

طراحی کنترل کننده فازی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم توزیع

حسین خورسند، مجید نیروی پور، علیرضا روستا

چکیده: در این مقاله کاربرد جدیدی از کنترلر فازی به منظور تنظیم ضریب مدولاسیون اینورتر سه فاز که به همراه منبع تغذیه بدون وقفه (UPS) به کار رفته، استفاده می شود، تا ولتاژ و توان راکتیو در شبکه کنترل شود. UPS ولتاژ را در نقطه اتصال مشترک (PCC) کنترل می کند. از یک فیلتر LC در خروجی اینورتر استفاده می شود، تا هارمونیک های ناشی از کلید زنی را از بین ببرد. در کنترلر فازی مقدار ضریب مدولاسیون اینورتر با تعریف قواعد فازی برای خطای ولتاژ ($e=V_0-V_{ref}$) در نقطه اتصال مشترک، بدست می آید. عملکرد کنترلر فازی پیشنهادی نسبت به کنترلر PI در شرایط کار مختلفی مانند افت ولتاژ، افزایش ولتاژ، نامتعادلی ولتاژ و هارمونیکها بررسی می شود. نتایج شبیه سازی انجام شده، نشان می دهد که کنترلر فازی عملکرد بهتری نسبت به کنترلر PI از خود نشان می دهد.

۱. مقدمه

عدم وجود بارهای یکسان روی فازهای یک شبکه موجب ایجاد جریان های عبوری مختلف از مسیر سه فاز می گردد. از طرفی با توجه به آنکه مسیرهای عبوری جریان دارای امپدانس می باشند، افت ولتاژهای متفاوت در مسیر بارها و در نتیجه ولتاژهای متفاوتی بر روی فازهای بار ایجاد می شود. نامتعادلی ولتاژ در شبکه سه فاز می تواند باعث اغتشاش و خرابی بارهای سه فاز شود. به عنوان مثال در اثر نامتعادلی ولتاژ، جریان سه فاز ماشین القایی می تواند اعوجاج بسیار زیادی پیدا کرده و جریان در یک فاز از مقدار نامی بیشتر شود. علاوه بر آن ولتاژ زیاد می تواند عایق بندی سیم پیچ استاتور را خراب کند و عمر موتور را کوتاه کند. به همین دلیل استاندارد بین المللی، نامتعادلی زیاد ولتاژ را ممنوع کرده است. بنابراین تنظیم ولتاژ در شبکه قدرت امری ضروری به نظر می رسد. استفاده از تولیدات پراکنده (DG) در این زمینه می تواند موثر واقع شود. بنابراین استفاده از منبع تغذیه بدون وقفه (UPS) می تواند راه حل مناسبی برای مسئله کیفیت توان از جمله هارمونیکها، نامتعادلی ولتاژ، افت ولتاژ، افزایش ولتاژ باشد. منبع تغذیه بدون وقفه می تواند برای کاهش اعوجاج، تنظیم ولتاژ برای بارهای بحرانی مانند سیستم های الکترونیکی پزشکی، وسایل ارتباطی و باتری پشتیبان، مورد استفاده قرار بگیرد. UPS ها شامل دو نوع هستند. در نوع *offline*، UPS منتظر می ماند تا قطعی برق رخ دهد، سپس وارد مدار می شود، به عبارتی به صورت پشتیبان مورد استفاده قرار می گیرد. در نوع *on-line*، UPS همواره در مدار است و به صورت پیوسته به شبکه توان می دهد و در همان حال نیز توسط شبکه شارژ می شود. در این مقاله کاربردهای UPS گسترش داده می شود و از آن در شبکه قدرت استفاده می شود. UPS توسط تولیدات پراکنده (DGs) مانند *pv stack*، *fuelcell stack* یا یک باتری، تغذیه می شود یک اینورتر سه فاز ولتاژ dc تولیدی UPS را به ac تبدیل می کند. در خروجی اینورتر از یک فیلتر پایین گذر LC با فرکانس قطع $50 \cdot \text{Hz}$ استفاده می شود تا هارمونیکهای ناشی از کلیدزنی اینورتر با فرکانس کلیدزنی 1 KHz ، را حذف کند. مدل اینورتر PWM به همراه فیلتر LC در شکل ۲ نشان داده شده است.

Wen zhang در مرجع [۱] تابع هدف چند ضابطه ای کنترل ولتاژ و توان راکتیو شبکه را با کنترلر فازی و الگوریتم PSO، بهینه می کند و ولتاژ شبکه را تثبیت می کند. Andrija T.Saric در مرجع [۲] از برنامه ریزی پویا و منطق فازی برای کنترل ولتاژ شبکه استفاده می کند و تابع هدف چند ضابطه ای شبکه را می نی مم می کند. Abdelouahab Bouafia در مرجع [۳] تکنیک کلید زنی جدیدی را برای اینورتر سه فاز PWM پیشنهاد می کند تا کنترل توان را مستقیماً و بدون سنسورهای ولتاژ در خط انتقال انجام دهد. Akbar Rahide در مرجع [۵] برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو از کنترلر فازی استفاده می کند و تلفات توان شبکه را کاهش می دهد. N.Yadaiah در مرجع [۶] از کنترلر فازی برای حفظ پایداری و جلوگیری از، از دست دادن سنکرونیزم شبکه استفاده می کند تا بعد از وقوع خطای اتصال کوتاه ناگهانی، کنترل ولتاژ ولتاژ مناسبی صورت گیرد. Ilhan kocaarslon در مرجع [۷] از کنترلر فازی و کنترلر PI جهت کنترل فرکانس بار در یک شبکه دو ناحیه ای استفاده می کند. K.H.AabduL Rahmam در مرجع [۸] برای حل مسئله کنترل توان راکتیو در شبکه قدرت از هوش مصنوعی استفاده می کند. H.Camblong در مرجع [۹] به منظور تولید ولتاژ متعادل تحت شرایط نامتعادل بار، از کنترلر اینورتر ۴ ساق که با منبع ولتاژ تغذیه می شود، استفاده می کند. Xu yan در مرجع [۱۰] توسط کنترلر فازی، ولتاژ و توان راکتیو را کنترل می کند.

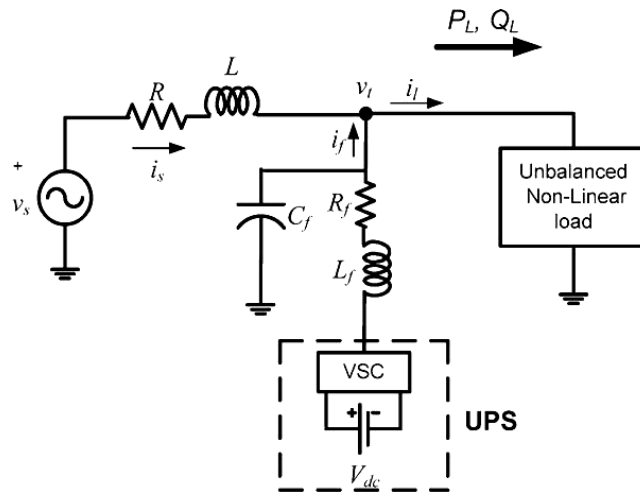
در هیچ کدام از موارد بالا از کنترلر فازی به عنوان کنترلری برای کنترل ضریب مدولاسیون در اینورتر سه فاز با منبع ولتاژ (VSI) مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله استفاده از کنترلر فازی در کنترل ضریب مدولاسیون اینورتر که در منبع تغذیه بدون وقفه (UPS) مورد استفاده قرار گرفته، بیان می شود.

۲. توصیف سیستم

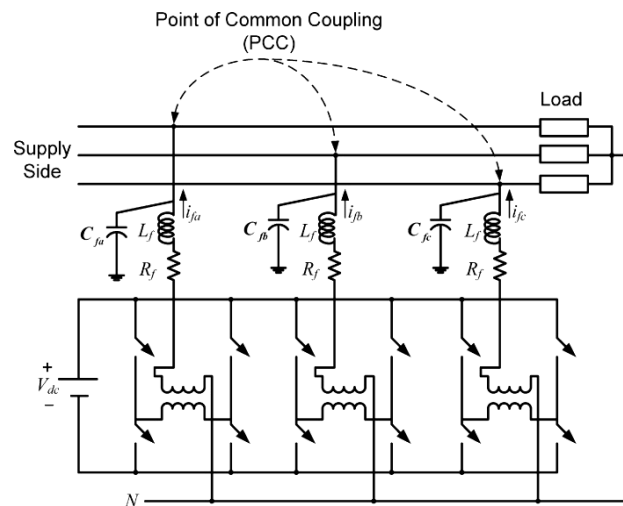
دیاگرام تک خطی سیستم توزیع به همراه UPS در شکل ۱ نشان داده شده است. برای سادگی فرض می شود که UPS توسط یک باتری با ولتاژ V_{dc} تغذیه می شود. همچنین فرض می شود که باری نامتعادل به نقطه اتصال مشترک PCC، متصل شده باشد. منبع ac با ولتاژ V_s با امپدانس $R+j\omega L$ به PCC متصل شده است. در خروجی اینورتر از یک فیلتر LC برای از بین بردن هارمونیکهای کلیدزنی استفاده می شود. C_f , L_f به ترتیب اندوکتانس و خازن فیلتر LC را تشکیل می دهند. مقاومت R_f بیانگر تلفات مدار است. ولتاژ PCC، V_t در نظر گرفته می شود.

3. مدل UPS

مدل UPS که در شکل ۲ نشان داده شده است، شامل سه اینورتر VSC است. هر سه اینورتر که توسط ولتاژ V_{dc} تغذیه می شود، بوسیله سه ترانسفورمر تکفاز به شبکه متصل شده اند، تا از شبکه ایزوله باشند. این ترانسفورمرها به صورت ستاره به هم متصل شده اند، و نقطه خنثی آنها به نقطه خنثی بار متصل شده است. در صورتی که نقطه خنثی بار در دسترس نباشد، می توان نقطه خنثی ترانسفورمرها را زمین کرد.



شکل ۱: دیاگرام تک خطی سیستم توزیع به همراه UPS



شکل ۲: مدل UPS شامل سه اینورتر VSC تغذیه شده با ولتاژ V_{dc} مشترک

4- استراتژی کنترلی

مهمترین هدف این مقاله تنظیم ولتاژ PCC (V_t) با وجود نامتعادلی و اغتشاش بار است. بنابراین در هنگام نامتعادلی و اغتشاش بار، ولتاژ بار بایستی در مقدار معینی تثبیت شود تا ولتاژ نقطه اتصال مشترک ثابت بماند. بنابراین برای کنترل ولتاژ PCC ، باید ورودی کنترلر فازی خطای ولتاژ بار از مقدار مبنا (V_{ref}) و مشتق خطا، در نظر گرفته شود $e = V_0 - V_{ref}$ که V_0 ولتاژ بار است و V_{ref} میزان ولتاژ مورد انتظار برای نقطه اتصال مشترک است). کنترلر فازی، ضریب مدولاسیون اینورتر (VSC) را کنترل می کند تا ولتاژ ثابتی در PCC داشته باشیم. در تئوری کنترل خطی با استفاده از مدل ریاضی سیستم و رفتار حلقه بسته سیستم، کنترلر طراحی می شود. این روش در سیستم های خطی به خوبی جوابگوست. روش طراحی $root - locus$ نیز در کنترل سیستم های خطی می تواند استفاده شود اما در این مقاله نمی تواند پاسخ مورد انتظار را برآورده کند. زیرا بدست آوردن مدل ریاضی سیستم به دلیل غیر خطی بودن، بسیار پیچیده است. و همچنین پارامترهای سیستم ثابت نیستند و دارای وابستگی متقابل با دیگر پارامترها هستند. بنابراین در این گونه موارد در استفاده از کنترلر خطی، محدودیت داریم. به همین منظور بایستی روشهای کنترلی مختلف را که به مدل ریاضی دقیق سیستم نیاز ندارند، ترکیب کنیم. استفاده از کنترلر فازی که بر اساس تجربه و آگاهی از رفتار سیستم است، می تواند بسیار موثر باشد. به همین منظور نوشتن قواعدی به زبان فازی که در شرایط خاص سیستم، سیگنال کنترلی مناسب را ایجاد کند، ضروری به نظر می رسد. به دلیل رفتار غیر خطی اینورتر، طراحی کنترلر خطی نمی تواند موثر باشد. با توجه به مزایای کنترلر فازی که پیشتر توصیف شد، استفاده از کنترلر فازی برای کنترل توان راکتیو که با تنظیم ضریب مدولاسیون اینورتر صورت می گیرد، بسیار مؤثر خواهد بود. سیستم استنتاج فازی پیشنهادی، از نوع $mamdani$ خواهد بود. که معمولاً به صورت فیدبک به کار می رود زیرا قواعد ارائه شده، یک نگاشت استاتیک بین متغیرهای قدیم و جدید است. به منظور کنترل توان راکتیو در مقدار مورد انتظار، سیستم استنتاج فازی (FIS) خطا و مشتق خطا را به عنوان ورودی و ضریب مدولاسیون (m) اینورتر را به عنوان خروجی در نظر می گیرد. کنترلر فازی برخلاف کنترلرهای معمولی نیاز به مدل ریاضی سیستم ندارد، اما درک دقیق سیستم و نیازمندی های کنترلی، بسیار ضروری است. در طراحی کنترلر فازی لازم است ابتدا اطلاعات مورد بررسی و پردازش قرار گرفته و بر مبنای آن استراتژی مناسب کنترلی اتخاذ شود. کنترل کننده فازی شامل سه قسمت بوده که در اینجا به اختصار مورد بررسی قرار می گیرند:

فازی سازی: متغیرهای کنترلی ابتدا بایستی به زبان فازی تبدیل شوند. این مرحله توسط تعریف توابع عضویت مناسب صورت می گیرد. در این مقاله از ۷ تابع عضویت برای خطا و مشتق خطا و خروجی استفاده شده است که عبارتند از: NB ، PM ، PS ، ZE ، NS ، NM و NB .

برای هر کدام از این زیرمجموعه ها از توابع عضویت گوسی استفاده می کنیم که در شکل های ۳-۵ نشان داده شده اند. این توابع عضویت هر کدام از متغیرهای ورودی را به حوزه فازی، تجزیه می کنند. توابع عضویت مشخص می کنند که کدام متغیر به قاعده خاصی تعلق دارد. به این پروسه که توسط قواعد تعریف شده، صورت می گیرد، فازی سازی می گویند. قواعد کنترلی، بر اساس مشخصه پاسخ پله، ساخته می شوند. به عنوان مثال اگر خروجی فاصله زیادی از نقطه کار داشته باشد، یک سیگنال کنترلی بزرگ مورد نیاز است تا خروجی را به سمت نقطه کار سوق دهد. اما اگر خروجی، نزدیک به نقطه کار باشد، سیگنال کنترلی کوچک مورد نیاز خواهد بود. قواعد کنترلی که در این مقاله به کار خواهد رفت، در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای داشتن سطح کنترلی پایدار و هموار، همپوشانی توابع عضویت مجاور هم باید به گونه ای باشد که مجموع نقاط عمودی در ناحیه همپوشانی بزرگتر از یک نباشد. در کنترل کننده پیشنهادی خطا و مشتق خطا فازی سازی شده و به صورت زیر مجموعه های فازی توصیف شده است.

مکانیزم استنتاج: رفتار کنترلی سیستم که به نحوه ارتباط ورودی و خروجی سیستم بستگی دارد توسط تعیین قواعد کنترلی که به صورت زیر هستند، تعیین می شود:

اگر (الگوریتم پیشنهادی) آنگاه (الگوریتم پیشنهادی)

که هر الگوریتم پیشنهادی به صورت « x برابر y باشد» یا « x برابر y نباشد» خواهد بود. این قواعد برای تعیین سیگنال کنترلی مناسب به کار می روند. وقتی یک متغیر ورودی خوانده می شود، هر قاعده ای که دارای درجه ای از درستی باشد، فعال می شود و باعث ایجاد سطح کنترلی مناسب خواهد شد. وقتی تمام قواعد، فعال شدند، سطح کنترلی مناسب به مرحله فازی زدایی فرستاده می شود.

فازی زدایی: مجموعه های فازی ایجاد شده در مرحله استنتاج که به زبان فازی است بایستی به متغیرهای واقعی تبدیل شوند تا در کنترل سیستم استفاده شوند. این پروسه توسط فازی زدایی انجام خواهد شد. روشهای متفاوتی جهت فازی زدایی وجود دارد. متداول ترین روشها عبارتند از:

Mean of Maxima (الف)

Center of Area (ب)

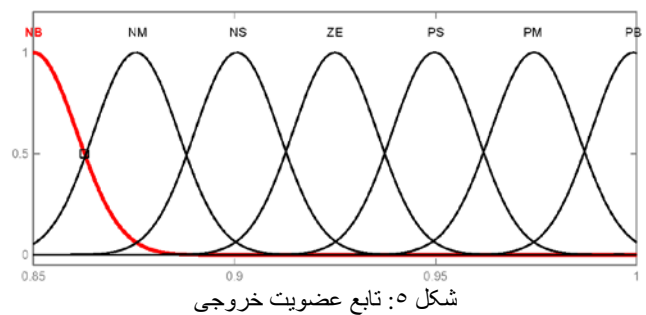
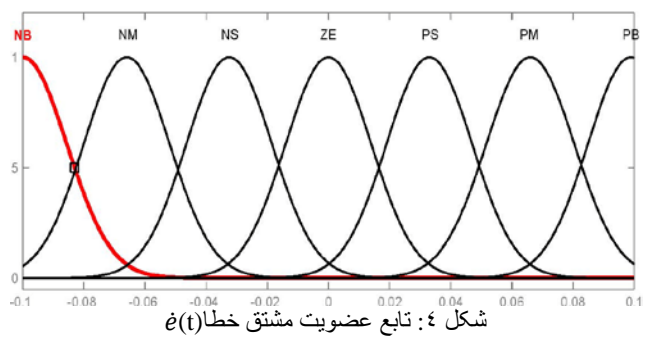
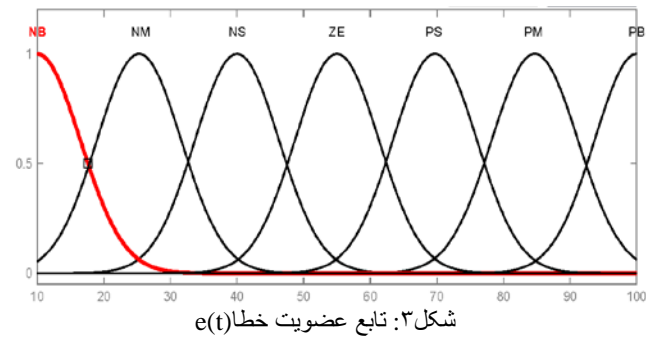
Middle of Maximum (ج)

Smallest of Maximum (د)

در کنترل کننده پیشنهادی از روش **Center of Area** استفاده می شود. این روش مرکز ثقل فضای نهایی فازی را محاسبه می کند و نتایجی را بر اساس حساسیت انجام قواعد، تولید می کند. بنابراین نتایج تمایل دارند به صورت هموار و صاف در میان سطح کنترلی، منتقل شوند.

جدول ۱: قواعد کنترلر فازی

$\Delta e/e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

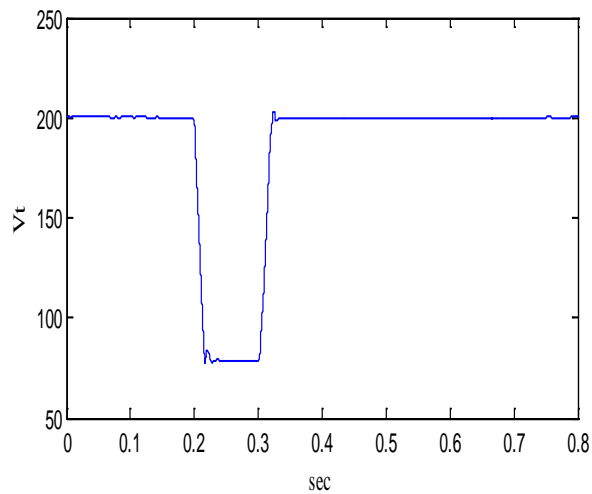


5- نتایج شبیه سازی

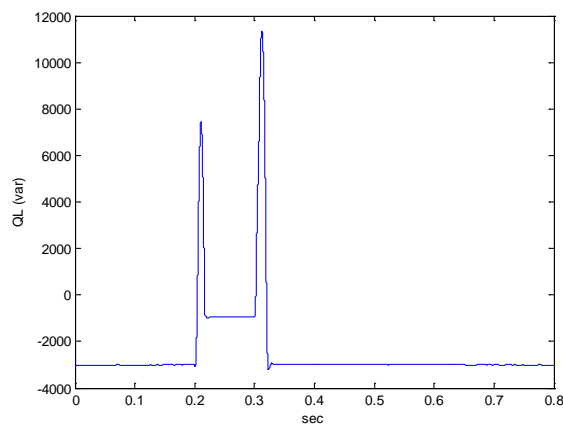
در این قسمت تاثیر کنترل کننده فازی پیشنهادی، جهت کنترل ولتاژ دو سر بار در سیستم شکل ۱ مورد بررسی قرار می گیرد. و نتایج بدست آمده، با کنترل کننده PI مقایسه خواهد شد.

در سیستم نشان داده شده در شکل ۱ ولتاژ منبع V_s ، متعادل و دارای اندازه 200 Vrms است. بار سه فاز متصل به PCC، (10Kw, 2Kvar) در نظر گرفته می شود. امپدانس فیدر $R+j\omega L=0.01 + j0.35\Omega$ بوده و ولتاژ تغذیه UPS برابر $V_{dc}=400$ و فیلتر قرار گرفته در خروجی اینورتر دارای مقادیر $L_f=2mH, C_f=50\mu f$ می باشد.

در زمان $t = 0.2s$ نامتعادلی بار رخ می دهد و بار سه فاز (100Kw, 2Kvar) با بار موجود به صورت موازی قرار می گیرد و در زمان $t = 0.3s$ برداشته می شود. ولتاژ بار در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که کنترلر، مقدار مبنا ($V_{ref}=200$) را دنبال می کند، و کاهش ولتاژ ناشی از اضافه شدن بار را جبران کرده و ولتاژ بار را در مقدار 200v تثبیت می کند. توان راکتیو عبوری از شبکه در شکل ۷ نشان داده شده است. توان اکتیو عبوری از شبکه در شکل ۸ و جریان عبوری از بار در شکل ۹ نشان داده شده است. به منظور مقایسه نتایج بدست آمده از کنترلر فازی با کنترلر PI، این شبکه با کنترلر PI نیز بررسی شده که نتایج در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

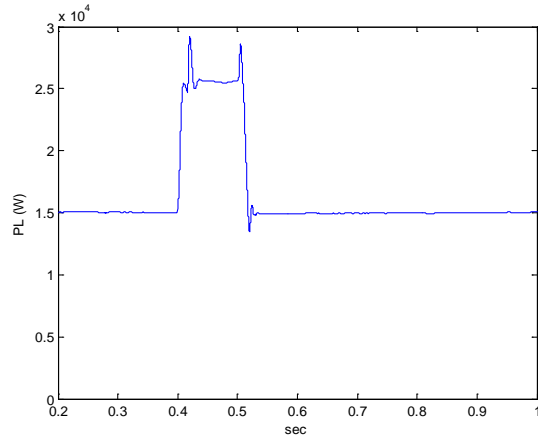


شکل ۶: ولتاژ نقطه اتصال مشترک با کنترلر فازی

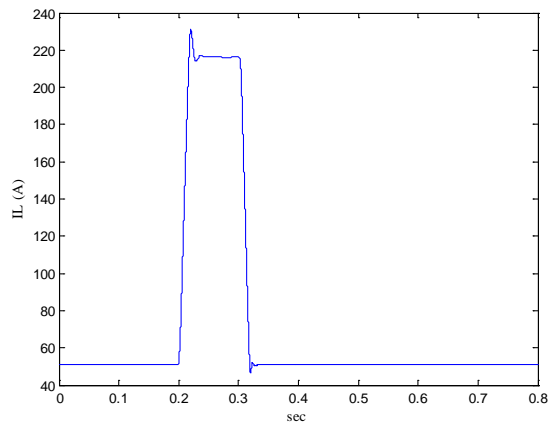


شکل ۷: توان راکتیو عبوری از بار با کنترلر فازی

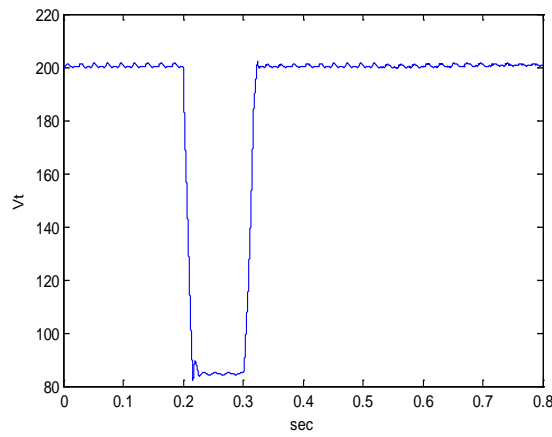
حسین خورسند، مجید نیری پور، علیرضا روستا



شکل ۸: توان اکتیو عبوری از بار با کنترلر فازی

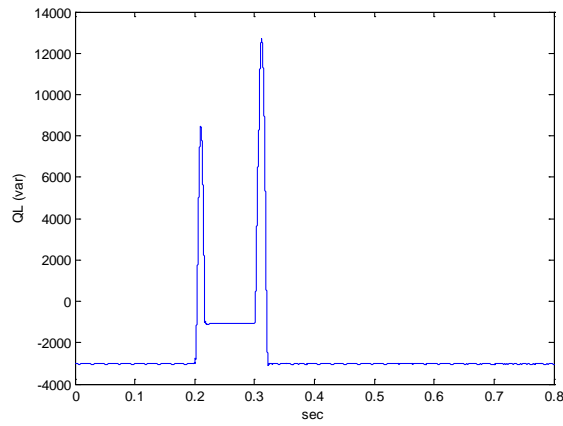


شکل ۹: جریان عبوری از بار با کنترلر فازی

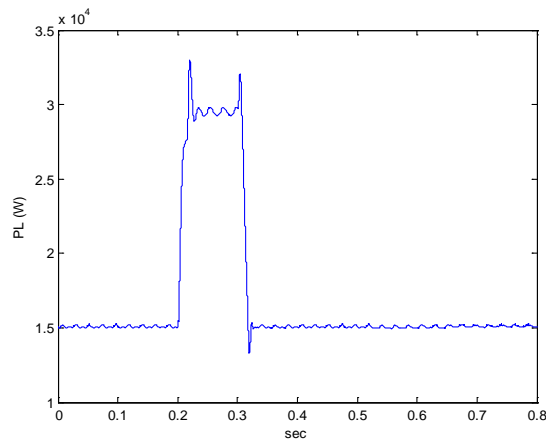


شکل ۱۰: ولتاژ نقطه اتصال مشترک با کنترلر PI

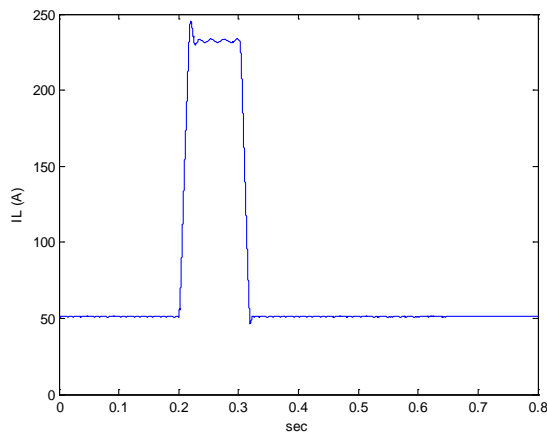
طراحی کنترل کننده فازی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم توزیع



شکل ۱۱: توان راکتیو عبوری از بار با کنترلر PI



شکل ۱۲: توان اکتیو عبوری از بار با کنترلر PI



شکل ۱۳: جریان عبوری از بار با کنترلر PI

6- نتیجه گیری

در این مقاله روش کنترل فازی به منظور کنترل توان راکتیو عبوری از شبکه و UPS پیشنهاد شد. با استفاده از اینورتر سه فاز که با تکنیک PWM کلیدزنی می شود، می توان UPS را به شبکه متصل کرد. و از یک فیلتر LC برای حذف هارمونیکهای ناشی از کلیدزنی اینورتر، استفاده نمود. در این مقاله توسط کنترلر فازی، ضریب مدولاسیون اینورتر کنترل شد تا به واسطه آن توان راکتیو عبوری از بار کنترل شود و ولتاژ بار در مقدار مورد انتظار تثبیت شود. با مطالعه نتایج شبیه سازی مشخص است که عملکرد کنترلر فازی در رنج کاری وسیعی از جمله نامتعادلی ولتاژ، افت ولتاژ، افزایش ولتاژ و وجود هارمونیکها، بسیار بهتر از کنترلر PI است.

مراجع

- [1] W. Zhang, and Y. Liu, *Multi objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swar*“, Electrical Power and Energy Systems, 30 (2008), 525-532.
- [2] A. T. Saric, M. S. Calovic, and V. C. Strezoski, *Fuzzy multi objective algorithm for multiple solution of distribution systems voltage control*, Electrical Power and Energy Systems, 25 (2003), 145–153.
- [3] A. Bouafia, F. Krim, and J. P. Gaubert, *Design and implementation of high performance direct power control of three-phase PWM rectifier, via fuzzy and PI controller for output voltage regulatio*, Energy Conversion and Management, 50 (2009), 6–13.
- [4] A. M. Al-Kandari, S.A. Soliman, and R.A. Alammari, *Power quality analysis based on fuzzy estimation algorithm: Voltage flicker measurements*, Electrical Power and Energy Systems, 28 (2006), 723–728.
- [5] A. Rahideh, M. Gitizadeh, and A. Rahideh, *Fuzzy logic in real time voltage/reactive power control in FARS regional electric network*, Electric Power Systems Research, 76 (2006), 996–1002.
- [6] N. Yadaiah, A. Ganga Dinesh Kumara, and J.L. Bhattacharya, *Fuzzy based coordinated controller for power system stability and voltage regulation*, Electric Power Systems Research, 69 (2004), 169–177.
- [7] I. Kocaarslan, and E. Cam, *Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control*, Electrical Power and Energy Systems, 27 (2005), 542–549.
- [8] K.H. Abdul-Rahman, S.M. Shahidehpour, M. Daneshdoost, *An approach to optimal var control with fuzzy reactive loads*, IEEE Transaction on power system, 10 (1995).
- [9] H. Camblong, I. Vechiu, and O. Curea, *An Innovative VSI Controller for the Generation of Balanced Voltage in Spite of the Presence of Unbalanced Loads*, Proceedings of the 2007 American Control Conference New York City, USA, (2007), 11-13.
- [10] X. Yan, L. Qing, W. Fei, and W. Zengping, *A Novel Method on Substation Reactive Power Control with the Fuzzy Logic Method*, Tencon 21-24 IEEE Region, 10 (2005), 1-5.
- [11] B. Venkatesh, G. Sadasivam, and M. Abdullah Khan, *A New Optimal Reactive Power Scheduling Method for Loss Minimization and Voltage Stability Margin Maximization Using Successive Multi-Objective Fuzzy LP Technique*, IEEE Transaction On Power systems, 15 (2000).
- [12] H. M. Kojabadi, B. Yu, I. A. Gadoura, L. Chang and M. Ghribi, *A novel DSP-based current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters*, IEEE Trans on Power Electronics, 21 (2006), 985-993.
- [13] B. Yu, and L. Chang, *Improved predictive current controlled PWM for single-phase grid-connected voltage source inverters*, Power Electronics Specialists Conference 2005, 231-236.
- [14] B. M. T. Ho, and H. Shu-Hung Chung, *An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems*, IEEE Trans on Power Electronics, 20 (2005), 953-962.
- [15] I.Vechiu, H. Camblong, G. Tapia, B. Dakyo, and O. Curea, *Modelling and control of four-wire voltage source inverter under unbalanced voltage condition for hybrid power system applications*, presented at the EPE 2005 Conference, Dresden, 2005.
- [16] M. A. Perales, M. M. Prats, R. Portillo, J. L. Mora, J. I. Leon, and L. G. Franquelo, *Three-dimensional space vector modulation in ABC coordinates for four-leg voltage source converters*, IEEE Power Electronics Letters, December 2003, Vol. 1, no. 4.

حسین خورسند (دانشجوی کارشناسی ارشد) *، شیراز، بولوار مدرس، دانشگاه صنعتی شیراز

آدرس پست الکترونیکی: Hoseinkhorsand@ymail.com

مجید نیری پور (استادیار) ، شیراز، بولوار مدرس، دانشگاه صنعتی شیراز

آدرس پست الکترونیکی: Nayeri@sutech.ac.ir

علیرضا روستا (استادیار) ، شیراز، بولوار مدرس، دانشگاه صنعتی شیراز

آدرس پست الکترونیکی: Roosta@sutech.ac.ir