



بهبود کیفیت توان در یک ریزشبکه توسط کنترل محلی منابع تولید پراکنده اینورتری

مرتضی افراسیابی

دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی

afراسیابی.mo@fe.lu.ac.ir

اسماعیل رک رک

دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی

rokrok.e@lu.ac.ir

چکیده :

اخیرا علاقه زیادی برای ارتقاء کیفیت توان در ریزشبکه ها از طریق کنترل محلی منابع تولید پراکنده¹ (DGs) اینورتری بوجود آمده است. این مقاله بهبود کیفیت توان در یک ریزشبکه متصل به شبکه بالادست را از طریق استفاده از ظرفیت مازاد اینورترهای واسط منابع تولید پراکنده بررسی می کند. هدف از جبران سازی، بالا بردن کیفیت ولتاژ در نقطه اتصال مشترک² (PCC) می باشد. برای دستیابی به این هدف، کنترل مناسب واسط اینورتری منابع تولید پراکنده مورد توجه قرار می گیرد. واسط اینورتری منابع علاوه بر تامین توان بارهای محلی خود، وظیفه انتقال توان حقیقی به شین PCC و حمایت از ولتاژ ریزشبکه بخصوص در مواقع بروز اختلال اعم از؛ نامتعادلی ولتاژ و کاهش یا افزایش کوتاه مدت ولتاژ را با توجه به ظرفیت مازاد خود برعهده دارد. در ساختار کنترلی اینورتر از واحد کنترل توان براساس روش افتری استفاده شده است. همچنین واحد مقابله با نامتعادلی ولتاژ در نظر گرفته شده است. کنترل ولتاژ و جریان در چارچوب متعامد ساکن انجام می گیرد برای این منظور کنترل کننده های تناسبی - تشدیددی استفاده شده است. حلقه امپدانس مجازی به منظور بهبود کیفیت توان و افزایش پایداری منابع پراکنده استفاده شده است. با استفاده از تحلیل دینامیکی مدل خطی شده منبع تولید پراکنده، مقادیر مناسب برای پارامترهای کنترلی انتخاب می گردد. از طریق شبیه سازی یک سیستم نمونه کارایی روش کنترلی مورد نظر مطالعه و مورد ارزیابی قرار می گیرد.

واژگان کلیدی: کیفیت توان، منابع تولید پراکنده، اینورتر منبع ولتاژ، مشخصه کنترل افتری

¹ Distributed Generators

² Point of Common Coupling

۱. مقدمه

سیستم های تولید پراکنده می بایست طوری طراحی شوند که با حالت متصل به شبکه سازگار باشند و همچنین ولتاژ مناسبی را در محل ایجاد کنند. در استاندارد (IEEE Std, 2003) توصیه شده است که سیستم های کوچک توان می بایست از شبکه سراسری جدا شوند هنگامی که دامنه ولتاژ کمتر از 0.85 pu یا بیشتر از 1.1 pu باشد. از آنجا که نامتعادلی ولتاژ نیز تاثیر منفی روی تجهیزات سیستم قدرت از قبیل موتورهای القایی و ادوات الکترونیک قدرت دارد، استاندارد IEC میزان نامتعادلی مجاز را در سیستم های قدرت ۲ درصد پیشنهاد کرده است (Jouanne and Banerjee, 2001). بنابراین نگه داشتن دامنه و نامتعادلی ولتاژ ریز شبکه در حد مجاز یکی از اهدافی هست که می بایست تا حد امکان محقق گردد. از طرف دیگر در این سیستم ها اغلب منبع تولید توان از طریق یک اینورتر به شبکه متصل می شود. هدف اصلی اینورتر، تنظیم اندازه و فاز خروجی ولتاژ برای کنترل توان راکتیو و اکتیو تزریقی می باشد. معمولا اینورتر DG های متصل به شبکه مانند منابع جریان عمل می کند و ولتاژ آن اغلب بوسیله یک 1 (PLL) با ولتاژ شبکه سراسری سنکرون می شود، اگر چه به منظور نگه داشتن ولتاژ و فرکانس بصورت ثابت، اینورتر 2 (VSI) گزینه مناسب تری می باشد (Guerrero et al, 2007). اخیرا بکار گیری اینورتر DG ها برای بهبود مشکلات کیفیت توان، در بسیاری از موارد مورد توجه قرار گرفته است (Cornforth et al, 2011) (He et al, 2012). در (Li et al, 2005) و (Li et al, 2006) برای اتصال DG به شبکه از یک اینورتر سری استفاده شده است، وظیفه اصلی اینورتر DG کنترل توان اکتیو و راکتیو می باشد و اینورتر سری متعادل سازی جریان خط و ولتاژ شین حساس 3 (SB) را به عهده دارد، بنابراین دو اینورتر برای تزریق توان و جبران تغییرات ولتاژ نیاز است، که می تواند به خاطر هزینه زیاد یک نقطه ضعف باشد. در (Vasquez et al, 2009) یک روش برای جبران کاهش ولتاژ شبکه بوسیله اینورتر DG پیشنهاد شده است. در (Hojo et al, 2008) و (Cheng et al, 2009) روشهایی برای جبران نامتعادلی ولتاژ بوسیله اینورتر DG ها وجود دارد. در (Cheng et al, 2009) ، (Lee and Gheng, 2007) و (Savaghebi et al, 2013) روشهایی برای جبران نامتعادلی و هارمونیک بصورت گروهی ارائه شده است. تکنیک های کنترلی در اکثر موارد فوق روش کنترل اکتیو می باشد که در آنها اینورترهای VSI بصورت موازی در یک سیستم و بدون اجتناب از شبکه ارتباطی با هم کار می کنند. اگرچه کنترل دراپ مشکلاتی هم دارد که اخیرا تعدادی از آنها حل شده است مانند: وابستگی به امپدانس خط و پاسخ گذرای آهسته. در روشهای قبلی ارائه شده جبران سازی مولفه اصلی ولتاژ بوسیله اینورتر DG تنها در (Vasquez et al, 2009) مطرح شده است که این روش برای اینورتر 4 (PV) در یک شبکه تک فاز ارائه شده است. هم چنین جبران سازی گروهی در اکثر روشها، صرفا برای جبران هارمونیک یا نامتعادلی ولتاژ بکار گرفته شده است و دنبال کردن بیش از یک هدف جبران سازی بصورت همزمان و گروهی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

این مقاله روی سیستم های DG متصل به شبکه سه فاز با قابلیت کاربردهای اضافی کیفیت توان از قبیل: جبران سازی گروهی کاهش یا افزایش کوتاه مدت ولتاژ و همچنین جبران نامتعادلی ولتاژ در شین بار حساس، متمرکز شده است. به دلیل استفاده از روش کنترل اکتیو، بار کاری جبران سازی بصورت کنترل محلی و با توجه به ظرفیت DG ها بین آنها تقسیم می شود. سیستم پیشنهاد شده ولتاژ اعمال شده به بارها را در هنگام تغییرات ولتاژ حمایت می کند. ادامه بخش های مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲ یک اینورتر سه فاز که به منظور جبران تغییرات مولفه اصلی و نامتعادلی ولتاژ شبکه ارتقاء داده شده است بحث می شود. در بخش ۳ طرح کنترلی و پارامترهای کنترلی بررسی شده است. در بخش ۴ آنالیز دینامیکی

¹ Phase Locked Loop

² Voltage Source Inverter

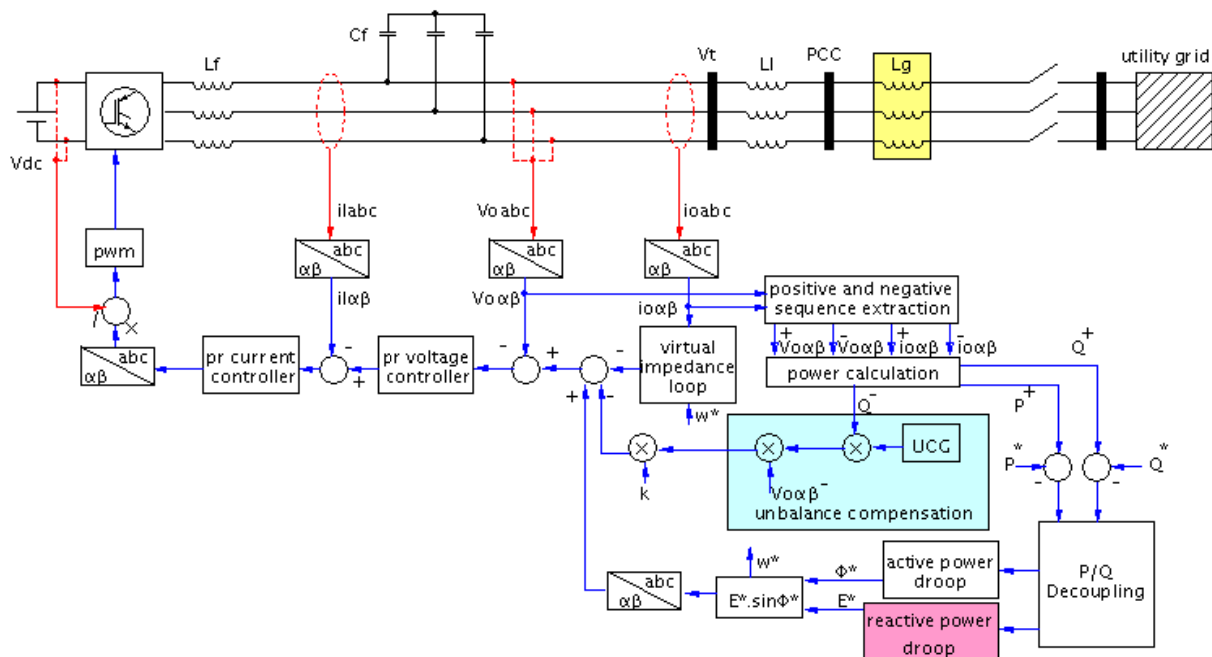
³ Sensitive bus

⁴ Photo Voltaic

سیستم بررسی شده است. شبیه سازی یک شبکه نمونه توسط سیمولینک نرم افزار متلب در بخش ۵ و سرانجام در بخش ۶ نتیجه گیری انجام شده است.

۲. اینورتر DG با قابلیت کاربردهای اضافی کیفیت توان

شکل ۱ سیستم کنترل پیشنهادی اینورتر واسط یکی از DG های ریز شبکه را در دستگاه سنکرون مرجع ساکن^۱ (SRF) نشان می دهد. مشاهده می شود که سیگنال مرجع $V_{\alpha\beta}$ توسط کنترل کننده های توان، جبران ساز عدم تعادل و امپدانس مجازی تولید می شود، جزئیات بخش های دیگر سیستم در ادامه تشریح شده است.



شکل-۱. سیستم کنترلی اینورتر dg

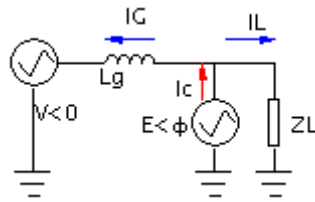
A- کاربری اینورتر DG برای جبران تغییرات مولفه اصلی ولتاژ

اغلب اینورتر های سری بوسیده تئوری توان لحظه ای با قابلیت ride-through ولتاژ برای جبران تغییرات ولتاژ شبکه استفاده می شوند (Lee et al, 2004). معمولاً اینورترهای موازی برای جبران سازی تغییرات کوچک ولتاژ بوسیله تزریق توان راکتیو استفاده می شوند. مثالهایی از این کاربرد در^۲ (UPS) ها و^۳ (APF) ها در (Tao et al, 2008) و (Nayar et al, 2000) بیان شده است. توانایی کنترل مولفه اصلی ولتاژ در یک نقطه خاص به امپدانس شبکه و ضریب توان بار بستگی دارد. جبران سازی ولتاژ بوسیله تزریق جریان مشکل است زیرا امپدانس شبکه معمولاً کوچک است و می بایست جریان بزرگی برای جبران ولتاژ تزریق شود. در شکل ۲ می توان مشاهده کرد که:

¹ Stationary reference frame

² Uninterruptible power supply

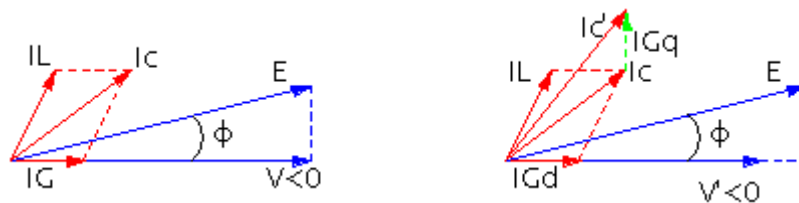
³ Active Power filter



شکل-۲. اینورتر متصل شده به باس بی نهایت از طریق اندوکتانس L_g

$$\vec{I}_C = \vec{I}_G + \vec{I}_L \quad (1)$$

که I_C و I_G و I_L جریان اینورتر، شبکه و بار هستند. فرض می شود که توان تبدیلی اینورتر با شبکه توان اکتیو باشد. در حالت عادی دامنه E و V تقریباً برابر می باشد، اینورتر توان را برای بار فراهم می کند و توان اکتیو از طریق L_g به شبکه جریان پیدا می کند. در این حالت جریان شبکه تماماً مولفه حقیقی می باشد $\vec{I}_G = I_{Gd}$ (شکل-3a) دیگرام برداری جریانهها و ولتاژها را نشان می دهد. برای جبران کمبود و یا بیشبود ولتاژ مولفه اصلی در هنگام تغییر ولتاژ شبکه، کنترلر اینورتر می بایست طوری طراحی شود که توان راکتیو مورد نیاز را در زمان تغییر ولتاژ فراهم کند.



(a) ولتاژ و جریانهای سیستم قبل از کاهش ولتاژ شبکه، (b) ولتاژ و جریانهای سیستم بعد از کاهش ولتاژ شبکه، (شکل-3)

برای مثال زمانی که ولتاژ شبکه افت می کند $V' < E$ ، در این هنگام اینورتر علاوه بر این که توان را برای بار فراهم می کند می بایست برای تثبیت ولتاژ بار، توان راکتیو به شبکه تزریق کند (شکل-3b)، در این حالت مولفه موهومی I_{Gq} به جریان شبکه اضافه می شود، (رابطه ۲).

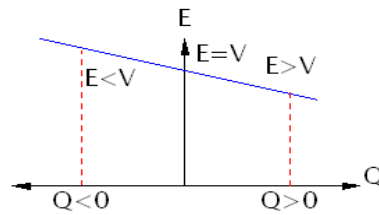
$$\vec{I}_G = I_{Gd} + jI_{Gq} \quad (2)$$

$$\vec{I}_G = \frac{E \angle \phi - V \angle 0}{jx} \quad (3)$$

طبق رابطه (۳) می توان مشاهده کرد که در هنگام تغییر ولتاژ شبکه، مقدار جریان راکتیو تزریقی برای تثبیت ولتاژ متناسب است با عکس امپدانس شبکه. این به این معنی است که اندوکتانس زیاد به کاهش تغییرات ولتاژ کمک می کند. در توپولوژی پیشنهادی اینورتر DG از طریق اندوکتانس L_g به شبکه متصل می شود. با توجه محدودیت رابطه انتقال توان و اندوکتانس خط:

$$X < \frac{EV}{p_{max}} \quad (4)$$

از رابطه (۴) نتیجه می گیریم که ماکزیمم توان انتقالی اندوکتانس را محدود می کند. در این ساختار ولتاژ با تنظیم توان راکتیو و به صورت مستقل از فرکانس کنترل می شود. اگر چه مجاز نیستیم که مقدار امپدانس L_g را زیاد انتخاب کنیم زیرا رگولاسیون ولتاژ به صورت مستقیم تاثیر می پذیرد (شکل 4).



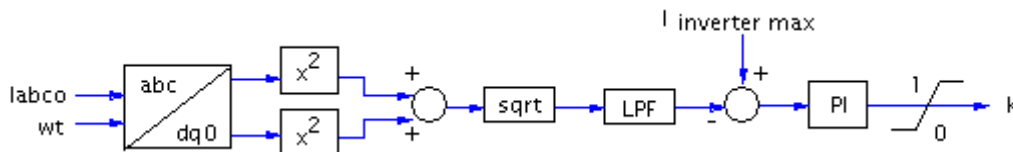
شکل-4. کنترل ولتاژ با استفاده از مشخصه افقی

B- جبرانسازی عدم تعادل ولتاژ

در سیستم های سه فاز جبرانسازی عدم تعادل ولتاژ از طریق کاهش دادن ولتاژ توالی منفی قابل انجام است. با توجه به شکل 1 خروجی بلوک "جبرانسازی عدم تعادل" که مرجع جبرانسازی عدم تعادل¹ (UCR) نام دارد یکی از بخش های سازنده مرجع کنترل کننده ولتاژ می باشد. برای ایجاد UCR، Q^- در ثابتی که "بهره جبرانسازی عدم تعادل² (UCG) نامیده شده و همچنین در $V_{\alpha\beta}^-$ ضرب می شود. UCG ثابت مثبتی است که میزان جبرانسازی توسط واحد DG را با عنایت به مسائل پایداری سیستم کنترل مشخص می کند و باید به نحوی تعیین گردد که عدم تعادل به میزان قابل قبولی کاهش داده شود و در عین حال پایداری سیستم حفظ گردد (Savaghebi et al, 2013). از آنجا که با جبرانسازی عدم تعادل (کاهش ولتاژ توالی منفی) Q^- کاهش می یابد، استفاده از این توان برای تولید مرجع جبرانسازی باعث می شود بار کاری جبرانسازی به نحو مناسبی بین DG های ریز شبکه توزیع گردد. بدین ترتیب، DG ها قادر خواهند بود که به صورت خودگردان عدم تعادل ولتاژ را جبرانسازی نمایند و نیازی به وجود ارتباط مخابراتی بین کنترل کننده های آنها نیست. رابطه (5) برای محاسبه توان لحظه ای راکتیو توالی منفی قابل استفاده می باشد:

$$Q'^- = V_{\alpha\alpha}^- \cdot i_{\alpha\beta}^- + V_{\alpha\beta}^- \cdot i_{\alpha\alpha}^- \quad (5)$$

برای تنظیم میزان بار جبرانسازی DG، از سیستم کنترلی با جزئیات نشان داده شده در شکل 5 بهره گرفته شده است. با استفاده از این بلوک، میزان نامتعادلی ولتاژ به صورت قابل تنظیم و با توجه به ظرفیت مازاد هر اینورتر جبرانسازی می گردد. ضریب K به منظور تنظیم ضریب جبرانسازی در مرجع UCR تولید شده ضرب شده تا مرجع نهایی جبرانسازی (v_C^*) تولید گردد. بدین ترتیب بار کاری جبرانسازی متناسب با توان های نامی بین DG ها تقسیم می گردد.



شکل-5. بلوک تنظیم میزان بار جبرانسازی

در این بلوک $I_{inverter\ max}$ و ω به ترتیب جریان خروجی اینورتر، ماکزیمم ظرفیت جریان اینورتر و فرکانس شبکه هستند. در نظر گرفتن عبارت $(I_{inverter\ max} - I)$ در بلوک فوق باعث می شود که بار کاری جبرانسازی بین DG ها تقسیم گردد. زیرا افزایش بار کاری به معنای افزایش I و در نتیجه کاهش خروجی بلوک می باشد، این کاهش سبب می شود که بار کاری جبرانسازی کاهش یابد. به عبارت دیگر، یک فیدبک منفی ذاتی در روش جبرانسازی وجود دارد.

¹ Unbalance Compensation Reference

² Unbalance Compensation Gain

۳. طرح سیستم کنترل

هدف این بخش طراحی کنترل اینورتر DG متصل به شبکه است. اساس طرح مشخصه کنترل افقی می باشد که اهداف زیر را دنبال می کند: تامین توان راکتیو خواسته شده به وسیله شبکه در هنگام تغییر ولتاژ، ارتقاء پایداری دینامیکی سیستم و کاهش مولفه توانی منفی ولتاژ. این اهداف کنترلی با استفاده از حلقه های کنترلی زیر محقق می شوند:

a- کنترل توان اکتیو و راکتیو بوسیله کنترل مشخصه افقی

هنگامی که اینورتر DG از طریق یک امپدانس به شبکه متصل شده است (شکل ۲)، می توان P و Q تزریقی به شبکه بوسیله VSI را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$P_c \cong 1/z[V(E-V)\cos\theta + EV \cdot \varphi \cdot \sin\theta] \quad (6)$$

$$Q_c \cong 1/z[V(E-V)\sin\theta - EV \cdot \varphi \cdot \cos\theta] \quad (7)$$

که $\theta = \text{tg}^{-1}(X/R)$ زاویه امپدانس خط ارتباطی می باشد. می توان P_c و Q_c را به متغیرهای جدید P' و Q' تبدیل کرد، که از لحاظ اندازه و فاز از امپدانس شبکه مستقل هستند:

$$P' = P_c \sin\theta - Q_c \cos\theta \quad (8)$$

$$Q' = P_c \cos\theta + Q_c \sin\theta \quad (9)$$

با جایگزینی (7) و (6) در معادلات (8) و (9) معادلات زیر بدست می آیند:

$$P' = \frac{EV}{z} \sin\varphi \quad (10)$$

$$Q' = \frac{EV}{z} \cos\varphi - \frac{v^2}{z} \quad (11)$$

توجه داشته باشید که P' مقدار زیادی به φ و Q' به اختلاف ولتاژ (E-V) بستگی دارد. متغیرهای جدید P' و Q' از Z و θ مستقل هستند، بنابراین می توان از آنها در طرح کنترلی افقی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو استفاده کرد. به منظور تزریق توان حقیقی ماکزیمم، P_c^* می بایست با توان ارائه شده بوسیله¹ (MPPT) برابر باشد و توان راکتیو معمولاً $Q^* = 0$ می باشد. بوسیله حلقه کنترل افقی معادلات زیر با استفاده از (8) و (9) بدست می آید:

$$\varphi = -G_p(s) [(P_c - P_c^*) \sin\theta - (Q_c - Q_c^*) \cos\theta] \quad (12)$$

$$E = E^* - G_q(s) [(P_c - P_c^*) \cos\theta - (Q_c - Q_c^*) \sin\theta] \quad (13)$$

یک کنترلر PI استفاده می شود تا تضمین کند که VSI توان اکتیو P_c^* را تزریق می کند، از طرف دیگر یک کنترلر P برای جبران سازی توان راکتیو استفاده می شود، بصورت زیر:

$$G_p(s) = \frac{m_i + m_p s}{s} \quad (14)$$

$$G_q(s) = n_p \quad (15)$$

برای جبران سازی توان راکتیو می بایست n_p بصورت مناسبی تنظیم شود. با استفاده از روابط (11)، (15) و (13) با $90^\circ = \theta$ و $V = \alpha E^*$ (که α دامنه کاهش ولتاژ می باشد)، n_p بصورت زیر بدست می آید:

$$n_p = \frac{E^{*2} \alpha (1 - \alpha) - Q_{max} X}{Q_{max} E^* \alpha} \quad (16)$$

که Q_{max} ماکزیمم توان راکتیو قابل انتقال بوسیله VSI می باشد.

b- کنترلرهای تشدید و امپدانس مجازی

¹ Maximum Power Point Tracking

نحوه تعیین پارامترهای مشخصه های کاهشی کنترل توان در بخش قبلی تشریح شد. در ادامه به طراحی بخش های دیگر سیستم کنترل پرداخته می شود. کنترل کننده های تناسبی - رزونانسی زیر به ترتیب برای کنترل ولتاژ و جریان استفاده شده است:

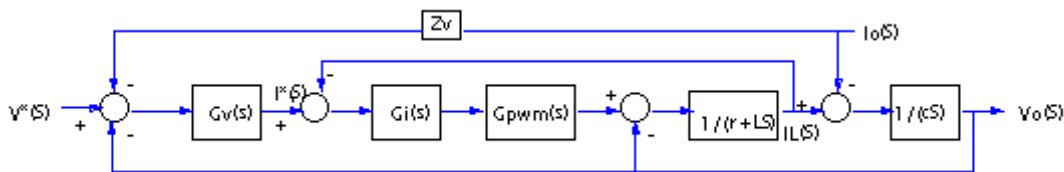
$$G_V(s) = K_p V + \frac{K_r V \cdot s}{s^2 + (\omega^*)^2} \quad (17)$$

$$G_I(s) = K_p I + \frac{K_r I \cdot s}{s^2 + (\omega^*)^2} \quad (18)$$

در این رابطه $K_p V$ و $K_p I$ به ترتیب ضرایب تناسبی کنترل کننده های ولتاژ و جریان، $K_r V$ و $K_r I$ ضرایب رزونانسی این کنترل کننده ها می باشند. افزایش پایداری سیستم بوسیله امیدانس طبیعی از طریق سیستم کنترلی VSI فراهم می شود. اضافه کردن میرایی به سیستم باعث می شود که امیدانس خروجی VSI به صورت سلفی خالص نباشد. برای ولتاژ خروجی اینورتر می توان رابطه زیر را نوشت:

$$V_0(s) = G(s) \cdot v_{ref}(s) - Z_0(s) \cdot i_0(s) \quad (19)$$

در این رابطه $v_{ref}(s)$ ، $V_0(s)$ و $i_0(s)$ به ترتیب مرجع ولتاژ و مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ و جریان خروجی می باشند.



شکل-۶. بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ اینورتر

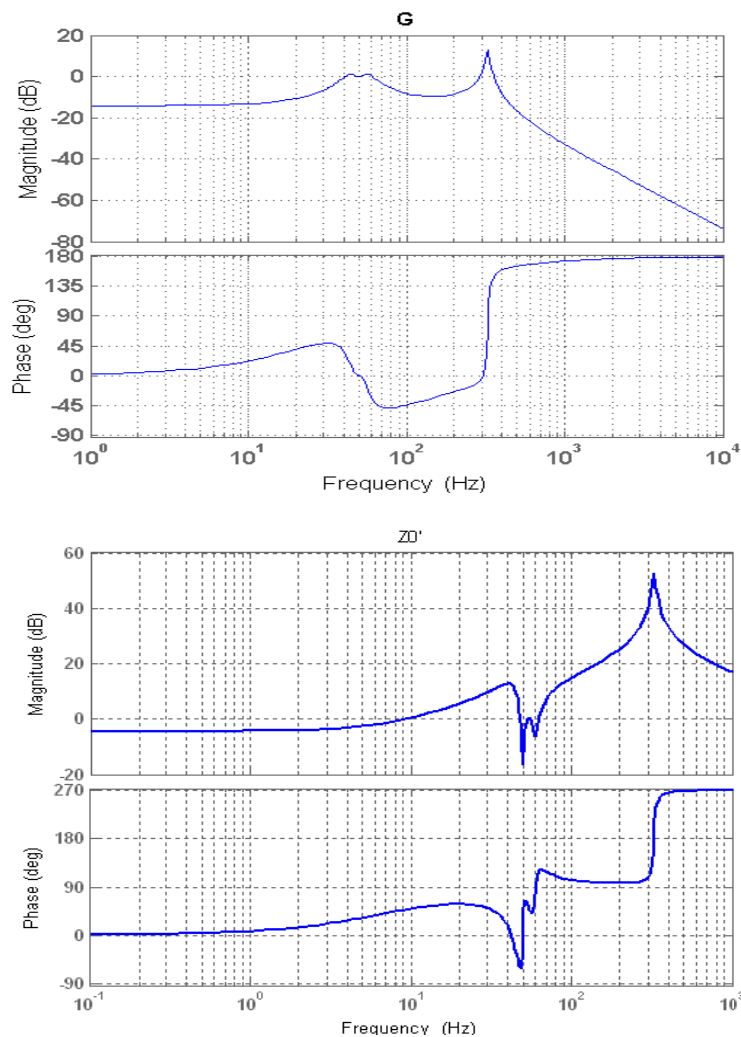
در حقیقت رابطه (19) نشان دهنده مدار معادل تونن سیستم شکل ۶ است که در آن $G_{pwm}(s) = 1$ می باشد، $G(s)$ و $Z_0(s)$ نیز به ترتیب تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترل و امیدانس خروجی اینورتر هستند که بر اساس روابط زیر بدست می آیند:

$$G(s) = \frac{G_V(s) \cdot G_I(s)}{LCS^2 + (r_L + G_I(s)) \cdot Cs + G_V(s) \cdot G_I(s) + 1} \quad (20)$$

$$Z_0(s) = Z'_0(s) + Z_v(s) \quad (21)$$

در رابطه (21)، $Z_v(s)$ امیدانس مجازی و $Z'_0(s)$ امیدانس خروجی اینورتر بدون اضافه کردن امیدانس مجازی است که بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

$$Z'_0(s) = \frac{r_L + Ls + G_I(s)}{LCS^2 + (r_L + G_I(s)) \cdot Cs + G_V(s) \cdot G_I(s) + 1} \quad (22)$$



شکل-۷. نمودار پاسخ فرکانسی تابع تبدیل G و امپدانس خروجی اینورتر

دیگرام های $G(s)$ و $Z_0(s)$ در توالی های مثبت با استفاده از پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، با طراحی مناسب کنترلر، مقدار Z_0 در فرکانس پایه بسیار ناچیز و اندازه تابع تبدیل G در بازه خارج از فرکانس پایه بسیار کوچک است، بنابراین می توان گفت که مرجع ولتاژ به خوبی دنبال می گردد. همچنین می توان گفت با انتخاب Z_V مناسب که عمدتاً سلفی در نظر گرفته می شود، در فرکانس پایه امپدانس خروجی Z_0 تقریباً برابر Z_V می باشد، بنابراین رفتار سلفی مطلوب برای کنترل توان های توالی مثبت فراهم شده است.

c- جبران ساز عدم تعادل

در این بخش هدف تعیین حداکثر مقدار UCG می باشد که در آن پایداری سیستم حفظ می گردد. براساس شکل 1 فازور UCR به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$UCR = Q^- \cdot V_0^- \cdot k \cdot UCG \quad (23)$$

که در این رابطه V_0^- فازور ولتاژ خروجی توالی منفی است، k ضریب جبرانسازی است و همواره $0 \leq k \leq 1$ می باشد. در اینجا برای بررسی بدترین وضعیت، $k = 1$ در نظر گرفته می شود. با توجه به شکل ۷ می توان نتیجه گرفت که $\hat{L} \approx 0$ ، بنابراین Q^- با توان راکتیو مصرفی توسط L_V قابل تخمین خواهد بود:

$$Q^- = 3 \cdot X_V \cdot (I_0^-)^2 \cdot LPF(j\omega) \quad (24)$$

در رابطه، I_0^- و X_V به ترتیب فازور جریان خروجی توالی منفی و راکتانس مجازی می باشند. حال با جایگزینی (24) در (23) و خطی سازی رابطه حاصل، نمایش سیگنال کوچک زبر بدست می آید:

$$U\hat{C}R = [3 \cdot X_V \cdot (I_0^-)^2 \cdot \hat{V}_0^- + 6 \cdot X_V \cdot I_0^- \cdot V_0^- \cdot \hat{I}_0^-] \cdot UCG \cdot LPF(j\omega) \quad (25)$$

که در آن نماد $\hat{}$ نشانگر مقدار سیگنال کوچک می باشد. واضح است با افزایش UCG مقدار جبرانسازی افزایش می یابد؛ اما UCG باید به نحوی انتخاب گردد که پایداری سیستم کنترل حفظ شود (Savaghebi et al, 2013). با توجه به تحلیل انجام شده برای مقدار $UCG \geq 1/5$ دو قطب در نیمه راست صفحه s قرار می گیرند و بنابراین سیستم کنترل ناپایدار می شود. در نتیجه در ادامه مقدار 8. برای UCG مورد استفاده قرار می گیرد.

۴. پایداری دینامیکی سیستم کنترلی

در این بخش آنالیز پایداری سیستم انجام می شود به گونه ای که m_p و m_i به طور مناسبی انتخاب شوند. آنالیز سیگنال کوچک سیستم به منظور بررسی وضعیت پایداری و پاسخ گذرای سیستم انجام شده است. در بلوک محاسبه کننده توان از یک فیلتر پایین گذر مرتبه دوم که پهنای باند عبور آن خیلی کوچکتر از پهنای باند کنترلر ولتاژ اینورتر می باشد استفاده شده است. توان اکتیو و راکتیو خروجی فیلترها بصورت زیر می باشد که ω_0 فرکانس رزونانس و ζ ضریب میرایی می باشد. با اعمال تقریب به منظور خطی سازی معادلات داریم:

$$\hat{p}_{meas}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot \left[\frac{v \sin\phi \hat{e}(s) + v E \cos\phi \hat{\phi}(s)}{z} \right] \quad (26)$$

$$\hat{q}_{meas}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot \left[\frac{v \cos\phi \hat{e}(s) - v E \sin\phi \hat{\phi}(s)}{z} \right] \quad (27)$$

مقدار سیگنال کوچک متغیرها پس از عبور از کنترلرهای توان بصورت زیر می باشد:

$$\hat{\phi}(s) = - \frac{m_i + m_p s}{s} \hat{p}_{meas}(s) \quad (28)$$

$$\hat{e}(s) = - n_i \hat{q}_{meas}(s) \quad (29)$$

از روابط قبلی روابط زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\hat{\phi}(s) = - \frac{m_i + m_p s}{s} \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot \left[\frac{v \sin\phi \hat{e}(s) + v E \cos\phi \hat{\phi}(s)}{z} \right] \quad (30)$$

$$\hat{e}(s) = - n_i \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot \left[\frac{v \cos\phi \hat{e}(s) - v E \sin\phi \hat{\phi}(s)}{z} \right] \quad (31)$$

با ترکیب (۳۰) و (۲۹) ما می توانیم معادله مشخصه مرتبه ۵ سیستم را بدست آوریم:

$$s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (32)$$

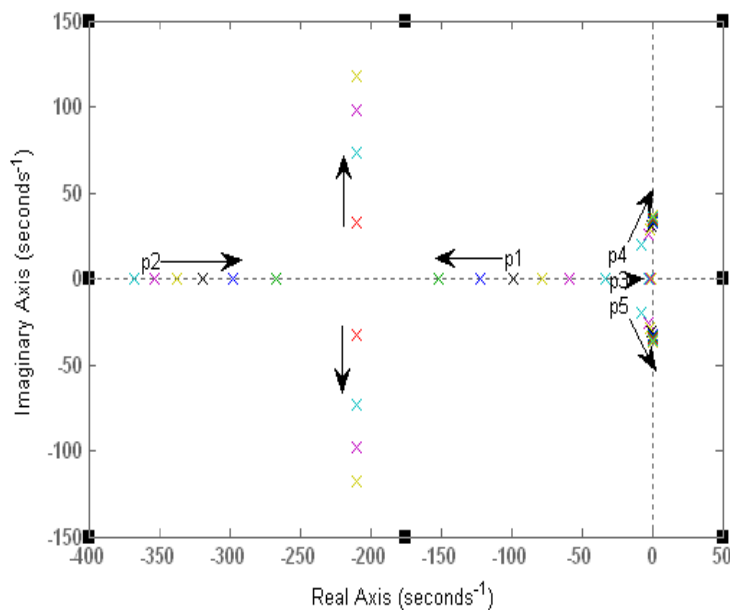
$$a_4 = 4 \cdot \omega_0 \cdot \zeta \cdot Z$$

$$a_3 = V \cdot \omega_0^2 \cdot \cos\Phi (n_p + E \cdot m_p) + 2\omega_0^2 (1 + 2\zeta^2) Z$$

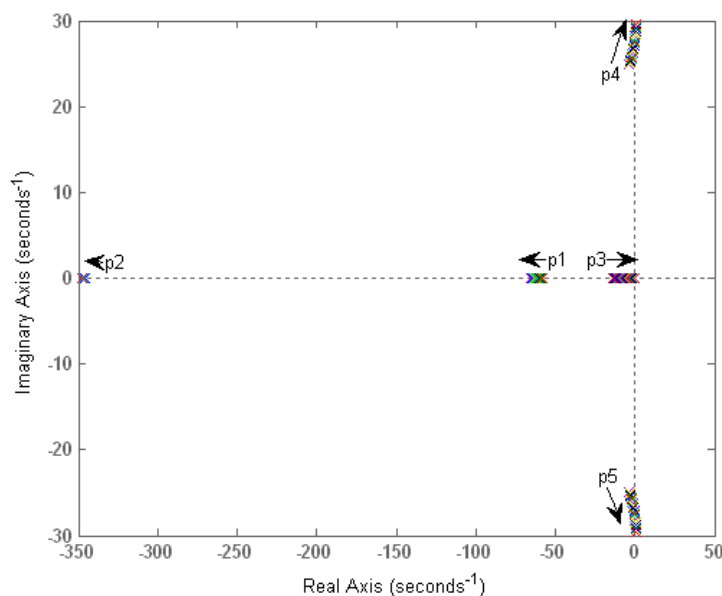
$$a_2 = 2V \cdot \omega_0^2 \cdot \zeta \cdot \cos\Phi (n_p + E \cdot m_p) + \omega_0^2 \cdot V \cdot E \cdot \cos\Phi \cdot m_i + 4\zeta \cdot \omega_0^3 \cdot Z$$

$$a_1 = V \cdot \omega_0^4 \cdot \cos\Phi (n_p + E \cdot m_p) + V \cdot E \cdot \omega_0^3 (2\zeta \cdot \cos\Phi \cdot m_i + (V/Z) \cdot \omega_0 \cdot n_p \cdot m_p) + \omega_0^4 \cdot Z$$

$$a_0 = V \cdot E \cdot \omega_0^4 \cdot m_i (\cos\Phi + (V/Z) \cdot n_p)$$



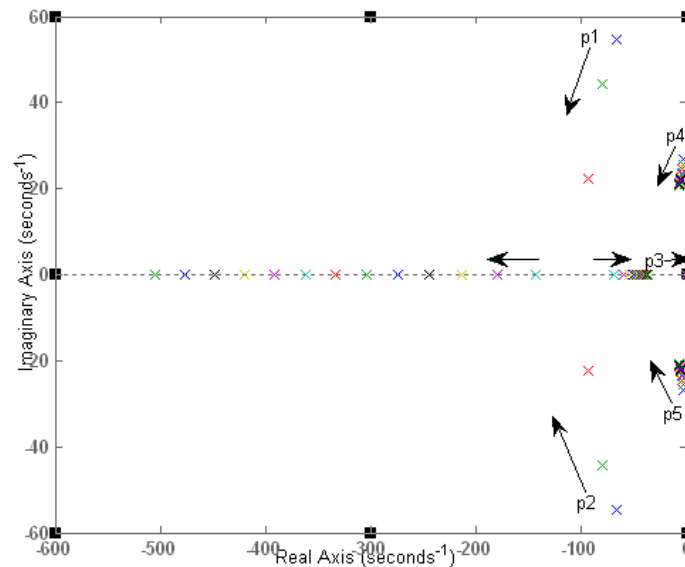
شکل-8a. مکان هندسی قطبهای سیستم به ازای تغییر $0.001 \leq m_p \leq 0.0001$.



شکل-8b. مکان هندسی قطبهای سیستم به ازای تغییر $0.001 \leq m_i \leq 0.00002$.

مکان هندسی ریشه های مدل بدست آمده در شکل های 8a و 8b نشان داده شده است. مکان هندسی مقادیر ویژه λ_4 و λ_5 نشان می دهد هنگامی که m_p زیاد می شود قطبها به سمت محور موهومی حرکت می کنند و سیستم سریعتر و نوسانی تر می شود، هنگامی که m_i زیاد می شود λ_4 و λ_5 از λ_1 و λ_2 دور می شوند شونده و از محور عمودی عبور می کنند و سیستم ناپایدار می شود. با استفاده از معادله (32) پایداری سیستم برای مقادیر بزرگ L_G نیز بررسی می شود. شکل 9 نشان می

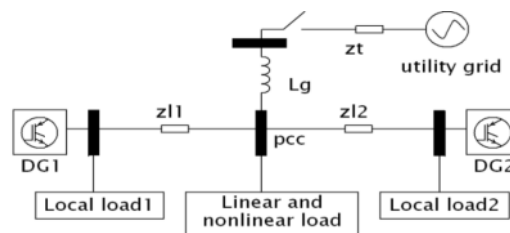
دهد که سیستم مرتبه ۵ مذکور پایدار است اگر مقادیر L_G بزرگتر از 5MH باشد، زیرا با این مقدار بخش حقیقی مقادیر ویژه λ_4 و λ_5 مثبت می شود بنابراین سیستم ناپایدار می شود و اگر مقدار L_G را افزایش دهیم این مقادیر ویژه پایدار می شوند. اگر چه λ_2 و λ_3 به سمت محور موهومی حرکت می کنند ولی هرگز از آن عبور نمی کنند.



شکل-۹. مکان هندسی به قطبهای سیستم ازای تغییر $0.005 \leq l_g \leq 0.02$.

۵. نتایج شبیه سازی

شبیه سازی بر روی ریزشبکه متصل به شبکه نشان داده شده در شکل ۱۰ انجام می گیرد. در این شکل بلوک های DG_1 و DG_2 نشان دهنده طبقه قدرت مولد تولید پراکنده (شامل لینک dc، اینورتر و فیلتر LC) هستند. به منظور بررسی صحت کنترل پیشنهاد شده تست های مختلفی انجام شده است و کلیه پارامترهای سیستم در جدول ۱ آمده است. تاثیر سیستم کنترلی پیشنهادی برای حالت افت ولتاژ در فازهای مختلف، افزایش ولتاژ و نامتعادلی ولتاژ بررسی شده است.



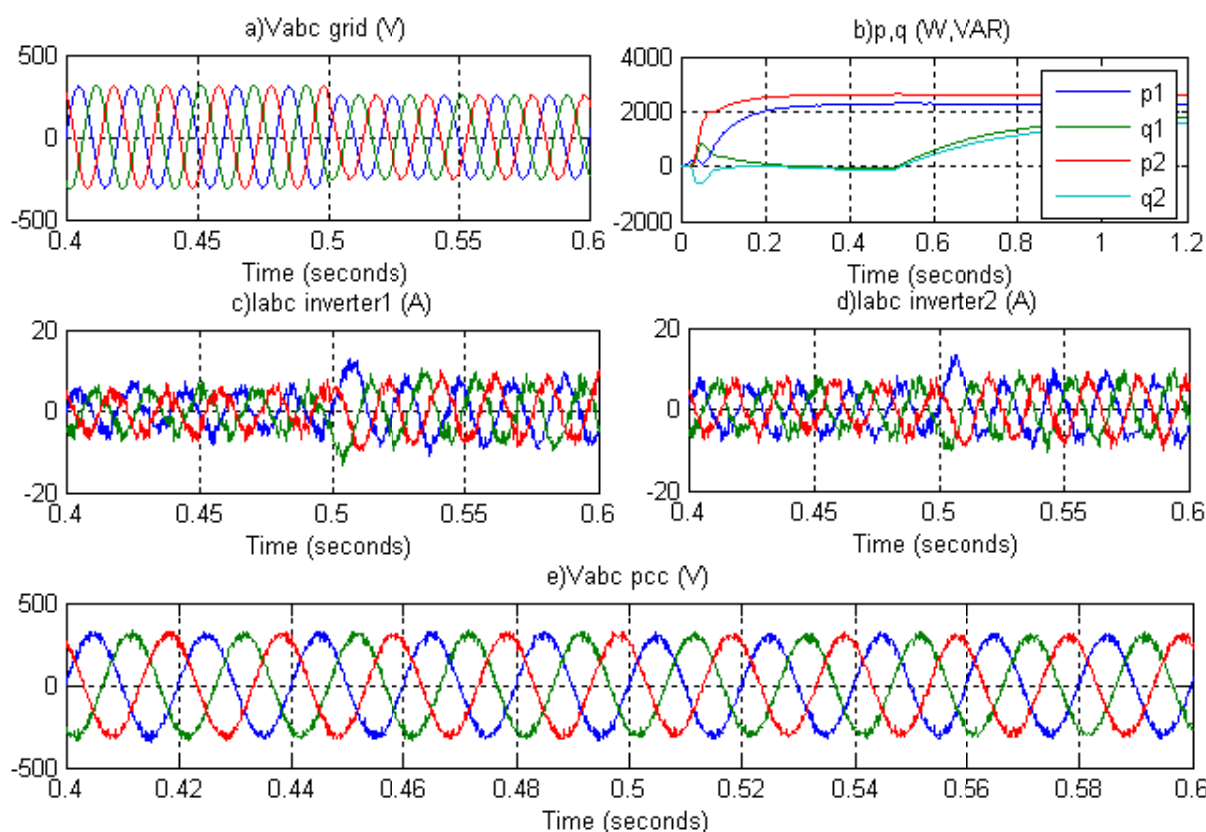
شکل-۱۰. مدل شبکه شبیه سازی شده

جدول ۱- پارامترهای شبکه قدرت و سیستم کنترل

Symbol	Parameter	Value	Unit
E	Grid voltage amplitude	311	V
ω	Grid frequency	50	Hz
$R_1, R_2, R_{pcc}, r_{l1}, r_{l2}, r_t, R_v$	Load and line resistance/ virtual impedance	70/70/40/.1/.1/1/1	Ω
$L_g, L_{l1}, L_{l2}, L_t, L_v$	Line Inductance/ virtual impedance	13/1/2/2	mH
F_s	Switching frequency	10	kHZ

m_{i1}, m_{i2}	integral droop P coefficient	.00002,00004	W s/rd
m_{p1}, m_{p2}	Proportional droop P coefficient	.0002,0004	W/rd
n_{p1}, n_{p2}	Proportional droop Q coefficient	.0006,.006	VARs s/V
ω_0	Resonance frequency of bpf	10π	Rd/s
ω_{lpf}	Cut off frequency of lpf	π	Rd/s
C_f	Inverter Capacitor	25	μf
$k_p V, k_p I / k_r V, k_r I$	PR controller coefficient	.5,1/100,200	W/rd

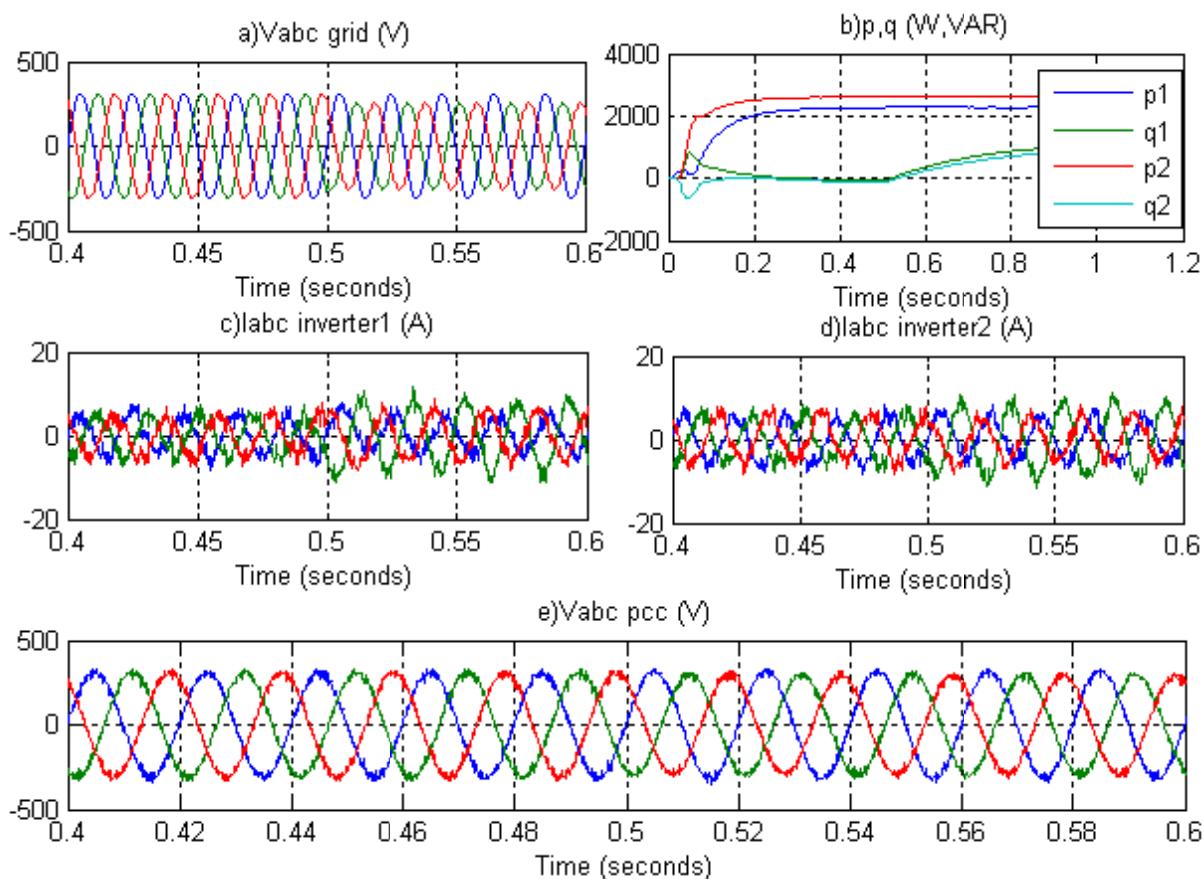
شکل ۱۱ وضعیت سیستم را در هنگامی که یک افت ولتاژ سه فاز 0.18 pu در زمان $t=0.5$ s در شبکه اتفاق می افتد، نشان می دهد. دقت شود که حالت گذرای اولیه شکل موجها به این خاطر می باشد که ریز شبکه در لحظه $t=0.02$ s با شبکه سنکرون و به آن متصل شده است.



شکل-۱۱. (a) ولتاژ شبکه، (b) توان اکتیو و راکتیو اینورترها، (c) جریان اینورتر ۱، (d) جریان اینورتر ۲، (e) ولتاژ شین pcc در هنگام کاهش متقارن ولتاژ شبکه

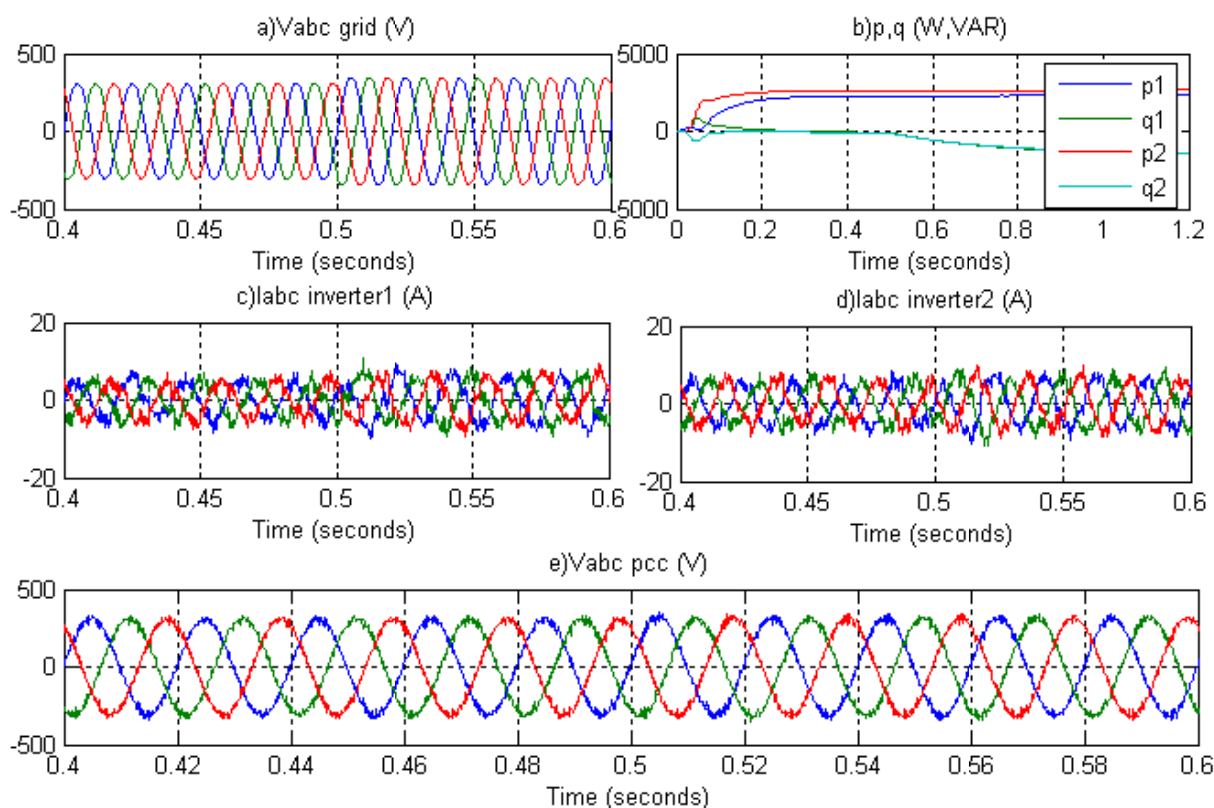
شکل های فوق نشان می دهند که اینورترها علاوه بر اینکه توان را برای بارهای محلی خود تامین می کنند مقادیر مرجع توان $P1^*=2200, P2^*=2600$ W, $Q1^*=Q2^*=0$ را به شبکه تحویل می دهند و در زمان وقوع افت ولتاژ، مقادیر توان راکتیو تزریق شده برای جبران سازی ولتاژ به مقدار $Q1=1800, Q2=1600$ VAR افزایش یافته است.

شکل ۱۲ وضعیت اینورترها را برای زمانی که افت ولتاژ در دو فاز از شبکه و در زمان $t=0.5$ s اتفاق می افتد، نشان می دهد.



شکل-۱۲. (a) ولتاژ شبکه، (b) توان اکتیو و راکتیو اینورترها، (c) جریان اینورتر ۱، (d) جریان اینورتر ۲، (e) ولتاژ شین pcc در هنگام افت ولتاژ دو فاز شبکه

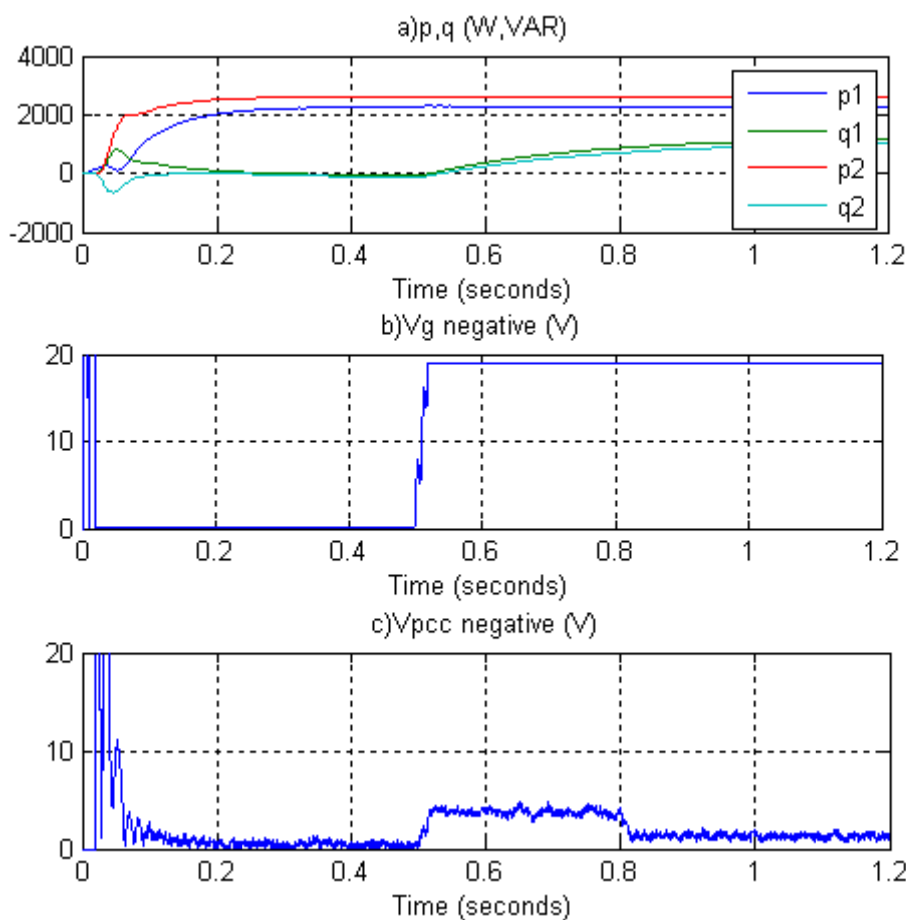
در این حالت کانورترها توان راکتیو مورد نیاز را برای جبران سازی افت ولتاژ فراهم می کنند و به منظور نگهداری کیفیت ولتاژ بار به شبکه جریان تزریق می کنند. مقدار توان راکتیو تزریقی در این حالت در مقایسه با حالت اول (کاهش ولتاژ سه فاز) کمتر می باشد. شکل نشان می دهد که توان اکتیو و راکتیو در هنگام تغییر مقادیر رفرنس بصورت مستقل از هم کنترل شده اند. در این حالت نیز سیستم قابلیت ردیابی رفرنسهای مورد نظر را به صورت مطلوب انجام داده است. در ادامه قابلیت کارایی سیستم برای حالتی که ولتاژ شبکه افزایش می یابد بررسی شده است. شکل ۱۳ وضعیت سیستم را برای زمانی که یک افزایش ولتاژ 0.11 pu در لحظه $t=0.5s$ در سه فاز شبکه اتفاق می افتد، نشان می دهد.



شکل-۱۳. (a) ولتاژ شبکه ، (b) توان اکتیو و راکتیو اینورترها ، (c) جریان اینورتر ۱ ، (d) جریان اینورتر ۲ ، (e) ولتاژ شین pcc در هنگام افزایش متقارن ولتاژ شبکه

شکل ها نشان می دهند که اینورترها علاوه بر تزریق توان اکتیو مورد نیاز، در هنگام وقوع اضافه ولتاژ در شبکه بوسیله جذب توان راکتیو ولتاژ شین PCC را تثبیت کرده اند.

در این بخش تاثیر عملکرد سیستم کنترل بر جبران سازی نامتعادلی ولتاژ شبکه بررسی شده است. شکل ۱۴ وضعیت توان و ولتاژها را برای زمانی که یک افت ولتاژ نامتقارن دو فاز 0.18 pu در لحظه $t=0.5\text{s}$ در شبکه اتفاق می افتد، نشان می دهد. میزان ولتاژ توالی منفی شبکه در لحظه وقوع افت ولتاژ دو فاز 19V می باشد. از آنجا که حلقه کنترل اکتیو قابلیت جبران سازی افت ولتاژهای نامتقارن را نیز دارد، کنترلر ولتاژ در ابتدا میزان دامنه ولتاژ توالی منفی نقطه PCC را به 5V کاهش داده است، بعد از فعال شدن بلوک جبران سازی توالی منفی اینورترها در لحظه $t=0.8\text{s}$ مقدار ولتاژ توالی منفی در نقطه PCC به مقدار 1.5V کاهش یافته است.



شکل-۱۴. (a) توان اکتیو و راکتیو اینورترها، (b) ولتاژ توالی منفی شبکه، (c) ولتاژ توالی منفی شین pcc، در هنگام فعال شدن بلوک جبران‌ساز توالی منفی

با توجه به شکل موج ولتاژهای سه فاز تاثیر کاهش میزان نامتعادلی ولتاژ توسط حلقه جبران‌ساز نامتعادلی به خوبی قابل مشاهده می باشد. طبق نتایج بدست آمده سیستم دارای قابلیت های مطلوب زیر می باشد: دنبال کردن مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو، تثبیت دامنه ولتاژ و جبران‌سازی نامتعادلی ولتاژ.

۶. نتیجه گیری

در آینده سرویسهای جانبی در DG ها می بایست شبکه توزیع را تقویت کنند و کیفیت توان آن را ارتقاء دهند. در این مقاله سیستم DG سه فاز با قابلیت کاربری به صورت تجهیز بهبود کیفیت توان ارائه شده است. اینورتر DG به صورت ولتاژ کنترل می باشد. از کنترل مشخصه افی برای ردیابی ولتاژ مرجع استفاده شده است. یک اندوکتانس بین شبکه و سیستم اضافه شده است، این مسئله می تواند به ایجاد یک خط ارتباطی تقریباً القایی کمک کند و اجازه می دهد که کنترل ولتاژ و فرکانس با تنظیم توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل از هم انجام شوند. اینورتر DG حمایت ولتاژ شبکه را در مولفه اصلی انجام می دهد و در زمان وقوع تغییرات ولتاژ و نامتعادلی ولتاژ، اینورتر علاوه بر تغذیه توان تقاضا شده بوسیله بار، توان راکتیو مورد نیاز را برای تثبیت ولتاژ شبکه فراهم می کند. سیستم کاربردها و قابلیت های زیر را دارا می باشد: ردیابی توان اکتیو و راکتیو مرجع،

تثبیت دامنه ولتاژ و جبران سازی نامتعادلی ولتاژ. نتایج سیستم شبیه سازی شده کارایی سیستم مذکور را در حالت های مختلفی نشان می دهد.

منابع:

- [1] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547-2003.
- [2] A. V. Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 16, no. 4, pp. 782–790, Oct. 2001.
- [3] J. M. Guerrero, J. Matas, L. García de Vicuña, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 994–1004, Apr. 2007.
- [4] D. Cornforth, T. Moore, and S. Sayeef, "Challenges and opportunities for inverters in microgrids," in Proc. 37th IEEE IECON, Nov. 2011, pp. 3111–3116.
- [5] J. He, Y. W. Li, and M. S. Munir, "A flexible harmonic control approach through voltage controlled DG-grid interfacing converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 444–455, Jan. 2012.
- [6] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1707–1719, Nov./Dec. 2005.
- [7] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 1021–1031, Jul. 2006.
- [8] Juan C. Vasquez, R. A. Mastromauro, Josep M. Guerrero, and Marco Liserre, "Voltage Support Provided by a Droop-Controlled Multifunctional Inverter", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 56, NO. 11, NOVEMBER 2009.
- [9] C. V. Nayar, M. Ashari, and W. W. K. Keerthipala, "A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a back up diesel generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 3, pp. 348–353, Sep. 2000.
- [10] H. Tao, J. L. Duarte, and M. A.M. Hendrix, "Line-interactive UPS using a fuel cell as the primary source," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 3012–3021, Aug. 2008.
- [11] M. Hojo, Y. Iwase, T. Funabashi, and Y. Ueda, "A method of three-phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems," in Proc. EPE-PEMC, Sep. 2008, pp. 2487–2491.
- [12] P. T. Cheng, C. Chen, T. L. Lee, and S. Y. Kuo, "A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 2, pp. 805–815, Mar./Apr. 2009.
- [13] Po-Tai Cheng, Chien-An Chen, Tzung-Lin Lee, and Shen-Yuan Kuo, "A Cooperative Imbalance Compensation Method for Distributed-Generation Interface Converters", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 45, NO. 2, MARCH/APRIL 2009.
- [14] Tzung-Lin Lee, and Po-Tai Cheng, "Design of a New Cooperative Harmonic Filtering Strategy for Distributed Generation Interface Converters in an Islanding Network", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 22, NO. 5, SEPTEMBER 2007.
- [15] Mehdi Savaghebi, , Alireza Jalilian, Juan C. Vasquez, and Josep M. Guerrero, "Autonomous Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 60, NO. 4, APRIL 2013.
- [16] S.-J. Lee, H. Kim, S.-K. Sul, and F. Blaabjerg, "A novel control algorithm for static series compensator by use of PQR instantaneous power theory," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 814–827, May 2004.