بررسی پایداری دینامیکی ریزشبکه با در نظر گرفتن مدل بار دینامیکی

علی اصغر قدیمی [۱]، محمد بیات[۲]، آرام مهدویان [۳]

۱. دانشیار دانشگاه اراک a-ghadimi@araku.ac.ir
۲. استادیار دانشگاه اراک H-baiat@araku.ac.ir
۳. دانشجوی کارشناسی‌ارشد دانشگاه اراک aram95mahdavian@gmail.com

چکیده

بهره‌برداری از ریزشبکه مستلزم طراحی مناسب کنترل‌کننده براساس مدل دقیق اجزا می‌باشد. در نظر گرفتن تمامی دینامیک‌های سیستم از شاخصه‌های یک مدل‌سازی کامل است که مقدمات یک طراحی موفق را فراهم خواهد کرد. استفاده از مدل دینامیکی برای بار، باعث می‌شود سیستمی با مانایی بسیار پایین مانند ریزشبکه را به صورتی مدل‌سازی نمود تا هیچ پدیده‌ی گذرا یا مانایی از نظر طراح دور نماند. در این مقاله، مدل سیگنال کوچک یک ریزشبکه‌ی اینورتری در حالت عملکرد جزیره‌ای با در نظر گرفتن مدل دینامیکی بار بدست آمده است. مدل بار دینامیکی مورد استفاده در این مقاله مدل بازیابی نمایی می باشد. در اینجا با بهره‌گیری از مکان ریشه‌ها و آنالیز حساسیت، پایداری ریزشبکه را در دو حالت شامل بار استاتیکی و دینامیکی بررسی خواهد شد. ابتدا معادلات کامل ریزشبکه بدست آمده، خطی‌سازی شده و سپس مدل فضای حالت تشکیل می‌شود و با بررسی مکان ریشه‌ها پایداری سیستم مورد قضاوت قرار می‌گیرد. در ادامه ریزشبکه‌ی مورد طراحی در محیط SIMULINK شبیه‌سازی شده و عملکرد آن در حضور دو نوع بار مورد اشاره بررسی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

ریزشبکه،مدل سیگنال کوچک،پایداری دینامیکی،مدل دینامیکی بار،مدل دینامیکی بازیابی نمایی بار،فروپاشی ولتاژ، منحنی توان-ولتاژ

۱–مقدمه

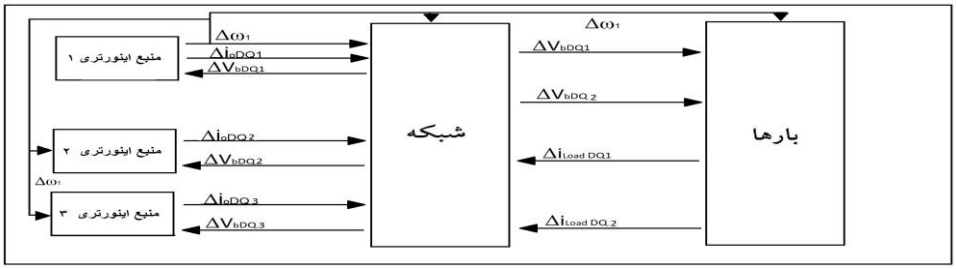
امروزه با افزایش مصرف انرژی و آلودگی‌های محیط زیستیِ مرتبط با آن، نیاز به منابع تجدیدپذیر و پاک به شدت احساس می شود. بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت پراکنده و نزدیک به بار، باعث می شود تا هزینه‌های انتقال و توزیع بسیار کاهش یابند، از طرفی پیچیدگی نیروگاه‌های با توانِ بالا را نیز ندارند "مجموعه‌ای از تولیدات پراکنده، شبکه و بارهای محلی که می‌توانند به شبکه‌ی برق سراسری متصل یا غیرمتصل باشند را ریزشبکه می‌نامند." ریزشبکه‌ها قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهند، اهمیّت وجود ریزشبکه‌ها را زمانی می‌توان به خوبی درک نمود که شبکه‌ی متداول و نیروگاه‌ها به هر دلیل اعم از شرایط فروپاشی شبکه یا شرایط نظامی حاد به مخاطره افتد، در این

مواقع وجود ریزشبکه‌ها به صورت پراکنده مراکز حساس و حیاتی را به گونه‌ای تامین می‌نماید تا تامین نیازهای اساسی وارد مرحله‌ی بحران نگردد. رشد قارچی ریزشبکه‌ها باعث می‌شود تا فروپاشی و قطع توان بارها بسیار سخت‌تر اتفاق افتد. ریزشبکه‌ها قابلیت اتصال یا عدم اتصال به شبکه را دارا می‌باشند، ریزشبکه‌ی جزیره‌ای اصطلاحی است که برای ریزشبکه‌های غیرمتصل به شبکه و در حالت کارکرد مستقل استفاده می‌شود.

تحقیقات فراوانی بر روی عملکرد ریزشبکه‌ها انجام گرفته است، مرجع [۲] تمامی پدیده‌های ممکن را بررسی و سپس الزامات حفاظتی و ساختاری ریز شبکه را بیان می‌کند. تولیدات پراکنده و منابع ذخیره‌ی انرژی و بارهای کنترل شده معمولاً به وسیله‌ی منابع ولتاژ اینورتری (VSI) به شبکه متصل می‌شوند [۳]. دلیل استفاده از این نوع ارتباط، انعطاف-پذیری عملکرد ریزشبکه با بکارگیری آن‌هاست. در [۶-۴] اثر روش‌های کنترلی بر اغتشاشات ممکن اعمال شده‌است، هرکدام از این مراجع با استفاده از کنترل‌کننده‌ی طراحی شده سعی در حذف اثر اغتشاش مورد نظر دارند. در [۷] به این موضوع می‌پردازد که مدل‌های دقیق بار در تحلیل پایداری ولتاژ، طراحی و کنترل سیستم‌های مختلف قدرت بسیار موثر است. اکثر مقالات از انواع منابع جریان مستقیم و ارتباط اینورتری به‌عنوان روش اتصال تولید پراکنده به شبکه و نهایتاً بار استفاده کرده‌اند [۹-۸]. مرجع [۱۰] بیان می‌دارد، منابع اینورتری به علّت پایین بودن مانایی و عدم وجود گشتاورهای سنکرون‌ساز کافی و پاسخ سریع این منابع به تقاضا، بایستی با احتیاط زیادی طراحی شوند تا در حالت عملکرد مستقل و متّصل به شبکه بتوانند به خوبی سیستم را در حالت سنکرون حفظ نمایند. انواع کنترل‌های مرسوم ریزشبکه در مرجع [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. روش کنترل‌کاهشی بر اساس نمودار کاهشی توان اکتیو- فرکانس و توان راکتیو- ولتاژ بنا شده‌است، این دو نمودار برای تقلیدِ رفتار گاورنر مولّدهای سنکرون بکار گرفته می‌شوند [۹]. با استفاده از کنترل کاهشی تقسیم بار دقیقی بین تولیدکنندگان مختلف بدست می‌آید [۱]. مرجع [۱۲] در سال ۲۰۱۷ به دسته‌بندی مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی بار پرداخته است و در ابتدا بر اهمیّت مدل‌های بار در مراجع [۷و۱۳] برای مطالعات پایداری ولتاژ پرداخته است. اکثر مقالات در زمینه‌ی ریزشبکه‌ها از مدل‌های استاتیکی و غالباً مدل بسیار ساده‌ی مقاومتی- اندوکتانسی استفاده شده است [۱و۹و۱۴]. مدل ZIP (متشکل از ۳ جمله برای امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت) بیشترین کاربرد را در بین مدل‌های استاتیکی داراست [۱۳]. در مرجع [۱۵] از بار فعّال استفاده شده است، مدل بار فعّال یک مقاومت و مداری برای کنترل جریان مستقیم بار می‌باشد، جریان متناوب توسط یک یکسوساز کنترل‌شده با حلقه‌های کنترل جریان و ولتاژ، به جریان مستقیم تبدیل می‌گردد. مدل دینامیکی دسته‌ای از مدل‌های بار است که در آن توان‌های اکتیو و راکتیو تابعی از ولتاژ و زمان هستند[۱۳]. در ۱۹۹۳ دیوید هیل به بررسی پدیده‌های گذرای سیستم پرداخت و باتوجه به شکل نمایی پاسخ بار به پله‌های ولتاژ، قالب نمایی را پیشنهاد داد که با تعیین پارامترهای آن بر نمودار پاسخ منطبق شده و پله‌های بزرگتر و کوچکتر ولتاژ را مدل می‌نماید[۱۶]. هیل یک سال بعد و به همراهی کارلسون به تبیین پارامترها و تعیین بعضی مقادیر نوعی برای زمان‌های مشخصی از سال اقدام نمود [۱۷]. مرجع [۱۸] با استفاده از روش براساس اندازه گیری پارامترهای بارهای مدل دینامیکی بازیابی نمایی و استاتیکی ZIP را بدست آورده است، برای تخمین این مجموعه پارامتر از الگوریتم تجمیع ذرات بهبود یافته استفاده شده است. منابع دیگری نیز مانند [۱۰و۱۹] با قرار دادن مدل مقاومت-اندوکتانس از تاثیر مدل بار بر روی ریزشبکه صرفنظر کرده‌اند. مدل‌های ترکیبی از بار در سال‌های اخیر مورد توجه بوده،در [۲۰] برای مدل بار، ترکیبی از ZIP و موتور القایی را با استفاده از روش آنالیز حساسیت، مورد تخمین پارامتر با شرط رعایت قیود، قرار گرفته می‌شود. در مرجع [۲۱] دقّت مدل‌های متفاوت، باهم مقایسه شده و نتایج شبیه‌سازی اغتشاشات گذرا دیده شده است. در تمامی

این مراجع مدل‌های دینامیکی مانند مدل بازیابی نمایی تنها در شبکه‌ی متداول صورت گرفته است، هرچند مقالاتی مانند [۲۲] به تازگی مدل موتور القایی در ریزشبکه را بررسی نموده اند امّا دامنه‌ی کاربرد عمومی برای این مدل بار نمی‌توان قائل شد. بازهم عدم وجود کلیّت در بارها، استفاده از مدل‌ها به تنهایی و بدون در نظر گرفتن سایر دینامیک‌های شبکه به چشم می‌خورد.

۲– ریزشبکه‌ی جزیره‌ای: ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای دارای زیرسیستم‌هایی شامل: منابع توان، خطوط انتقال و بارهای محلی می‌باشد که به صورت نمایش یافته در شکل ۱ بهم متصل‌اند. همانطور که در شکل دیده می‌شود هرگاه تعدادی منبع توان در یک ریزشبکه مشترکاً مسئول تامین توان باشند یکی از آن‌ها به عنوان مرجع مشترک انتخاب شده و زمینه‌ی کارکرد سنکرون تمامی منابع را فراهم می‌کند، در این حالت معادلات هر منبع به قاب مرجع سنکرون انتقال می‌یابند که در ریزشبکه‌ی مورد مطالعه منبع ۱ مقادیر مبنا را تعیین می‌کند. در شکل ۲ انتقال مولفه‌های محور qوd به قاب مرجع مشترک D و Q دیده می‌شود. در ادامه با ورود به زیرسیستم‌های ریزشبکه معادلات حالت را بدست آورده و در نهایت با خطی‌سازی این معادلات و بررسی مکان ریشه‌ها، تاثیر حضور بار استاتیکی و دینامیکی مشاهده خواهد شد.



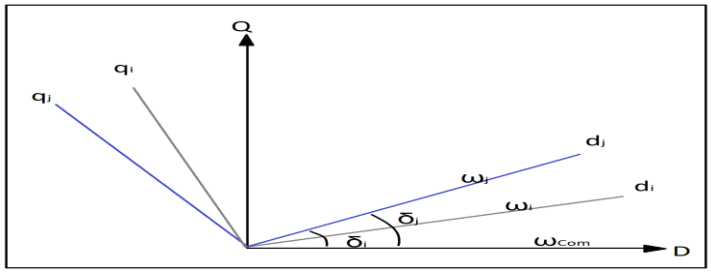
شکل ۱ : ساختار کلی ریزشبکه

تبدیل مولفه‌های هر اینورتر به مرجع مشترک در زیر آمده است:

$$\delta_i = \int (\omega_i - \omega_{com})dt \qquad (۱)$$

$$\left[f_{DQ}\right] = \left[T_i\right]\left[f_{dq}\right] \qquad (۲)$$

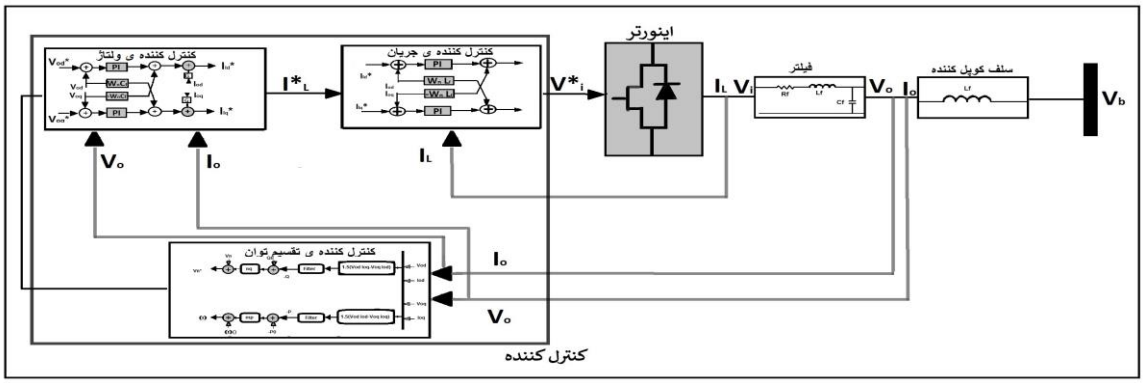
$$\left[T_i\right] = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & -\sin\delta_i \\ \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \qquad (۳)$$



شکل ۲ : انتقال قاب‌های مرجع مختلف

۲.۱–مدل فضای حالت ریزشبکه منبع اینورتری: هر منبع اینورتری نیز زیرسیستم‌هایی شامل: کنترل‌کننده‌ها، اینورتر، فیلتر و سلف کوپل‌کننده می‌باشد. منبع جریان مستقیم به اینورتر متصل و با کنترل‌های اعمال شده شکل موج

ولتاژ و جریان درخواستی را در خروجی خود ارائه می‌دهد. کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان با مقادیر مرجع، اندازه ولتاژ و فرکانسی که از کنترل‌کننده‌ی تقسیم توان دریافت می‌کنند و مقایسه‌ی آن با مقادیر خروجی، نهایتاً سیگنال‌های فرمان را به اینورتر می‌دهد تا با اصلاح فرآیند کلیدزنی خود مقادیر مرجع را تولید کند. در شکل **۳** نمایی از منبع اینورتری دیده می‌شود:



شکل ۳ : زیرسیستم‌های منابع اینورتری

۲.۱.۱– کنترل‌کننده: بخش کنترلی ریزشبکه خود شامل سه زیرسیستم کنترل‌کننده‌های تقسیم توان، ولتاژ و جریان می‌باشد. معادلات هرکدام از این بخش‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

۲.۱.۱.۱–کنترل‌کننده‌ی تقسیم توان: این کنترل‌کننده به منظور تقلید رفتار گاورنر ژنراتورهای سنکرون و با استفاده از منحنی‌های کاهشی توان اکتیو-فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ بکار گرفته می‌شود. منحنی‌های کاهشی هر افزایش در توان را با کاهش در فرکانس و اندازه‌ی ولتاژ پاسخ می‌دهد. اندازه‌ی ولتاژ را بر روی محور d متمرکز و در راستای q برابر با صفر قرار داده می‌شود.

معادلات این کنترل‌کننده به صورت زیر می‌باشد:

$$f_0 - f = m_p (P_0 - P) \quad (۱)$$

$$V_0 - V = n_q (Q_0 - Q) \quad (۲)$$

مقادیر توان اکتیو وراکتیو از معادلات زیر بدست آمده و در ادامه مقادیر فیلتر شده‌ی آن‌ها دیده می‌شود :

$$\tilde{p} = v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq} \quad (۳)$$

$$\tilde{q} = v_{od} . i_{oq} - v_{oq} . i_{od} \quad (۴)$$

$$P = (\frac{\omega_c}{s + \omega_c}) . \tilde{p} \quad (۵)$$

$$Q = (\frac{\omega_c}{s + \omega_c}) . \tilde{q} \quad (۶)$$

۲.۱.۱.۲– کنترل‌کننده‌ی ولتاژ: کنترل ولتاژ در این بخش توسط یک کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی انجام می‌پذیرد، ورودی‌های این بلوک ولتاژهای خروجی فیلتر شده و مقدار مرجع ولتاژ از کنترل‌کننده‌ی تقسیم توان است. همانطور

که در شکل **۴** دیده می‌شود خروجی این بلوک، جریان مرجعِ کنترل‌کننده‌ی جریان می‌باشد. در ادامه معادلات این بخش آمده است:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = v^*_{od} - v_{od} \tag{۷}$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = v^*_{oq} - v_{oq} \tag{۸}$$

$$i^*_{ld} = G.i_{od} - \omega_n.C_f.v_{oq} + K_{pv}.(v^*_{od} - v_{od}) + K_{iv}.\phi_d \tag{۹}$$

$$i^*_{lq} = G.i_{oq} + \omega_n.C_f.v_{od} + K_{pv}.(v^*_{oq} - v_{oq}) + K_{iv}.\phi_q \tag{۱۰}$$

۲.۱.۱.۳– کنترل‌کننده‌ی جریان: کنترل‌کننده‌ی جریان نیز همانند نمونه‌ی ولتاژی خود، توسط کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی شکل گرفته‌است. در خروجی این قسمت، سیگنال‌های مرجعی به اینورتر داده می‌شود تا موج ولتاژ را مشابه این سیگنال از نظر اندازه و فرکانس تولید کند.

$$\frac{d\gamma_d}{dt} = i^*_{ld} - i_{ld} \tag{۱۱}$$

$$\frac{d\gamma_q}{dt} = i^*_{lq} - i_{lq} \tag{۱۲}$$

$$v^*_{id} = -\omega_n.L_f.i_{lq} + K_{pc}.(i^*_{ld} - i_{ld}) + K_{ic}.\gamma_d \tag{۱۳}$$

$$v^*_{iq} = \omega_n.L_f.i_{ld} + K_{pc}.(i^*_{lq} - i_{lq}) + K_{ic}.\gamma_q \tag{۱۴}$$

۲.۱.۲– اینورتر: اینورتر وظیفه دارد تا جریان مستقیم ورودی از منبع را به جریان متناوب تبدیل کند، این تبدیل توسط کلیدزنیِ ترانزیستورها صورت می‌گیرد که با توجه به سیگنال مرجع مورد اشاره در کنترل‌کننده‌ی جریان صورت می‌گیرد. در اینجا اینورتر فاقد دینامیک و با عملکرد ایده‌آل درنظر گرفته شده است، به این معنا که سیگنال ورودی با ولتاژ خروجی اینورتر تطبیق کامل دارد.

۲.۱.۳–فیلتر پایین‌گذر و سلف کوپل‌کننده: فیلتر پایین‌گذر به منظور حذف هارمونیک‌های فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی اینورتر در مدار قرار می‌گیرد، پیش از این در معادلات کنترل‌کننده‌ها نیز اثر این فیلتر مشاهده شد. پس از فیلتر و به منظور حذف سطوح جریان مستقیم از خروجی منبع توان، سلف کوپل‌کننده قرار دارد. در ادامه معادلات این بخش از منبع اینورتری آمده است:

$$\frac{di_{ld}}{dt} = \frac{-r_f}{L_f}.i_{ld} + \omega.i_{ld} + \frac{1}{L_f}.v_{id} - \frac{1}{L_f}.v_{od} \tag{۱۵}$$

$$\frac{di_{lq}}{dt} = \frac{-r_f}{L_f}.i_{lq} - \omega.i_{ld} + \frac{1}{L_f}.v_{iq} - \frac{1}{L_f}.v_{oq} \tag{۱۶}$$

$$\frac{dv_{od}}{dt} = \omega v_{oq} + \frac{1}{C_f}.i_{ld} - \frac{1}{C_f}.i_{od} \tag{۱۷}$$

$$\frac{dv_{oq}}{dt} = -\omega v_{od} + \frac{1}{C_f}.i_{lq} - \frac{1}{C_f}.i_{oq} \tag{۱۸}$$

$$\frac{di_{od}}{dt} = \frac{-r_c}{L_c}.i_{od} + \omega.i_{oq} + \frac{1}{L_c}.v_{od} - \frac{1}{L_c}.v_{bd} \tag{۱۹}$$

$$\frac{di_{oq}}{dt} = \frac{-r_c}{L_c}.i_{oq} - \omega.i_{od} + \frac{1}{L_c}.v_{oq} - \frac{1}{L_c}.v_{bq} \tag{۲۰}$$

با خطی سازی معادلات غیرخطی فوق و انتقال مولفه‌های dوq مرجع اینورتر تکی به قاب مرجع مشترک معادلات حالت خطی و متغییرهای حالت هر اینورتر را به صورت زیرخواهیم داشت:

$$\left[\Delta x_{inv}\right] = \left[\Delta\delta \quad \Delta P \quad \Delta Q \quad \Delta\phi_{dq} \quad \Delta\gamma_{dq} \quad \Delta I_{ldq} \quad \Delta V_{odq} \quad \Delta I_{odq}\right]^T$$

$$\Delta \dot{x}_{invi} = A_{invi}\Delta x_{invi} + B_{invi}\Delta v_{bDQi} + B_{comi}\Delta\omega_{com} \tag{۲۱}$$

$$A_{invi} = \begin{bmatrix}
0 & -m_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5\omega_c I_{od} & 1.5\omega_c I_{oq} & 1.5\omega_c V_{od} & 1.5\omega_c V_{oq} \\
0 & 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5\omega_c I_{oq} & -1.5\omega_c I_{od} & -1.5\omega_c V_{oq} & 1.5\omega_c V_{od} \\
0 & 0 & -n_q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -n_q K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -K_{pv} & -\omega_n C_f & G & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & K_{iv} & 0 & 0 & 0 & -1 & \omega_n C_f & -K_{pv} & 0 & G \\
0 & -m_p I_{lq} & \frac{-n_q K_{pv} K_{pc}}{L_f} & \frac{K_{iv} K_{pc}}{L_f} & 0 & \frac{K_{ic}}{L_f} & 0 & \frac{-K_{pc} - r_f}{L_f} & \omega_0 - \omega_n & \frac{-1 - K_{pc} K_{pv}}{L_f} & \frac{-\omega_n C_f K_{pc}}{L_f} & \frac{K_{pc} G}{L_f} & 0 \\
0 & m_p I_{ld} & 0 & 0 & \frac{K_{iv} K_{pc}}{L_f} & 0 & \frac{K_{ic}}{L_f} & \omega_n - \omega_0 & \frac{-K_{pc} - r_f}{L_f} & \frac{\omega_n C_f K_{pc}}{L_f} & \frac{-1 - K_{pc} K_{pv}}{L_f} & 0 & \frac{K_{pc} G}{L_f} \\
0 & -m_p V_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 & \frac{-1}{C_f} & 0 \\
0 & m_p V_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_f} \\
\frac{\begin{pmatrix} V_{bD}\sin\delta_i \\ -V_{bQ}\cos\delta_i \end{pmatrix}}{L_c} & -m_p I_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & \frac{-r_c}{L_c} & \omega_0 \\
\frac{\begin{pmatrix} V_{bD}\cos\delta_i \\ +V_{bQ}\sin\delta_i \end{pmatrix}}{L_c} & m_p I_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega_0 & \frac{-r_c}{L_c}
\end{bmatrix}$$

$$B_{invi} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{-1}{L_c}\cos\delta_i & \frac{-1}{L_c}\sin\delta_i \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{L_c}\sin\delta_i & \frac{1}{L_c}\cos\delta_i \end{bmatrix}_{13\times 2} \qquad B_{com} = \left[-1 \quad 0 \quad \dots \quad 0\right]^T_{13\times 1}$$

به منظور حفظ اختصار از آوردن معادلات بیشتر خودداری می‌شود، در مرجع [۱] مشروح این معادلات موجود است.

۲.۲–شبکه: در مورد شبکه استفاده از همان مدل مقاومتی-اندوکتانسی بنظر کافی می‌رسد. این قسمت از مدار، دینامیکی به سیستم اضافه نمی‌کند و تحت تاثیر دینامیک‌های منبع می‌باشد. معادلات این بخش برای خط i اُم بین دو باس j و k نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{di_{lineDi}}{dt}=\frac{-r_{linei}}{L_{linei}}.i_{lineDi}+\omega.i_{lineQi}+\frac{1}{L_{linei}}.v_{bDj}-\frac{1}{L_{linei}}.v_{bDk} \quad (۲۲)$$

$$\frac{di_{lineQi}}{dt}=\frac{-r_{linei}}{L_{linei}}.i_{lineQi}-\omega.i_{lineDi}+\frac{1}{L_{linei}}.v_{bQj}-\frac{1}{L_{linei}}.v_{bQk} \quad (۲۳)$$

معادلات خطی شده‌ی شبکه به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\Delta\dot{I}_{lineDi}=\frac{-r_{linei}}{L_{linei}}\Delta I_{lineDi}+\omega_{com}\Delta I_{lineQi}+I_{lineQi}\Delta\omega_{com}+\frac{1}{L_{linei}}\Delta V_{bDj}-\frac{1}{L_{linei}}\Delta V_{bDk} \quad (۲۴)$$

$$\Delta\dot{I}_{lineQi}=\frac{-r_{linei}}{L_{linei}}\Delta I_{lineQi}-\omega_{com}\Delta I_{lineDi}-I_{lineDi}\Delta\omega_{com}+\frac{1}{L_{linei}}\Delta V_{bQj}-\frac{1}{L_{linei}}\Delta V_{bQk} \quad (۲۵)$$

۲.۳–بار: مدل بار استفاده شده در تمامی مقالات مورد بررسی همانطور که در بخش مروری بر منابع دیده‌شد از نوع مقاومتی-سلفی است، امّا این مدل هیچ دینامیک مستقلی را نشان نمی‌دهد، در ادامه ابتدا بار امپدانس ثابت در مدل ریز شبکه قرار می‌گیرد و سپس با جایگزینی مدل دینامیکی به بررسی نتاج خواهیم پرداخت.

۲.۳.۱– مدل استاتیکی امپدانس ثابت (مقاومتی–اندوکتانسی): همانگونه که اشاره شد، این مدل دینامیکی ندارد و صرفاً تابع دینامیک‌های منابع توان است که شامل جریان‌های ورودی از شبکه است:

$$\frac{di_{loadDi}}{dt}=\frac{-R_{loadi}}{L_{loadi}}.i_{loadDi}+\omega.i_{loadQi}+\frac{1}{L_{loadi}}.v_{bDi} \quad (۲۶)$$

$$\frac{di_{loadQi}}{dt}=\frac{-R_{loadi}}{L_{loadi}}.i_{loadQi}-\omega.i_{loadDi}+\frac{1}{L_{loadi}}.v_{bQi} \quad (۲۷)$$

و معادلات فوق به صورت زیر خطی می‌گردد:

$$\Delta\dot{I}_{loadDi}=\frac{-R_{loadi}}{L_{loadi}}\Delta I_{loadDi}+\omega_{com}\Delta I_{loadQi}+I_{loadQi}\Delta\omega_{com}+\frac{1}{L_{loadi}}\Delta V_{bDi} \quad (۲۸)$$

$$\Delta\dot{I}_{loadQi}=\frac{-R_{loadi}}{L_{loadi}}\Delta I_{loadQi}-\omega_{com}\Delta I_{loadDi}-I_{loadDi}\Delta\omega_{com}+\frac{1}{L_{loadi}}\Delta V_{bQi} \quad (۲۹)$$

۲.۳.۲–مدل دینامیکی بازیابی نمایی بار: نیاز به وجود تصویری دقیق و منطبق بر واقعیت یکی الزامات طراحی هر سیستم مورد مطالعه‌ای می‌باشد. مدل‌های دینامیکی، تصویری دقیق از بار را توسط فرآیند شناسایی بدست می‌دهند. این مدل به صورت مجموعه‌ای از روابط غیرخطّی بین توان‌های اکتیو و راکتیو با تغییرات ولتاژ ارائه شده است:

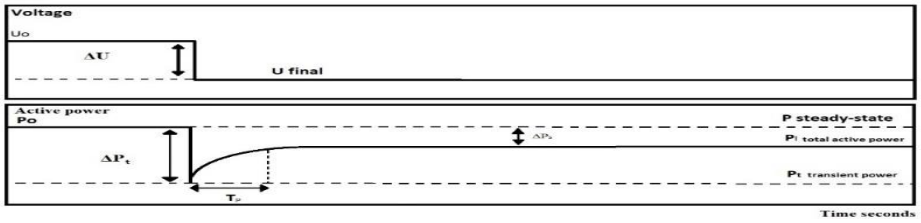
$$\tau_p.(\frac{dP_r}{dt})+P_r=P_0.[\frac{V}{V_0}]^{\alpha_s}-P_0.[\frac{V}{V_0}]^{\alpha_t} \quad (۳۰)$$

$$P_L=P_r+P_0.[\frac{V}{V_0}]^{\alpha_t} \quad (۳۱)$$

$$\tau_q.(\frac{dQ_r}{dt})+Q_r=P_0.[\frac{V}{V_0}]^{\beta_s}-Q_0.[\frac{V}{V_0}]^{\beta_t} \quad (۳۲)$$

$$Q_L=Q_r+Q_0.[\frac{V}{V_0}]^{\beta_t} \quad (۳۳)$$

V_0 ، P_0 و Q_0 مقادیر ولتاژ و توان پیش از اغتشاش، P_r و Q_r مقادیر بازیابی توان‌های باس، P_L و Q_L پاسخ کلّ توان‌های اکتیو و راکتیو، τ_p و τ_q ثابت زمانی‌های بازیابی توان اکتیو و راکتیو، α_t و β_t وابستگی بار- ولتاژ گذرای توان‌های اکتیو و راکتیو، α_s و β_s وابستگی بار- ولتاژ ماندگار توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشند. در دو شکل زیر پاسخ توان به تغییر پله‌ی اعمال شده مشاهده می‌شود:



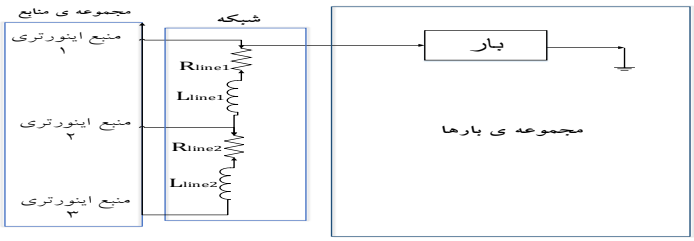
شکل ۴ : پاسخ مدل نمایی به پله‌ی ولتاژ

رفتار بار توسط پارامترهای، ثابت زمانی(τ) و وابستگی‌های گذرا و ماندگار توان به ولتاژ(α وβ) مشخص می‌شود. ثابت زمانی(τ) نشان دهنده‌ی مدّت زمانی است که طول می‌کشد تا بار به **۶۳** درصد مقدار نهایی خود از لحظه‌ی اغتشاش برسد، وابستگی ماندگار بار به ولتاژ (α_sوβ_s) نمایش دهنده‌ی مقدار توانی است که در نهایت بار قادر به بازیابی آن تحت شرایط پسا اغتشاش می‌باشد، در اینصورت مقدار صفر برای آن به معنی بازیابی کامل توان به شرایط پیش از اغتشاش است و وابستگی گذرای بار به ولتاژ (α_tو β_t) نمایش دهنده‌ی رفتار بار در لحظه‌ی اغتشاش است. معادلات خطی شده‌ی بار دینامیکی به صورت زیر بدست آمده است:

$$\Delta \dot{P}_L = \frac{-1}{\tau_P}\Delta P_L + \frac{P_0\alpha_s}{V_{bDQ1}}\Delta V_{bDQ1} \qquad (۳۴)$$

$$\Delta \dot{Q}_L = \frac{-1}{\tau_q}\Delta Q_L + \frac{Q_0\beta_s}{V_{bDQ1}}\Delta V_{bDQ1} \qquad (۳۵)$$

۳- شبیه‌سازی و نتایج:

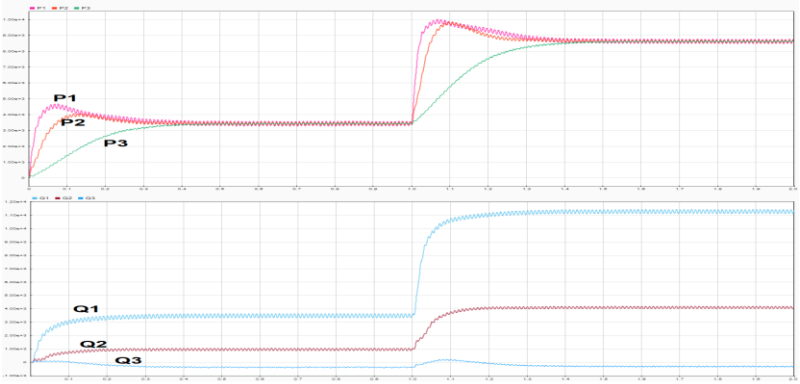


شکل ۵ : ریزشبکه‌ی مورد بررسی

ریزشبکه‌ی مورد بررسی شامل ۳ منبع اینورتریِ مشابه است که مقادیر قاب مرجع مشترک توسط اینورتر ۱ فراهم می‌شود، بار متصل به باس اوّل در نظر گرفته شده‌است. در مرحله‌ی اول بار استاتیکی توان ثابت اعمال و در زمان ۱ثانیه پله‌ی ۱۶.۸ Kw و ۱۲ Kvar اعمال شده است تا نتایج ریزشبکه‌ی طراحی شده در [۱] با بار دینامیکی نیز مورد بررسی قرار گیرد. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای منابع اینورتری آمده است. شکل‌های زیر نتایج شبیه‌سازی در محیط SIMULINK را نشان می‌دهد.

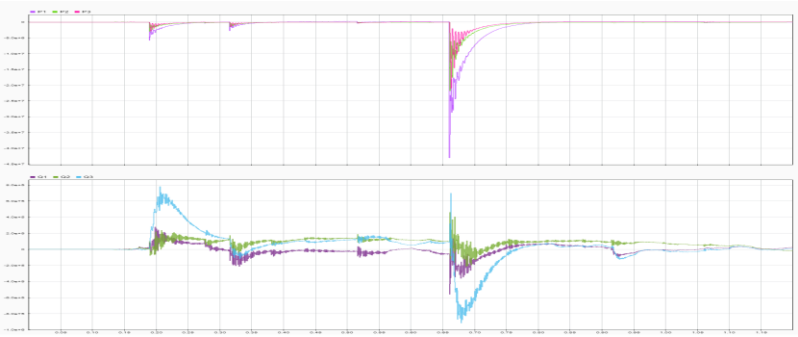
پارامتر	اندازه		پارامتر	اندازه		پارامتر	اندازه
$m_{p\ 1,2,3}$	۹.۴×۱۰^{-۵}		$K_{pc\ 1,2,3}$	۱۰.۵		$L_{c\ 1,2,3}$	۰.۳۵ (H)
$n_{q\ 1,2,3}$	۱.۳×۱۰^{-۳}		$K_{ic\ 1,2,3}$	۱۶×۱۰^{۳}		$r_{c\ 1,2,3}$	۰.۰۳ (Ω)
$K_{pv\ 1,2,3}$	۰.۰۵		$L_{f\ 1,2,3}$	۱.۳۵×۱۰^{-۳} (H)		L_{line1}	۰.۱ (H)
$K_{iv\ 1,2,3}$	۳۹۰		$C_{f\ 1,2,3}$	۵۰×۱۰^{-۶} (F)		R_{line1}	۰.۲۳ (Ω)
f_s	۸×۱۰^{۳} (Hz)		$r_{f\ 1,2,3}$	۰.۱ (Ω)		L_{line2}	۰.۵۸ (H)
$G_{1,2,3}$	۰.۷۵		$\omega_{c\ 1,2,3}$	۳۱.۴۱ (rad/s)		R_{line2}	۰.۳۵ (Ω)
α_s	۱.۸۱۶۲۴۰۹۸		α_t	۲.۱۲۷۳۳۳۳۴۸		τ_p	۰.۹۱۱۵۹۵(s)
β_s	۱.۹۲۲۷۷۳۲		β_t	۲.۰۴۷۵۵۶۵۷		τ_q	۰.۹۹۲۸۴(s)

جدول ۱ : مقادیر پارامترها



شکل ۶ : پاسخ ریزشبکه با بار استاتیکی به پله‌ی اعمالی

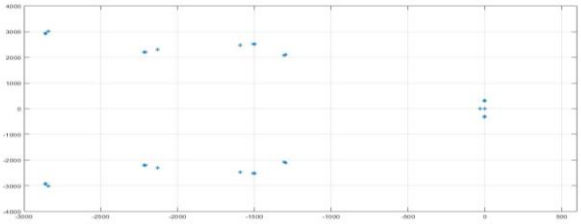
دیده می‌شود که ریزشبکه‌ی طراحی شده به خوبی پاسخگوی تغییر نسبتاً شدید اعمالی در بار را داراست، امّا آیا می‌توان به این طراحی اطمینان نمود؟ در ادامه شبیه‌سازی صورت گرفته با بار دینامیکی برای همین شرایط بررسی می‌شود.



شکل ۷ : جایگذاری مدل دینامیکی نمایی بار در ریزشبکه‌ی طراحی شده

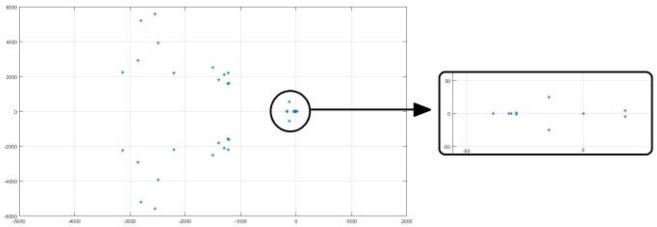
همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود ریزشبکه‌ای که در حضور بار استاتیکی به خوبی تغییرات را پیگیری می‌کرد و پایداری کاملی از خود نشان می‌داد با قرار دادن بار دینامیکی دارای پارامترهای مذکور و توان پایه‌ای برابر با مدل استاتیکی ناپایدار می‌گردد، این موضوع نشان دهنده‌ی عملکرد نامناسب کنترل‌کننده‌ی طراحی شده است. در زیر، مکان

ریشه‌های ریزشبکه‌ی مدل‌سازی شده با بار دینامیکی مشاهده می‌شود، تمامی ریشه‌ها دارای مقدار حقیقی منفی هستند که نشان از پایداری ریزشبکه می‌دهد.



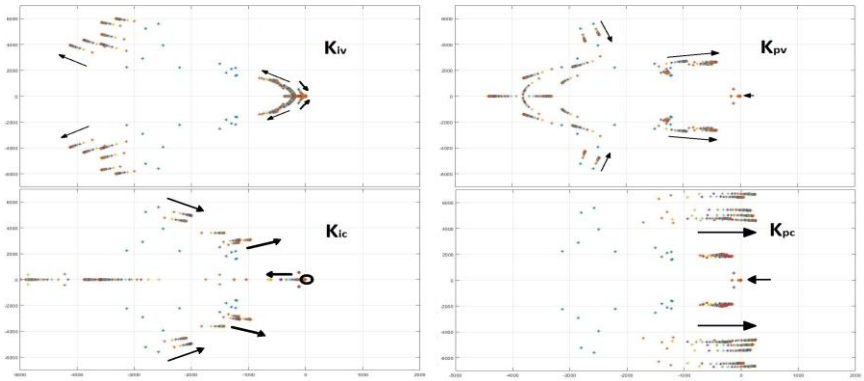
شکل ۸ : مکان ریشه‌ها در حضور بار استاتیکی

امّا با جایگذاری مدل دینامیکی تعدادی از قطب‌های سیستم تحت بررسی به سمت ناپایداری حرکت می‌کند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تایید می‌کنند. دلیل این ناپایداری در اضافه شدن دینامیک‌های بار به دینامیک‌های منبع اینورتری است، دقت کنید در مدل‌سازی برای بار استاتیکی نیز دو جمله‌ی جریان‌های دو محور برای بار وجود داشت اما دینامیک این دو متغییر حالت وابسته به دینامیک جریان‌های ورودی از سمت شبکه و در نهایت ناشی از دینامیک‌های منابع اینورتری است.



شکل ۹ : مکان ریشه‌ها در حضور بار دینامیکی

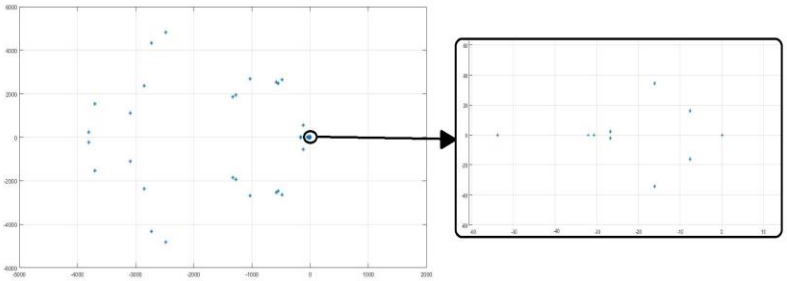
با استفاده از آنالیز حساسیت مکان ریشه‌ها نسبت به کاهش پله‌ای پارامترهای کنترلی K_{pv}، K_{iv}، K_{pc} و K_{ic} نتایج نمایش یافته در شکل ۱۰ بدست آمد:



شکل ۱۰ : اثر تغییر پارامترهای کنترلی بر مکان ریشه‌ها

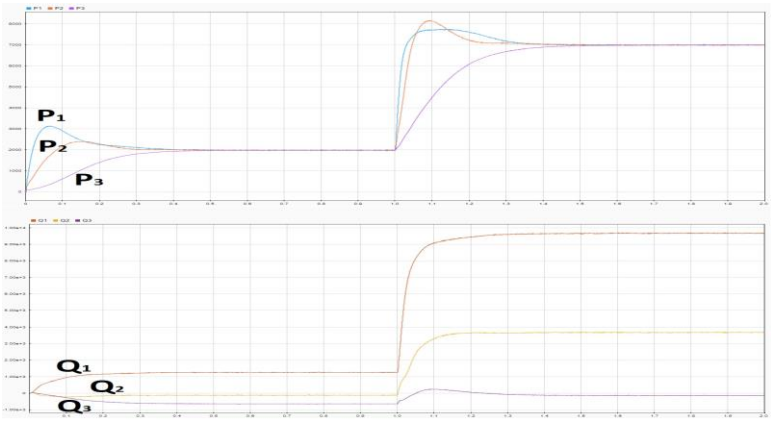
همانطور که در شکل قابل مشاهده است تغییرات K_{iv} باعث حرکت ریشه‌های مرزی به سمت ناپایداری بیشتر و ریشه-های پایدارتر را از محور حقیقی دور می‌کند، تغییر پارامتر K_{ic} بر روی ریشه‌های ناپایدار تاثیری ندارد و تنها ریشه‌های مرزی پایدار را به سمت چپ و ریشه‌های متقارن کاملاً پایدار را به سمت راست سوق می‌دهد. تغییر K_{pc} مکان ریشه‌های متقارن را به شدت تحت تاثیر قرار داده و با حرکت به سمت راست باعث ناپایداری بیشتر سیستم خواهد شد، اما تغییر K_{pv} باعث می‌شود تا ریشه‌های ناپایدار به مرز پایداری و ریشه‌های دور از محور حقیقی به سمت آن حرکت پیدا کنند

که عملکرد دینامیکی سیستم را سرعت می‌بخشد[۹]. با این تحلیل از تغییرات پارامترهای کنترلی کاهش K_{pv} به ۰.۱ مقدار طراحی شده برای بار استاتیکی، مکان ریشه‌های ناپایدار را به طرف منفی محور حقیقی خواهد کشاند.



شکل ۱۱ : مکان ریشه‌ها با اعمال تغییرات کنترلی

برای اطمینان از عملکرد ریزشبکه تحت این تغییرات مقادیر پارامتر K_{pv} در کنترل‌کننده‌های ولتاژ ۳ منبع اینورتری به ۱۰درصد مقدار اولیه تقلیل یافت و پاسخ توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت زیر بدست آمد:



شکل ۱۲ : پاسخ توان‌های اکتیو و راکتیو بار دینامیکی با اصلاح کنترل‌کننده

همانطور که مشاهده می‌شود با تغییرات اعمالی بر روی بخش کنترلی،ریزشبکه به خوبی پاسخگوی تغییر بار خواهد بود.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به مدل‌سازی سیگنال کوچک ریزشبکه‌ای با ۳ منبع اینورتری، شبکه‌ی داخلی و بارها پرداختیم. مدل بار به دو صورت، یکی استاتیکی امپدانس ثابت و دیگری دینامیکی بازیابی نمایی ارائه شد و دیدیم در حضور مدل دینامیکی بر خلاف بار استاتیکی، ریزشبکه پایدار نمی‌باشد. این وضعیت نشان می‌دهد تقریب بار استفاده شده و چشم‌پوشی از دینامیک‌های مستقل آن، امکان طراحی مناسب و پایدار ریزشبکه را سلب می‌نماید. در ادامه با استفاده از روش مکان ریشه‌ها و آنالیز حساسیت ریشه‌ها نسبت به تغییر پارامترهای کنترلی، مقدار بهینه‌ای جهت پایدارسازی ریزشبکه بدست آمد و نتیجه‌ی اصلاح کنترل‌کننده در شبیه‌سازی دیده‌شد و پایداری کاملی را بدست آوردیم.

منابع و مراجع

[1] Pogaku, Nagaraju, Milan Prodanovic, and Timothy C. Green. "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid." *IEEE Transactions on power electronics* 22.2 (2007): 613-625.

[2] Che, Liang, Mohammad E. Khodayar, and Mohammad Shahidehpour. "Adaptive Protection System for Microgrids:Protection practices of a functional microgrid system." *IEEE Electrification magazine*2.1(2014):66-80.

[3] Liu, X., et al. "The MicroGrid: a scientific tool for modeling computational Grids." *Proceedings of the ACM/IEEE Supercomputing Conference, IEEE Computer Society*. 2001.

[4] Chen, Xinhe, Wei Pei, and Xisheng Tang. "Transient stability analyses of micro-grids with multiple distributed generations." *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010.

[5] Jin, Qiang, and Yong-Li Li. "A study on steady characters of inverter interfaced distributed generation in three phase symmetrical system."*Power System Technology(POWERCON),2010International Conference on*.IEEE, 2010.

[6] Nimpitiwan, Natthaphob, et al. "Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators." *IEEE Transactions on power delivery* 22.1 (2007): 634-641.

[7] Taylor, Carson W. *Power system voltage stability*. McGraw-Hill, 1994.

[8] Herrera, Luis, et al. "Small-signal modeling and networked control of a PHEV charging facility." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50.2 (2014): 1121-1130.

[9] Yu, Kai, et al. "Analysis and Optimization of Droop Controller for Microgrid System Based on Small-Signal Dynamic Model." *IEEE Trans. Smart Grid* 7.2 (2016): 695-705.

[10] Coelho, Ernane Antonio Alves, Porfirio Cabaleiro Cortizo, and Pedro Francisco Donoso Garcia. "Small signal stability for parallel connected inverters in stand-alone AC supply systems." *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. Vol. 4. IEEE, 2000.

[11] Shuai, Zhikang, et al. "Microgrid stability: Classification and a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58 (2016): 167-179.

[12] Arif, Anmar, et al. "Load Modeling–A Review." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2017).

[13] Kundur, Prabha, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. *Power system stability and control*. Vol. 7. New York: McGraw-hill, 1994.

[14] Coelho, EA Alves, Porfírio Cabaleiro Cortizo, and Pedro Francisco Donoso Garcia. "Small signal stability for single phase inverter connected to stiff AC system." *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*. Vol. 4. IEEE, 1999.

[15] Bottrell, Nathaniel, Milan Prodanovic, and Timothy C. Green. "Dynamic stability of a microgrid with an active load." (2008).

[16] Hill, David J. "Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies." *IEEE transactions on power systems* 8.1 (1993): 166-176.

[17] Karlsson, Daniel, and David J. Hill. "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 9.1 (1994): 157-166.

[18] Rodríguez-García, Luis, Sandra Pérez-Londoño, and Juan Mora-Flórez. "Measurement-based exponential recovery load model: Development and validation." *Dyna* 82.192 (2015): 131-140.

[19] Tabatabaee, Shahab, et al. "Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous microgrid."*Power Electronics,Drive Systems and Technologies Conference(PEDSTC),2011 2nd*. IEEE,2011.

[20] Ma, Jin, et al. "Reducing identified parameters of measurement-based composite load model." *IEEE Transactions on Power Systems* 23.1 (2008): 76-83.

[21] Price, W. W., et al. "Load representation for dynamic performance analysis." *IEEE Transactions on Power Systems (Institute of Electrical and Electronics Engineers);(United States)* 8.2 (1993).

[22] Kahrobaeian, Alireza, and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed. "Analysis and mitigation of low-frequency instabilities in autonomous medium-voltage converter-based microgrids with dynamic loads." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.4 (2014): 1643-1658.

چهارمین کنفرانس سراسری
دانش و فناوری
مهندسی مکانیک و برق ایران
www.dmeconf.ir

تاریخ : ۱۳۹۷/۰۷/۲۸
شماره : ۹۷۳۱۹

گواهی ارائه مقاله

بدینوسیله گواهی میگردد ، اصل مقاله با عنوان :

بررسی پایداری دینامیکی ریزشبکه با در نظر گرفتن مدل بار دینامیکی

کد مقاله **dmeconf18-03120443:**

ارائه شده توسط **: علی اصغر قدیمی , محمد بیات ,آرام مهدویان**

مورد پذیرش کامل و تایید هیات داوران و کمیته علمی جهت ارائه در چهارمین کنفرانس سراسری دانش و فناوری مهندسی مکانیک و برق ایران قرار گرفته است. امید است این گواهی در بهبود هر چه بیشتر عملکرد ایشان در راستای افزایش بهره وری و تحقق توسعه دانش و فناوری در بخش های مهندسی مکانیک و برق موثر واقع شده و در ارتقاء علمی ایشان مد نظر قرار گیرد .

رئیس کنفرانس
دکتر مجتبی رضوانی

دبیر علمی کنفرانس
دکتر محمودرضا طهماسب پور

موسسه برگزار کننده همایش های توسعه محور دانش و فناوری سام ایرانیان
باهمایش BaHamayesh.com پایگاه اطلاع رسانی همایش های کشور
CIVILICA
مرکز مطالعات و تحقیقات اسلامی سروش حکمت مرتضوی
DNW Besser Führen
SE
PERFECTION COMMITMENT PCMS
dmeconf.ir