



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(1):1-16

## A New Dynamic Equivalent Model for Microgrids Including Distributed Generation Units and Static Compensators

Behrooz Zaker<sup>1</sup>, Assistant Professor<sup>1</sup> School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

### Abstract:

Due to the expansion and increasing penetration level of distributed generation units which are usually inertialess or low inertia, new challenges have arisen in power system studies. Thus, in power system studies, microgrids which may have numerous distributed generation units should be modelled and simulated that is very time consuming and complex. Therefore, dynamic equivalencing of microgrids in order to reduce computation burden and complexity is inevitable. In this paper, a new method for dynamic equivalencing of microgrids that includes inverter-based generation units and DSTATCOMs is proposed. The proposed equivalent model is a physical one which includes components such as equivalent converter, controller, resistance, reactance and equivalent load. Using the measurement data at the point of common coupling and utilizing optimization procedure, the parameters of the equivalent model will be identified. The proposed method is applied to IEEE 33-bus test system to show its accuracy and effectiveness.

**Keywords:** Distributed generation, Dynamic equivalencing, Microgrid, Reactive static compensator.

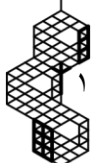
**Received:** 30 July 2023

**Revised:** 29 September 2023

**Accepted:** 22 October 2023

**Corresponding Author:** Dr. Behrooz Zaker, b.zaker@shirazu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teegees.2023.1997093.1095>





## ارائه یک مدار معادل دینامیکی جدید برای ریزشبکه‌ها شامل منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستای توان راکتیو

بهرروز ذاکر<sup>۱</sup>، استادیار

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

**چکیده:** با توجه به گسترش و افزایش ضریب نفوذ روزافزون منابع تولید پراکنده که اغلب بدون اینرسی یا با اینرسی پایین هستند، چالش‌های جدیدی در مطالعات سیستم قدرت به وجود آمده است. از این رو، در مطالعات سیستم‌های قدرت باید ریزشبکه‌های متعددی که تعداد بالایی منابع تولید پراکنده در دل خود دارند مدل‌سازی و شبیه‌سازی شوند که بار محاسباتی بسیار زیادی را به نرم‌افزارها تحمیل می‌کند. لذا، بحث معادل‌سازی دینامیکی ریزشبکه‌ها به منظور کاهش بار محاسباتی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله، روش جدیدی به منظور معادل‌سازی دینامیکی ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع اینورتری و جبران‌سازهای ایستا ارائه خواهد شد. مدار معادل پیشنهادی برخلاف مطالعات پیشین، یک مدل صرفاً ریاضی نبوده و شامل عناصر فیزیکی از جمله، مبدل معادل، کنترل‌کننده‌های معادل، مقاومت، راکتانس و بار معادل است. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری در محل اتصال ریزشبکه به شبکه بالادست و استفاده از یک فرایند بهینه‌سازی، پارامترهای مدار معادل شناسایی خواهند شد. روش موردنظر به شبکه تست ۳۳ شینه IEEE اعمال شده و با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف، صحت و دقت روش پیشنهادی ارزیابی خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** تولید پراکنده، جبران‌ساز ایستای توان راکتیو، ریزشبکه، معادل‌سازی دینامیکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهروز ذاکر، b.zaker@shirazu.ac.ir

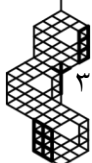
DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeGES.2023.1997093.1095>



در شبکه‌های قدرت فعلی، مسائل مربوط به کیفیت توان و قابلیت اطمینان دو مورد از نگرانی‌ها و چالش‌های اصلی هستند. در دهه‌های اخیر، به‌منظور بهبود این موارد، استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های برق رشد چشمگیری داشته است. در نتیجه، شاهد تغییر شکل شبکه‌های توزیع سنتی (غیرفعال) به شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه‌ها بوده‌ایم. ریزشبکه‌ها در کنار مزایای متعددی که دارند، نکات منفی و نگران‌کننده‌ای نیز دارند که باید مورد بررسی قرار گیرد. مباحث مربوط به کنترل ولتاژ و فرکانس در حالت عملکرد جزیره‌ای، حفظ شاخص‌های کیفیت توان در حد استاندارد، مدیریت و تسهیم توان بین منابع مختلف و همچنین اثرات متقابل دینامیکی بین ریزشبکه‌ها و شبکه قدرت بالادست اشاره کرد از جمله چالش‌های ریزشبکه‌ها هستند [۱]. با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده بدون اینرسی یا با اینرسی کم، اثرات متقابل دینامیکی بین ریزشبکه‌ها و شبکه قدرت بالادست بسیار حائز اهمیت خواهد بود. لذا، ضروری است تا مطالعات سیستم قدرت در حالتی که تعداد زیادی ریزشبکه به آن متصل هستند با دقت بالایی انجام شود. از طرفی، بالا بودن نسبت  $X/R$  در شبکه‌های توزیع باعث می‌شود که این شبکه‌ها افت ولتاژ قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشند. علاوه بر این، سیستم‌های توزیع معمولاً دارای فیدرهای شعاعی هستند، در نتیجه افزایش تقاضای بار الکتریکی و متعاقباً پیشرفت سیستم‌های توزیع، سبب افزایش افت ولتاژ و تلفات و همچنین ناهماهنگی بار می‌شود [۲]. لذا باید در ریزشبکه‌ها از تجهیزات جدیدی از جمله ادوات FACTS<sup>۱</sup> استفاده شود تا بتوان به‌واسطه آن‌ها کیفیت بهره‌برداری از شبکه را ارتقا داد. این عناصر در ریزشبکه‌ها برای کاهش تلفات، بهبود کیفیت توان، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش میزان بارپذیری شبکه استفاده می‌شوند.

به دلیل حضور تعداد زیادی منابع تولید پراکنده مختلف و ادوات FACTS به همراه کنترل‌کننده‌های بعضاً پیچیده، انجام مطالعات روی این سیستم‌ها بار محاسباتی بسیار زیاد خواهد داشت. در نتیجه، بهترین راه حل استفاده از مدل‌های معادل ساده شده و کاهش مرتبه یافته است [۳]. مبحث معادل‌سازی دینامیکی در سیستم‌های قدرت را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد. در دسته اول، معادل‌سازی با فرض در اختیار بودن پارامترهای اجزاء سیستم انجام می‌شود. روش‌هایی از قبیل تحلیل مودال [۴] و هم‌نوایی (Coherency) [۵] از مواردی هستند که در این دسته قرار می‌گیرند. همچنین در [۶]، از روش تقریب Hankle برای معادل‌سازی شبکه‌های توزیع فعال استفاده شده است. روش‌های دسته اول رویکرد جعبه-سفید نامیده می‌شوند. روش‌های اشاره شده در بالا همیشه قابلیت پیاده‌سازی عملی ندارند زیرا در واقعیت، همیشه پارامترهای موردنظر سیستم در اختیار نیست یا اگر هم در اختیار باشند ممکن است مقدار آن‌ها قابل اعتماد نباشد [۷]. لذا، به‌منظور رفع این مشکل دو رویکرد دیگر از روش‌های معادل‌سازی ارائه شده است؛ جعبه-خاکستری و جعبه-سیاه. در روش جعبه-سیاه، بدون در نظر گرفتن این مورد که ماهیت فیزیکی سیستم تحت مطالعه چیست، صرفاً سعی می‌شود با استفاده از یک مدل ریاضی، ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم را بر هم منطبق کرد. در [۸، ۹]، معادل‌سازی جعبه-سیاه یک ریزشبکه با روش Prony معرفی شده است. در این زمینه، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز کاربرد زیادی دارند [۱۰-۱۲]. در تمامی تحقیقات ذکر شده، سیگنال‌های ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو در یک نقطه خاص از شبکه (مثلاً نقطه اتصال مشترک<sup>۲</sup>) و در یک نقطه کاری معین ضبط می‌شوند و هدف این است تا یک مدل ریاضی دقیق به دست آید تا رفتار شبکه تحت مطالعه را تقلید کند. لذا، پارامترهایی که برای این مدل‌های ریاضی تخمین زده می‌شوند دیگر مفهوم فیزیکی مشخصی (از قبیل راکتانس، ثابت زمانی، اینرسی و ...) ندارند. روش‌های جعبه-خاکستری در واقع ترکیب دو رویکرد جعبه-سفید و جعبه-سیاه هستند [۱۳-۱۵]. به عنوان نمونه، در [۱۶]، نویسندگان یک روش برای معادل‌سازی دینامیکی ریزشبکه شامل منابع پیل سوختی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد داده‌اند. در [۱۷]، نویسندگان با استفاده از یک رویکرد جعبه-خاکستری و داده‌های اندازه‌گیری، مدار معادلی برای یک ریزشبکه که شامل منابع تولید پراکنده مبتنی بر ژنراتور سنکرون هستند ارائه داده‌اند. البته در این مقاله صرفاً مطالعات سیگنال کوچک بررسی شده است.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، در این مقاله یک مدار معادل دینامیکی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه بالادست ارائه شده است. ریزشبکه موردنظر شامل منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و جبران‌ساز ایستای توان راکتیو<sup>۳</sup> است. مدل معادل پیشنهادی به صورت مدار الکتریکی بوده که شامل منبع تولید پراکنده معادل، عنصر FACTS معادل، بار معادل و امپدانس معادل است. لذا، نواقص مربوط به مطالعات پیشین که اغلب مدار معادل صرفاً ریاضی را پیشنهاد داده بودند ندارد و با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده خواهد شد که مدار معادل پیشنهادی در نقاط کار مختلف و در مواجهه با اغتشاشات متفاوت معتبر خواهد بود. به‌منظور تخمین پارامترهای





مدار معادل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در نتیجه می‌توان گفت که رویکرد معادل‌سازی در این مقاله به صورت جعبه-خاکستری خواهد بود. نوآوری‌های این مطالعه به شرح زیر است:

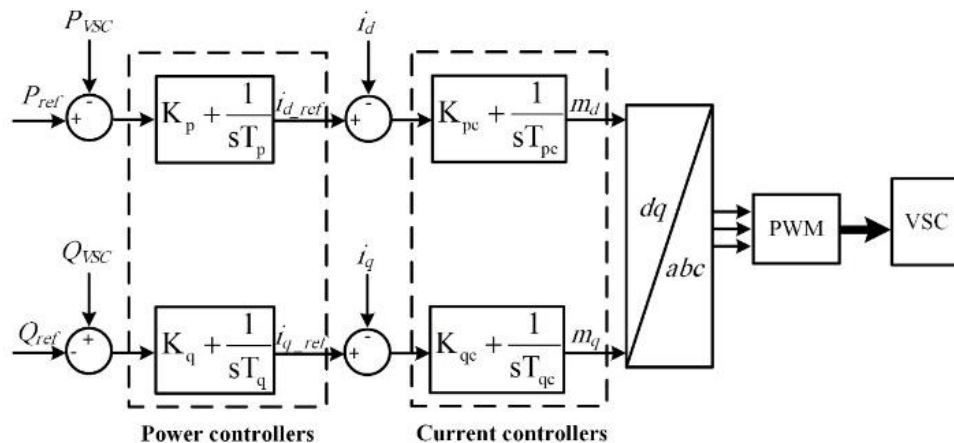
- ارائه یک مدار معادل برای ریزشبهه‌ای که هم‌زمان شامل منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز ایستای توان راکتیو است.
- ارائه یک مدار معادل یکپارچه که منابع تولید پراکنده و عناصر FACTS را هم‌زمان مدل می‌کند. این مدار معادل شامل عناصر فیزیکی از جمله، مبدل معادل، کنترل‌کننده‌های معادل، مقاومت، راکتانس و بار معادل است. در مطالعات پیشین، مدارات معادل غالباً یک مدل صرفاً ریاضی بوده‌اند.
- با توجه به مورد دوم، مدار معادل پیشنهادی برای نقاط کاری مختلف و رخدادهایی از جمله تغییر مرجع‌های توان و خطاهای اتصال کوتاه معتبر خواهد بود.

ادامه مقاله با عناوین زیر ارائه خواهد شد: در بخش دوم مدل‌سازی اجزاء ریزشبهه بیان خواهد شد. در بخش سوم مدار معادل پیشنهادی و فرایند معادل‌سازی توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و بحث در مورد نتایج ارائه می‌شود و بخش آخر نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

## ۲- مدل‌سازی اجزاء ریزشبهه

### ۲-۱- مدل‌سازی منابع تولید پراکنده اینورتری

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، هدف این مقاله معادل‌سازی دینامیکی ریزشبهه‌ی متصل به شبکه است. لذا، کلیه مبدل‌های مربوط به منابع تولید پراکنده به صورت PQ کنترل می‌شوند. از دو حلقه کنترل توان و کنترل جریان برای این منظور استفاده شده است. مطابق شکل (۱)، کنترل‌کننده اول با مقایسه سیگنال مرجع توان (اکتیو/راکتیو) با مقادیر اندازه‌گیری شده، مرجع جریان را می‌سازد و سپس کنترل‌کننده جریان، جریان خروجی مبدل را بر اساس این مرجع تنظیم می‌کند. در نهایت بر اساس خروجی کنترل‌کننده‌های جریان، سیگنال مدولاسیون به‌منظور کلیدزنی مبدل تولید می‌شود.



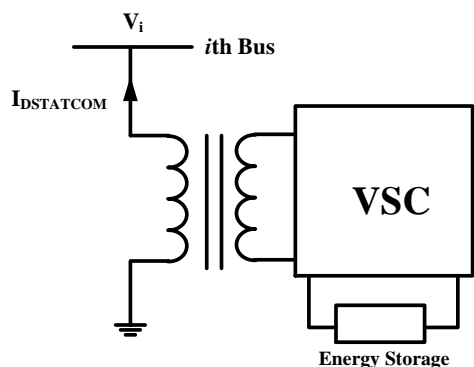
شکل (۱): حلقه‌های کنترل توان منابع تولید پراکنده اینورتری

### ۲-۲- مدل‌سازی جبران‌سازهای ایستای توان راکتیو

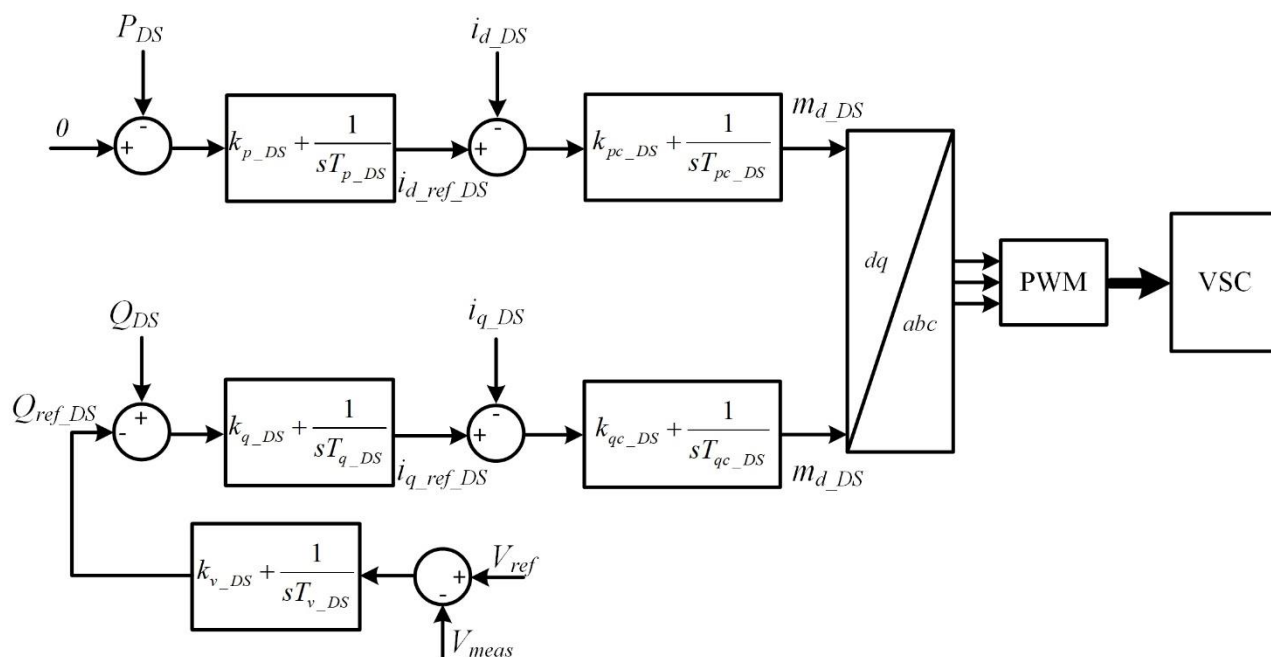
جبران‌ساز ایستا به‌عنوان یک عنصر موازی که به یک مبدل منبع ولتاژ<sup>۴</sup> متصل است به طور فزاینده‌ای در مباحث کیفیت توان به کار می‌رود. در شرایط اضافه‌بار و افت ولتاژ، ولتاژ باسی که جبران‌ساز به آن متصل است با تزریق جریان تنظیمی به سیستم می‌تواند تنظیم شود [۱۸]. این عنصر علاوه بر تزریق توان راکتیو به شبکه، در شرایط اضافه ولتاژ قابلیت جذب توان راکتیو به‌منظور تثبیت ولتاژ را نیز دارد. در واقع جبران‌ساز ایستا یک مبدل منبع ولتاژی با کلیدزنی سه‌فاز با مدولاسیون عرض پالس<sup>۵</sup> است که شامل یک لینک DC خازنی یا یک منبع انرژی DC است. این عنصر معمولاً به‌وسیله ترانسفورماتور کوپلینگ به شبکه توزیع متصل می‌شود [۱۹]. یک جبران‌ساز ایستا می‌تواند مانند منبع ولتاژ سنکرون با زاویه و اندازه ولتاژ کار کند که از این ویژگی برای تصحیح ولتاژ و ضریب توان بهره



می‌گیرند. شکل (۲) یک باس را در شبکه توزیع نشان می‌دهد که جبران‌ساز ایستا به آن متصل شده است. همچنین در شکل (۳)، حلقه‌های کنترلی جبران‌ساز ایستا نمایش داده شده است. به طور مشخص چون این تجهیز در کنترل ولتاژ و توان راکتیو مشارکت دارد، مقدار مرجع توان اکتیو صفر لحاظ می‌شود. در حلقه کنترل ولتاژ ابتدا ولتاژ باس جبران‌ساز با مقدار مرجع مقایسه شده، سپس با توجه به اختلاف این دو مقدار مرجع توان راکتیو ساخته می‌شود. در مرحله بعد توان راکتیو خروجی مبدل جبران‌ساز ایستا با این مرجع مقایسه شده و در نهایت ضریب مدولاسیون  $m_q$  ساخته خواهد شد.



شکل (۲): نمونه یک DSTATCOM متصل به باس  $i$  ام

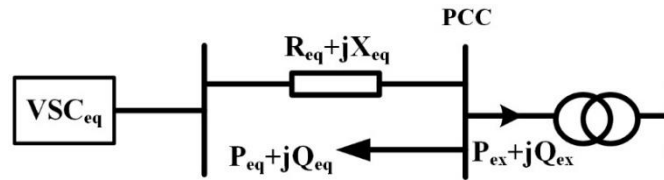


شکل (۳): حلقه‌های کنترل توان و ولتاژ DSTATCOM

### ۳- مدار معادل پیشنهادی و فرایند معادل‌سازی

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در این مطالعه ریزش‌بکه تحت مطالعه به صورت متصل به شبکه در نظر گرفته می‌شود. این ریزش‌بکه شامل تعدادی منابع تولید پراکنده اینورتری، جبران‌ساز ایستای توان راکتیو، بار و خط خواهد بود. مدار معادل پیشنهادی برای چنین ریزش‌بکه‌ای در شکل (۴) نمایش داده شده است. سه عنصر معادل در این مدار معادل قرار دارند که روی هم رفته رفتاری معادل با ریز شبکه اصلی را ارائه خواهند داد.





شکل (۴): مدار معادل پیشنهادی

 ۱- مبدل منبع ولتاژی معادل ( $VSC_{eq}$ ):

این مبدل به عنوان عنصری معادل برای منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا استفاده می‌شود. با توجه به شکل‌های (۱) و (۳)، منابع تولید پراکنده به صورت PQ کنترل می‌شوند و ورودی حلقه‌های کنترلی آن‌ها مراجع توان اکتیو و راکتیو خواهد بود. اما جبران‌سازهای ایستا فقط در تولید توان راکتیو مشارکت دارند. لذا، حلقه‌های کنترلی این مبدل معادل به گونه‌ای طراحی می‌شود که در حلقه کنترل توان راکتیو هم اثر جبران‌سازهای ایستا (کنترل ولتاژ تا سقف ظرفیتی آن‌ها) و هم اثر منابع تولید پراکنده (تولید توان راکتیو به اندازه مرجع ورودی) دیده شود. حلقه‌های کنترلی پیشنهادی برای این منظور در شکل (۵) نمایش داده شده است. این حلقه‌ها از ۴ قسمت A، B، C و D تشکیل شده است. قسمت A معادل حلقه کنترل توان اکتیو منابع تولید پراکنده خواهد بود.  $P_{VSC\_eq}$  از خروجی مبدل معادل شکل (۴) اندازه‌گیری خواهد شد و سیگنال مرجع توان از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{ref\_eq} = \sum_{i=1}^{N_{VSC}} P_{ref\_i} \quad (1)$$

قسمت B و C روی هم معادل حلقه کنترل توان راکتیو منابع تولید پراکنده خواهند بود.

جدول (۱): واژه نامه

نماد	توضیح
$P_{VSC}, Q_{VSC}$	توان خروجی اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده اینورتری
$P_{ref}, Q_{ref}$	مرجع توان اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده اینورتری
$K_p, T_p$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده توان اکتیو منبع تولید پراکنده اینورتری
$K_{pc}, T_{pc}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده جریان محور d منبع تولید پراکنده اینورتری
$K_q, T_q$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده توان راکتیو منبع تولید پراکنده اینورتری
$K_{qc}, T_{qc}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده جریان محور q منبع تولید پراکنده اینورتری
$i_d, i_q$	جریان محور d و q خروجی منبع تولید پراکنده اینورتری
$i_{d\_ref}, i_{q\_ref}$	مرجع جریان محور d و q منبع تولید پراکنده اینورتری
$m_d, m_q$	ضرایب مدولاسیون محور d و q منبع تولید پراکنده اینورتری
$P_{DS}, Q_{DS}$	توان خروجی اکتیو و راکتیو جبران‌ساز ایستا
$Q_{ref\_DS}$	مرجع توان راکتیو جبران‌ساز ایستا
$K_{p\_DS}, T_{p\_DS}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده توان اکتیو جبران‌ساز ایستا
$K_{pc\_DS}, T_{pc\_DS}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده جریان محور d جبران‌ساز ایستا
$K_{q\_DS}, T_{q\_DS}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده توان راکتیو جبران‌ساز ایستا
$K_{qc\_DS}, T_{qc\_DS}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده جریان محور q جبران‌ساز ایستا
$K_{v\_DS}, T_{v\_DS}$	ضریب تناسبی و ثابت زمانی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده ولتاژ جبران‌ساز ایستا
$i_{d\_DS}, i_{q\_DS}$	جریان محور d و q خروجی جبران‌ساز ایستا
$i_{d\_ref\_DS}, i_{q\_ref\_DS}$	مرجع جریان محور d و q جبران‌ساز ایستا
$m_{d\_DS}, m_{q\_DS}$	ضرایب مدولاسیون محور d و q جبران‌ساز ایستا
$S_{VSC}, S_{DS}$	ظرفیت نامی هر منبع تولید پراکنده و جبران‌ساز ایستا
$N_{VSC}, N_{DS}$	تعداد منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا
$P_{ex\_DMG}, Q_{ex\_DMG}$	توان‌های اکتیو و راکتیو تبدیلی ریزشبهک اصلی با شبکه بالادست
N	تعداد نمونه‌های موجود در هر بردار

از خروجی مبدل معادل شکل (۴) اندازه‌گیری خواهد شد و سیگنال مرجع توان از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{ref\_eq} = \sum_{i=1}^{N_{VSC}} Q_{ref\_i} \quad (2)$$

قسمت D و C روی هم معادل حلقه کنترل ولتاژ جبران‌سازهای ایستا خواهند بود. ولتاژ مرجع برابر با 1 pu خواهد بود. در واقع در این مدار معادل یک مبدل داریم که بخشی از توان راکتیو تولیدی آن معادل منابع تولید پراکنده و بخش دیگر آن معادل توان جبران‌سازهای ایستا در ریزشبه اصلی است. لذا ظرفیت این مبدل معادل باید به صورت زیر در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردد:

$$S_{VSCeq} = \sum_{i=1}^{N_{VSC}} S_{VSC\_i} + \sum_{i=1}^{N_{DS}} S_{DS\_i} \quad (3)$$

۲- امپدانس معادل  $(R_{eq} + jX_{eq})$ :

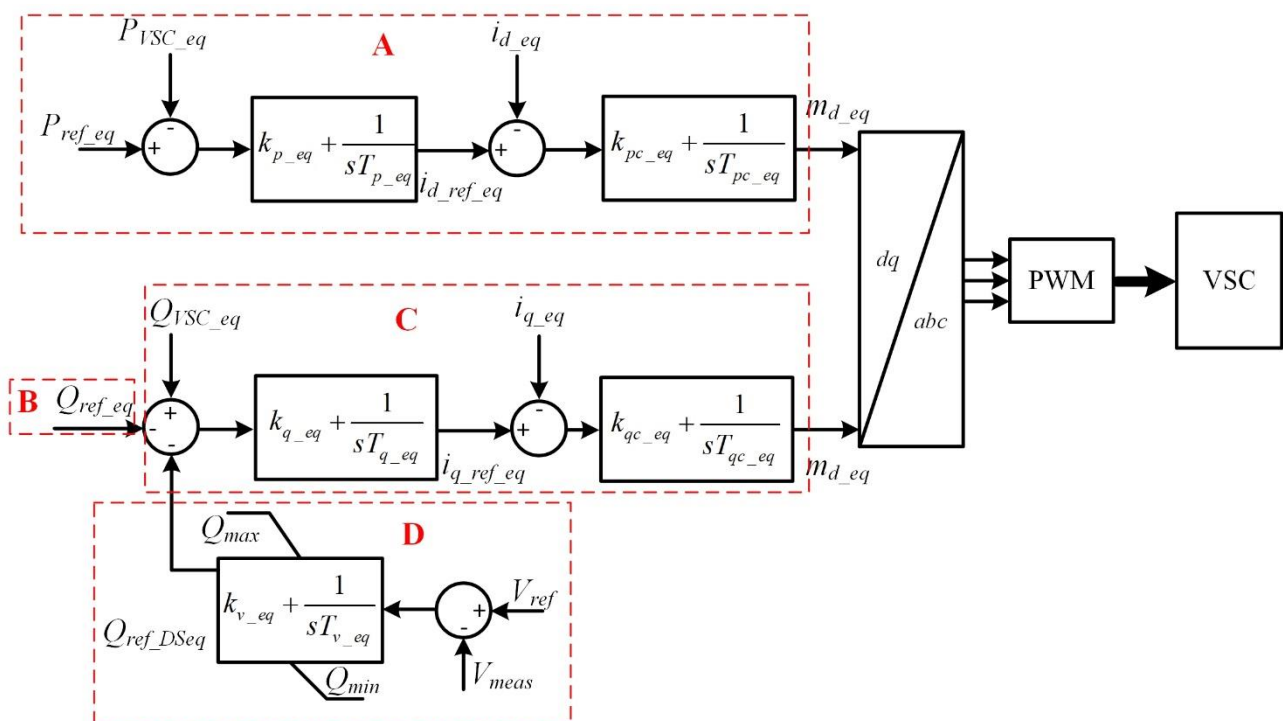
این امپدانس معادل جایگزین کلیه امپدانس‌های مقاومتی-سلفی موجود در فیدهای ریزشبه اصلی خواهد بود.

۳- بار معادل  $(P_{eq} + jQ_{eq})$ :

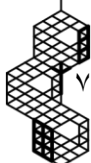
این بار معادل جایگزین کلیه بارهای موجود در ریزشبه اصلی خواهد بود. لازم به ذکر است که در این مطالعه کلیه بارها به صورت توان ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به مدار معادل شکل (۴)، فرایند معادل‌سازی طبق مراحل زیر انجام خواهد شد:

**مرحله اول:** ریزشبه اصلی (Detailed MG) به صورت متصل به شبکه بالادست در نرم‌افزار DigSILENT پیاده‌سازی می‌شود. به ازای یک نقطه کار مشخص، توان‌های تبدیلی این ریزشبه با شبکه بالادست ( $P_{ex\_DMG\_0}$  و  $Q_{ex\_DMG\_0}$ ) و همچنین توان‌های تولیدی منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا ( $P_{VSC}$ ،  $Q_{VSC}$  و  $Q_{DS}$ ) در مرکز کنترل ریزشبه ضبط خواهند شد.



شکل (۵): حلقه‌های کنترلی پیشنهادی برای مبدل معادل







علامت مثبت برای توان‌های تبادلی نشان‌دهنده تزریق توان به شبکه بالادست و مقادیر منفی نشان‌دهنده جذب توان از شبکه بالادست خواهد بود. با استفاده از این مقادیر و رابطه زیر، تخمین اولیه‌ای از کل بار موجود در ریزشبكة به دست می‌آوریم:

$$P_{eq0} = \sum_{i=1}^{N_{VSC}} P_{VSC\_i} - P_{ex\_DMG\_0} \quad (4)$$

$$Q_{eq0} = \sum_{i=1}^{N_{VSC}} Q_{VSC\_i} + \sum_{i=1}^{N_{DS}} Q_{DS\_i} - Q_{ex\_DMG\_0}$$

**مرحله دوم:** از طریق مرکز کنترل ریزشبكة اصلی، فرمان‌هایی در زمان‌های دلخواه به مراجع توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده اعمال می‌شود. در اثر این تغییرات چون نقطه کار ریزشبكة تغییر می‌کند، جبران‌سازهای ایستا پاسخ‌های لازم را به صورت خودکار خواهند داد؛ لذا نیازی به اعمال تغییر در مرجع جبران‌سازهای ایستا نخواهد بود. در اثر اعمال این تغییرات، سیگنال‌های توان‌های تبادلی ریزشبكة با شبکه بالادست ( $P_{ex\_DMG}$  و  $Q_{ex\_DMG}$ ) ضبط خواهند شد و به عنوان سیگنال معیار در مرحله بعدی استفاده خواهند شد. همچنین به‌منظور تطابق بیشتر با شرایط عملی و واقعی، به سیگنال‌های معیار، نویز گوسی سفید نیز اضافه می‌شود و در مراحل بعد از سیگنال آلوده به نویز استفاده خواهد شد.

**مرحله سوم:** مدل معادل ریزشبكة مطابق شکل (۴) و با استفاده از حلقه‌های کنترلی شکل (۵)، نرم‌افزار DIGSILENT پیاده‌سازی می‌شود. معادل فرمان‌هایی که در مرحله دوم به مراجع توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده ریز شبکه اصلی اعمال شده بود، در این مرحله به مبدل معادل اعمال می‌شود. در اثر اعمال این تغییرات، سیگنال‌های توان‌های تبادلی ریزشبكة معادل با شبکه بالادست ( $P_{ex}$  و  $Q_{ex}$ ) ضبط خواهند شد و به عنوان سیگنال مقایسه استفاده خواهند شد.

هدف اصلی این معادل‌سازی این است که سیگنال‌های مقایسه در این مرحله رفتاری کاملاً منطبق بر سیگنال‌های معیار در مرحله دوم داشته باشند. لذا، باید پارامترهای مدار معادل به گونه‌ای تخمین زده شوند که این اتفاق رخ دهد. پارامترهایی که در مدار معادل باید تخمین زده شوند به شرح زیر خواهند بود:

- ضرایب تناسبی و ثابت زمانی‌های انتگرال‌گیر کنترل‌کننده‌های شکل (۵) (۱۰ پارامتر)
- امپدانس معادل شکل (۴)  $R_{eq} + jX_{eq}$  (۲ پارامتر)
- بار معادل شکل (۴)  $P_{eq} + jQ_{eq}$  (۲ پارامتر)

نکته حائز اهمیت در فرایند تخمین پارامتر مربوط به بار معادل است. همان‌طور که در مرحله ۱ ذکر شد با استفاده از داده‌های نقطه کار، یک تخمین اولیه از بار معادل مطابق با رابطه (۴) به دست آمده است. اما باید دقت شود که چون این تخمین اولیه برابر با اختلاف توان تولیدی داخل ریز شبکه و توان تبادلی با شبکه بالادست است، لذا مقدار آن هم شامل بارهای موجود در ریزشبكة و هم تلفات خطوط می‌باشد. در مدار معادل پیشنهادی ما یک امپدانس معادل خطوط هم داریم و تلفات معادل‌سازی خواهد شد، پس باید به طریقی سهم تلفات خطوط را از رابطه (۴) کم کنیم. برای این منظور در این مقاله پیشنهاد شده است که دو ضریب اصلاحی  $n_p$  و  $n_q$  که مقدارشان بین ۰ تا ۱ می‌تواند باشد مطابق رابطه زیر اعمال شوند. در نهایت بجای تخمین مستقیم  $P_{eq}$  و  $Q_{eq}$ ، به تخمین این دو ضریب می‌پردازیم.

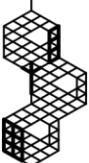
$$P_{eq} = n_p \times P_{eq0} \quad (5)$$

$$Q_{eq} = n_q \times Q_{eq0}$$

**مرحله چهارم:** با استفاده الگوریتم ژنتیک و تابع هدف رابطه (۶)، ۱۴ پارامتر ذکر شده در مرحله قبل تخمین زده می‌شوند.

$$O.F.: \min \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{ex\_DMG\_i} - P_{ex\_i})^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{ex\_DMG\_i} - Q_{ex\_i})^2} \right\} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، اندیس  $i$  نشان دهنده نمونه  $N$ ام از بردار مربوطه است.



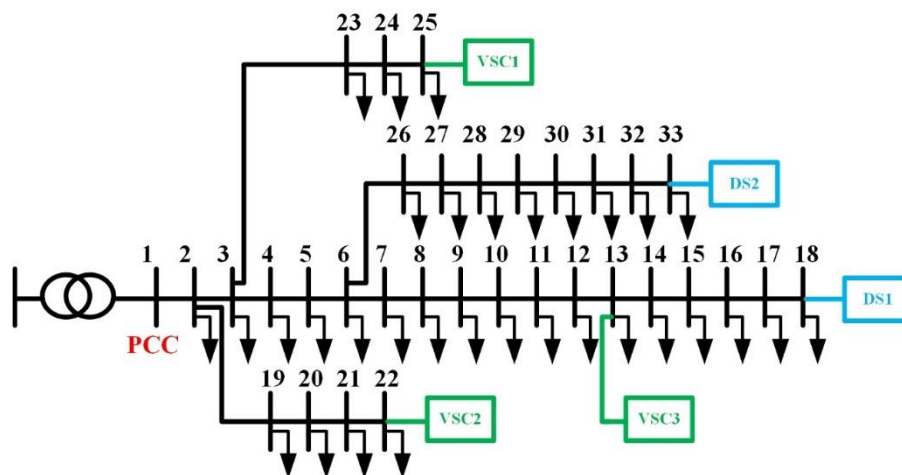


#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

سیستم انتقال مورد استفاده در این مطالعه که به عنوان شبکه بالادست استفاده می‌شود شبکه ۹ باس IEEE است که اطلاعات آن در [۲۰] موجود است. برای ریزشبکه اصلی تحت مطالعه از شبکه ۳۳ باس IEEE با ولتاژ ۱۲.۶۶ کیلو ولت استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌ها این شبکه توزیع به باس شماره ۵ از شبکه انتقال ۹ باس و از طریق یک ترانس ۲۳۰/۱۲.۶۶ کیلو ولت متصل شده است. شبکه ۳۳ باس در شرایط عادی باری معادل ۳/۷۱۵ مگا وات و ۲/۳ مگا ولت آمپر راکتیو از شبکه بالادست می‌کشد. به‌منظور تشکیل ریزشبکه تحت مطالعه، سه عدد منبع تولید پراکنده در باس‌های ۱۳، ۲۲ و ۲۵ و دو عدد جبران‌ساز ایستا در باس‌های ۱۸ و ۳۳ مطابق شکل (۶) به شبکه ۳۳ باس اضافه شده است. مشخصات منابع تولید پراکنده و جبران‌سازها در جدول (۲) آورده شده است. به‌منظور جمع‌آوری داده برای انجام فرایند معادل‌سازی و تخمین پارامتر، نقطه کار زیر تحت عنوان آزمایش ۱ برای ریزشبکه اصلی در نظر گرفته شده است:

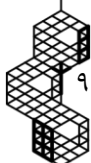
- مرجع توان اکتیو و راکتیو به ترتیب ۰/۵ و صفر پیرونیت برای منابع تولید پراکنده
- مرجع ولتاژ ۱ پیرونیت برای جبران‌ساز ایستا

در این نقطه کار، در ثانیه ۱۰ مرجع توان اکتیو منابع تولید پراکنده از ۰/۵+ به ۰/۸+ پیرونیت تغییر می‌کند و در ثانیه ۱۵، مرجع توان راکتیو آن‌ها از صفر به ۰/۲+ تغییر می‌کند. در شکل (۷) پاسخ خروجی توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده به این تغییرات نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۷) پاسخ توان راکتیو دو جبران‌ساز ایستای موجود در ریزشبکه نیز نمایش داده شده است. در لحظات اول شبیه‌سازی حلقه کنترل ولتاژ عمل کرده و جبران‌سازها با تزریق توان راکتیو سعی در تثبیت ولتاژ داشته‌اند و پس از آن که توان راکتیو تولیدی‌شان به ۱ پیرونیت رسیده است در همان مقدار (ظرفیت نامی) ثابت مانده‌اند.



شکل (۶): ریزشبکه اصلی مبتنی بر شبکه ۳۳ باس IEEE

در این آزمایش، سیگنال‌های توان اکتیو و راکتیو تبادلی ریزشبکه اصلی با شبکه بالادست تحت عنوان  $P_{ex\_DMG}$  و  $Q_{ex\_DMG}$  ضبط می‌شوند. سپس مدار معادل شکل (۴) در نرم‌افزار پیاده‌سازی می‌شود. طبق رابطه (۳) و اطلاعات جدول (۲)، ظرفیت نامی مبدل معادل برابر با ۰/۸۶ مگا ولت آمپر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس آزمایش ۱، متناظر با ریزشبکه اصلی و در زمان‌های مشابه، تغییرات نقطه کار به این مبدل نیز اعمال خواهد شد و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و تابع هدف (۶) فرایند تخمین پارامتر انجام می‌شود. نتایج تخمین پارامتر در جدول (۳) آورده شده است. با استفاده از پارامترهای به دست آمده، مدار معادل شکل (۴) شبیه‌سازی شده است و نتایج سیگنال‌های تبادلی توان اکتیو و راکتیو در ریزشبکه اصلی و مدار معادل پیشنهادی با هم مقایسه شده‌اند که نتایج آن در شکل (۸) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که همان‌طور که در بخش ۳ ذکر شده بود، سیگنال‌های مربوط به ریزشبکه اصلی همراه با نویز هستند تا شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، مدار معادل پیشنهادی به خوبی رفتار ریزشبکه اصلی را تقلید کرده است و دقت بسیار بالایی دارد. به‌منظور بررسی عددی دقت محاسبات از شاخص  $RMSE$  مطابق با رابطه زیر استفاده شده است و نتایج آن در جدول (۴) آورده شده است. شاخص  $RMSE$  دقت بالا و خطای کم مدار معادل را نشان می‌دهد.





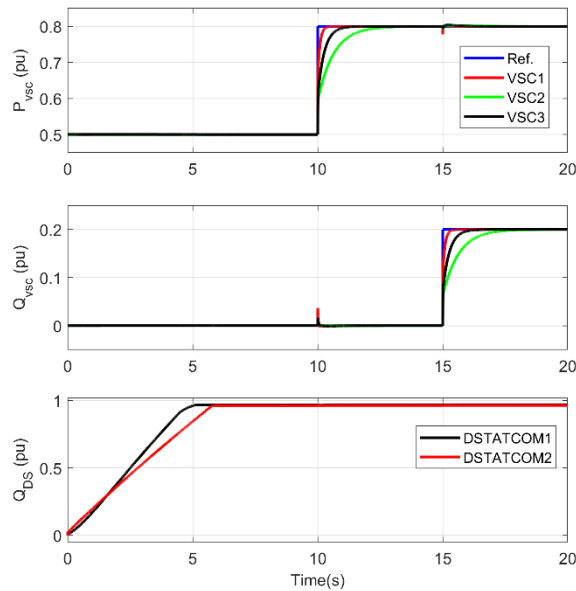
جدول (۲): مشخصات منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا

	$S$ (MVA)	$K_p/$ $K_{p\_DS}$	$T_p/$ $T_{p\_DS}$	$K_{pc}/$ $K_{pc\_DS}$	$T_{pc}/$ $T_{pc\_DS}$	$K_q/$ $K_{q\_DS}$	$T_q/$ $T_{q\_DS}$	$K_{qc}/$ $K_{qc\_DS}$	$T_{qc}/$ $T_{qc\_DS}$	$K_v$	$T_v$
VSC1	0.06	1.20	0.05	0.20	0.01	1.20	0.05	0.20	0.01	-	-
VSC2	0.08	0.45	0.20	0.35	0.02	0.45	0.20	0.35	0.02	-	-
VSC3	0.12	0.60	0.10	0.50	0.03	0.60	0.10	0.50	0.03	-	-
DS1	0.30	0.40	0.20	0.30	0.02	0.40	0.20	0.30	0.02	0.30	0.10
DS2	0.30	0.80	0.05	0.25	0.15	0.80	0.05	0.25	0.15	0.45	0.2

$$RMSE_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ex\_DMG\_i} - P_{ex\_i})^2}{N}} \times 100$$

$$RMSE_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{ex\_DMG\_i} - Q_{ex\_i})^2}{N}} \times 100$$

(۷)

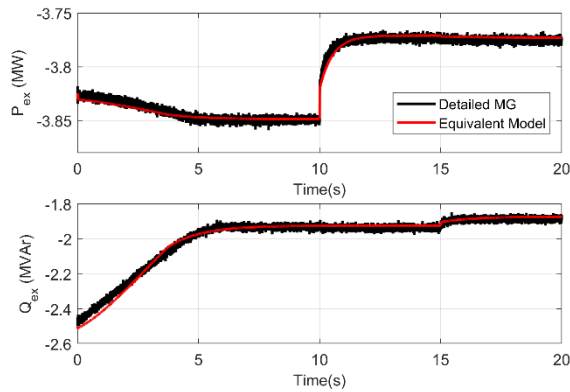


شکل (۷): پاسخ خروجی منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا در آزمایش ۱

جدول (۳): پارامترهای تخمین زده شده برای مدار معادل پیشنهادی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$K_{p\_eq}$	0.602 (pu)	$T_{qc\_eq}$	0.062 (s)
$T_{p\_eq}$	0.198 (s)	$K_{v\_eq}$	0.351 (pu)
$K_{pc\_eq}$	0.293 (pu)	$T_{v\_eq}$	0.054 (s)
$T_{pc\_eq}$	0.047 (s)	$R_{eq}$	1.464 ( $\Omega$ )
$K_{q\_eq}$	0.583 (pu)	$X_{eq}$	1.083 ( $\Omega$ )
$T_{q\_eq}$	0.482 (s)	$n_p$	0.953
$K_{qc\_eq}$	0.300 (pu)	$n_q$	0.958





شکل (۸): مقایسه توان‌های تبدلی ریزشکه اصلی و مدار معادل پیشنهادی در آزمایش ۱

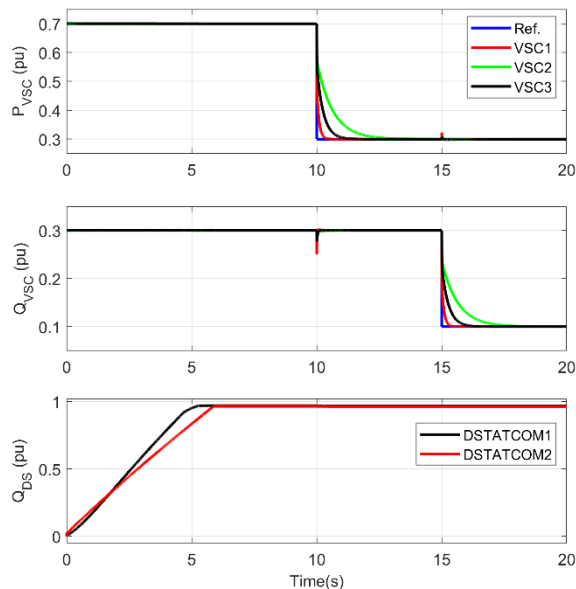
به‌منظور صحت‌سنجی مدار معادل به دست آمده سه آزمایش دیگر نیز انجام شده است. در این آزمایش‌ها از پارامترهای به دست آمده توسط آزمایش ۱ استفاده شده است اما شرایط نقطه کار و رخدادهای جدیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا ثبات مدل به دست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین علاوه بر آزمایش‌های تغییر نقطه کار، در آزمایش ۴، خطای اتصال کوتاه نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا نشان داده شود مدار معادل پیشنهادی در برابر اغتشاشات با دامنه بزرگ نیز دقت بالایی از خود نشان می‌دهد. یکی از مزایای اصلی مدار معادل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های معادل صرفاً ریاضی که در مطالعات قبلی انجام شده بود این است که برای هرگونه اغتشاش با هر دامنه‌ای دقت بالایی دارد. اطلاعات این سه آزمایش به شرح زیر است:

آزمایش ۲: نقطه کار منابع تولید پراکنده  $+0/7$  و  $+0/3$  پریونیت به ترتیب برای توان اکتیو و راکتیو و تغییر آن‌ها به  $+0/1$  و  $+0/3$ .

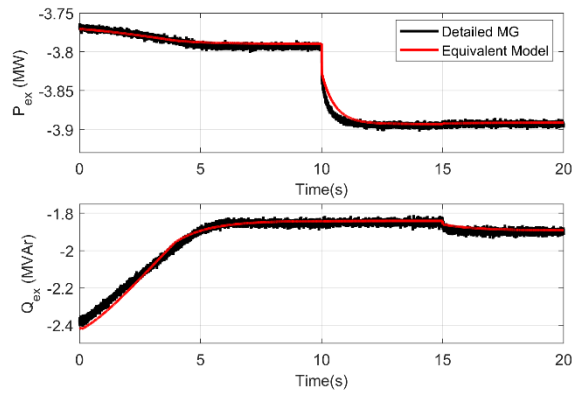
آزمایش ۳: نقطه کار منابع تولید پراکنده  $+0/9$  و  $+0/1$  پریونیت به ترتیب برای توان اکتیو و راکتیو و تغییر آن‌ها به  $+0/4$  و  $+0/5$ .

آزمایش ۴: نقطه کار منابع تولید پراکنده  $+0/9$  و  $+0/1$  پریونیت و اعمال خطای اتصال کوتاه سه فاز در خط ۵ از شبکه بالادست (شبکه ۹ باس) در ثانیه ۱۰ و رفع خطا در ثانیه ۱۵/۱۰.

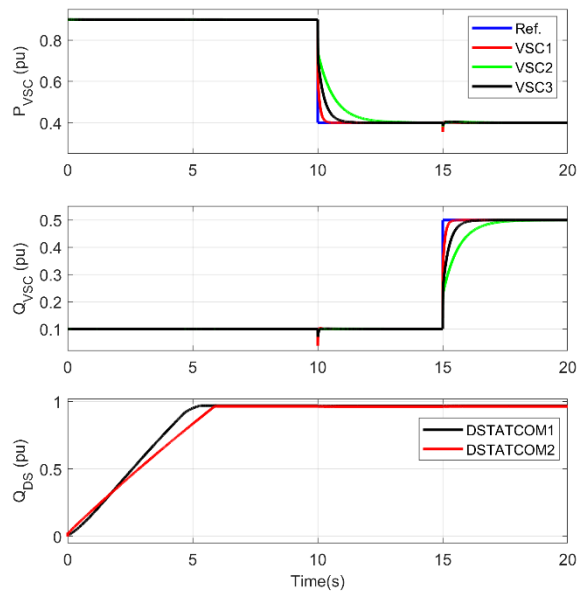
نتایج مربوط به این ۳ آزمایش در شکل‌های (۹) الی (۱۴) نمایش داده شده است.



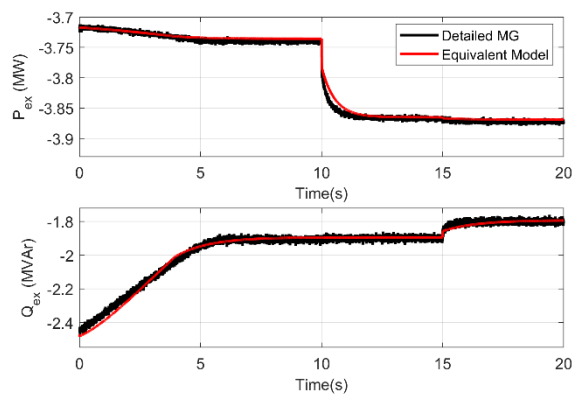
شکل (۹): پاسخ خروجی منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا در آزمایش ۲



شکل (۱۰): مقایسه توان‌های تبدیلی ریزشبکه اصلی و مدار معادل پیشنهادی در آزمایش ۲

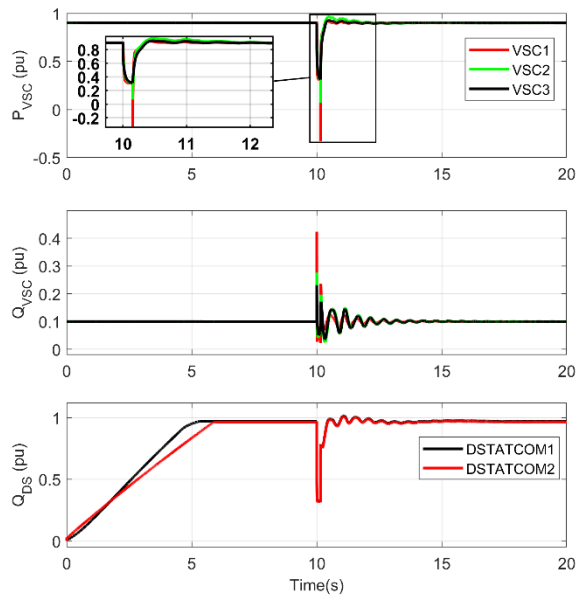


شکل (۱۱): پاسخ خروجی منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستای در آزمایش ۳

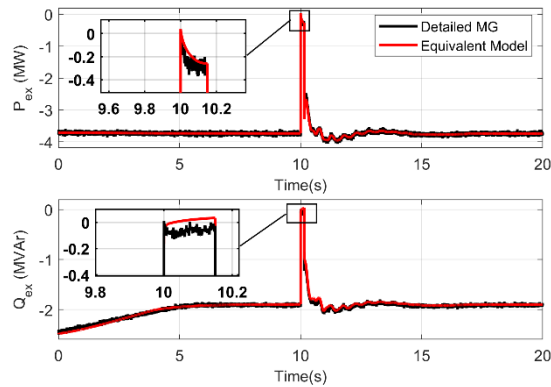


شکل (۱۲): مقایسه توان‌های تبدیلی ریزشبکه اصلی و مدار معادل پیشنهادی در آزمایش ۳





شکل (۱۳): پاسخ خروجی منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای ایستا در آزمایش ۴



شکل (۱۴): مقایسه توان‌های تبادلی ریزشبه اصلی و مدار معادل پیشنهادی در آزمایش ۴

جدول (۴): خطای RMSE برای آزمایش‌های انجام شده

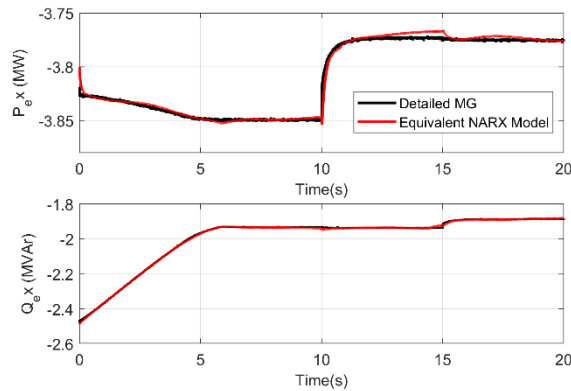
آزمایش	مقدار خطا	مقدار خطا
	RMSE <sub>P</sub>	RMSE <sub>Q</sub>
۱	۰/۲۶۶۸	۱/۷۹۱۳
۲	۰/۳۸۸۶	۱/۷۳۸۶
۳	۰/۴۸۱۴	۱/۶۲۵۰
۴	۱/۶۸۲۴	۲/۴۶۰۱

همان‌طور که از شکل‌های (۱۰)، (۱۲) و (۱۴) مشخص است، مدار معادل پیشنهادی در شرایط کاری مختلف شامل نقاط کار مختلف، تغییرات مرجع توان و همچنین خطای اتصال کوتاه سه فاز توانسته است رفتار ریزشبه اصلی را تقلید کند. همچنین بر اساس جدول (۴)، خطای رفتار مدار معادل نسبت به ریزشبه اصلی بسیار کم و قابل قبول است.

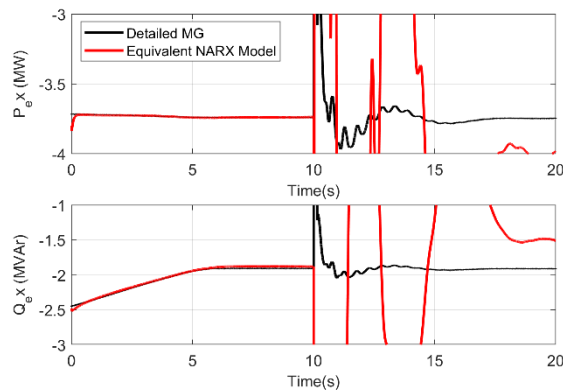
به‌منظور مقایسه مدل پیشنهادی با سایر مدل‌ها، معادل‌سازی جعبه-سیاه ریزشبه نیز به کمک یک شبکه برون‌زا خودپنداره غیرخطی<sup>۷</sup> انجام شده است. در این مدل دو ورودی داریم و دو خروجی. ورودی‌ها ولتاژ باس اتصال مشترک و جریان تبدیلی با شبکه بالا دست و خروجی‌ها نیز توان اکتیو و راکتیو تبادلی ریزشبه اصلی با شبکه بالا دست هستند. رگسورهای این مدل غیرخطی برای سیگنال‌های



ورودی از مرتبه ۳ و برای سیگنال‌های خروجی از مرتبه ۲ انتخاب شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایش ۱، مدل موردنظر شناسایی شده است که نتایج آن در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود دقت مدل شناسایی شده قابل قبول است. اما زمانی که به‌منظور صحت سنجی آن، داده‌های ورودی آزمایش ۴ که خطای اتصال کوتاه است به آن داده می‌شود، مطابق شکل (۱۶) خروجی‌ها کاملاً ناپایدار می‌شوند. لذا، در این شرایط برتری کامل مدار معادل پیشنهادی که برای تمامی رخدادها از جمله خطای اتصال کوتاه (شکل (۱۶)) نیز دقت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد کاملاً مشهود است.



شکل (۱۵): مقایسه توان‌های تبادلی ریزشبهه اصلی و مدل معادل NARX در آزمایش ۱



شکل (۱۶): مقایسه توان‌های تبادلی ریزشبهه اصلی و مدل معادل NARX در آزمایش ۴

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدار معادل دینامیکی برای ریزشبهه‌های متصل به شبکه که دارای منابع تولید پراکنده اینورتری و جبران‌سازهای ایستای توان راکتیو هستند ارائه شد. مدار معادل پیشنهادی بر خلاف مطالعات پیشین، صرفاً یک مدل ریاضی نبوده و دارای ساختار و پارامترهای فیزیکی و قابل درک از جمله مقاومت، راکتانس، بار و ثابت زمانی است. همین تفاوت موجب شد تا مدار معادل به دست آمده در شرایط مختلف کاری از جمله نقاط کار مختلف و خطاهای اتصال کوتاه معتبر و دقیق باشد. دقت شبیه‌سازی‌ها با اجرای چهار آزمایش مختلف روی شبکه نمونه ۳۳ باس IEEE بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت.

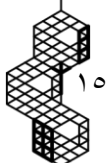
## مراجع

- [1] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*. Stevenage, U.K.: Inst. Eng. Technol, 2009.
- [2] M. H. Moradi, A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, and M. Abedini, "An efficient hybrid method for solving the optimal sitting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based





- on imperialist competitive algorithm and genetic algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 101–111, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.IJEPES.2013.06.023.
- [3] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, and M. Karrari, “A Novel Measurement-Based Dynamic Equivalent Model of Grid-Connected Microgrids,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 4, pp. 2032–2043, Apr. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2856852.
- [4] T. J. Donnelly, S. D. Pekarek, D. R. Fudge, and N. Zarate, “Thévenin equivalent circuits for modeling common-mode behavior in power electronic systems,” *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 163–172, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.2996029.
- [5] R. Podmore, “Identification of coherent generators for dynamic equivalents,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, no. 4, pp. 1344–1354, 1978, doi: 10.1109/TPAS.1978.354620.
- [6] A. Ishchenko, J. M. A. Myrzik, and W. L. Kling, “Dynamic equivalencing of distribution networks with dispersed generation using Hankel norm approximation,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 1, no. 5, pp. 818–825, 2007, doi: 10.1049/IET-GTD:20070028.
- [7] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, M. Karrari, and N. Moaddabi, “Simultaneous Parameter Identification of Synchronous Generator and Excitation System Using Online Measurements,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1230–1238, May 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2478971.
- [8] P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, and G. K. Papagiannis, “Dynamic modeling of a microgrid using smart grid technologies,” *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2012, doi: 10.1109/UPEC.2012.6398460.
- [9] P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, P. Crolla, A. J. Roscoe, G. K. Papagiannis, and G. M. Burt, “Black-box dynamic equivalent model for microgrids using measurement data,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 5, pp. 851–861, May 2014, doi: 10.1049/IET-GTD.2013.0524.
- [10] M. Luzi, F. M. Frattale Mascioli, M. Paschero, and A. Rizzi, “A White-Box Equivalent Neural Network Circuit Model for SoC Estimation of Electrochemical Cells,” *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, vol. 31, no. 2, pp. 371–382, Feb. 2020, doi: 10.1109/TNNLS.2019.2901062.
- [11] C. Cai, H. Liu, Y. Tao, Z. Deng, W. Dai, and J. Chen, “Microgrid Equivalent Modeling Based on Long Short-Term Memory Neural Network,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23120–23133, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966238.
- [12] Y. Li, J. M. Guerrero, J. Yang, Y. Guan, G. Ma and J. Feng, “Dynamic equivalent modeling for black-box microgrid under multi-operating-point by using LSTM,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.01660.
- [13] J. V. Milanovic and S. Mat Zali, “Validation of equivalent dynamic model of active distribution network cell,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2101–2110, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2227844.
- [14] S. Mat Zali and J. V. Milanovic, “Generic model of active distribution network for large power system stability studies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3126–3133, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2233223.
- [15] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, and M. Karrari, “Small signal equivalent model of synchronous generator-based grid-connected microgrid using improved Heffron-Phillips model,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 108, pp. 263–270, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.IJEPES.2019.01.016.
- [16] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, and M. Karrari, “Equivalent model parameter estimation of grid-connected fuel cell-based microgrid,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 6, p. e2540, Jun. 2018, doi: 10.1002/ETEP.2540.
- [17] W. Hu, Z. Wu, and V. Dinavahi, “Dynamic Analysis and Model Order Reduction of Virtual Synchronous Machine Based Microgrid,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106585–106600, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001076.
- [18] P. S. Sensarma, K. R. Padiyar, and V. Ramanarayanan, “Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 259–264, Apr. 2001, doi: 10.1109/61.915492.
- [19] B. Blažič and I. Papič, “A new mathematical model and control of D-StatCom for operation under unbalanced conditions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 72, no. 3, pp. 279–287, Dec. 2004, doi: 10.1016/J.EPSR.2004.04.012.







- [20] M. Ojaghi, Z. Sudi, and M. Azari, "Local online adaptive technique for optimal coordination of overcurrent relays within high voltage substations," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 8, pp. 1810–1828, Aug. 2016, doi: 10.1002/ETEP.2183.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Flexible AC Transmission System
- <sup>2</sup> Point of common coupling
- <sup>3</sup> Static compensator
- <sup>4</sup> Voltage source converter
- <sup>5</sup> Pulse width modulation
- <sup>6</sup> Root-mean-square error
- <sup>7</sup> Nonlinear autoregressive exogenous (NARX)

