

## بهبود عملکرد جبران کننده سنکرون استاتیکی توزیع برای بهبود کیفیت توان با استفاده از کنترل کننده فازی - عصبی

غضنفر شاهقلیان<sup>(۱)</sup> - ابراهیم حق جو<sup>(۱)</sup> - علیرضا سیفی<sup>(۲)</sup> - ایرج حسنزاده<sup>(۳)</sup>

(۱) دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

(۲) دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز

(۳) دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز

**خلاصه:** در این مقاله عملکرد و سیستم کنترل جبران کننده سنکرون استاتیکی توزیع (DSTATCOM) به عنوان یک جبرانگر موازی موثر در تامین شاخص‌های کیفیت توان مورد بررسی قرار گرفته است. سپس جهت بهبود عملکرد جبران کننده هر یک از تنظیم کننده‌های خطی تناسبی - انتگرالی (PI) سیستم کنترل جبران کننده با یک تنظیم کننده غیرخطی فازی - عصبی مناسب بر اساس خطا و مشتق خطای سیستم جایگزین شده است. با بهره‌گیری از نرم افزار MATLAB چگونگی ایجاد عوامل مخرب کیفیت توان و نحوه جبران‌سازی آنها در یک شبکه توزیع نمونه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از کنترلرهای فازی - عصبی به جای کنترلرهای خطی در سیستم کنترل DSTATCOM، توانایی جبران کننده در جبران‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو، کمبود ولتاژ (Sag)، بیشبود ولتاژ (Swell)، فلیکر ولتاژ و هارمونیک‌های فرکانس پایین ولتاژ و جریان به نحو چشمگیری افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی:** کیفیت توان، جبران کننده سنکرون استاتیکی توزیع، کنترل کننده خطی، کنترل کننده فازی - عصبی

### ۱- مقدمه

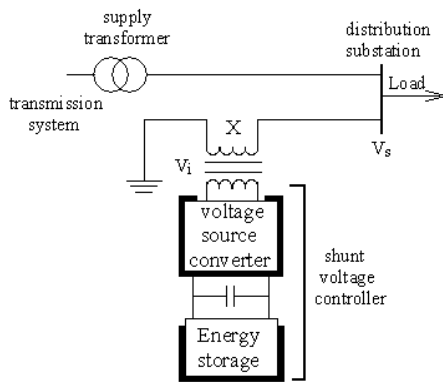
امروزه مصرف کننده‌های انرژی الکتریکی خواستار قابلیت اطمینان و کیفیت توان بالا در شبکه‌های توزیع هستند. به طور کلی هر مشکلی که در جریان، ولتاژ و یا فرکانس ظاهر شده و باعث ایجاد خطا و یا عملکرد ناصحیح دستگاه‌ها شود، به عنوان یک مشکل کیفیت توان مطرح است. از جمله این مشکلات می‌توان به کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ، فلیکر ولتاژ و هارمونیک‌ها اشاره کرد [۱، ۳]. با گسترش تجهیزات حساس در صنایع مدرن نظیر فرایندهای کنترل، PLC، درایوهای تنظیم سرعت، گیرنده‌های مخابراتی و روبات‌ها، دیگر مشکلات کیفیت توان در سیستم‌های توزیع قابل تحمل نمی‌باشند. در سال‌های اخیر با پیشرفت صنایع نیمه هادی، استفاده از جبران کننده‌های مبتنی بر مبدل‌های ولتاژ و جریان مورد توجه کارشناسان برق قرار گرفته است. این مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم‌های توزیع موسوم به ادوات Custom Power هستند که جهت بهبود کیفیت توان به کار برده می‌شوند. این تجهیزات به صورت موازی، سری یا ترکیبی از آنها به خطوط تغذیه متصل می‌شوند. یکی از این تجهیزات جبران کننده سنکرون استاتیکی توزیع است که به صورت موازی به شبکه توزیع متصل می‌شود. کنترل کننده DSTATCOM

به عنوان یک منبع جریان کنترل شونده با پاسخ سریع، می‌تواند در کاهش نوسانات توان‌های اکتیو و راکتیو و جبران‌سازی جریان هارمونیک‌های کشیده شده توسط بارهای متغیر، فلیکر ولتاژ و تنظیم ولتاژ موثر باشد. بخش‌های اصلی DSTATCOM در واقع یک مبدل منبع ولتاژ سه فاز و سیستم کنترل آن است. مبدل منبع ولتاژ از طریق یک ترانسفورماتور تزویج به صورت موازی به شبکه توزیع متصل شده است. در ساختار سیستم کنترلی DSTATCOM معمولاً از کنترل کننده‌های خطی PI استفاده شده است. کنترل کننده‌های خطی PI کارایی بسیار زیادی در صنعت دارند و از لحاظ اجرایی نیز بسیار ساده می‌باشند، ولی از عیوب این کنترل کننده‌ها می‌توان به کارایی نامناسب در اثر تغییرات زیاد در نقطه کار سیستم اشاره کرد. برای رفع این عیب، در این مقاله با استفاده از طراحی کنترل کننده‌های جدید به جای کنترل کننده‌های خطی سیستم کنترلی DSTATCOM، عملکرد جبران کننده در جبران‌سازی سریع توان‌های اکتیو و راکتیو هارمونیک‌های ولتاژ و جریان‌های هارمونیک‌های بار، تنظیم دینامیکی ولتاژ و کاهش فلیکر ولتاژ بهبود یافته است. با توجه به اینکه مجموعه سیستم‌های قدرت، غیرخطی می‌باشند و نمی‌توان مدل دقیق ریاضی برای آن بیان کرد، در

شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان کنترل کننده اصلی در سیستم کنترل DSTATCOM، به منظور کاهش شیب مشخصه ولتاژ جریان جبرانگر و بهبود کیفیت توان سیستم توزیع استفاده کرده‌اند. در این مقاله نتایج شبیه سازی‌ها به ازای اعمال کنترل کننده‌های خطی PI و غیرخطی فازی-عصبی در ساختار کنترل DSTATCOM آورده شده‌اند. با استفاده از نتایج شبیه سازی‌ها معین می‌شود که کنترل کننده فازی-عصبی مقاوم طراحی شده بر خلاف سایر کنترل کننده‌های با ساختار ثابت (کنترل کننده‌های PI و فازی) قابلیت تطبیق با شرایط مختلف کاری را دارا هستند. این کنترل کننده‌ها در زمان اغتشاشات پاسخی سریع دارند، در حالی که کنترل کننده‌های PI درصد فراجش بزرگتری در دوره گذرا دارند. همچنین آشکار می‌شود که عملکرد DSTATCOM در جبران سازی سریع توان‌های اکتیو و راکتیو، هارمونیک‌های ولتاژ و جریان‌های هارمونیک بار و فلیکر ولتاژ، با بهره‌گیری از کنترل کننده‌های فازی-عصبی بهبود یافته است.

## ۲- ساختار و عملکرد DSTATCOM

شکل (۱) دیگرام ساده‌ای از اجزاء اصلی تشکیل دهنده یک STATCOM را در یک سیستم قدرت نشان می‌دهد. اجزاء اصلی DSTATCOM شامل یک اینورتر منبع ولتاژ (VSI) سه فاز، خازن تامین کننده ولتاژ dc اینورتر، یک ترانسفورماتور تزویج، فیلتر ac بین ترانس و اینورتر، یک سیستم کنترلی جهت کنترل سوئیچینگ کلیدهای اینورتر و نهایتاً در صورت لزوم یک منبع ذخیره انرژی خارجی به منظور جبران سازی بهتر توان اکتیو است [۱۴].



شکل (۱): ساختار پایه یک DSTATCOM متصل به شبکه توزیع

با صرف نظر از جریان‌های هارمونیک درون راکتانس نشستی و مقاومت ترانسفورماتور تزویج می‌توان روابط ذیل را نوشت:

$$I = \frac{V_i - V_s}{jX} \quad (1)$$

$$P = \frac{V_i V_s}{X} \sin \alpha \quad (2)$$

سال‌های اخیر از سیستم‌های فازی و عصبی برای پوشش این نامعینی‌ها و عوامل غیرخطی، به عنوان کنترل کننده استفاده شده است.

کنترل کننده‌های فازی با تغییرات در پارامترهای خود می‌توانند بر نامعینی‌های ذاتی موجود در فرآیندها غلبه کنند. ولی در قبال برتری‌هایی که نسبت به کنترل کننده‌های کلاسیک دارند، دارای مشکلاتی نیز می‌باشند. از جمله مشکلات این کنترل کننده‌ها می‌توان به چگونگی انتخاب نوع سیستم استنتاج فازی، شکل و بازه تغییرات توابع عضویت فازی و قوانین فازی اشاره کرد که می‌بایست توسط فرد خبره انتخاب شود.

در شبکه‌های عصبی، مشکلاتی از جمله تعداد زیاد ورودی برای آموزش شبکه و چگونگی انتخاب تعداد نرون‌های لایه میانی و بالا رفتن زمان انجام محاسبات برای کارهای online وجود دارد. اما آنچه به نظر می‌رسد این موضوع می‌باشد که اگر بتوانیم از کنترل کننده‌ای کاملاً تطبیقی بهره ببریم که از اطلاعات هر لحظه سیستم و تغییرات در نقاط کار سیستم برای مساله کنترلی استفاده کند بسیار مناسب خواهد بود، یعنی پارامترهای کنترل کننده همزمان با تغییرات در پارامترهای فرآیند بهنگام و جدید شوند.

اگر خاصیت تطبیقی و قابلیت تنظیم شدن را به سیستم‌های فازی اضافه کنیم، کنترل کننده‌های فازی-عصبی به دست می‌آیند. در این کنترل کننده‌ها همه پارامترهای بهینه متعلق به توابع عضویت فازی را می‌توان با استفاده از خاصیت یادگیری شبکه‌های عصبی در سراسر تغییرات نقاط کار سیستم تنظیم کرد، یا به عبارت دیگر مشکل چگونگی انتخاب قوانین و تعیین شکل و بازه تغییرات توابع عضویت ورودی‌های سیستم فازی و همچنین ضرایب توابع عضویت خروجی را نخواهیم داشت.

تاکنون مقالات مختلفی در زمینه کاربرد ادوات FACTS برای بهبود رفتار سیستم قدرت بیان شده است [۳-۶]. در مرجع [۷] یک روش کنترل بر اساس ساختار متغیر مد لغزشی با عملکرد انتگرالی برای DSTATCOM استفاده شده که در آن خطای حالت دائمی از کنترل جریان جبران کننده کاهش می‌یابد و سرعت پاسخ به وسیله عملکرد انتگرالی افزایش یافته است. در مراجع [۸، ۹] از کنترل کننده‌های فازی به عنوان کنترل کننده مستقیم در سیستم کنترلی STATCOM به منظور تنظیم ولتاژ و میرایی نوسانات الکترومغناطیسی در سیستم‌های قدرت استفاده کرده‌اند. در مرجع [۱۰] مولفان از کنترل کننده‌های فازی جهت دستیابی به یک کنترل کننده با بهره متغیر در سیستم کنترلی تجهیزات FACTS به منظور غلبه بر نامعینی‌ها در سیستم‌های قدرت، استفاده کرده‌اند. در مرجع [۱۱] از شبکه‌های عصبی به عنوان کنترل کننده بهینه در سیستم کنترلی اینورتر مدولاسیون پهنای پالس موجود در ساختار STATCOM، به منظور جبران سازی دینامیکی کمبود ولتاژ و بیشبود ولتاژ استفاده کرده‌اند. در مراجع [۱۲، ۱۳] مولفان از

مطابق شکل (۲) کنترلر DSTATCOM دارای چند تنظیم کننده بیرونی و درونی است، که عبارتند از:

- تنظیم کننده‌های بیرونی که شامل دو کنترل کننده برای تنظیم ولتاژ AC (ACVR) و تنظیم ولتاژ DC خازن (DCVR) است. ورودی‌های کنترلر استفاده شده در تنظیم کننده ولتاژ AC، زوج  $(V_{ac,ref}$  و  $V_{ac}$ ) است و خروجی آن جریان  $I_{q,ref}$  می‌باشد. به همین ترتیب ورودی‌های تنظیم کننده ولتاژ DC خازن،  $(V_{dc}$  و  $V_{dc,ref}$ ) و خروجی آن جریان  $I_{d,ref}$  است.

- تنظیم کننده درونی جریان که شامل دو کنترل کننده برای تنظیم جریان‌های  $I_q$  ( $I_{qR}$ ) و  $I_d$  ( $I_{dR}$ ) است. ورودی‌های کنترلر استفاده شده در حلقه کنترلی تنظیم جریان  $I_q$ ، زوج  $(I_{q,ref}$  و  $I_q$ ) است و خروجی آن ولتاژ  $V_q$  می‌باشد. به همین ترتیب ورودی‌های حلقه کنترلی تنظیم جریان  $I_d$ ،  $(I_{d,ref}$  و  $I_d$ ) و خروجی آن ولتاژ  $V_d$  است.

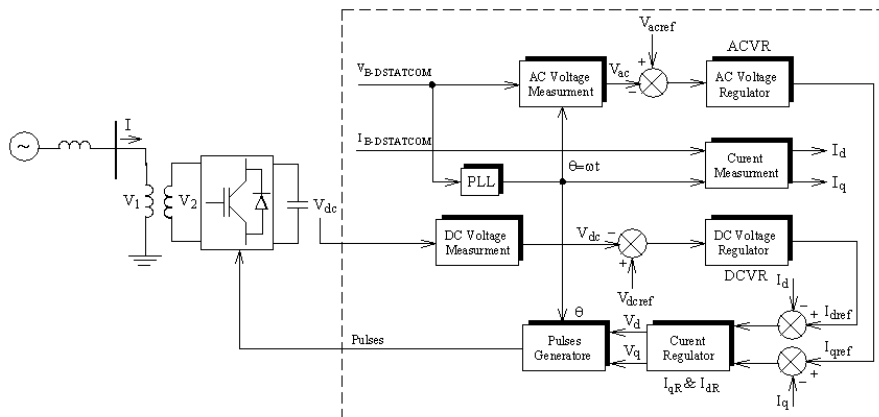
در نهایت ولتاژهای  $V_d$  و  $V_q$  به یک بلوک PWM Pulse Generator وارد می‌شوند که زوایای آتش IGBT‌های اینورتر را متناسب با عملکرد جریان ساز تولید می‌کند. در ساختار هر یک از تنظیم کننده‌های سیستم کنترلی فوق از کنترل کننده‌های خطی PI استفاده شده است. ورودی هر کنترلر PI سیگنال خطای ناشی از مقایسه پارامتر مرجع با پارامتر اندازه‌گیری شده، می‌باشد.

$$Q = \frac{V_i \cdot V_s}{X} \cos \alpha - \frac{V_s^2}{X} \quad (3)$$

که در آن  $V_i$  ولتاژ اینورتر،  $V_s$  ولتاژ سیستم توزیع و  $X$  راکتانس ناشی ترانسفورماتور تزویج و  $\alpha$  اختلاف فاز بین  $V_i$  و  $V_s$  است. میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مبادله شده بین DSTATCOM و شبکه توزیع به ترتیب P و Q می‌باشند. جبران‌سازی کمبود ولتاژ، پیش‌بود ولتاژ و فلیکر ولتاژ را DSTATCOM به کمک جذب یا تولید توان راکتیو انجام می‌دهد.

### ۳- ساختار کنترلر DSTATCOM

در این بخش، در ساختار جبران کننده از یک اینورتر منبع ولتاژ با روش سوئیچینگ SPWM که شامل دو پل IGBT استفاده شده است. هر کدام از پل‌های IGBT یک اینورتر سه سطحی با فرکانس مدولاسیون  $1/68 \times 28 = 60 \text{ KHz}$  است. وظیفه کنترلر جبران کننده ایجاد فرامین عملکرد گیت برای کلیدهای اینورتر است، به گونه‌ای که عملکرد مناسب جبران کننده متناسب با تغییرات توان و ولتاژ شبکه توزیع را تضمین کند. در این مقاله از تکنیک کنترل مستقیم در ساختار سیستم کنترلی DSTATCOM استفاده شده است.



شکل (۲): دیاگرام سیستم کنترل یک DSTATCOM

#### ۴- کنترل کننده فازی - عصبی پیشنهادی

در این بخش جهت بهبود عملکرد DSTATCOM در بهبود پدیده‌های مهم کیفیت توان هر یک از تنظیم کننده‌های PI ساختار کنترلر جبران کننده با یک تنظیم کننده فازی - عصبی مناسب جایگزین شده است. ساختار تنظیم کننده‌های فازی - عصبی استفاده شده در کنترلر DSTATCOM در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق با شکل مشاهده می‌شود که ابتدا از مقایسه مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده با مقدار پارامتر مرجع سیگنال خطا تولید می‌شود، در ادامه مشتق این سیگنال نیز به دست آورده می‌شود. سپس از سیگنال‌های خطا (e) و تغییرات خطا (ce) به عنوان دو ورودی کنترل کننده فازی - عصبی استفاده می‌شود. از نماد u به طور همزمان برای نشان دادن تک خروجی کنترل کننده فازی - عصبی استفاده شده است. در نهایت با استفاده از u، سیگنال خروجی تنظیم کننده فازی - عصبی ساخته می‌شود.

در این مقاله، با استفاده از یک مجموعه اطلاعات ورودی - خروجی مطلوب، یک سیستم استنتاج فازی نوع تاکاگی - سوگنو-کانگ (T.S.K) به گونه‌ای ساخته می‌شود که پارامترهای توابع عضویت آن به کمک شبکه‌های عصبی و با الگوریتم آموزش پس انتشار با تابع هدف حداقل جذر میانگین مربعات خطا تعدیل می‌شوند.

در این کنترلرهای فازی - عصبی از عملگر (prob) AND و روش نافازی سازی میانگین وزنی استفاده شده است. توابع عضویت دو ورودی کنترل کننده فازی، سیگنال خطا (e) و تغییرات سیگنال خطا (ce) به صورت مثلثی انتخاب شده‌اند. در سیستم استنتاج فازی T.S.K با دو ورودی سیگنال خطا (e) و تغییرات سیگنال خطا (ce)، توابع عضویت خروجی می‌توانند توابع ثابت  $(f_i = [\alpha_{0,i}])$  یا توابع خطی بر حسب ورودی‌ها  $(f_i = [\alpha_{0,i} + \alpha_{1,i}(e) + \alpha_{2,i}(ce)])$  باشند. شکل (۴) ساختار شبکه فازی - عصبی پیشنهادی با سیستم استنتاج فازی نوع T.S.K با دو ورودی (c و ce) و یک خروجی (u) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل ساختار شبکه فازی - عصبی از لایه‌های زیر تشکیل یافته است:

- لایه اول: این لایه مربوط به تعیین توابع عضویت و درجه عضویت دو ورودی می‌باشد.

در کنترل کننده فازی - عصبی پیشنهادی از توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. توابع عضویت مثلثی برای هر کدام از دو ورودی به صورت روابط (۴) و (۵) می‌باشند:

$$MF_j(e) = [a_j \ b_j \ c_j] \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

در رابطه فوق  $(a_j, b_j, c_j)$  پارامترهای (سه راس) تابع عضویت مثلثی زام  $(MF_j)$  ورودی اول (e) هستند. m نیز نشان دهنده تعداد کل توابع عضویت برای e است.

$$MF_k(ce) = [a_k \ b_k \ c_k] \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $(a_k, b_k, c_k)$  پارامترهای (سه راس) تابع عضویت مثلثی k ام  $(MF_k)$  ورودی دوم (ce) هستند. همچنین p نشان دهنده تعداد کل توابع عضویت برای ورودی دوم (ce) است. پارامترهای  $(a_j, b_j, c_j)$  و  $(a_k, b_k, c_k)$  را پارامترهای بخش مقدم می‌نامند که قابلیت تنظیم به کمک شبکه عصبی را دارا هستند. خروجی لایه اول مربوط به ورودی اول به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$Q_{1,e,j} = \mu[MF_j(e)] \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

در رابطه فوق  $Q_{1,e,j}$  نشان دهنده خروجی شماره زام لایه اول، مربوط به درجه عضویت ( $\mu$ ) تابع عضویت زام  $[MF_j(e)]$  ورودی اول (e) می‌باشد. همچنین خروجی لایه اول مربوط به ورودی دوم به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود:

$$Q_{1,ce,k} = \mu[MF_k(ce)] \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

در رابطه فوق  $Q_{1,ce,k}$  نشان دهنده خروجی شماره k ام لایه اول، مربوط به درجه عضویت ( $\mu$ ) تابع عضویت k ام  $[MF_k(ce)]$  ورودی دوم (ce) می‌باشد. طبق رابطه (۸) تعداد کل خروجی‌های لایه اول  $(Q_{1,i})$  به ازای m و p تابع عضویت مثلثی برای هر کدام از دو ورودی برابر  $h = m + p$  می‌باشد.

$$Q_{1,i} = \mu[MF_i(I)] \quad I = c, ce \quad i = 1, 2, \dots, h \quad (8)$$

در رابطه فوق I نشان دهنده دو ورودی (c و ce) می‌باشد.

- لایه دوم: این لایه مربوط به تشکیل قوانین فازی می‌باشد. در این لایه هیچ گونه تنظیم یا تطبیقی روی پارامترها صورت نمی‌گیرد و فقط عملگرهای فازی بر روی قسمت مقدم قوانین اعمال می‌گردند. خروجی این لایه در واقع میزان وزن یا قدرت قوانین را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن عملگر فازی (prob) AND، خروجی این لایه به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} Q_{2,i} &= W_i \\ &= \text{AndMethod}\{\mu[MF_j(e)] \text{ and } \mu[MF_k(ce)]\} \\ &= \mu\{MF_j(e)\} \mu\{MF_k(ce)\} \\ i &= 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $Q_{2,i}$  و  $W_i$  به ترتیب نشان دهنده خروجی شماره i ام لایه دوم و وزن قانون شماره i ام می‌باشند. طبق این رابطه تعداد کل خروجی‌های لایه دوم  $(Q_2)$  به ازای m و p تابع عضویت مثلثی برای هر کدام از دو ورودی برابر  $n = m \times p$  می‌باشد. i، j و k به ترتیب نشان دهنده شماره قوانین فازی (شماره خروجی‌های لایه دوم)، توابع عضویت ورودی اول و توابع عضویت ورودی دوم هستند. در شکل (۴) II، نماد عملگر فازی ضرب (AND(prob)) است.

- لایه سوم: با توجه به استنتاج فازی نوع T.S.K این لایه، لایه نرمالیزاسیون می‌باشد. خروجی این لایه وزن نرمالیزه شده هر قانون می‌باشد و به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود:

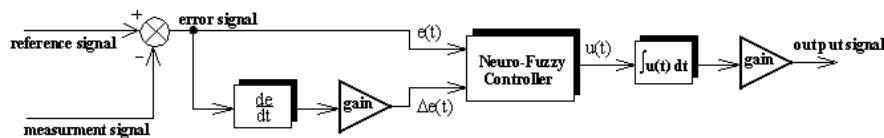
در رابطه (۱۳)  $u$  و  $Q_5$  به ترتیب نشان دهنده خروجی کنترل کننده فازی - عصبی و لایه پنجم به ازای یک بردار آموزشی می باشند. رابطه (۱۳) نشان دهنده آن است که، خروجی نهایی سیستم فازی - عصبی از روش میانگین وزنی تمام خروجی های قوانین به دست می آید. همان طور که نشان داده شده است از شبکه عصبی به منظور تنظیم پارامترهای مقدم و تالی کنترل کننده فازی استفاده شده است.

شبکه عصبی را باید طوری آموزش دهیم که پارامترهای مقدم و تالی سیستم استنتاج فازی را با مونیتورینگ نقاط کار مختلف سیستم تنظیم کند. با این استراتژی به ساختار یک کنترل کننده فازی - عصبی تطبیقی دست خواهیم یافت. برای آموزش شبکه عصبی لازم است دو ورودی و یک خروجی مطلوب کنترل کننده فازی - عصبی به صورت یک الگوی آموزشی در نقاط کار مختلف سیستم تعیین شوند. با توجه به شکل (۲) مشخص می شود که خروجی مطلوب تنظیم کننده ولتاژ AC (ACVR) و تنظیم کننده ولتاژ DC (DCVR) به ترتیب جریان هایی از جنس  $I_q$  و  $I_d$  می باشند. همچنین خروجی مطلوب تنظیم کننده های درونی جریان های  $I_d$  (IdR) و  $I_q$  (IqR)، به ترتیب ولتاژهایی از جنس  $V_d$  و  $V_q$  هستند. نوسان در ولتاژها و جریان های مولفه های  $d$  و  $q$  (خروجی تنظیم کننده ها) ناشی از اغتشاشات موجود در سیستم توزیع است. بنابراین خروجی مطلوب کنترل کننده های فازی - عصبی طراحی شده، برابر عکس تغییرات جریان های  $I_q$  و  $I_d$  و ولتاژهای  $V_d$  و  $V_q$  ناشی از اغتشاشات در نظر گرفته می شوند. دو ورودی مطلوب کنترل کننده های فازی - عصبی همان ورودی های کنترل کننده های PI در نظر گرفته می شوند.

در این مقاله برای آموزش شبکه عصبی از ۳۱۲۶ الگوی آموزشی در نقاط کار مختلف سیستم استفاده شده است. هر الگوی آموزشی به صورت یک بردار با سه پارامتر به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$Z_l = [in_{1,l} \quad in_{2,l} \quad out_{1,l}] \quad l=1,2,\dots,3126 \quad (14)$$

در فرمول بالا  $Z_l$  بردار آموزشی شماره  $l$ ام می باشد.  $in_{1,l}$  و  $in_{2,l}$  به ترتیب نشان دهنده ورودی اول، ورودی دوم و خروجی مطلوب کنترل کننده در نقطه کار شماره  $l$ ام هستند. مقدار بهینه پارامترهای مقدم و تالی مرتبط با توابع عضویت دو ورودی و یک خروجی، متناسب با تغییر نقاط کار سیستم توزیع تغییر می کنند.



شکل (۳): دیاگرام تنظیم کننده فازی - عصبی استفاده شده در سیستم کنترل DSTATCOM

$$\bar{w}_i = Q_{3,i} = \frac{Q_{2,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{2,i}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

در فرمول بالا  $\bar{w}_i$  و  $Q_{3,i}$  به ترتیب نشان دهنده وزن نرمالیزه شده قانون شماره  $i$ ام و خروجی شماره  $i$ ام لایه سوم می باشند. تعداد قوانین فازی برابر  $n$  در نظر گرفته شده است.

لایه چهارم: در این لایه توابع عضویت خروجی و نتایج هر قانون معین می گردند. در صورتی که از سیستم استنتاج فازی مرتبه اول نوع T.S.K استفاده شود، خروجی این لایه از ضرب شدن خروجی لایه سوم، در یک چند جمله ای مرتبه اول ایجاد می شود و به صورت رابطه (۱۱) بیان می گردد:

$$Q_{4,i} = u_i = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (\alpha_{0,i} + \alpha_{1,i} e + \alpha_{2,i} ce) \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

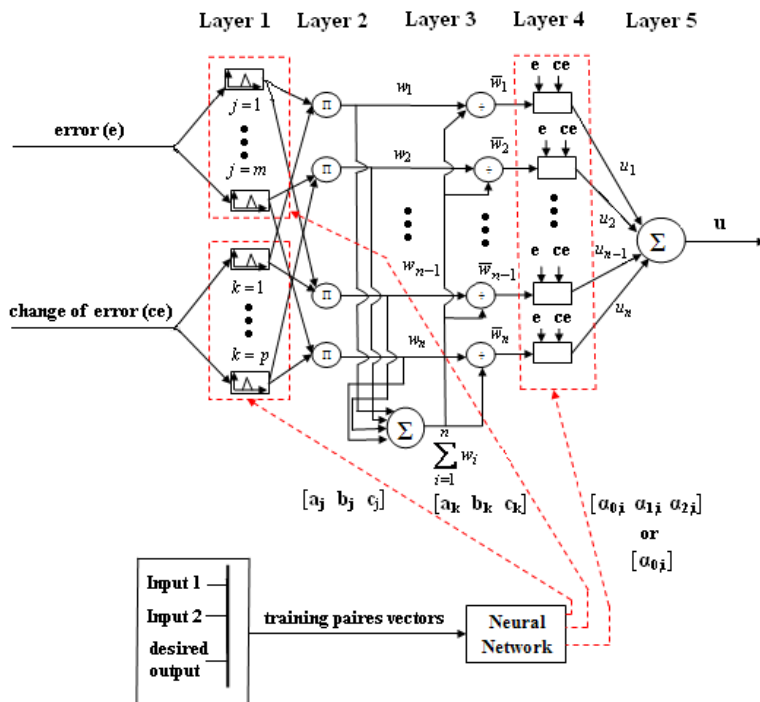
در رابطه فوق  $Q_{4,i}$  و  $u_i$  به ترتیب نشان دهنده خروجی شماره  $i$ ام لایه چهارم و خروجی قانون شماره  $i$ ام هستند. پارامترهای  $\alpha_{0,i}$ ،  $\alpha_{1,i}$  و  $\alpha_{2,i}$  نشان دهنده ضرایب توابع عضویت خروجی مرتبه اول ( $f_i[\alpha_{0,i}, \alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}]$ ) قانون  $i$ ام می باشند. در صورتی که از سیستم استنتاج فازی نوع T.S.K با توابع عضویت خروجی ثابت ( $f_i = [\alpha_{0,i}]$ ) استفاده شود، خروجی این لایه به صورت رابطه (۱۲) بیان می گردد:

$$Q_{4,i} = u_i = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (\alpha_{0,i}) \quad i=1,2,\dots,n \quad (12)$$

پارامترهای توابع عضویت خروجی ( $\alpha_{0,i}$ ،  $\alpha_{1,i}$  و  $\alpha_{2,i}$ ) همگی قابلیت تنظیم به کمک شبکه عصبی را دارا هستند و به پارامترهای بخش نتیجه یا تالی مشهورند.

لایه پنجم: این لایه بیانگر خروجی نهایی شبکه فازی - عصبی می باشد که از مجموع عبارت های لایه چهارم تشکیل یافته است و به صورت رابطه (۱۳) قابل بیان می باشد:

$$u = Q_5 = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad i=1,\dots,n \quad (13)$$



شکل (۴): ساختار شبکه فازی- عصبی پیشنهادی با دو ورودی و یک خروجی

برای بهبود عملکرد DSTATCOM در بهبود کیفیت توان آورده شده‌اند.

به عنوان نمونه جدول قوانین فازی و شکل توابع عضویت دو ورودی کنترل کننده فازی- عصبی IdR در شکل (۵) و جدول (۲) نشان داده شده‌اند. در سه کنترل کننده فازی- عصبی دیگر تعداد توابع عضویت خروجی با تعداد قوانین ( $n = m \times p$ ) برابر است (عدم وجود توابع عضویت خروجی تکراری) تا همه حالت‌های ممکن برای قوانین فازی پوشش داده شوند.

در این مقاله برای محاسبه این مقادیر بهینه از یک بردار شیب (گرادیان نزولی) استفاده شده است. این بردار مقیاسی است که نشان می‌دهد، سیستم استنتاج فازی با چه کیفیتی اطلاعات ورودی- خروجی مطلوب را می‌نگارد. این بردار شیب به کمک الگوریتم آموزش پس انتشار به گونه‌ای تعیین می‌شود که تابع هدف ناشی از جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) حداقل شود. در جدول (۱) به ترتیب مشخصه‌های چهار کنترل کننده فازی- عصبی به کار رفته در تنظیم کننده ولتاژ AC (ACVR)، تنظیم کننده ولتاژ DC (DCVR) و تنظیم کننده‌های جریان‌های  $I_d$  (IdR) و  $I_q$  (IqR)،

جدول (۱): مشخصه‌های چهار کنترل کننده فازی- عصبی به کار رفته در سیستم کنترلی DSTATCOM

Name of Neuro-Fuzzy Controller	ACVR	DCVR	IdR	IqR
Number and Type of Inputs MFs	[۱۷ ۱۹] - Triangel	[۱۰ ۱۰] - Triangel	[۷ ۷] - Triangel	[۱۰ ۱۰] - Triangel
Number of Fuzzy Rules	۳۲۳	۱۰۰	۴۹	۱۰۰
Number and Type of Output MFs	۳۲۳ - linear	۱۰۰ - constant	۴۹ - linear	۱۰۰ - linear
Number of Nonlinear Parameters	۱۰۸	۶۰	۴۲	۶۰
Number of Linear Parameters	۳۲۳	۱۰۰	۴۹	۱۰۰
Number of Nodes	۷۲۳	۲۴۵	۱۳۱	۲۴۵
Number of Training Data Pairs	۳۱۲۶	۳۱۲۶	۳۱۲۶	۳۱۲۶
Number of Checking Data Pairs	۳۱۲۶	۳۱۲۶	۳۱۲۶	۳۱۲۶

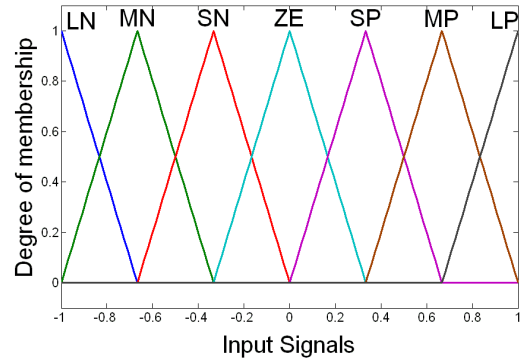
باس‌های  $B_2$  و  $B_3$  منتقل می‌کنند. از یک بانک خازنی موازی در باس  $B_2$  جهت تصحیح ضریب توان استفاده شده است. وظیفه DSTATCOM جبران‌سازی کمبود ولتاژ، پیش‌بود ولتاژ، فلیکر ولتاژ و مولفه‌های هارمونیک در ولتاژ و جریان باس  $B_3$  به وسیله‌ی جذب یا تزریق توان راکتیو است. جهت رسیدن به سرعت قابل قبول در شبیه‌سازی و بهبود عملکرد دینامیکی DSTATCOM این مدل با زمان نمونه برداری نسبتاً کوچکی ( $T_s=5\mu s$ )، نمونه برداری شده است.

#### ۷- نتایج شبیه‌سازی

##### الف- جبران‌سازی کمبود ولتاژ و پیش‌بود

در این قسمت پاسخ دینامیکی یک DSTATCOM با دو نوع کنترلر فازی-عصبی و PI نسبت به تغییرات منبع ولتاژ تغذیه کننده سیستم توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی سیستم توزیع مورد مطالعه، مدار معادل تونن شبکه فوق توزیع با یک منبع ولتاژ برنامه پذیر<sup>۱</sup> مدل شده است. در طول شبیه‌سازی بارهای متصل به باس‌های  $B_2$  و  $B_3$  ثابت هستند (در شبیه‌سازی بار متغیر باس  $B_3$  غیر فعال است)، ولی ولتاژ درونی منبع ولتاژ برنامه پذیر به صورت پله‌ای تغییر می‌کند.

در ابتدای شبیه‌سازی مقدار دامنه ولتاژ تغذیه کننده سیستم توزیع در محل باس  $(V_{B1})$ ،  $1/0.47 p.u$  است. در این حالت جبران کننده غیر فعال است و مقدار دامنه ولتاژ باس  $B_3$ ،  $1 p.u$  است. مقدار دامنه ولتاژ تولیدی توسط منبع ولتاژ برنامه پذیر در سه مرحله و در زمان‌های  $t=0/2s$ ،  $t=0/3s$  و  $t=0/4s$  به ترتیب ۶ درصد افزایش، سپس ۶ درصد کاهش و در انتها به مقدار اولیه خودش ( $1/0.47 p.u$ ) برگردانده می‌شود. شکل (۷) تغییرات مقدار دامنه ولتاژ باس  $B_1$  را نسبت به زمان نشان می‌دهد.



شکل (۵): توابع عضویت مثلثی دو ورودی کنترل کننده فازی عصبی  $I_{dR}$

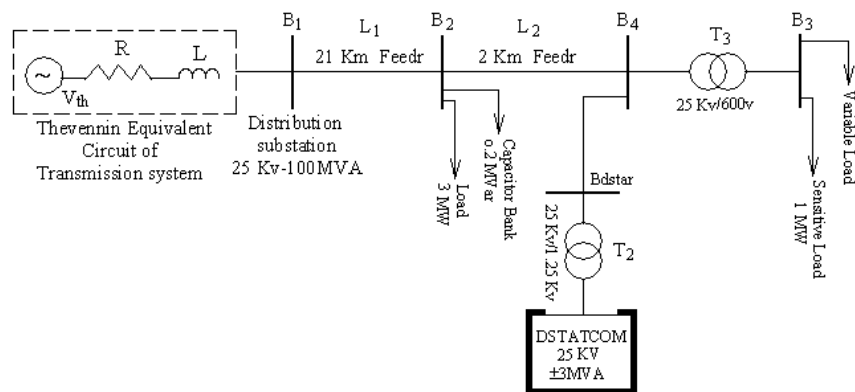
جدول (۲): مجموعه قوانین فازی کنترل کننده فازی  $I_{dR}$

e/c <sub>e</sub>	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
LN	LN	LN	MN	LN	MN	LN	MN
MN	MN	MN	LN	MN	MN	LN	MN
SN	LN	MP	SN	ZE	SP	MN	LN
ZE	MN	MN	SN	ZE	SP	MP	LN
SP	MP	MP	SN	ZE	SP	LP	MN
MP	LP	LP	LP	MP	MP	MP	MP
LP	MP	MP	MP	LP	MP	LP	LP

##### ۶- سیستم توزیع مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه شامل یک DSTATCOM با ظرفیت  $\pm 3MVar$  بر روی یک شبکه‌ی توزیع 25kv است. شکل (۶) یک دیاگرام شبیه‌سازی شامل DSTATCOM و شبکه توزیع را نشان می‌دهد.

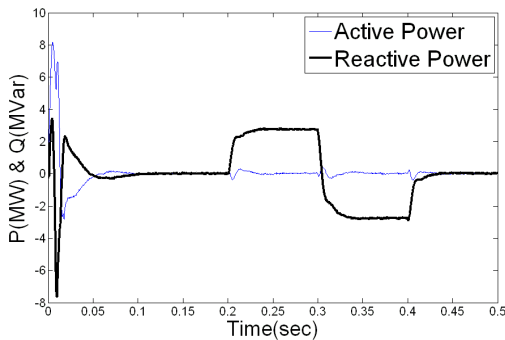
شبکه فوق توزیع به وسیله مدار معادل تونن نشان داده شده است. خطوط تغذیه ۲km و ۲۱km توان را به بارهای متصل شده در



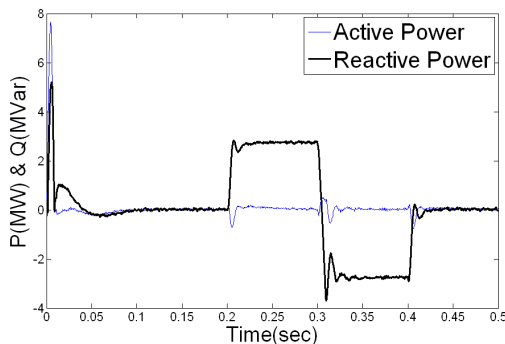
شکل (۶): دیاگرام یک DSTATCOM در شبکه‌ی توزیع 25kv مورد مطالعه

$t = 0.3$  S نیز سریعتر می‌باشد. باید توجه کرد که شاخص مدولاسیون (m) و در نتیجه ولتاژ خروجی اینورتر در حین تغییر عملکرد DSTATCOM از حالت سلفی به خازنی افزایش می‌یابد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) باس DSTATCOM را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی-عصبی نشان می‌دهند.

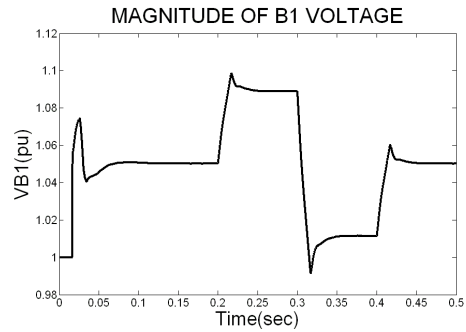
مطابق شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که در لحظه  $t = 0.2$  S با افزایش مقدار ولتاژ در باس  $B_1$ ، DSTATCOM فعال می‌شود و مانند یک سلف توان راکتیوی معادل  $Q = +2/7$  MVar در محل باس  $B_3$  جذب می‌کند تا ولتاژ این باس را در  $1 p.u.$  تنظیم نماید. در این لحظه جبرانگر توان اکتیوی معادل  $P = -0.7$  MW را به شبکه تزریق می‌کند تا ولتاژ خازن DC را در مقدار مرجع  $V_{dc,ref} = 2/4$  kv نگه دارد. در لحظه  $t = 0.3$  S با کاهش مقدار ولتاژ باس  $B_1$  نسبت به حالت اولیه‌اش، DSTATCOM از حالت سلفی به حالت خازنی تغییر ماهیت داده و مانند یک خازن توان راکتیوی معادل  $Q = -2/8$  MVar به باس  $B_3$  تزریق می‌کند و توان اکتیوی معادل  $P = +0.5$  MW را از شبکه جذب می‌نماید. مشاهده می‌شود که در جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی، نوسانات P و Q در حالت گذرای ابتدای شبیه سازی کمتر است و همچنین متناسب با تغییرات ولتاژ باس  $B_1$  در زمان‌های  $t = 0.2$  S،  $t = 0.3$  S و  $t = 0.4$  S نیز با جهش‌های سریعتر و بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۰): تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در باس جبرانگر با کنترلر PI

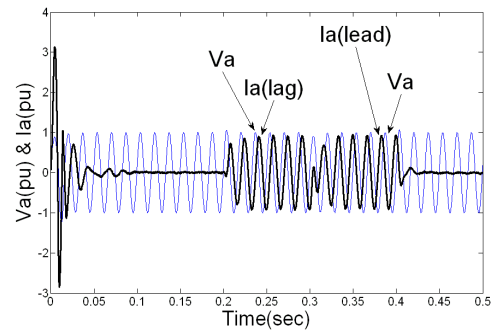


شکل (۱۱): تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در باس جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی

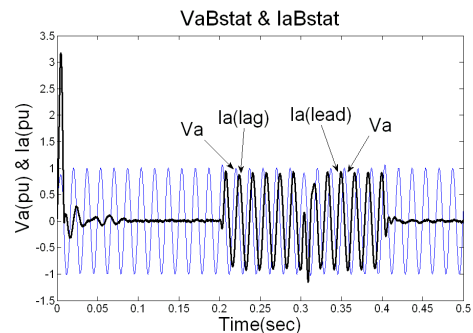


شکل (۷): تغییرات مقدار دامنه ولتاژ  $V_a$  باس  $B_1$  نسبت به زمان

در لحظه  $t = 0.2$  S با افزایش ۶ درصدی مقدار ولتاژ در باس  $B_1$ ، DSTATCOM فعال می‌شود و مانند یک سلف با جذب توان راکتیو در محل باس  $B_3$  ولتاژ این باس را در  $1 p.u.$  تنظیم می‌نماید. در لحظه  $t = 0.3$  S مقدار ولتاژ باس  $B_1$  نسبت به حالت اولیه‌اش ۶ درصد کاهش می‌یابد، در این حالت جبرانگر از حالت سلفی به حالت خازنی تغییر ماهیت داده و جریان  $I_a(p.u.)$  به اندازه ۱۸۰ درجه تغییر فاز می‌دهد. شکل‌های (۸) و (۹) برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی-عصبی، تغییرات ولتاژ و جریان فاز a در باس جبران کننده به ازای اعمال تغییرات در ولتاژ باس  $B_1$  را نشان می‌دهند.



شکل (۸): تغییرات ولتاژ و جریان فاز a در DSTATCOM با کنترلر PI

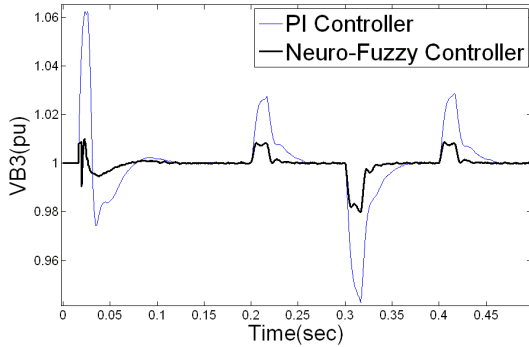


شکل (۹): تغییرات ولتاژ و جریان فاز a در DSTATCOM با کنترلر فازی-عصبی

مطابق شکل‌های (۸) و (۹) ملاحظه می‌شود که در جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی، تغییرات  $I_a$  در حالت گذرای ابتدای شبیه سازی کمتر است و همچنین تغییر حالت عملکرد DSTATCOM در لحظه‌ی



تغییرات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی-عصبی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): تغییرات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  برای جبرانگر با کنترلر PI و فازی-عصبی

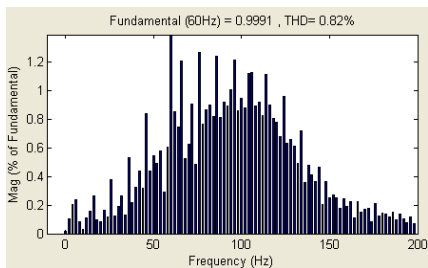
جدول (۴) اندازه و درصد نوسانات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  نسبت به مقدار مرجع ولتاژ ac ( $V_{ac,ref}=1p.u$ ) را برای هر دو نوع کنترل کننده نشان می‌دهد. نتایج جدول فوق به معنی آن است که با بهره‌گیری از کنترل کننده فازی-عصبی، عملکرد تنظیم کننده ولتاژ AC (ACVR) بهبود می‌یابد و تنظیم ولتاژ بهتری در باس  $B_3$  صورت گرفته است.

جدول (۴): میزان نوسانات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  ناشی از تغییرات ولتاژ در باس  $B_1$  برای هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی

Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
Magnitude of Variations	[0.943 1.029]	[0.979 1.010]
Percentage of Variations	[-5.7% +2.9%]	[-2.1% +1.0%]

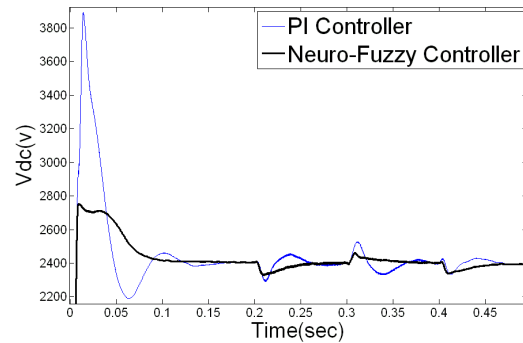
### ب- تحلیل هارمونیک

در این قسمت با استفاده از تابع FFT بلوک powergui برای ولتاژ و جریان فاز a باس DSTATCOM تحلیل هارمونیک انجام شده است. برای هر طیف هارمونیک مقدار T.H.D و مرتبه هارمونیک‌ها مشخص می‌شوند. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) طیف هارمونیک  $V_{a-Bdstat}$  و شکل‌های (۱۶) و (۱۷) طیف هارمونیک  $I_{a-Bdstat}$  را برای هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی، نشان می‌دهند.



شکل (۱۴): طیف هارمونیک  $V_{a-Bdstat}$  برای جبرانگر با کنترلر PI

نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) این نکته را تایید می‌کند که با بهره‌گیری از کنترلر فازی-عصبی، عملکرد تنظیم کننده‌های جریان‌های  $I_d$  ( $I_{dR}$ ) و  $I_q$  ( $I_{qR}$ ) بهبود می‌یابد. در مبدل‌های منبع ولتاژ مبتنی بر IGBT و اینورترهایی با روش سوئیچینگ مدولاسیون پهنای پالس (PWM)، متناسب با تغییر عملکرد DSTATCOM، مدولاسیون نیز تغییر می‌کند تا  $V_{ac}$  خروجی جریان کننده تغییر کند، ولی ولتاژ dc خازن در این نوع مبدل‌ها مستقل از عملکرد DSTATCOM است و در حالت ایده‌آل باید در مقدار مرجع خود ( $V_{dc,ref}=2.4kv$ )، ثابت باقی بماند. شکل (۱۲) برای هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی، نوسانات ولتاژ dc خازن را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): نوسانات ولتاژ dc خازن برای DSTATCOM با هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی به ازای تغییرات ولتاژ در باس  $B_1$

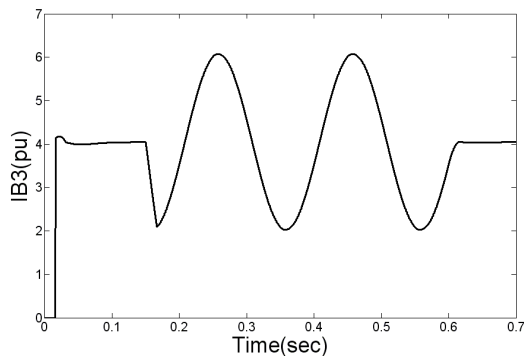
مطابق شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که در کنترل کننده‌های فازی-عصبی مقدار فراجش  $V_{dc}$  در حالت گذرای ابتدای شبیه‌سازی کمتر است ( $2752 < 3890$ ) و همچنین متناسب با تغییرات بار در باس  $B_3$ ، نوسانات ولتاژ dc خازن نیز کمتر می‌باشد. جدول (۳) اندازه و درصد نوسانات  $V_{dc}$  نسبت به مقدار مرجع ولتاژ dc ( $V_{dc,ref}=2/4kv$ ) را برای هر دو نوع کنترل کننده نشان می‌دهد.

جدول (۳): میزان نوسانات ولتاژ dc خازن ناشی از تغییرات ولتاژ در باس  $B_1$  برای هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی

Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
Magnitude of Variations	[2290 2572]	[2330 2460]
Percentage of Variations	[-4.58%+7.17%]	[-2.91% +2.50%]

نتایج جدول (۳) این نکته را تایید می‌کند که با بهره‌گیری از کنترل کننده فازی-عصبی، عملکرد تنظیم کننده ولتاژ DC (DCVR) بهبود می‌یابد. هدف از به کار گیری DSTATCOM در این بخش جبران سازی P و Q در شبکه به منظور تنظیم ولتاژ باس  $B_3$  در مقابل اغتشاشات ناشی از تغییرات در ولتاژ باس  $B_1$  می‌باشد. شکل (۱۳)

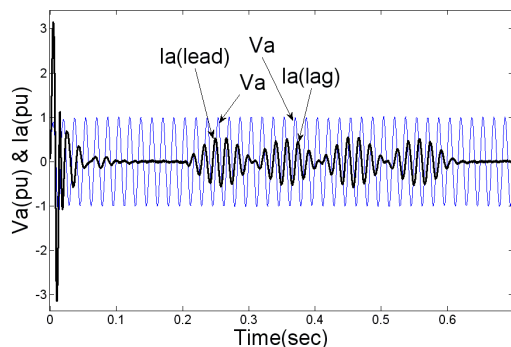
یک بار متغیر  $600V$  از طریق یک ترانسفورماتور  $25KV/600V$  به باس  $B_3$  متصل شده است. این بار متغیر یک منبع جذب جریان‌های متغیر پیوسته را فراهم می‌کند که عامل به وجود آورنده فلیکر ولتاژ در باس  $B_3$  است. دامنه جریان بار متغیر با فرکانس  $5Hz$  تغییر می‌کند، که این امر موجب تغییرات توان بار از  $1MW$  تا  $5/2MW$  با ضریب توان پس فاز متغیر می‌شود. شکل (۱۸) تغییرات دامنه جریان فاز  $a$  در باس  $B_3$  ناشی از تغییرات بار را نشان می‌دهد.



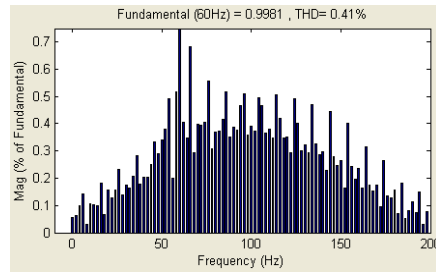
شکل (۱۸): تغییرات دامنه جریان  $I_a$  در باس  $B_3$  به ازای اعمال تغییرات بار

در ابتدای شبیه‌سازی بار متغیر غیر فعال است. در این حالت  $DSTATCOM$  نیز غیر فعال است و مقدار دامنه ولتاژ باس  $B_3$   $1 pu$  است. در لحظه‌ی  $t = 0.2s$  با فعال شدن بار متغیر با ضریب توان پس فاز،  $DSTATCOM$  نیز فعال می‌شود و به طور تناوبی مانند یک سلف یا یک خازن متناسب با تغییرات جریان و توان راکتیو بار متغیر، توان راکتیو جذب یا تزریق می‌کند تا در محل باس  $B_3$  اثر پدیده فلیکر ولتاژ را تعدیل نماید و ولتاژ این باس را در  $1 pu$  تنظیم کند. پس از غیر فعال شدن بار متغیر در لحظه‌ی  $t = 0.6s$ ، جبران کننده نیز غیر فعال می‌شود.

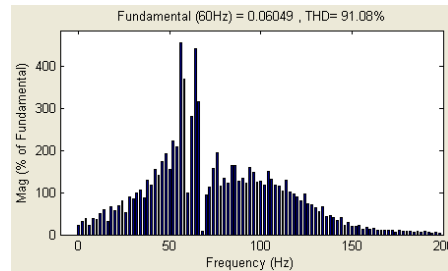
شکل‌های (۱۹) و (۲۰) برای هر دو نوع کنترلر  $PI$  و فازی-عصبی تغییرات ولتاژ و جریان فاز  $a$  جبرانگر را نشان می‌دهند.



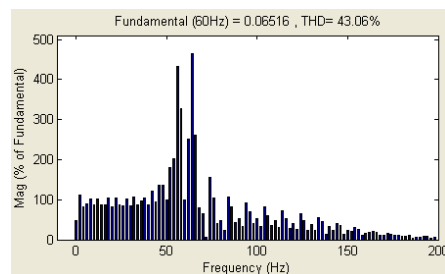
شکل (۱۹): تغییرات ولتاژ و جریان فاز  $a$  در  $DSTATCOM$  با کنترلر  $PI$  به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$



شکل (۱۵): طیف هارمونیک  $V_a$ -Bdstat برای جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی



شکل (۱۶): طیف هارمونیک  $I_a$ -Bdstat برای جبرانگر با کنترلر  $PI$



شکل (۱۷): طیف هارمونیک  $I_a$ -Bdstat برای جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی

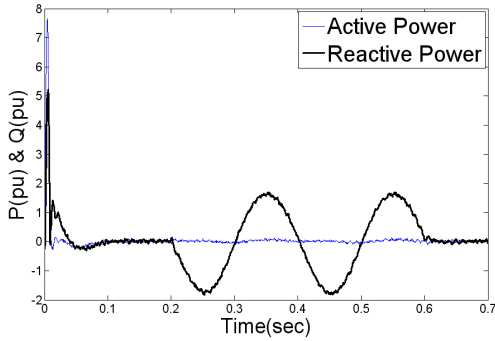
مطابق شکل‌های مذکور، مشاهده می‌شود که مولفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان تزریق شده توسط  $DSTATCOM$  با بهره‌گیری از کنترل کننده‌های فازی-عصبی کاهش می‌یابند. جدول (۵) مقدار T.H.D ولتاژ و جریان فاز  $a$  باس جبرانگر را برای هر دو نوع کنترل کننده نشان می‌دهد.

جدول (۵): مقدار T.H.D ولتاژ و جریان فاز  $a$  باس  $DSTATCOM$  برای هر دو نوع کنترل کننده  $PI$  و فازی-عصبی

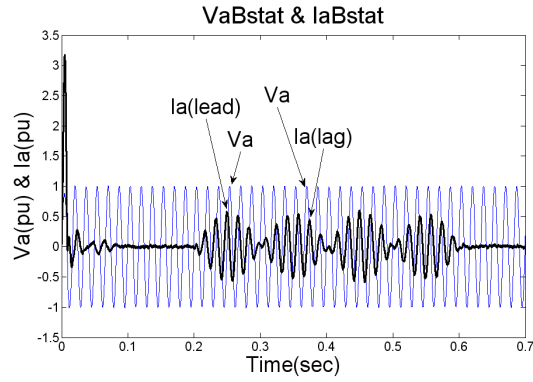
Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
T.H.D of $V_a$ -Bdstat	0.82%	0.41%
T.H.D of $I_a$ -Bdstat	91.08%	43.06%

### ج- جبران سازی فلیکر ولتاژ

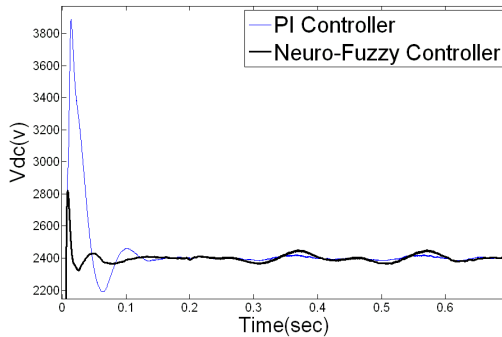
در این قسمت مدار معادل تونن شبکه فوق توزیع به وسیله یک منبع ولتاژ با ولتاژ درونی ثابت مدل شده است.



شکل (۲۲): تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در باس جبرانگر با کنترلر فازی - عصبی به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$



شکل (۲۰): تغییرات ولتاژ و جریان فاز a در DSTATCOM با کنترلر فازی - عصبی به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$



شکل (۲۳): نوسانات ولتاژ dc خازن برای DSTATCOM با هر دو نوع کنترلر کننده PI و فازی - عصبی به ازای اعمال تغییرات بار

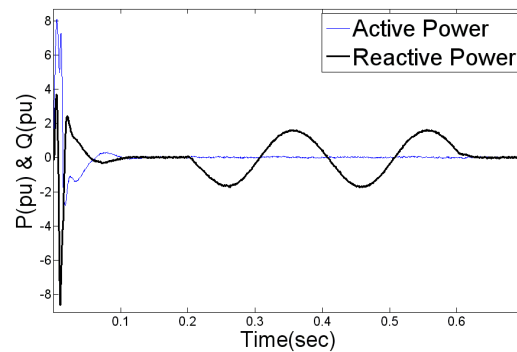
مطابق شکل (۲۳) مشاهده می‌شود که در کنترلر کننده‌های فازی - عصبی مقدار فراجهش  $V_{dc}$  در حالت گذرای ابتدای شبیه سازی کمتر است ( $2818 < 3890$ ). جدول (۶) اندازه و درصد نوسانات  $V_{dc}$  نسبت به  $V_{dc,ref} = 2/4 \text{ kV}$  را برای هر دو نوع کنترلر کننده نشان می‌دهد.

جدول (۶): میزان نوسانات ولتاژ dc خازن ناشی از تغییرات بار، برای هر دو نوع کنترلر کننده PI و فازی - عصبی

Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
Magnitude of Variations	[2193 2459]	[2366 2450]
Percentage of Variations	[-8.62%+2.45%]	[-1.42% +2.08%]

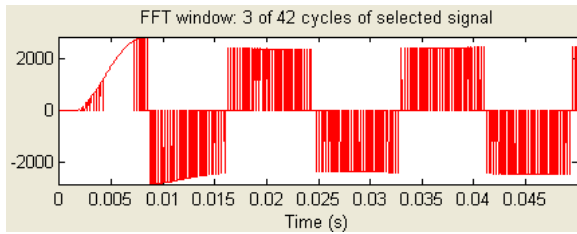
نتایج جدول (۶) این نکته را تایید می‌کند که با بهره‌گیری از کنترلر کننده فازی - عصبی عملکرد تنظیم کننده ولتاژ DC (DCVR) بهبود می‌یابد. شکل (۲۴) تغییرات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی - عصبی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نوسانات دامنه ولتاژ باس  $B_3$  برای کنترلر کننده فازی در ابتدای شبیه سازی کمتر است، جدول (۷) میزان فلیکر ولتاژ در باس  $B_3$  نسبت به مقدار مرجع ولتاژ ac ( $V_{dc,ref} = 1 \text{ p.u.}$ ) را برای هر دو نوع کنترلر کننده نشان می‌دهد.

مطابق شکل‌های (۱۹) و (۲۰) ملاحظه می‌شود که برای هر دو کنترلر کننده ماهیت عملکرد جبرانگر متناسب با تغییرات بار به طور تناوبی تغییر کرده است و همچنین نوسانات گذرای جریان در ابتدای شبیه سازی برای جبران کننده با کنترلر فازی - عصبی کمتر است. با توجه به شکل‌های (۲۱) و (۲۲) مشاهده می‌شود که در حالت گذرا تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در باس جبران کننده برای DSTATCOM با کنترلر کننده فازی - عصبی محدودتر است. همچنین بعد از فعال شدن بار متغیر در لحظه  $t = 0/2 \text{ s}$  کنترلر کننده فازی - عصبی همانند کنترلر کننده PI به خوبی از عهده جبران سازی توان راکتیو متناسب با تغییرات بار برآمده است. محدوده تغییرات توان راکتیو DSTATCOM برای جبران سازی بار از  $1/85 \text{ MVar}$  تا  $1/65 \text{ MVar}$  است.

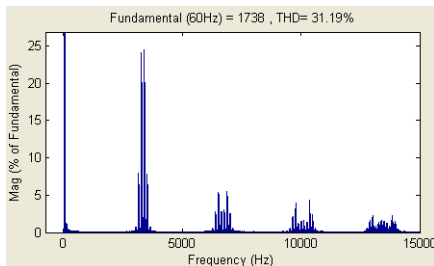


شکل (۲۱): تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در باس جبرانگر با کنترلر PI به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$

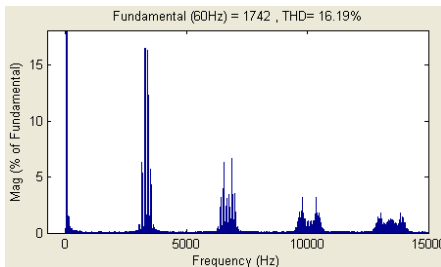
نتایج شکل‌های (۲۱) و (۲۲) این نکته را تایید می‌کند که با بهره‌گیری از کنترلر کننده‌های فازی - عصبی، عملکرد تنظیم کننده‌های جریان‌های  $I_d$  (IdR) و  $I_q$  (IqR) بهبود می‌یابد. شکل (۲۳) برای هر دو نوع کنترلر کننده PI و فازی - عصبی، نوسانات ولتاژ dc خازن را بر حسب زمان نشان می‌دهد.



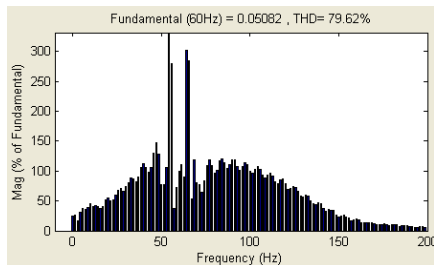
شکل (۲۶): سه سیکل ابتدایی ولتاژ خروجی اینورتر PWM برای کنترلر فازی-عصبی به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$



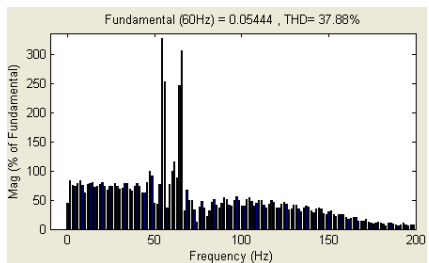
شکل (۲۷): طیف هارمونیک  $V_{a-inv}$  برای جبرانگر با کنترلر PI



شکل (۲۸): طیف هارمونیک  $V_{a-inv}$  برای جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی

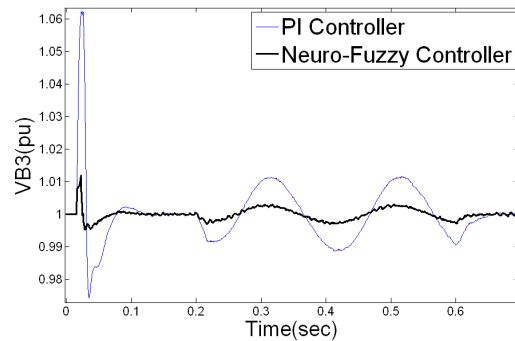


شکل (۲۹): طیف هارمونیک  $I_{a-Bdstat}$  برای جبرانگر با کنترلر PI



شکل (۳۰): طیف هارمونیک  $I_{a-Bdstat}$  برای جبرانگر با کنترلر فازی-عصبی

جدول (۸) مقدار T.H.D  $V_{a-inv}$  و  $I_{a-Bdstat}$  را برای هر دو نوع کنترل کننده نشان می‌دهد.



شکل (۲۴): تغییرات مقدار دامنه ولتاژ باس  $B_3$  برای DSTATCOM با هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی به ازای اعمال تغییرات بار

جدول (۷): میزان فلیکر ولتاژ در باس  $B_3$  ناشی از بار متغیر، برای هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی-عصبی

Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
Magnitude of Variations	[0.988 1.012]	[0.997 1.003]
Percentage of Variations	[-1.2% +1.2%]	[-0.3% +0.3%]

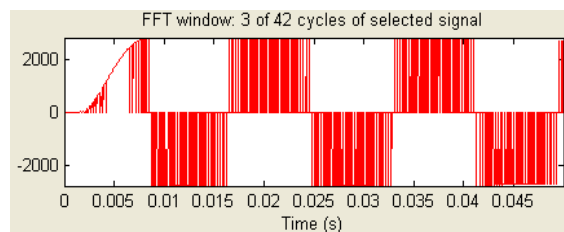
نتایج جدول فوق تایید می‌کند که با بهره‌گیری از کنترل کننده فازی-عصبی عملکرد تنظیم کننده ولتاژ AC بهبود می‌یابد و جبرانسازی بهتری در باس  $B_3$  صورت گرفته است.

#### د- تحلیل هارمونیک

در این قسمت برای ولتاژ خروجی اینورتر PWM ( $V_{a-inv}$ ) و جریان فاز a باس DSTATCOM ( $I_{a-Bdstat}$ ) تحلیل هارمونیک انجام شده است. شکل‌های (۲۵) و (۲۶) ولتاژ خروجی اینورتر برای سه سیکل ابتدایی شبیه سازی (از ۴۲ سیکل کل) را برای هر دو نوع کنترلر نشان می‌دهند.

شکل‌های (۲۷) و (۲۸) طیف هارمونیک  $V_{a-inv}$  و شکل‌های (۲۹) و (۳۰) طیف هارمونیک  $I_{a-Bdstat}$  را نشان می‌دهند.

مطابق شکل‌های مذکور، مشاهده می‌شود که مولفه‌های هارمونیک ولتاژ خروجی اینورتر و جریان تزریق شده توسط DSTATCOM با بهره‌گیری از کنترل کننده‌های فازی-عصبی کاهش می‌یابند.



شکل (۲۵): سه سیکل ابتدایی ولتاژ خروجی اینورتر PWM برای کنترلر به ازای اعمال تغییرات بار در باس  $B_3$

مشخصات ترانسها -

Name of Parameter	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
Configuration	Zy <sub>n1</sub>	Dy <sub>n11</sub>
Nominal Frequency	60 Hz	60 Hz
Nominal Power	3 MVA	6 MVA
Primary Winding Voltage(V1rms)	25 kv	25 kv
Primary Winding Resistance	0.03 pu	0.05 pu
Primary Winding Inductance	0.03 pu	0.05 pu
Secondary Winding Voltage(V2rms)	1250 v	600 v
Secondary Winding Resistance	0.03 pu	0.05 pu
Secondary Winding Inductance	0.03 pu	0 pu
Magnetization Resistance	200 pu	500 pu
Magnetization Reactance	200 pu	500 pu

مشخصات بارهای متصل به باس B<sub>2</sub> -

Name of Parameter	Load	Capacitor Bank
Configuration	Yn	Yn
Nominal Frequency	60 Hz	60 Hz
Nominal Active Power(P)	3 MW	-----
Voltage (Vrms)	25 kv	25 kv
Nominal Reactive Power(Q)	-----	0.2 MVar

مشخصات بارهای متصل به باس B<sub>3</sub> -

Name of Parameter	Sensitive Load	Variable Load
Configuration	Y	Y
Nominal Frequency	60 Hz	60 Hz
Nominal Active Power(P)	1 MW	1.62 MW
Voltage (Vrms)	600 v	600 v
Nominal Reactive Power(Q)	-----	0.785 MVar
Nominal Current(Irms)	-----	3000 A
Modulation of Irms	-----	2000 A
Modulation of Frequency	-----	5 Hz
Modulation of Time [Ton Toff]	-----	[0.15 s 0.6s]

پی نوشت:

1- Programmable Voltage Source

جدول (۸): مقدار T.H.D ولتاژ و جریان فاز a باس DSTATCOM برای

هر دو نوع کنترل کننده PI و فازی - عصبی

Type of Controller	PI Controller	Neuro-Fuzzy Controller
T.H.D of V <sub>a-inv</sub>	31.19%	16.19%
T.H.D of I <sub>a-Bdstat</sub>	79.62%	37.88%

۷- نتیجه گیری

در این مقاله توانایی یک DSTATCOM با دو نوع کنترل کننده PI و فازی - عصبی در جبران سازی کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ، فلیکر ولتاژ و هارمونیک های فرکانس پایین ولتاژ و جریان به وسیله ی جذب یا تزریق توان راکتیو، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا ساختار کنترلر اینورتر جبران کننده تشریح شده است، سپس به جای کنترل کننده های ساختار ثابت خطی PI در چهار تنظیم کننده بیرونی و درونی سیستم کنترل جبران کننده از کنترل کننده های فازی - عصبی غیر خطی طراحی شده مناسب، استفاده شده است.

با توجه به نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که کنترل کننده های فازی - عصبی بدون نیاز به شناسایی تابع تبدیل سیستم توزیع و مهارت فرد خبیره در طراحی کنترل کننده، قابلیت تطبیق با نقاط کاری مختلف سیستم را دارند. همچنین DSTATCOM با این نوع کنترل کننده ها از پاسخ دینامیکی مطلوبتری در جبران سازی کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ، فلیکر ولتاژ، مولفه های هارمونیک و توان راکتیو برخوردار است.

همچنین با بهره گیری از کنترل کننده های فازی - عصبی نوسانات گذرای ابتدای شبیه سازی کاهش می یابد و ولتاژ خازن dc جبران کننده نیز تا حد مطلوبی تثبیت می شود.

نتایج آنالیز طیف هارمونیک نیز نشان می دهند که با کنترل کننده های فازی - عصبی مولفه های هارمونیک ولتاژ و جریان مرتبه پایین کمتری توسط DSTATCOM به شبکه توزیع تزریق می شوند.

ضمیمه

مشخصات فیدرها -

Name of Parameter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
Nominal Frequency	60 Hz	60 Hz
Nominal Power	100 MVA	100 MVA
Positive Sequence Resistance	0.1153 Ω/km	0.1153 Ω/km
Zero Sequence Resistance	0.3963 Ω/km	0.3963 Ω/km
Positive Sequence Inductance	1.048 mH/km	1.048 mH/km
Zero Sequence Inductance	2.73 mH/km	2.73 mH/km
Positive Sequence Capacitance	11.33 nF/km	-----
Zero Sequence Capacitance	5.338 nF/km	-----
Line Section Length	21 km	2 km

مراجع

- [1] A.Elnady, M.M.A.Salama, "Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM", IEEE Tran. on Pow. Del., Vol.20, No.2, pp.992-1000, April 2005.
- [۲] مهدی ترابیان اصفهانی، رحمت ا... هوشمند، "طراحی پارامترهای جبران کننده راکتور تایریستور کنترل برای کوره‌های قوس الکتریکی"، مجله پژوهش در فناوری برق، سال اول، شماره ۴، ص: ۶۰-۵۳، پاییز ۱۳۸۸.
- [3] P.Mitra, G.K.Venayagamoorthy, "An adaptive control strategy for DSTATCOM applications in an electric ship power system", IEEE Tran. on Pow. Ele., Vol.25, No.1, pp.95-104, Jan. 2010.
- [4] Y.Xiao-ping, H.Hai-bin, Y.Zhong, "The state-space modeling and nonlinear control strategies of multilevel DSTATCOM", IEEE/APPEEC, pp.1-4, Chengdu, March 2010.
- [5] E.Song, A.F.Lynch, V.Dinavahi, "Experimental validation of nonlinear control for a voltage source converter", IEEE Tran. on Con. Sys. Tec., Vol.17, No.5, pp.1135-1144, Sep. 2009.
- [2] G.Shahgholian, "Development of state space model and control of the STATCOM for improvement of damping in a single-machine infinite-bus", Inter. Rev. of Elec. Engi.(IREE), Vol.4, No.6, pp.1367-1375, November/December 2009.
- [3] H.Yong, Y.Guodong, "Integral sliding mode variable structure control for DSTATCOM", IEEE/ICMTMA, Vol.2, pp.476-479, Changsha City, March 2010.
- [4] L.O.Mak, Y.X.Ni, C.M.Shen, "STATCOM with fuzzy controllers for interconnected power systems", Elec. Pow. Sys. Res., Vol.55, pp.88-95, 2000.
- [5] D.Menniti, A.Burgio, A.Pinnarelli, N.Sorrentino, "Design of STATCOM fuzzy controller to damp electromechanical oscillations in a multi-machine power system", PMAPS, pp.439-444, Naples, Italy, 2002.
- [6] P.K.Dash, S.Morris, S.Mishra, "Design of a nonlinear variable-gain fuzzy controller for FACTS devices", IEEE Trans. on Con. Sys. Tec., Vol.12, No.3, pp.428-438, May 2004.
- [7] M.Mohaddes, A.M.Gole, P.G.McLare, "A neural network controlled optimal pulse-width modulated STATCOM", IEEE Tran. Pow. Del., Vol.14, No.2, pp.481- 488, 1999.
- [8] Y.Xiao-ping, Z.Yan-ru, W.Yan, "A novel control method for DSTATCOM using artificial neural network", IEEE/IPEMC, Vol.3, pp.1-4, Shanghai, Aug. 2006.
- [9] B.Singh, J.Solanki, V.Verma, "Neural network based control of reduced rating DSTATCOM", IEEE/INDICON, pp.516-520, Dec. 2005.
- [10] P.Giroux, G.Sybille, H.Le-Huy, "Modeling and simulation of a distribution STATCOM using simulink's power system blockset", IEEE/IECON, Vol.2, pp.990-994, Denver, CO, 2001.

رزومه



غضنفر شاهقلیان (متولد آذر ماه سال ۱۳۴۷ شهر اصفهان) دارای دکتری تخصصی در رشته مهندسی برق - قدرت از دانشگاه علوم و تحقیقات در سال ۱۳۸۵ می‌باشد. وی دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را نیز در رشته مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۷۰ و ۱۳۷۳ به ترتیب در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تبریز به پایان رسانده است. زمینه تخصصی الکترونیک قدرت، دینامیک سیستم، ماشینهای الکتریکی، کنترل و شبیه سازی سیستمها می‌باشد. از ایشان تاکنون بیش از صد مقاله علمی در کنفرانسهای ملی و بین‌المللی و مجلات معتبر چاپ شده است. چاپ هشت کتاب در زمینه‌های مدارهای الکتریکی، ماشینهای الکتریکی و بررسی سیستمهای قدرت و ارائه چند طرح تحقیقاتی از دیگر فعالیتهای علمی ایشان می‌باشد.



ابراهیم حق جو (متولد مرداد ماه سال ۱۳۶۲ شهر شیراز) دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق - قدرت به ترتیب در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون و دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۸ به پایان رساند. زمینه تخصصی تاثیر ادوات FACTS بر بهبود کیفیت توان در سیستم‌های توزیع و شبیه سازی سیستم‌های قدرت می‌باشد.



علیرضا سیفی (متولد مرداد ماه سال ۱۳۴۷ شهر شیراز) دارای دکتری تخصصی در رشته مهندسی برق - قدرت از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۷۹ می‌باشد. وی دوره کارشناسی را در رشته مهندسی برق - الکترونیک در دانشگاه شیراز در سال ۱۳۶۹ و دوره کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی برق - قدرت دانشگاه تبریز در سال ۱۳۷۲ به پایان رساند. زمینه تخصصی بهینه سازی فازی، دینامیک سیستم قدرت، شبیه سازی سیستم قدرت و ماشینهای الکتریکی می‌باشد. از ایشان تاکنون بیش از پنجاه مقاله علمی در کنفرانسهای ملی و بین‌المللی و مجلات معتبر چاپ شده است.



ایرج حسن‌زاده درجه دکترای خود را در مهندسی برق (کنترل- رباتیک) از دانشگاه تبریز و همکاری دانشگاه Western Ontario کانادا و درجه کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه تبریز در سالهای ۲۰۰۲ و ۱۹۹۴ دریافت کرد. ایشان مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۹۹۱ از دانشگاه تهران دریافت نمود. دکتر حسن‌زاده دوره فوق‌دکترای خود در زمینه مکترونیک و رباتیک را به مدت دو سال (۲۰۰۴-۲۰۰۶) در دانشگاه Ryerson تورنتو (کانادا) گذراند. ایشان از سال ۲۰۰۲ با دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز همکاری دارد و در حال حاضر مسئول آزمایشگاه تحقیقاتی رباتیک آن دانشگاه است و دو تیم رباتیک را که در مسابقات بین‌المللی رباتیک (RDC 2006, RDC 2002) موفق به کسب چهار جایزه شدند رهبری کرده‌اند. زمینه‌های تحقیق مورد علاقه ایشان رباتیک، Visual Servo، تله رباتیک، تئوری کنترل و سیستم‌های قدرت می‌باشد. ایشان دارای ۳۵ مقاله در زمینه‌های فوق می‌باشند که در مجلات چاپ و یا در کنفرانس‌های بین‌المللی ارائه شده‌اند. دکتر حسن‌زاده عضو IEEE و نیز عضو کمیته برنامه‌ریزی چندین کنفرانس بین‌المللی (IEEE Thai 2006, IEEECCA 2005, SPIE 2005) و کنفرانس‌های ملی بوده‌اند.