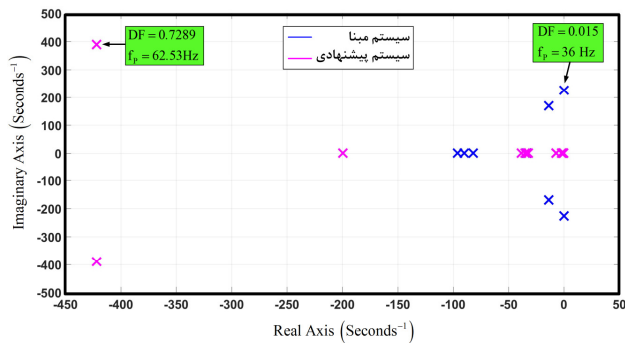
که $V_{ref_{SC}}(s)$ خروجی حلقه امپدانس مجازی است و برابر با $V_{DC} - R_{d_{SC}} \cdot I_{avg_{SC}}(s)$ می‌باشد. $R_{d_{SC}}$ مقاومت مجازی و $V_{SC-mod}(s)$ خروجی حلقه تنظیم‌کننده حالت شارژ است. از طرفی، $I_{avg_{SC}}(s)$ و $V_{SC-mod}(s)$ معادل هستند با:

$$I_{avg_{SC}}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} I_{SC}(s) \quad (7)$$

$$V_{SC-mod}(s) = -I_{SC}(s) \cdot G_{SOC}(s) \quad (8)$$

که ω_c فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر و G_{SOC} بهره کنترل‌کننده PI بلوک تنظیم شارژ است.

با ترکیب (۳) و (۶) تا (۸)، ولتاژ خروجی واحد SC به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۷: مودهای غالب فرکانس پایین ریزشبه dc برای هر دو مورد سیستم مینا و سیستم پیشنهادی

در ابتدا، سیستم حلقه بسته DG₁ مورد بررسی قرار داده می‌شود. با توجه به اهمیت مقدار مقاومت خط، فرض می‌گردد که مقدار این پارامتر از صفر تا ۰/۰۵ اهم تغییر کند. سایر پارامترها برابر خواهند بود با مکان‌هندسی پایین DG₁ در شکل ۶ نمایش داده شده است. $R_{Load} = 1.15 \Omega$ و $L_{Line} = 0$ ، $R_{D1} = 0.057 \Omega$ مکان‌هندسی مودهای غالب فرکانس پایین DG₁ در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶ الف مربوط به سیستم مینا می‌باشد که در [۲۱] ارائه شده است و همان‌طور که مشخص است با افزایش مقاومت خط میرایی سیستم بهبود می‌یابد. شکل ۶ ب مودهای غالب فرکانس پایین DG₁ در سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. قابل ملاحظه است که علاوه بر افزایش فاکتور میرایی سیستم با افزایش مقاومت خط، سیستم پیشنهادی در بدترین شرایط عملیاتی، یعنی $R_{Line} = 0$ ، نیز پایدار است.

شکل ۷ مکان‌هندسی مودهای غالب فرکانس پایین ریزشبه dc را برای هر دو مورد سیستم مینا و سیستم پیشنهادی، نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، فاکتور میرایی سیستم مینا برابر با ۰/۰۵۱۲ می‌باشد که مقدار کوچکی است؛ در حالی که، با استفاده از راهبرد کنترلی پیشنهادی مقدار فاکتور میرایی سیستم برابر با ۰/۷۲۸۹ خواهد بود. مقایسه رفتار دینامیکی سیستم مورد مطالعه در این مقاله با سیستم مینا، بدون استفاده از ضریب افتی دینامیکی، تأثیر طرح کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵- شبیه‌سازی

به منظور تأیید عمل کرد طرح کنترلی پیشنهادی، سیستم نشان داده شده در شکل ۱، با فرض عمل کرد جزیره‌ای^۱، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی عمل کرد سیستم در حالت‌های ماندگار و گذرا بررسی شده است. جداول ۱ و ۲ پارامترهای ریزشبه dc شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند.

برای ارزیابی پاسخ دینامیکی ریزشبه dc، دو تغییر بار ناگهانی اعمال می‌گردد. در ابتدای کار سیستم فرض بر این است که جریان‌های بار، به ترتیب برای بارهای شماره ۱ تا ۵، برابر با ۱، ۱۲، ۱۱ و ۱۶ و ۹ آمپر می‌باشند. گام اول تغییرات در لحظه $t=12s$ اتفاق می‌افتد. در این لحظه، بار شماره ۳ به میزان زیادی افزایش خواهد یافت و جریان بار برابر با ۵۸ آمپر خواهد شد. گام دوم تغییرات به خروج ناگهانی بارهای شماره ۱ و ۴ اختصاص دارد که در لحظه $t=25s$ رخ می‌دهد. در شکل ۸ جریان

$$V_{out}(s) = Z_{Line}(s) \left[I_{out}(s) - \frac{V_{out}(s)}{R_{Load}} \right] + V_{grid}(s) \quad (13)$$

$$I_{out}(s) = I_{FC}(s) + I_{SC}(s) + I_{PV}(s) \quad (14)$$

در حالی که $Z_{Line}(s) = R_{Line} + sL_{Line}$ است. با ترکیب (۹)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) ولتاژ خروجی DG حاصل می‌گردد.

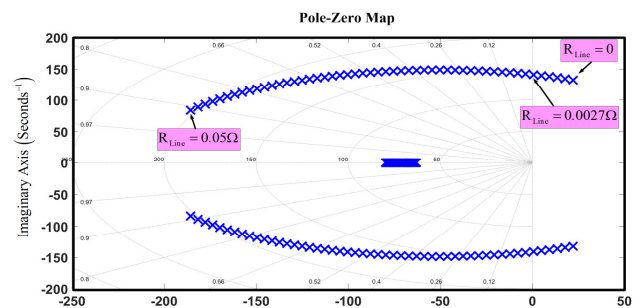
$$V_{out}(s) = \frac{Z_{Line}(s) \left(I_{PV} + \frac{V_{FC}(s)}{Z_{FC}^*(s)} + \frac{V_{SC}(s)}{Z_{SC}^*(s)} \right) + V_{grid}(s)}{1 + \frac{Z_{Line}(s)}{R_{Load}} + \frac{Z_{Line}(s)}{Z_{FC}^*(s)} + \frac{Z_{Line}(s)}{Z_{SC}^*(s)}} \quad (15)$$

مخرج (۱۵)، معادله مشخصه سیستم حلقه بسته DG است. به بیان ساده‌تر، معادله مشخصه مطابق با (۱۶) خواهد بود:

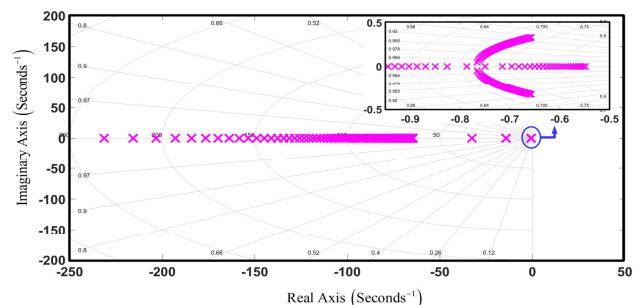
$$R_{Load} \cdot Z_{FC}^*(s) \cdot Z_{SC}^*(s) + Z_{Line}(s) [Z_{FC}^*(s) \cdot Z_{SC}^*(s) + R_{Load} \cdot Z_{SC}^*(s) + R_{Load} \cdot Z_{FC}^*(s)] = 0 \quad (16)$$

معادله مشخصه کل ریزشبه dc را می‌توان از درمیان ماتریس امیدانس مش $Z_{MG}(s)$ (براساس مدل مداری شکل ۵) به دست آورد که به تفصیل در بخش ۲-۳ مقاله [۲۱] بیان شده است.

$$Z_{MG}(s) = \begin{bmatrix} Z_{MG11}(s) & Z_{MG12}(s) & Z_{MG13}(s) & Z_{MG14}(s) \\ Z_{MG21}(s) & Z_{MG22}(s) & Z_{MG23}(s) & Z_{MG24}(s) \\ Z_{MG31}(s) & Z_{MG32}(s) & Z_{MG33}(s) & Z_{MG34}(s) \\ Z_{MG41}(s) & Z_{MG42}(s) & Z_{MG43}(s) & Z_{MG44}(s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

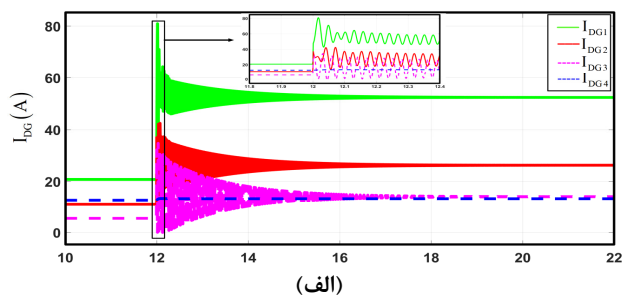


(الف)

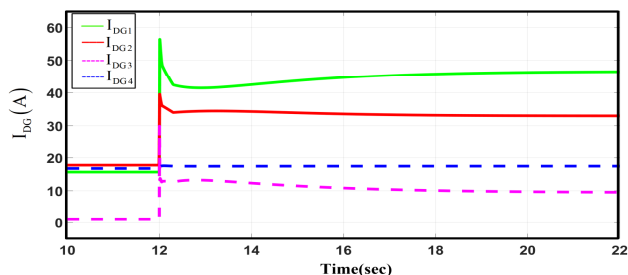


(ب)

شکل ۸: مودهای غالب فرکانس پایین DG₁ با تغییر R_{Line} از صفر تا ۰/۰۵ اهم، (الف) سیستم مینا و (ب) سیستم پیشنهادی.

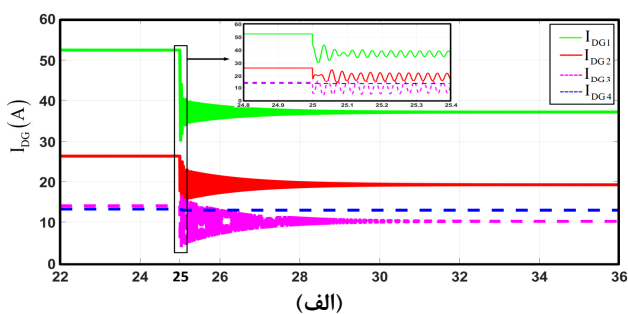


(الف)

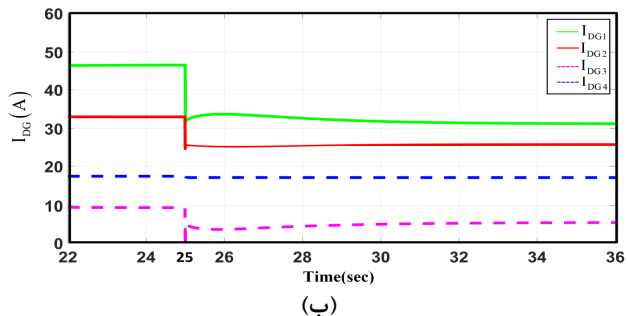


(ب)

شکل ۹: پاسخ دینامیکی واحدهای DG به اولین تغییر بار، (الف) سیستم مینا و (ب) سیستم پیشنهادی



(الف)

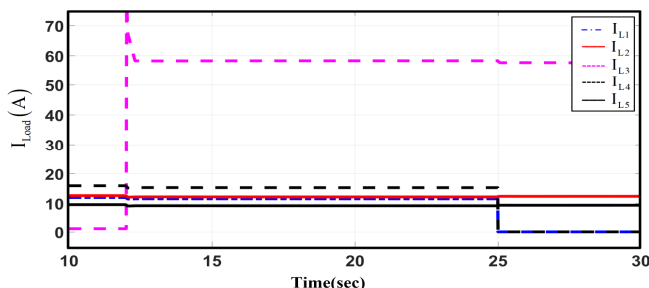


(ب)

شکل ۱۰: پاسخ دینامیکی واحدهای DG به دومین تغییر بار، (الف) سیستم مینا و (ب) سیستم پیشنهادی

باتوجه به اینکه عمل کرد راهبرد کنترلی و در نتیجه عمل کرد سراسر سیستم در زمان اضافه بار از اهمیت بسیاری برخوردار است، ولتاژ خروجی DG و ولتاژ لحظه‌ای بارها مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۱۱ ولتاژ ترمینال خروجی DG₁ را در مقایسه با ولتاژ مرجع نشان می‌دهد. آن‌گونه که پیداست استفاده از راهبرد کنترلی پیشنهادی، نوسانات فرکانس پایین ولتاژ را در شرایط گذرا میرا می‌کند. قابل توجه است که در طرح پیشنهادی، ولتاژ خروجی DG مرجع خود را به خوبی دنبال می‌کند که این مطلب نشان‌دهنده عمل کرد مناسب سیستم می‌باشد.

لحظه‌ای بارهای dc با دو گام تغییر مشاهده می‌شود. در ادامه این بحث، مواردی از قبیل جریان‌های خروجی DG، ولتاژ خروجی DG، ولتاژ لحظه‌ای بارها و جریان واحدهای FC، SC و PV مورد بررسی قرار می‌گیرد.

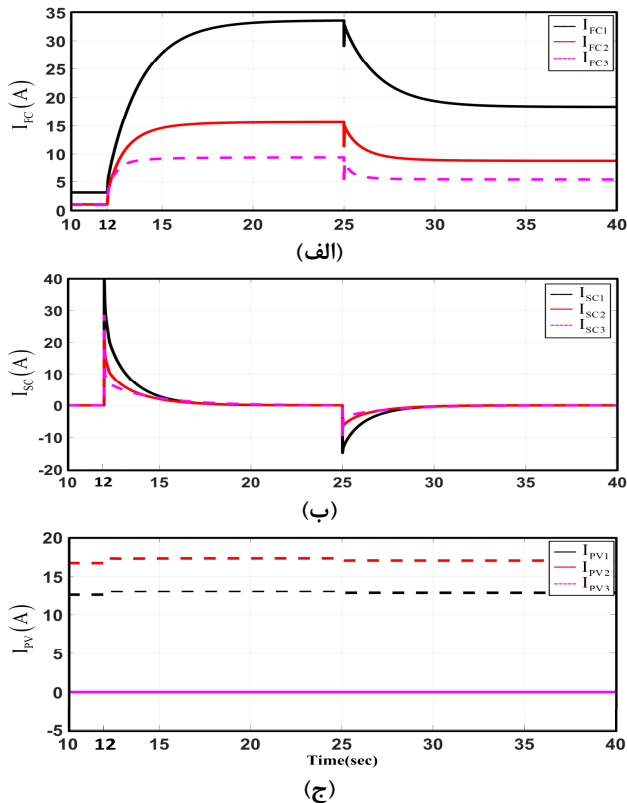


شکل ۸: جریان لحظه‌ای بارهای ریزشکه dc

پاسخ دینامیکی واحدهای DG به اولین تغییر بار سیستم در شکل ۹ نمایش داده شده است. زمانی که واحدهای تولید انرژی از نقطه نظر کنترلی-دینامیکی مستقل از هم نیستند (سیستم مینا)، جریان‌های خروجی واحدهای DG تحت تأثیر نوسانات فرکانس پایین قابل توجهی قرار می‌گیرند که در شکل ۹-الف قابل مشاهده است. فرکانس این نوسانات حدود ۳۶ هرتز است که از روی تحلیل سیگنال کوچک نشان داده شده در شکل ۷ محاسبه می‌شود و با نتایج شبیه‌سازی شکل ۹-الف مطابقت دارد.

با اعمال راهبرد کنترلی پیشنهادی، همان‌طور که انتظار می‌رود، نوسانات فرکانس پایین توان/جریان میرا می‌شود. این مطلب که با توجه به فاکتور میرایی مناسب قطب‌های غالب سیستم در شکل ۷ بیان گردید، در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۹-ب قابل مشاهده است. علاوه بر این، تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای ریزشکه dc با خطوط امیدانس پایین، جریان‌های خروجی متناسب با ضرایب افتی مشخص شده برای هر واحد DG، به درستی میان این واحدها تقسیم می‌شوند. با مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۹-ب می‌توان نتیجه گرفت که در حالت ماندگار، هر دو راهبرد کنترلی عمل کرد قابل قبولی دارند؛ در حالی که، با استفاده از طرح پیشنهادی، ریزشکه dc در حالت گذرا نیز عمل کرد مناسبی خواهد داشت.

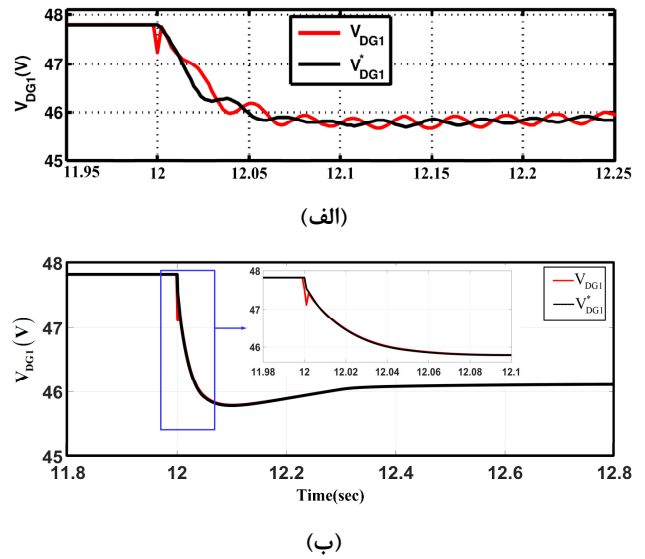
به‌طور مشابه با گام اول، پاسخ دینامیکی واحدهای DG به دومین تغییر بار سیستم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، جریان خروجی واحدهای DG در سیستم مینا نوسانی است که مطابق با نتایج سیگنال کوچک بخش پیشین (فاکتور میرایی کوچک) می‌باشد. این در حالی است که طرح پیشنهادی عمل کرد مناسب سیستم را در پی دارد. به عبارت دیگر، با به‌کارگیری راهبرد کنترلی پیشنهادی، علاوه بر افزایش فاکتور میرایی سیستم و میراشدن نوسانات مؤثر جریان‌های خروجی، تقسیم جریانی مناسبی میان واحدهای انرژی ایجاد می‌گردد.



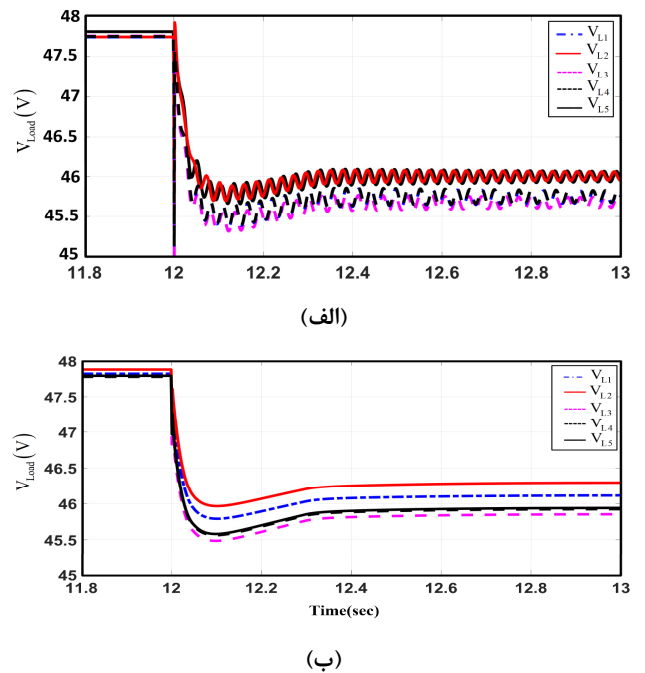
شکل ۱۳: پاسخ دینامیکی واحدهای انرژی به تغییرات بار، الف) جریان خروجی واحدهای FC، ب) جریان خروجی واحدهای SC و ج) جریان خروجی واحدهای PV.

به منظور حفظ قابلیت اطمینان ریزشکده dc لازم است که هر کدام از واحدهای انرژی (PV و FC و SC) متناسب با تقاضای بار سیستم، پاسخ دینامیکی مطلوبی داشته باشند. در شکل ۱۳ جریان خروجی واحدهای FC، SC، PV ترسیم شده است. مشاهده می شود که با افزایش بار سیستم در لحظه $t=12s$ ، واحدهای FC به دلیل دینامیک کند، تولید خود را به آهستگی افزایش می دهند. از طرفی، واحدهای SC به جهت جبران سازی پاسخ کند FC، بلافاصله تغییرات بار را پاسخ داده و کمبود توان مورد نیاز سیستم را جبران می کنند. هم چنین، واحدهای PV که به صورت یک منبع جریان ثابت در اینجا مدل شده اند، نیز، به تأمین بخشی از توان تقاضا شده سیستم کمک می نمایند. بنابراین، تقاضای توان سیستم به طور پیوسته تأمین می گردد. زمانی که بار سیستم کاهش می یابد (لحظه $t=25s$)، واحدهای FC جریان خروجی خود را به آهستگی کاهش می دهند تا به نقطه کار جدید دست یابند. در این حالت، واحدهای SC می توانند از مازاد توان تولیدی سیستم برای شارژ مجدد خود استفاده کنند.

برای نشان دادن تأثیر مدل سازی به نسبت ایده آل ریزشکده dc مورد مطالعه در این مقاله، پاسخ دینامیکی سیستم پیشنهادی با سیستم ارائه شده در مقاله [۲۱]، ضمن در نظر گرفتن ضریب افتی دینامیکی، مقایسه می شود. فرض کنید بار شماره ۴ در ابتدا از ریزشکده dc جدا باشد. در اینجا، سه مرحله تغییر بار به منظور ارزیابی پاسخ سیستم‌ها

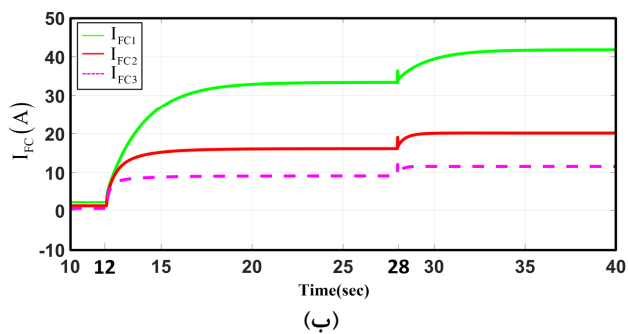
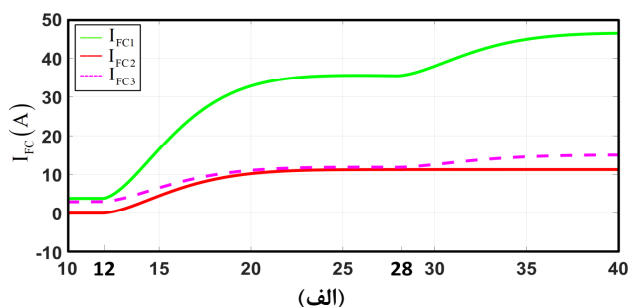


شکل ۱۱: ولتاژ ترمینال خروجی DG₁ زمانی که در لحظه $t=12s$ بار سیستم افزایش می یابد، الف) سیستم مینا [۲۱] و ب) سیستم پیشنهادی.



شکل ۱۲: ولتاژ لحظه‌ای بارها زمانی که در لحظه $t=12s$ بار سیستم افزایش می یابد، الف) سیستم مینا و ب) سیستم پیشنهادی.

شکل ۱۲ ولتاژ لحظه‌ای بارهای ریزشکده dc را در زمان اضافه بار نشان می دهد. با دقت در نتایج به دست آمده می توان دریافت که راهبرد کنترلی پیشنهادی نوسانات فرکانس پایین ولتاژهای بار را به طور مؤثری میرا می نماید. توجه گردد که در این حالت، افت ولتاژ بارهای سیستم از حد استاندارد (۵٪ ولتاژ نامی) فراتر نمی رود.



شکل ۱۵: پاسخ دینامیکی واحدهای FC به تغییرات بار، (الف) سیستم مینا با در نظر گرفتن ضریب droop دینامیکی و (ب) سیستم پیشنهادی.

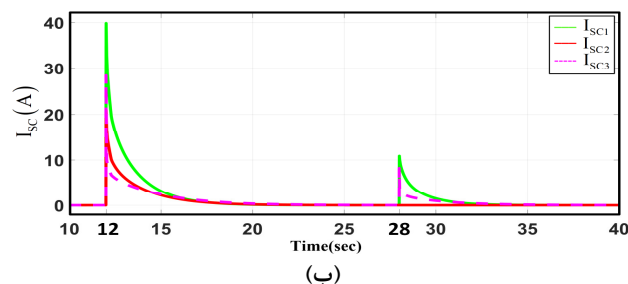
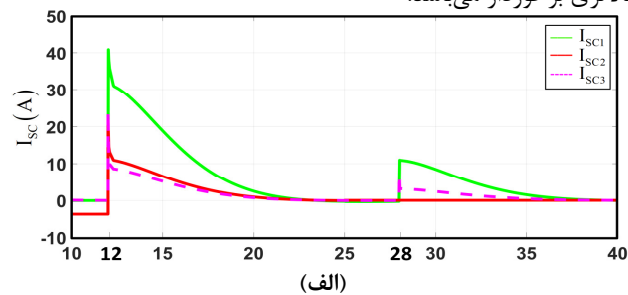
۶- نتیجه‌گیری

نوسانات فرکانس پایین توان/جریان که عمدتاً ناشی از حلقه‌های کنترل تقسیم توان هستند، یکی از چالش‌های مهم ریزشکده dc محسوب می‌شوند. در این مقاله، به منظور غلبه بر چالش مذکور، یک راهبرد کنترلی غیرمتمرکز ارائه شده است. با توجه به قابلیت راهبرد پیشنهادی در جداسازی دینامیکی واحدهای FC و SC، رفتار دینامیکی کل ریزشکده dc بهبود خواهد یافت. نتایج حاصل از تحلیل سیگنال کوچک تأثیر طرح کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نیز حاکی از آن است که با اعمال راهبرد کنترلی پیشنهادی نه تنها فاکتور میرایی سیستم تا مقدار استاندارد افزایش می‌یابد، بلکه مدیریت توان مناسبی بدون نیاز به حلقه امپدانس اندوکتیو اضافی، برقرار می‌گردد. بنابراین، تطابق مطلوب بین نتایج تحلیل سیگنال کوچک و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی دارای دقت بسیار خوبی بوده و عمل کرد سیستم مورد مطالعه در هر دو حالت ماندگار و گذرا قابل قبول می‌باشد.

مراجع

- [۱] مجید نیریور، سعید حسنونند، حسین فلاح‌زاده ابرقوئی، « برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم به‌منظور تبدیل شبکه توزیع موجود به ریزشکده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، ۷۷۴-۷۶۱، تابستان ۱۳۹۶.
- [2] W. Du, J. Zhang, Y. Zhang, and Zhaoming Qian, "Stability criterion for cascaded system with constant power load," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1843-1851, April 2013.

اعمال می‌شود. مرحله اول تغییرات همان افزایش بار شماره ۳ در لحظه $t=12s$ می‌باشد. در لحظه $t=25s$ واحد SC_2 از ریزشکده dc جدا شده و در لحظه $t=28s$ بار ۴ به ریزشکده dc متصل می‌گردد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب پاسخ دینامیکی واحدهای SC و FC را به تصویر می‌کشند. جریان خروجی واحدهای SC در هر دو سیستم مورد شبیه‌سازی رفتاری تقریباً مشابه دارند. با این وجود، ضمن بررسی پاسخ دینامیکی واحدهای FC، یک تناقض مهم ایجاد می‌شود. در شکل ۱۵-الف قابل مشاهده است که با خروج واحد SC_2 در سیستم مینا، عمل کرد واحد FC_2 تحت تأثیر قرار گرفته و جریان خروجی آن علی‌رغم تغییر بار سیستم در لحظه $t=28s$ ثابت باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، عدم استقلال دینامیکی واحدهای FC و SC سبب می‌شود که خروج هر واحد SC در سیستم مورد مطالعه در مقاله [۲۱]، منجر به تغییر ماهیت واحد FC مربوطه گردد. در این صورت، واحد FC تبدیل به یک منبع جریان ثابت شده و تغییر بار سیستم را متوجه نمی‌شود. این درحالی است که در عمل، چنین اتفاقی می‌تواند کنترل واحد DG را مختل کرده و حتی ممکن است DG را از مدار خارج نماید و در پی آن، ریزشکده را در شرایط اضافه بار قرار دهد. اما، طرح کنترلی ارائه شده در این مقاله بدون تأثیرپذیری از خروج هر یک از واحدهای انرژی، همچنان پایداری و عمل کرد مطلوب ریزشکده را حفظ می‌کند. با دقت در نتایج شکل ۱۵-ب می‌توان دریافت که رفتار دینامیکی واحدهای FC در سیستم پیشنهادی مستقل از واحدهای SC بوده و خروج SC_2 بر عمل کرد سایر واحدهای انرژی تأثیر نامطلوبی نخواهد داشت. بنابراین، آن‌گونه که از نتایج شبیه‌سازی پیداست، در طرح و مدل‌سازی پیشنهادی واحدهای FC و SC به حالت ایده‌آل خود نزدیک‌تر بوده و در نتیجه، عمل کرد دینامیکی سیستم از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۱۴: پاسخ دینامیکی واحدهای SC به تغییرات بار، (الف) سیستم مینا با در نظر گرفتن ضریب droop دینامیکی و (ب) سیستم پیشنهادی.

- [13] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, and J. C. Vasquez, "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, Apr. 2014.
- [14] L. Meng, T. Dragicevic, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Dynamic consensus algorithm based distributed global efficiency optimization of a droop controlled DC microgrid," in *Proc. IEEE Int. Energy Conf.*, pp. 1276-1283, 2014.
- [15] X. Lu, K. Sun, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and L. Huang, "Doublequadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 147-157, Jan. 2015.
- [16] A. Tahim, D. Pagan, E. Lenz, V. Stramosk, "Modeling and stability analysis of islanded DC microgrids under droop control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, NO. 8, pp. 4597-4607, August 2015.
- [17] A. Hosseinipour, and H. Hojabri, "Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with constant power loads." *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, no. 4, 430-438, 2017.
- [18] Q. Yang, H. Zhao, and H. Zeng, "Autonomous voltage regulation and current sharing in islanded multi-inverter DC microgrid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 6, 6429-6437, Nov. 2018.
- [19] F. Guo, Q. Xu, Ch. Wen, L. Wang, and P. Wang, "Distributed Secondary Control for Power Allocation and Voltage Restoration in Islanded DC Microgrids." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1857-1869, Oct. 2018.
- [20] E. Mojica-Nava, J. M. Rey, J. Torres-Martinez, and M. Castilla, "Decentralized Switched Current Control for DC Microgrids." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, no. 2, 1182-1191, Feb. 2019.
- [21] M. Hamzeh, M. Ghafouri, H. Karimi, K. Sheshyekani, and J. M. Guerrero, "Power oscillations damping in DC microgrids," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 3, pp. 970-980, Sep. 2016.
- [22] A. Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari, and R. Iravani, "Automatic droop control for a low voltage DC microgrid," *IET Generat., Transmiss. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 41-47, Jan. 2016.
- [3] J. Zeng, Z. Zhang, and W. Qiao, "An interconnection and damping assignment passivity-based controller for a DC-DC boost converter with a constant power load," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, July/August 2014.
- [۴] امین رنجبران، محمود عبادیان، «ارائه روش کنترلی به‌منظور تنظیم دقیق ولتاژ بار و تقسیم دقیق توان‌های اکتیو و راکتیو ریزشبه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۳، ۱۰۵۸-۱۰۴۷، پاییز ۱۳۹۶.
- [5] J. Guerrero, P.C. Loh, T.-L. Lee, et al.: "Advanced control architectures for intelligent microgrids; part ii: Power quality, energy storage, and ac/dc microgrids," *IEEE Trans. Ind Electron.*, 60, (4), pp. 1263-1270, 2013.
- [6] S. Sanchez and M. Molinas, "Degree of influence of system states transition on the stability of a DC microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2535-2542, Sep. 2014.
- [7] C. Jin, P. Wang, J. Xiao, Y. Tang, and F. H. Choo, "Implementation of hierarchical control in DC microgrids", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, pp. 4032-4042, Aug. 2014.
- [8] M. Hamzeh, A. Ghazanfari, Y. A.-R. I. Mohamed, and Y. Karimi, "Modeling and design of an oscillatory current sharing control strategy in DC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 6647-6657, May 2015.
- [۹] سید عباس صارمی حصاری، محسن حمزه، احمد سالم‌نیا، «بهبود عملکرد دینامیکی و استاتیکی سیستم تقسیم توان در ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، ۲۴۳-۲۳۳، بهار ۱۳۹۵.
- [10] L. Guo, S. Zhang, X. Li, YW. Li, C. Wang, Y. Feng, "Stability Analysis and Damping Enhancement Based on frequency dependent virtual resistor for DC Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 338-350, March 2017.
- [11] T. Morstyn, B. Hredzak, G. D. Demetriades, and V. G. Agelidis. "Unified distributed control for dc microgrid operating modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, 802-812, 2016.
- [12] Q. Shafiee, T. Dragicevic, J. Vasquez, and J. Guerrero, "Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 922-933, 2014.

زیر نویس‌ها

⁶ Supercapacitor (SC)
⁷ Photovoltaic (PV)
⁸ State-of-Charge (SOC)
⁹ Proportional Integral (PI)
¹⁰ Islanded

¹ Distributed Generation (DG)
² Hybrid
³ Passive Damping
⁴ Active Damping
⁵ Fuel Cell (FC)