

# جبران سازی سریع توان راکتیو در شبکه های توزیع انرژی الکتریکی با استاتکام

## به روش تئوری منطق فازی

یوسف ابراهیمی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تبریز

سیدحسین حسینی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تبریز

رضارهنورد

شرکت برق منطقه ای آذربایجان

معاونت نظارت بر توزیع

### چکیده

امروزه جبران سازی توان راکتیو در دو گروه اصلی S.V.C و STATCOM قابل طبقه بندی است. خازنهای

سوئیچ شونده تریستوری (T.S.C)، راکتورهای کنترل شده با تریستور (T.C.R) و خازنهای سوئیچ شونده مکانیکی جز نوع اول می باشند که اغلب دارای زمان پاسخ کند هستند. عموماً بانکهای خازنی برای جبران توان راکتیو در حالت Steady state به کار می روند و امکان سوئیچ کردن آنها در بازه زمانی کوتاه، به دفعات کم وجود دارد. از طرفی T.S.C و T.C.R می توانند زمان پاسخ را کاهش دهند، ولی توان راکتیو خروجی آنها بستگی به سطح ولتاژ سیستم دارد. استاتکام به عنوان یک منبع ولتاژ سنکرون عمل نموده، می تواند توان راکتیو معینی را بدون توجه به سطح ولتاژ AC سیستم جبران نماید، پاسخ سریع و عدم تولید هارمونیکهای فرکانس پائین توسط استاتکام برای از بین بردن نا متعادلی، جبران توان راکتیو، حذف هارمونیکها، جبران مؤلفه منفی، تنظیم ولتاژ سیستم AC و کاهش فلیکر از مشخصه های بارز آن می باشد. در این مقاله استاتکام با تامین مولفه راکتیو مورد نیاز جریان بار، برای جبران توان راکتیو شبکه، تنظیم ولتاژ و بهبود ضریب

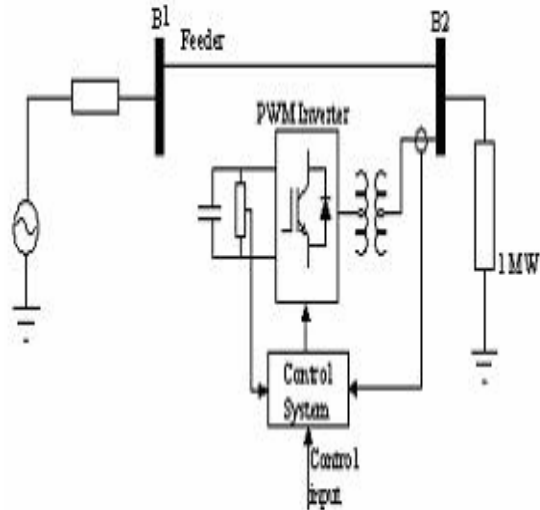
در این مقاله مطالعه ای در مورد جبران کننده استاتیکی (STATCOM) برای جبران توان راکتیو در شبکه توزیع، ارائه گردیده است. در ابتدا ویژگیها و مزایای استاتکام در مقایسه با سایر ادوات جبران کننده توان راکتیو بحث شده و سپس ساختار، اصول کارکرد، اجزای تشکیل دهنده آن و نحوه عملکرد کنترل کننده فازی در مقایسه با کنترل کننده PI، جهت دستیابی به بهترین پاسخ دینامیکی با استفاده از MATLAB /SIMULINK شبیه سازی شده و بازه استاتیکی و دینامیکی یک استاتکام نمونه با قدرت جبران توان راکتیو  $\pm 3Mvar$  روی یک شبکه  $20^{KV}$  ارزیابی و مزایای عنوان شده در ابتدای مطالعه با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه سازی مورد تأیید قرار گرفته است [1].

کلمات کلیدی: استاتکام، تئوری منطق فازی

### ۱- مقدمه

تغییرات سریع توان راکتیو، هارمونیکهای تولید شده توسط بارهای غیرخطی، نامتعادلی، عدم تنظیم سطح ولتاژ و... از عمده مشکلات کیفیت توان در شبکه های توزیع می باشند.

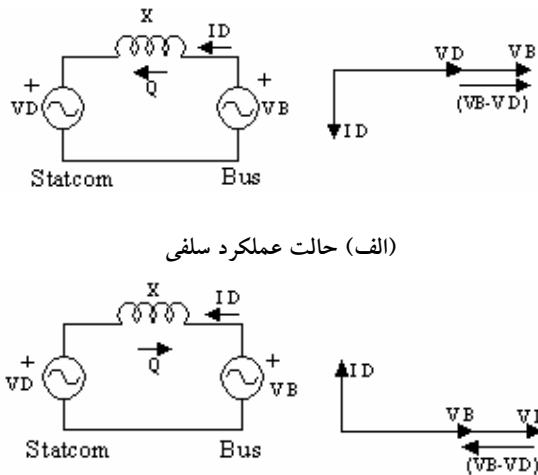
توان به روش تئوری منطق فازی استفاده شده است. [1],[2]



ش

کل ۱: شماتیک کلی یک استاتکام

شکل ۲ دیاگرام فازوری عملکرد استاتکام را در دو حالت جذب و تولید توان راکتیو نشان می دهد.



(الف) حالت عملکرد سلفی

(ب) حالت عملکرد خازنی

شکل ۲: دیاگرام فازوری عملکرد استاتکام

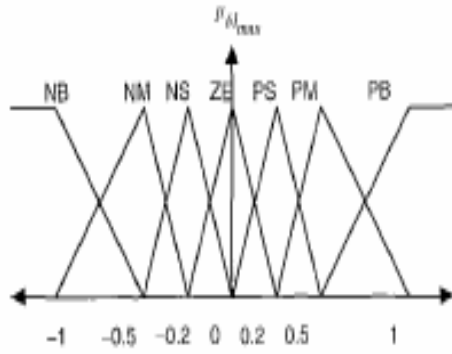
### ۳- اساس کار کنترل کننده فازی

در این روش عمل کنترل به صورت مجموعه ای از جملات زبانی ساده بیان شده اند و جهت توسعه این قوانین ساده زبانی، باید پروسه کنترلی را بشناسیم، بنابراین نیازی به استخراج مدل ریاضی سیستم نمی باشد، شکل ۳ ساختار داخلی کنترل کننده فازی را نشان می دهد. که در آن خطا

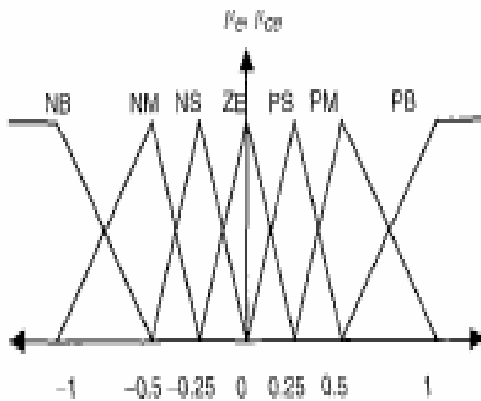
### ۲- شرح عملکرد استاتکام

استاتکام به صورت موازی در شبکه های توزیع، جهت تنظیم ولتاژ سیستم به شبکه ac وصل می شود. در مطالعه حاضر استاتکام شامل یک اینورتر بوده که طرف DC مربوط به آن به یک خازن ذخیره کننده انرژی و طرف ac آن از طریق یک ترانسفورماتور به باس شبکه متصل می شود که به وسیله توان گرفته شده از شبکه شارژ می شود (مطابق شکل ۱). وظیفه سیستم کنترل، تنظیم ولتاژ باس شبکه و ولتاژ DC دوسرخازن می باشد. انتقال توان راکتیو از طریق استاتکام به شبکه و بالعکس از طریق راکتانس نشی ترانسفورماتور کوپلاژ کننده در سیستم، با ایجاد یک ولتاژ ثانویه توسط اینورتر که با ولتاژ اولیه (ولتاژ باس) هم فاز است، صورت می گیرد. البته بایستی انتقال فاز را با توجه اتصال اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در نظر داشت. زمانیکه ولتاژ ثانویه (VD) از ولتاژ باس (VB) کمتر است، استاتکام شبیه یک سلف توان راکتیو را از باس جذب می کند، زمانیکه ولتاژ ثانویه (VD) از ولتاژ باس (VB) بیشتر است، استاتکام شبیه یک خازن توان راکتیو را به باس تزریق می کند. در حالت ماندگار بعلاوه تلفات اینورتر، ولتاژ باس (VB) همیشه با اختلاف فاز اندکی از ولتاژ اینورتر جهت تأمین توان اکتیو مورد نیاز آن جلو می افتد.

و تغییرات سیگنال خطا به صورت متغیرهای عددی وارد سیستم فازی شده است



شکل ۴: تابع عضویت سیگنال خطا



شکل ۵: تابع عضویت تغییرات سیگنال خطا

جدول ۱: قوانین فازی استفاده شده در کنترل کننده فازی

e \ de	NB	NM	NS	ZE	PS	PB	PM
NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NS	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
ZE	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PS
PB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PM	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB

بر اساس جدول فوق if-then های تعریف شده جهت تنظیم سیگنالهای تحت کنترل بر اساس شکل ۷ به صورت خلاصه به شرح زیر می باشد:

If e is NB & ce(change of error)is NB then os(out put signal) is NB

If e is NB & ce is NM then os is NB

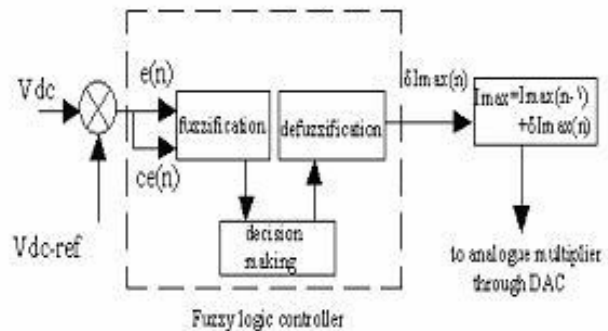
If e is NS & ce is PS then os is NS

If e is ZE & ce is PB then os is ZE

If e is PB & ce is NM then os is NS

If e is PM & ce is NM then os is ZE

If e is NB & ce is NM then os is NB



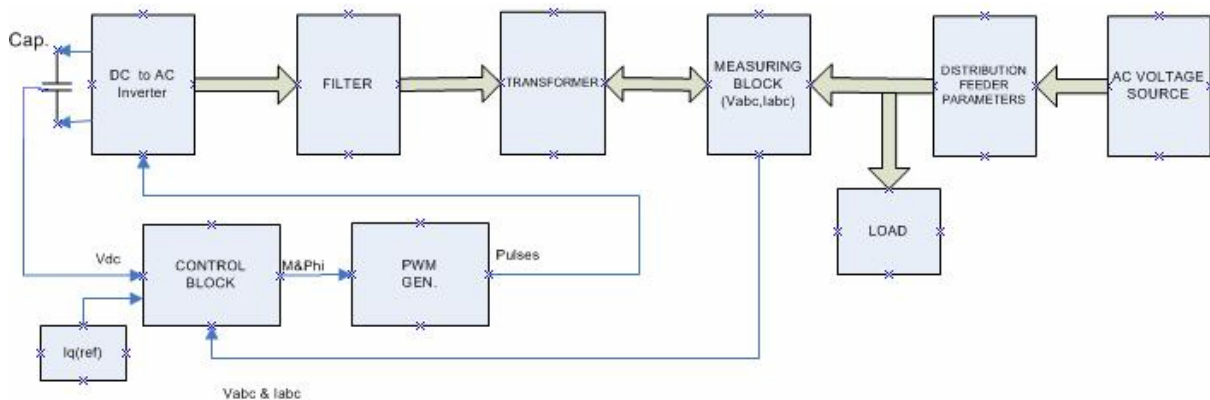
شکل ۳: ساختار داخلی کنترل کننده فازی

جهت تبدیل متغیرهای عددی به متغیرهای زبانی (Linguistic variables)، هفت مجموعه فازی به صورت: مثبت کوچک (PS)، منفی کوچک (NS)، منفی متوسط (NM)، منفی بزرگ (NB)، صفر (ZE)، مثبت متوسط (PM) و همچنین هفت مجموعه فازی برای هر ورودی و خروجی با تابع عضویت مثلثی شکل که در مدل mamdani با عملگر "min" تعریف شده است، به کار رفته است. در طراحی قوانین فازی کنترلی در نظر گرفتن خواص روابط بین ورودیها و خروجی مهم می باشد، لیکن شبیه کنترل کننده PI نیازی به استخراج مدل ریاضی سیستم جهت طراحی کننده نمی باشد و این یکی از مزایای کنترل کننده فازی است. قوانین فازی به کار گرفته شده به صورت جدول ۱ و تابع عضویت مثلثی برای سیگنال خطا و سیگنال تغییرات خطا مطابق شکل های ۴ و ۵ می باشند. [3],[4],[5]

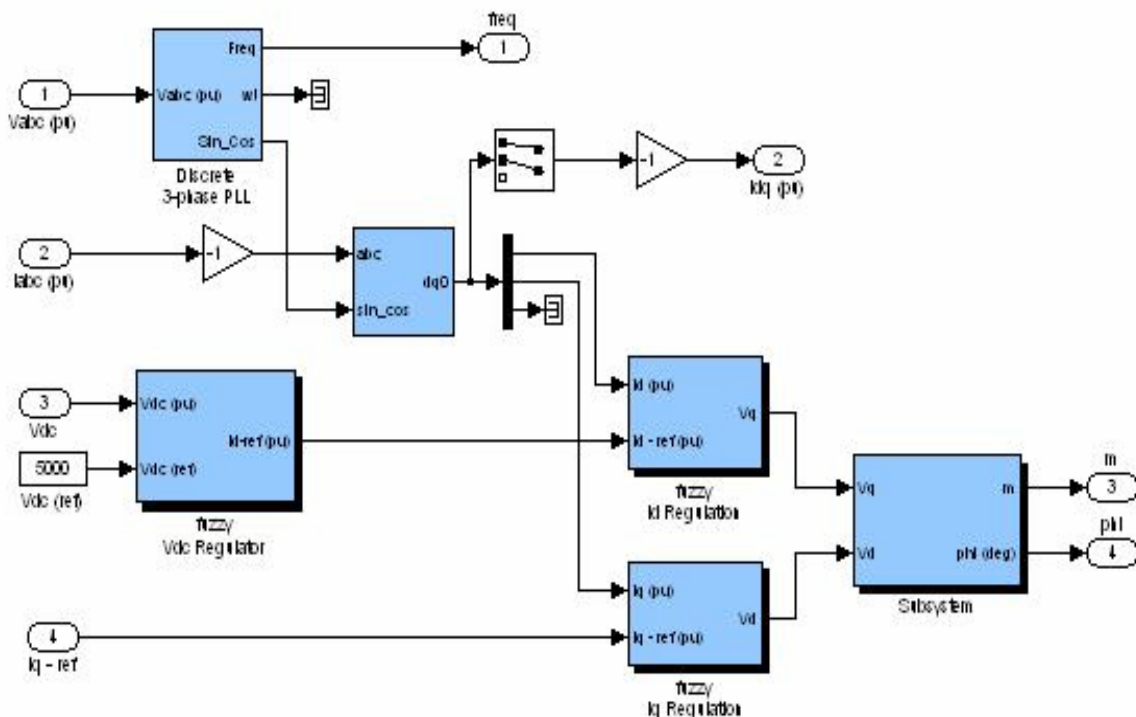
#### ۴- نتایج شبیه سازی استاتکام

جهت بررسی نحوه عملکرد استاتکام با استفاده از تئوری منطق فازی در یک شبکه نمونه مدار شکل ۱ با استفاده از MATLAB مدل سازی شده است که در آن، مدل یک استاتکام با قدرت جبران توان راکتیو  $\pm 3\text{MVAR}$  در یک شبکه توزیع نمونه که توسط مدار معادل تونن آن نشان داده شده است طراحی گردیده و یک ترانسفورماتور ستاره به مثلث به دومتظور کاهش قدرت  $20\text{KV} / 2\text{KV}$

ادوات مورد استفاده در استاتکام و تأمین سلف مورد نیاز استاتکام از طریق امپدانس نشی خود ترانسفورماتور (XL) بکاررفته است. خازن C با ظرفیت  $10000\ (\mu\text{f})$  جهت تأمین ولتاژ مورد نیاز طرف DC اینورتر و توان اکتیو تلف شده در اینورتر و ترانسفورماتور به کار رفته است. اینورتر به کار رفته از نوع SPWM با فرکانس حامل  $2500\text{HZ}$

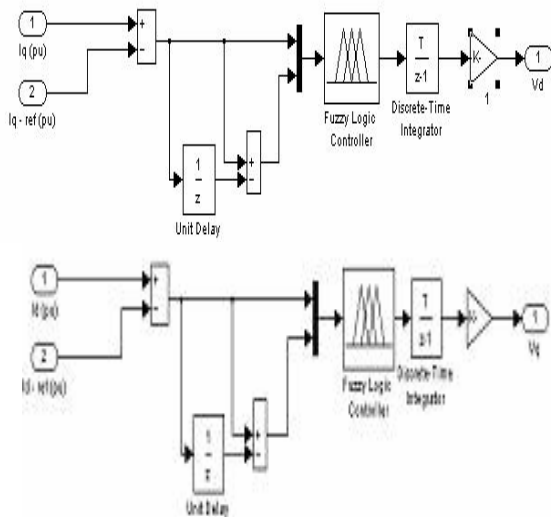


شکل ۶: شماتیک استاتکام شبیه سازی روی شبکه توزیع نمونه



شکل

۷: بلوک سیستم کنترلی استاتکام

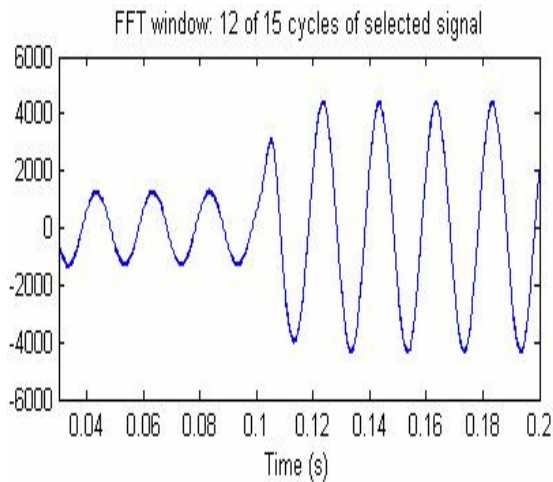


شکل ۸: بلوک کنترلر فازی استفاده شده جهت تنظیم سیگنال های مورد نظر

#### ۴-۱- مشاهده نتایج حاصل از شبیه سازی

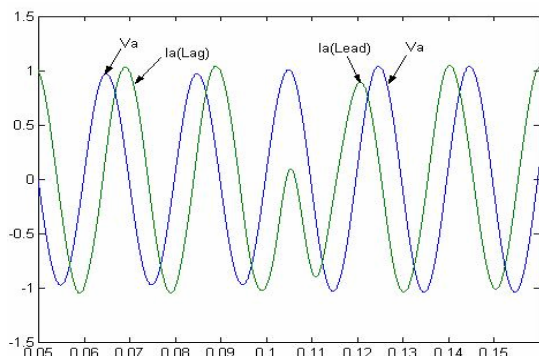
مدل مذکور با  $T_s=2e-6$ ، discrete شده است که در آن در لحظه  $t=0.1^{sec}$  یک ورودی پله از  $+1^{p.u}$  تا  $-1^{p.u}$  که مدل یک بار  $+3MVAR$  خازنی در لحظه اولیه، و سوئیچ شدن یک بار  $-3MVAR$  سلفی در لحظه  $t=0.1^{sec}$  باشد، در نظر گرفته شده است. در زمان شروع شبیه سازی، خازن به مقدار  $V_{dc}(ref)$  شارژ شده و مؤلفه  $I_d(p.u)$  به مقدار نزدیک صفر می رسد، در لحظه  $t=0.1^{sec}$  ثانیه جریان  $I_q(p.u)$  به مقدار  $(-1)^{p.u}$  می رسد، در این حالت استاتکام از حالت سلفی به خازنی تغییر ماهیت داده و جریان  $I_a$  به اندازه  $180^\circ$  تغییر فاز می دهد (از  $V_a$  که قبلاً  $90^\circ$  عقب بود به اندازه  $90^\circ$  جلو می افتد) باید توجه کرد که اندیس مدولاسیون و در نتیجه ولتاژ خروجی اینورتر در حین تبدیل استاتکام از حالت سلفی به خازنی افزایش می یابد شکل های ۹ و ۱۰ تغییرات ضریب مدولاسیون به ازای اعمال تغییر در سیستم، در زمان  $t=0.1^{sec}$  را در هر دو نوع کنترل کننده FUZZY و PI را نشان میدهند.

و فرکانس خروجی  $50^{HZ}$  می باشد، جهت کاهش هارمونیکهای خروجی اینورتر (مضرب صحیحی از  $2500^{HZ}$ ) از یک فیلتر پائین گذر، قبل از اعمال به ثانویه ترانسفورماتور استفاده شده است. خروجی استاتکام توسط ترانسفورماتور بصورت موازی به شبکه توزیع وصل شده است، زمانیکه ولتاژ ثانویه کمتر از ولتاژ اولیه (شبکه) می باشد، استاتکام توان راکتیو جذب می کند و زمانیکه بیشتر باشد توان راکتیو تولید خواهد کرد. شکل ۶ شماتیک استاتکام شبیه سازی روی شبکه توزیع نمونه را نشان می دهد. در سیستم کنترلی استاتکام نشان داده شده در شکل ۷، جهت کنترل ولتاژ خروجی اینورتر برای جذب یا تزریق توان راکتیو از کنترل کننده فازی (FUZZY CONTROLLER) استفاده شده است. [3] نخستین مسأله در سیستم کنترلی، تثبیت ولتاژ طرف DC اینورتر بر روی خازن  $10000 \mu f$  در یک مقدار مشخص ( $V_{dc}$ ) است تا عملکرد صحیح اینورتر را تضمین نماید، جهت طراحی سیستم کنترل از تبدیل abc to dq0 استفاده شده است. بلوک کنترلی (Regulator)  $V_{dc}$  جریان اکتیو مرجع مورد نیاز استاتکام را تولید می کند که یک سیگنال dc با دامنه متغیر می باشد. ( $I_d, I_{ref}$ ) و بلوک (regulator)  $I_d$  جریان اکتیو استفاده شده در استاتکام را و بلوک (regulator)  $I_q$  جریان راکتیو مورد نیاز استاتکام را کنترل می کند. شکل ۸ بلوک کنترل فازی استفاده شده در سیستم کنترلی را نشان می دهد.

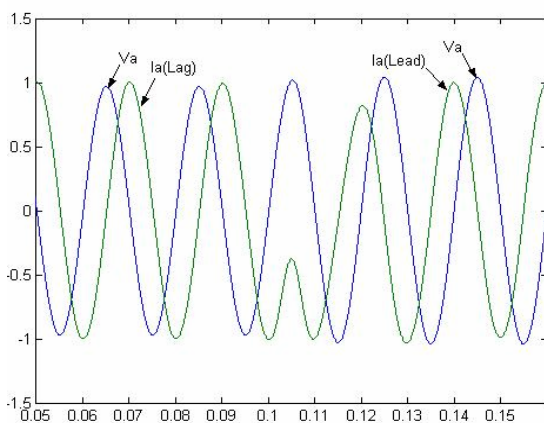


شکل ۱۲: تغییرات ولتاژ خروجی اینورتر بعد از اعمال تغییر در  $t=0.1$  ثانیه

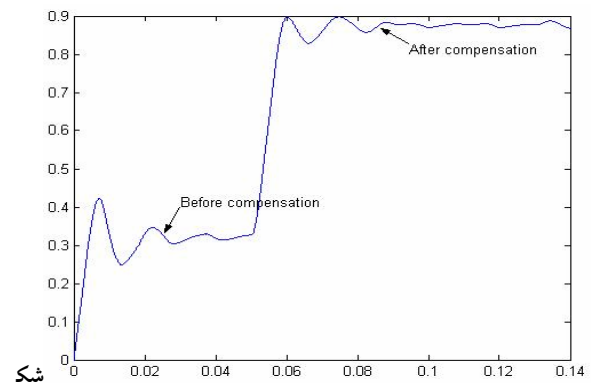
از شکل های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می شود تا قبل از اعمال تغییر در سیستم (قبل از زمان  $t=0.1$  ثانیه) جریان از ولتاژ عقب بوده (پس فاز) ولی با اعمال تغییر در سیستم در  $t=0.1$  ثانیه جریان از ولتاژ جلومی افتد (پیش فاز).



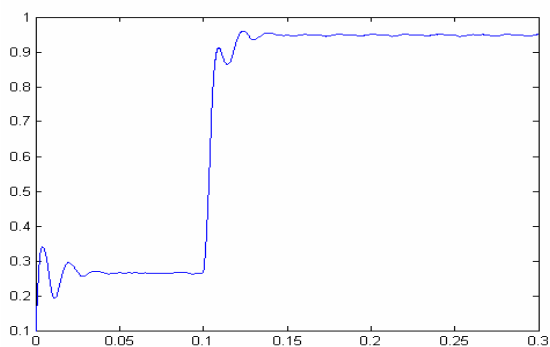
شکل ۱۳: تغییرات ماهیت خازنی یا سلفی بودن استاتکام پس از اعمال تغییر در سیستم ( $t=0.1$  ثانیه) با کنترل فازی



شکل ۱۴: تغییرات ماهیت خازنی یا سلفی بودن استاتکام پس از اعمال تغییر در سیستم ( $t=0.1$  ثانیه) با کنترل PI

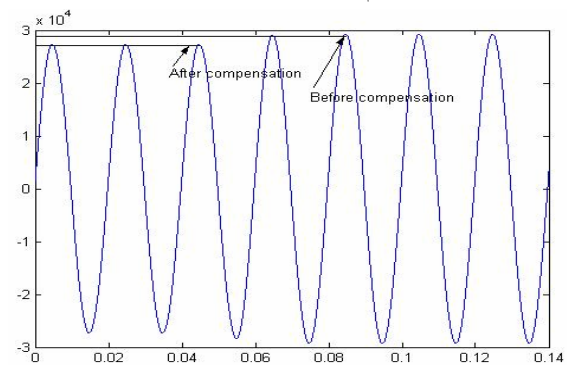


شکل ۹: تغییرات ضریب مدولاسیون در لحظه  $t=0.1$  ثانیه با کنترل کننده PI



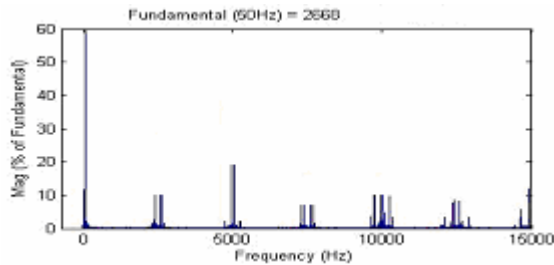
شکل ۱۰: تغییرات ضریب مدولاسیون در لحظه  $t=0.1$  ثانیه با کنترلر Fuzzy

شکل ۱۱ افزایش سطح ولتاژ بار موجود در شبکه را بعد از اعمال تغییر در سیستم در لحظه  $t=0.1$  ثانیه نشان میدهد.

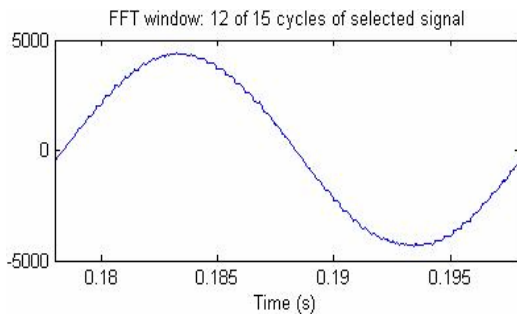


شکل ۱۱: نشانگر افزایش سطح ولتاژ باس به منظور جبران کاهش ولتاژ بار

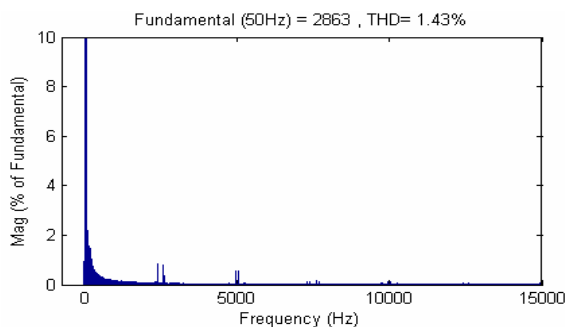
با اعمال تغییر در سیستم در لحظه  $t=0.1$  ثانیه ولتاژ خروجی اینورتر افزایش می یابد (شکل ۱۲) و همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده گردید متناسب با آن، ضریب مدولاسیون نیز افزایش یافته است.



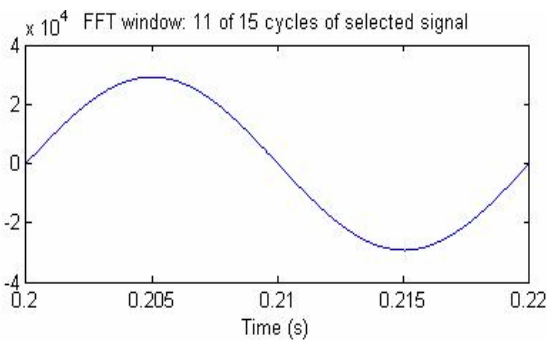
شکل ۱۷: طیف هارمونیک ولتاژ خروجی اینورتر



شکل ۱۸: ولتاژ خروجی فیلتر

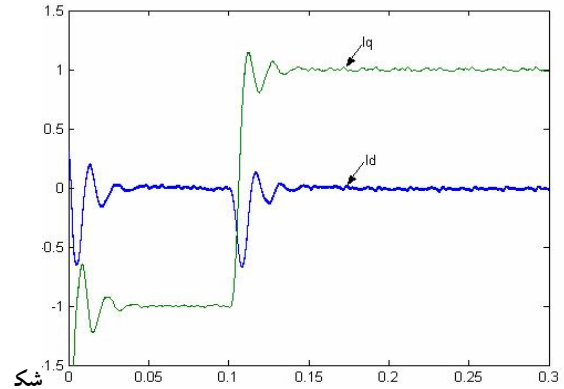


شکل ۱۹: طیف هارمونیک ولتاژ خروجی فیلتر



شکل ۲۰: ولتاژ بار روی باس ۲۰ کیلوولت

تغییرات سیگنال  $I_q$  و  $I_d$  پس از اعمال تغییر در  $t=0.1$  ثانیه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

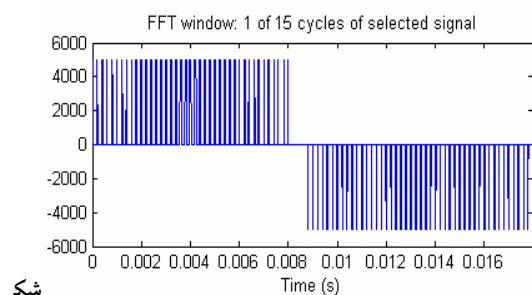


شکل ۱۵: تغییرات سیگنال  $I_q$  و  $I_d$  پس از اعمال تغییر در

$t=0.1$  ثانیه

## ۲-۴- تحلیل هارمونیک

جهت مشاهده طیف هارمونیک مدار در نقاط مختلف شبکه، آنالیز هارمونیک با استفاده از تابع FFT انجام گرفته است و در هر طیف هارمونیک مقدار T.H.D و مرتبه هارمونیکهای موجود کاملاً مشخص است. ملاحظه می شود که استاتکام مؤلفه های هارمونیک مرتبه پائین تولید نمی کند و میزان هارمونیکهای مرتبه بالای تزریق شده به شبکه بسیار اندک بوده (شکلهای ۱۶ و ۱۷) و طیف هارمونیک سیستم با کنترل کننده فازی



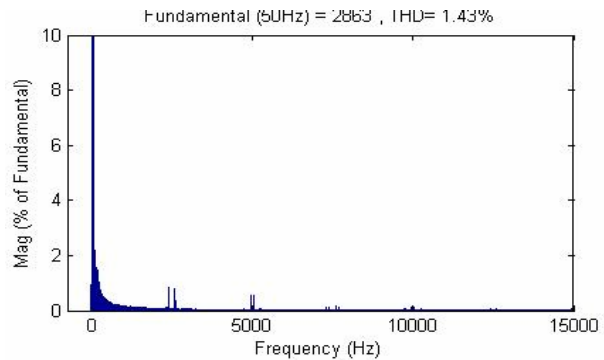
شکل ۱۶: ولتاژ خروجی اینورتر



IEEE Transactions on Volume 25, Issue 3, March 1995 Page(s):505 – 512

4-Chin-Ming Hong; Huan-Wen Tzeng; Shun-Yuan Wang; Chi-Wu Huang,"Design of a static reactive power compensator using fuzzy sliding mode control".Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Volume 4, 14-16 Dec. 1994 Page(s):4142 - 4145 vol.4

5- Chia, B.H.K.; Morris, S.; Dash, P.K,"A feedback linearization based fuzzy-neuro controller for current source inverter-based STATCOM".Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National 15-16 Dec. 2003 Page(s):172 - 179



شکل ۲۱: طیف هارمونیک بار

## ۵ - نتیجه

در این مقاله اثرات یک استاتکام با کنترل کننده فازی روی شبکه توزیع بررسی و مطالعه گردید. از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود که استاتکام مذکور در یک دوره تناوب با یک پاسخ دینامیکی مناسب همانند استاتکام با کنترل کننده PI بکاررفته و قادر است عمل جبران سازی توان راکتیو را بدون نیاز به شناسائی تابع تبدیل سیستم انجام دهد، طیف هارمونیک نشان می دهد که هارمونیکهای مرتبه ی پائین اندک بوده و هارمونیکهای مرتبه بالا فیلتر شده اند.

## ۶- مراجع

- 1-Hochgraf, C.; Lasseter, R.H,"Statcom controls for operation with unbalanced voltages".Power Delivery, IEEE Transactions on:Volume: 13, Issue 2, April 1998 Page(s):538 - 544
- 2-Wei-Neng Chang; Kuan-Dih Yeh,"Design of D-STATCOM for fast load compensation of unbalanced distribution systems"Power Electronics and Drive Systems, 2001. Proceedings., 2001 4th IEEE International Conference on Volume: 2, 22-25 Oct. 2001 Page(s):801 - 806 vol.2
- 3- Han-Xiong Li; Gatland, H.B,"A new methodology for designing a fuzzy logic controller"Systems, Man and Cybernetics,