

## بررسی هارمونیک‌ها در شبکه‌های توزیع در شرایط نامتقارنی بارهای الکتریکی

حسین اصغرپور علمداری<sup>۱\*</sup>، حسن زارع<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup>دانشگاه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.

### چکیده

بارهای غیرخطی در شبکه توزیع موجب مشکلات فراوانی برای شبکه‌های توزیع می‌شود. از جمله این مشکلات می‌توان به تلفات، تداخل در عملکرد سیستم‌های حفاظتی، کاهش عمر تجهیزات و عملکرد نامطلوب موتورها و خازن‌ها اشاره کرد. در ساختار شبکه‌های توزیع، با رشد استفاده از تجهیزات الکترونیکی و وجود مبدل‌های الکترونیک قدرت، موجب تزریق هارمونیک و کاهش کیفیت توان در این شبکه‌ها شده است. استفاده از تجهیزات فیلتر اکتیو می‌تواند موجب کاهش هارمونیک و بهبود شاخص‌های کیفیت توان در شبکه‌های توزیع گردد. در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری به منظور بهینه سازی ضرایب کنترل‌کننده کلاسیک با هدف کاهش هارمونیک استفاده شده است. هم‌چنین از کنترل‌کننده عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم آموزش مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای کاهش هارمونیک شبکه استفاده شده است. مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، غیرخطی بودن و قابلیت حذف نویز می‌باشد. به منظور تایید بر انجام کار از محیط برنامه نویسی و شبیه سازی نرم افزار متلب استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:** شبکه‌های توزیع، هارمونیک‌ها، کیفیت توان، مبدل‌های الکترونیک قدرت، فیلتر اکتیو.

### تاریخچه مقاله:

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۴/۰۱

تاریخ اصلاحات: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

### Keywords:

Distribution Network  
Harmonic  
Power Quality  
Power Electronic Converters  
Active Filter

\*ایمیل نویسنده مسئول:

asgharpour\_alamdari@tvu.ac.ir

## Harmonics Analysis in Distribution Networks under Asymmetric Conditions of Electrical Loads

Hossein Asgharpour-Alamdari<sup>۱\*</sup>, Hassan Zare<sup>۲</sup>

<sup>۱,۲</sup>Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU),  
Tehran, Iran.

### Abstract

The existence of nonlinear loads in the distribution network causes many problems for distribution networks. These problems include losses, interference in the performance of protective systems, reduced lifetime of equipment and undesirable performance of motors and capacitors. In the structure of distribution networks, the growth of the use of electronic equipment and the presence of electronic converters have caused harmonic injection and reduced power quality in these networks. In this regard, the use of active filter equipment can reduce harmonics and improve power quality indices in distribution networks. In this paper, an optimization algorithm for teaching and learning is proposed to optimize the classical controller coefficients with the aim of reducing harmonics. Also, Multilayer Perceptron Neural Controller has been used to train algorithm based on intelligent algorithms to reduce network harmonics. The most important features of neural networks are nonlinearity and noise cancellation. In order to perform the simulation of software, the programming environment and simulation of MATLAB software is used.

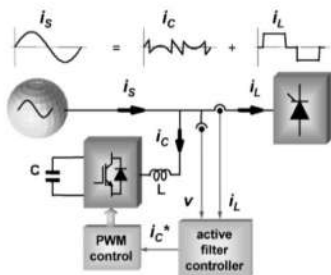
الگوریتم آموزش مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای کاهش هارمونیک شبکه استفاده شده که دارای قابلیت حذف نویز می‌باشد.

## ۲- توصیف کلی فیلترهای اکتیو شنت

از آنجایی که فیلتر به کار رفته در این مقاله به صورت موازی در مدار قرار می‌گیرد در این بخش در خصوص عملکرد آن‌ها بحث می‌گردد. فیلترهای اکتیو شنت معمولاً شامل دو بلوک اصلی مجزا است [۹-۱۲]:

- مبدل  $PWM^4$  (پردازش توان)
- کنترل کننده‌ی فیلتر اکتیو (پردازش سیگنال)

مبدل  $PWM$  مسئول پردازش توان در تولید جریان جبران کننده‌ای است که باید از شبکه قدرت کشیده شود. کنترل کننده‌ی فیلتر اکتیو وظیفه‌ی پردازش سیگنال برای تعیین مراجع جریان جبران کننده‌ی لحظه‌ای به صورت بلادرنگ است، که این سیگنال به صورت پیوسته به مبدل  $PWM$  منتقل می‌شود. شکل (۱) ساختار کلی یک فیلتر اکتیو شنت را برای جبران‌سازی جریان هارمونیک‌ها با بار خاص نشان می‌دهد. این فیلتر یک مبدل تغذیه ولتاژ، با یک کنترل کننده‌ی جریان  $PWM$  و یک کنترل کننده‌ی فیلتر اکتیو است که یک الگوریتم کنترل تقریباً لحظه‌ای را تحقق می‌بخشد. کنترل کننده‌ی فیلتر اکتیو در یک وضعیت حلقه بسته، دائماً جریان بار  $i_L$  را حس کرده و مقادیر لحظه‌ای مرجع جریان جبران کننده‌ی  $i_c^*$  را برای مبدل  $PWM$  محاسبه می‌کند. در حالت ایده‌آل، مبدل  $PWM$  به صورت یک تقویت کننده‌ی خطی توان فرض می‌شود که در آن جریان جبران کننده‌ی  $i_c$  به درستی جریان مرجع خود  $i_c^*$  را دنبال می‌کند.



(شکل-۱): ساختار اساسی فیلتر اکتیو شنت

مبدل  $PWM$  باید فرکانس کلیدزنی  $f_{pwm}$  بالایی داشته باشد تا بتواند دقیقاً جریان جبران کننده را بازسازی کند. به‌طور طبیعی  $f_{pwm} > 10 f_{hmax}$  است، که در آن  $f_{hmax}$

افزایش بارهای غیرخطی در صنعت سبب افزایش مشکلات کیفیت توان نظیر هارمونیک‌های جریان، اعوجاج ولتاژ، تداخل الکترومغناطیسی و ضریب توان پایین، راندمان کم تجهیزات شده است. در این راستا، فیلترهای پسیو که به صورت گسترده به‌منظور جبران‌سازی این بارها و تامین نیازهای سیستم استفاده می‌شوند از مشکلاتی نظیر رزونانس، بازده کم، وابستگی به محیط اطراف و سرعت جبران‌سازی کم می‌کنند. در مقابل فیلترهای اکتیو قادرند هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و ضریب توان را به سرعت و با قابلیت اطمینان بالا جبران نمایند. در حال حاضر علی‌رغم تحقیقات فراوان بر روی روش‌های کنترلی، نیاز به روش‌های مطمئن‌تر و سریع‌تر هنوز احساس می‌شود. از طرفی استفاده وسیع از تجهیزات الکترونیک قدرت نیز همراه با بار خطی، موجب افزایش اعوجاج هارمونیک در جریان‌های شبکه  $AC$  شده و سیستم‌های سه فاز این مولفه‌ها می‌توانند موجب نامتعادلی و جریان‌های اضافی سیم نول گردند [۱-۳]. هارمونیک‌های تزریقی باعث مصرف توان راکتیو، نامتعادلی و جریان‌های اضافی سیم نول شده که موجب پایین آمدن راندمان سیستم و ضریب قدرت می‌شود. بیشتر بارهای غیرخطی مبتنی بر مبدل‌های حالت جامد نظیر  $UPS^1$ ،  $SMPS^2$  و غیره هستند. این بارهای غیرخطی جریان غیرسینوسی می‌کشند و بنابراین افت ولتاژ در هادی‌های توزیع ایجاد می‌کنند. اثرات مضر اصلی جریان و ولتاژ هارمونیک بر تجهیزات سیستم قدرت مواردی نظیر اضافه حرارت، اضافه بار، اغتشاش کنترل حساس و تجهیزات الکترونیکی، خرابی خازن، تداخل مخابراتی و ارتباطی، مسئله پردازش، لرزش موتور، مسئله رزونانس و ضریب قدرت کم می‌باشند. به‌عنوان یک نتیجه، مسدود نمودن و حذف موثر هارمونیک‌ها از سیستم برای شبکه و مصرف کننده مهم می‌شود. فیلترینگ قدرت اکتیو، موثرترین راه حل پیشنهادی می‌باشند. فیلتر قدرت اکتیو  $APF^3$  می‌تواند مسئله هارمونیک‌ها و توان راکتیو را هم‌زمان حل کند. در [۳-۵] نویسندگان دو روش کنترل جریان فیلتر قدرت اکتیو موازی تحت شرایط نامتعادلی و غیرسینوسی مقایسه کرده‌اند. تئوری‌ها و نظریه‌های زیادی برای آشکارسازی هارمونیک‌های جریان لحظه‌ای در فیلتر قدرت اکتیو ایجاد شده که همانند تکنیک تحلیل فوریه سریع، شبکه عصبی، تئوری توان راکتیو لحظه‌ای، تئوری قاب مرجع سنکرون  $dq$ ، استفاده از فیلترهای الکتریکی آنالوگ یا دیجیتال با مجزا کردن مولفه‌های هارمونیک اضافی با کنترلر منطق فازی می‌باشد [۶-۸]. در این مقاله، از کنترل کننده عصبی پرسپترون چند لایه با

<sup>1</sup> Uninterruptible Power Supply

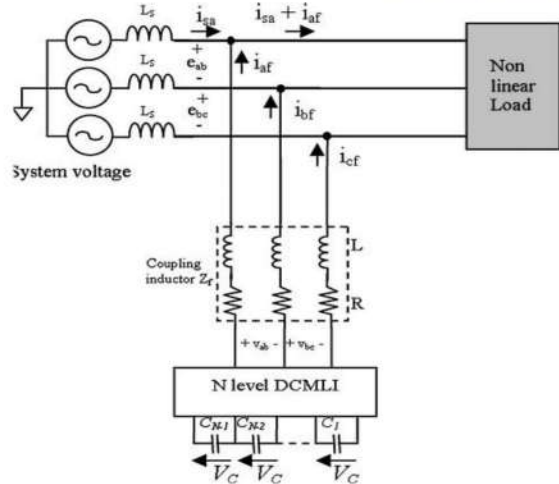
<sup>2</sup> Switched-Mode Power Supply

<sup>3</sup> Active Power Filter

<sup>4</sup> Pulse-Width Modulation



جریان از طریق یک سلف بالا و پایین شود و سیگنال جریان مرجع را دنبال کند. یک سیگنال خطا جهت کنترل کلیدزنی  $e(t)$  اینورتر استفاده می‌شود. این خطا اختلاف جریان مرجع با جریان تزریق شده توسط اینورتر است. وقتی خطا به مقدار حد بالایش می‌رسد، کلیدها سوچ می‌شوند تا جریان را پایین بیاورند و بالعکس. بازه سیگنال خطا  $e_{\max} - e_{\min}$ ، مستقیماً مقدار ریپل جریان خروجی اینورتر را کنترل می‌کند که باند هیستریزس نام دارد. حدود هیستریزی  $e_{\max}, e_{\min}$ ، نسبتی از آفست سیگنال مرجع هستند. تا زمانی که جریان مرجع تغییر نکرده باشد، جریان در این محدوده نگه داشته می‌شود. فرکانس کلیدزنی با پهنای باند هیستریزس، اندازه سلف و ولتاژ DC اینورتر وابسته است.



(شکل-۴): نمایی از فیلتر اکتیو موازی

وظیفه فیلتر اکتیو تزریق یک جریان هارمونیک به شبکه در نقطه اتصال مشترک شبکه و بار غیرخطی می‌باشد، بطوریکه جریان کشیده شده از شبکه سینوسی و هم‌فاز با ولتاژ شبکه گردد. فرض کنید که ولتاژ شبکه در نقطه مشترک با بار غیر خطی و جریان بار به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$I_L(t) = \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

$$V_s(t) = V_s \sin(\omega t)$$

که در رابطه (۱)  $\theta_n$  زاویه فاز جریان در هارمونیک  $n$  ام می‌باشد. در حالت عملکرد مطلوب فیلتر، جریان شبکه باید به صورت رابطه (۲) باشد.

$$i_s(t) : I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i_f(t) = i_L(t) - i_s(t)$$

در رابطه (۲)  $i_f(t)$  جریان فیلتر و  $i_L(t)$  جریان بار می‌باشد.  $\theta_1$  زاویه فاز مولفه پایه جریان می‌باشد. اگر اینورتر، جریان  $i_f(t)$  را به شبکه تزریق کند، جریان شبکه به صورت یک سینوسی هم‌فاز با ولتاژ در می‌آید.

**۳-۳- طرح کلیدزنی:** فیلترهای اکتیو جریان تغذیه با اندازه‌گیری جریان‌های هارمونیک و تزریق معادل آنها با شیفت ۱۸۰ درجه باعث می‌شوند جریان منبع تغذیه تقریباً سینوسی شود. برای این جبران‌سازی به یک اینورتر با جریان کنترل شده احتیاج داریم. کنترل جریان هیستریزس یکی از روش‌های کنترلی اینورتر منبع ولتاژ است که موجب می‌شود جریان تولید شده خروجی از شکل موج جریان مرجع تبعیت کند. در این روش سوئیچ‌های یک اینورتر بصورت غیرسنکرون کنترل می‌شوند تا

**۳-۴- تخمین جریان مرجع:** جریان مرجع لحظه‌ای خط  $(I_{Sref}, I_{Sbref}, I_{Saref})$  توسط ضرب بردارهای جریان سه‌فازه واحد در ماکزیمم جریان خط  $I_{SMax}$  محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه مقادیر حداکثر از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$V_{S \max} = \sqrt{2/3} (V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2) \quad (3)$$

**۳-۵- طراحی خازن لینک دی سی:** لازم است به منظور درک بهتر نحوه در نظر گرفتن خازن لینک دی سی در شرایط تغییرات بار مصرفی و تعیین میزان شارژ و دشارژ خازن، مفهوم تعادل انرژی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. خازن لینک دی سی در طول تغییرات جریان بار توان مورد نیاز سیستم را تامین می‌کند و این تامین نیاز سیستم با تغییرات ولتاژ نمایان می‌شود. به همین منظور برای برقراری تعادل انرژی در سیستم رابطه (۴) برقرار می‌باشد.

$$\frac{1}{2} C_{dc} (V_{dcref}^2 - V_{dc}^2(t)) = \Delta E_C(t) = \frac{1}{2} V_{S \max} \Delta I_L T \quad (4)$$

بنابراین مقدار ولتاژ خازن از ۳ مرحله زیر بدست می‌آید.

مرحله اول: افزایش مولفه اصلی جریان بار  $C_{dc1}$

$$\frac{1}{2} C_{dc1} (V_{dcref}^2 - V_{dc, \min}^2(t)) = \frac{1}{2} V_{S \max} \Delta I_L T \quad (5)$$

جریان واقعی این منبع کسر شده و در خروجی جریان تولیدی فیلتر اکتیو  $i_f^{ref}$  به منظور جبران سازی هارمونیک بدست می آید. جریان بدست آمده در این بخش از جریان حال حاضر تولیدی فیلتر اکتیو کسر می شود تا جریان باقیمانده به حلقه های هیستریزس داده شود تا عمل کلید زنی انجام شود.

$$i_e = i_f - i_f^* \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $i_e$  جریان خطای فیلتر اکتیو است که باید توسط حلقه های هیستریزس تولید گردد. به همین منظور می توان از رابطه (۹) استفاده کرد.

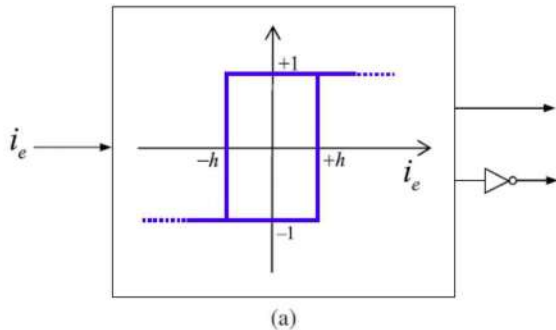
$$u = \begin{cases} +1 & \text{for } i_e > 0 \\ -1 & \text{for } i_e < 0 \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه (۹) نحوه تولید پالس های کلید زنی از مقدار جریان خطا بدست آمده است.

به منظور تعیین پالس های کلید زنی از روش هیستریزس از رابطه (۱۰) استفاده می شود.

$$T_1 = \begin{cases} on & \text{for } i_f > i_f^* + h \\ off & \text{for } i_f < i_f^* - h \end{cases} \quad (10)$$

بر اساس رابطه (۱۰) برای تولید جریان مرجع سیستم تحت مطالعه در سیستم پهنای باندی به مقدار  $h$  در نظر گرفته می شود که مقدار کوچکی می باشد مطابق با شکل های (۵) و (۶) سیستم به منظور تولید جریان مورد نیاز شبکه در این باند اقدام به روشن و خاموش کردن کلیدها می کند که به موجب این روشن و خاموش شدن شکل موج مورد نظر تولید می شود.



(شکل-۵): نمایشی حلقه هیستریزس

در روابط (۵)،  $V_{dc, \min}$  حداقل ولتاژ خازن لینک دی سی از پیش تعیین شده است.  $V_{S, \max}$  ماکزیمم ولتاژ منبع توان می باشد.  $T$  دوره تناوب منبع ولتاژ می باشد.

مرحله دوم: کاهش مولفه اصلی جریان بار  $C_{dc2}$

$$\frac{1}{2} C_{dc1} (V_{dc, \max}^2 - V_{dc, \text{ref}}^2(t)) = \frac{1}{2} V_{S, \max} \Delta I_{L2} T \quad (6)$$

$V_{dc, \max}$  حد بالایی از پیش تعیین شده ولتاژ ذخیره کننده انرژی می باشد.

مرحله سوم: جبران سازی توان راکتیو و هارمونیک جریان بار در

طول شرایط حالت دائم  $C_{dc3}$

$$\frac{1}{2} C_{dc3} (V_{dc, \Delta}^2 - V_{dc, \text{ref}}^2(t)) = \frac{1}{2} V_{S, \max} \Delta I_{L3} T \quad (7)$$

حداکثر مقداری که برای  $(C_{dc1}, C_{dc2}, C_{dc3})$  از روابط (۷)

بدست می آید مقدار اصلی برای خازن لینک دی سی می باشد.

البته این در شرایطی است که جریان سینوسی در شرایط ایده آل بدست آید.

### ۳-۶- طرح ریزی سیستم کنترلی: به منظور حفظ کارایی

سیستم فیلتر اکتیو لازم است که ولتاژ این سیستم در محدوده

$V_{dc, \text{ref}}$  باقی بماند به همین منظور از ساختار کنترلی شکل (۵)

استفاده شده است. بر اساس این ساختار مقدار ولتاژ لینک خازن

دی سی از مقدار مرجع (مقدار نامی) کم شده و از خطای تغییرات

ولتاژ انتگرال گرفته می شود. انتگرال گیری از این تغییرات موجب

جریان ماکزیمم  $I_{S, \text{Max}}$  می شود. به همین منظور در این بخش

از کنترل کننده کلاسیک که یک انتگرال گیر و یک ضریب تناسبی

می باشد استفاده شده است. بدست آوردن مقدار حداکثر جریان از

خروجی کنترل کننده برای ما دارای اهمیت بالایی می باشد زیرا

اگر این جریان به درستی تخمین زده شود می توان هارمونیک های

بیشتری را در شبکه کاهش داد و جبران سازی بهتری انجام داد.

بر اساس شکل (۶) به منظور تخمین جریان مولفه اصلی منبع

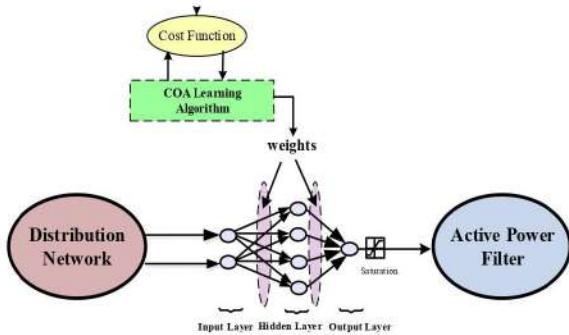
علاوه بر جریان  $I_{S, \text{Max}}$  به مقادیر زوایه ایی این جریان نیز نیاز

می باشد. با روابط شرح داده شده در بخش قبل و شکل (۵) با

ضرب  $I_{S, \text{Max}}$  در مقدار  $\sin(\omega t)$  مقدار جریان مرجع منبع

تولید توان بدون هارمونیک بدست می آید. این جریان از مقدار

کنترل‌کننده در نظر گرفته شده است. همچنین در ساختار شبکه-ی عصبی پیشنهادی به بایاس‌ها وزن‌هایی برای تغییر و تاثیر بر روی جواب اختصاص داده شده است. براساس شکل (۷) الگوریتم آموزش و یادگیری با هدف مینیمم شدن خطای نوسانات گشتاور و سرعت اقدام به تغییر ضرایب کنترل‌کننده می‌نماید.

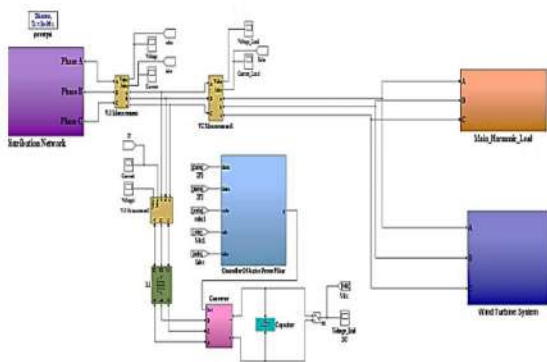


شکل-۷: ساختار کنترل‌کننده عصبی

کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی دارای مزایای خوبی نسبت به کنترل‌کننده‌ی کلاسیک و کنترل‌کننده‌ای مرسوم می‌باشد. مهم-ترین مزیت این کنترل‌کننده این است که به ساختار و پارامتر-های سیستم وابسته نیست. این موجب می‌شود که این کنترل‌کننده برای هر سیستمی عملکرد مطلوبی داشته باشد.

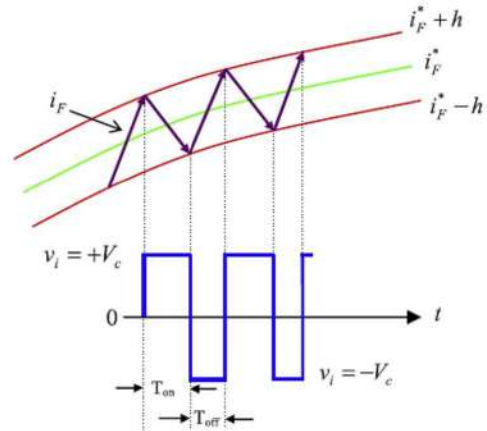
#### ۴- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

ساختار سیستم تحت مطالعه در نرم افزار متلب در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل-۸: ساختار سیستم تحت مطالعه در نرم افزار متلب

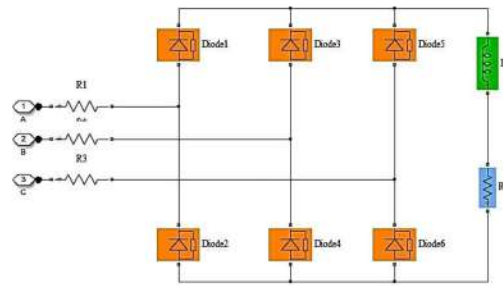
این شکل از یک شبکه توزیع، با بارهارمونیک و فیلتر اکتیو تشکیل شده است. در ساختار شکل (۹) سیستم کلید زنی و کنترلی هیستریزس نمایش داده شده است. در این شکل کنترل‌کننده لینک خازن دی سی به منظور کنترل شارژ و دشارژ خازن و جلوگیری از استخراج بیش از حد از خازن استفاده شده است. در ساختار کنترلی روش هیستریزس هدف تعیین جریان مرجع



شکل-۶: نمایی نحوه کلید زنی

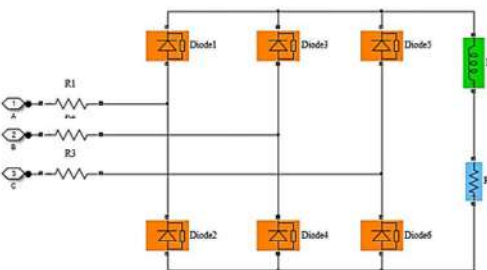
۳-۷- روش کنترلی شبکه عصبی پرسپترون و ساختار کنترل‌کننده: در این مقاله از روش‌های مختلف کنترلی برای کنترل فیلتر اکتیو موازی استفاده شده است. در روش‌های مختلف کنترلی هدف کاهش هارمونیک شبکه می‌باشد. این کاهش هارمونیک در واقع همان تامین توان هارمونیک بار مصرفی به منظور جلوگیری از فشار زیاد بر روی نیروگاه‌ها می‌باشد.

در این مقاله از کنترل‌کننده کلاسیک به همراه الگوریتم‌های بهینه‌سازی آموزش و یادگیری جهت کنترل سیستم تحت مطالعه استفاده شده است. همچنین به منظور بهبود عملکرد و کارایی سیستم کنترلی فیلتر اکتیو از کنترل‌کننده عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. مفهوم پرسپترون ابتدا به صورت یک نرون مصنوعی ارائه شد. شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه نشان دهنده‌ی یک ارتباط غیرخطی بین بردار ورودی‌ها و بردار خروجی‌ها می‌باشد. این کار از طریق اتصال نرون‌های هر گره در لایه‌های قبلی و بعدی انجام می‌شود. خروجی نرون‌ها در ضرایب وزنی ضرب می‌شود و به تابع غیر خطی فعال‌سازی به عنوان ورودی داده می‌شود. بخش مهم مربوط به یک شبکه‌ی عصبی آموزش شبکه‌ی عصبی می‌باشد. این الگوریتم برای آموزش شبکه عصبی و یا به عبارتی تنظیم وزن‌ها استفاده می‌شود. در این پروژه از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری برای آموزش کنترل‌کننده عصبی استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی با هدف بهبود کارایی کنترل‌کننده عصبی در بهبود کنترل فیلتر اکتیو موازی به کار رفته است. ساختار کنترل‌کننده عصبی مورد استفاده در کنترل فیلتر اکتیو موازی در شکل (۷) نمایش داده شده است. در ساختار این شکل تعداد نرون‌های لایه میانی ۳ عدد و تعداد نرون‌های لایه خروجی یک عدد می‌باشد. با توجه به تعداد ورودی‌های بکاررفته برای نرون‌ها تعداد مشخصی متغیر برای این



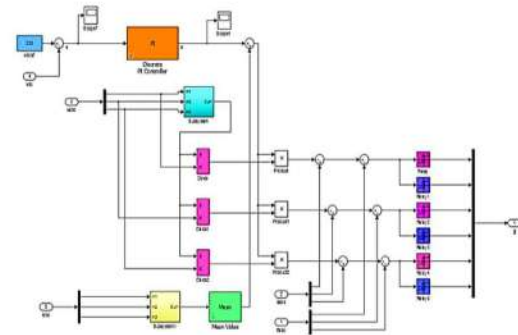
(شکل-۱۱): ساختار مدلسازی با بار هارمونیکی

۴-۱- کنترل کننده کلاسیک (سناریو ۱): در سناریو اول برای بار هارمونیکی همانند شکل (۱۲) تغییرات بار هارمونیکی در نظر گرفته نشده است. این ساختار در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. در شکل (۷) ساختار روش کنترلی هیستریزس به همراه کنترل کننده کلاسیک نمایش داده شده است. براساس این شکل کنترل کننده کلاسیک وظیفه کنترل ولتاژ لینک خازن دی سی را بر عهده دارد. خروجی کنترل کننده کلاسیک به منظور انجام کلید زنی به حلقه های هیستریزس داده می شود تا این حلقه های کنترلی با تولید صفر و یک اقدام به کلید زنی مبدل نمایند. در شکل (۱۴) جریان هارمونیکی بار و در شکل (۱۵) ولتاژ بار هارمونیکی نمایش داده شده است. همچنین در شکل های (۱۶) و (۱۷) جریان و ولتاژ شبکه توزیع بعد از جبران سازی هارمونیکی توسط کنترل کننده کلاسیک نتایج بدست آمده از جبران سازی هارمونیکی در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. براساس این شکل جمع کل هارمونیکی شبکه با جبران سازی کنترل کننده کلاسیک به عدد ۱.۹۵ رسیده است.



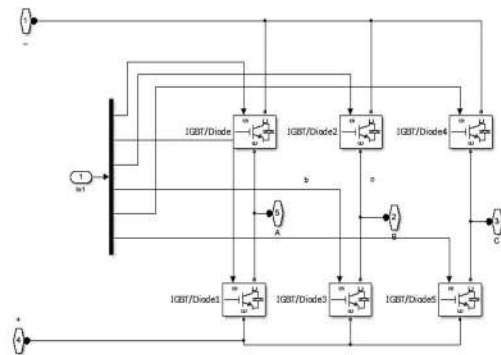
(شکل-۱۲): ساختار بار غیرخطی و هارمونیکی بدون تغییرات بار هارمونیکی

تولیدی فیلتر اکتیو می باشد. بعد از تعیین جریان مرجع فیلترین جریان از جریان حال حاضر تولیدی فیلتر کم شده و جریان باقیمانده باید توسط حلقه های هیستریزس به واسطه مبدل تولید شود. در شکل (۱۰) نیز مبدل الکترونیک قدرت نمایش داده شده است براساس این شکل مبدل مورد استفاده برای فیلتر اکتیو از نوع ۳ ساقی بوده و دارای ۶ کلید IGBT می باشد. در شکل (۱۱) ساختار بار هارمونیکی مدل شده در نرم افزار متلب نمایش داده شده است. در این مقاله به منظور مدلسازی بار هارمونیکی از یکسوساز و یک بار اهمی و سلفی استفاده شده است.

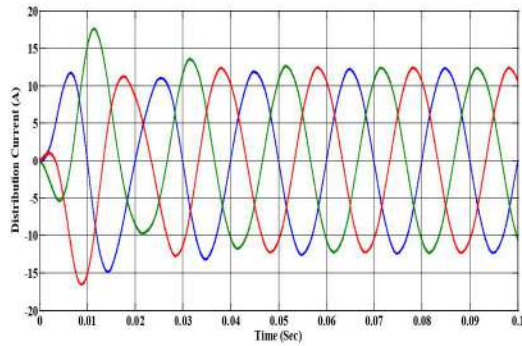


(شکل-۹): ساختار روش کلید زنی هیستریزس

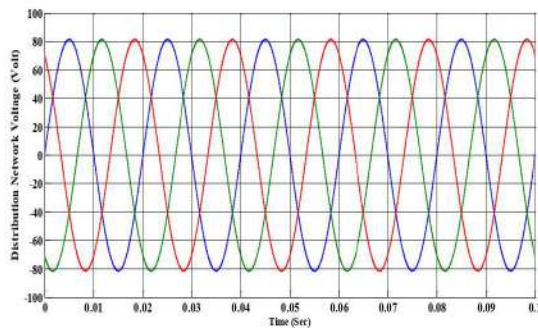
در این مقاله از ۲ سناریو و ۲ کنترل کننده استفاده شده است. در هر سناریو تغییرات بار در نظر گرفته شده است. کنترل کننده های مورد استفاده، کنترل کننده کلاسیک و کنترل کننده عصبی می باشد. کنترل کننده عصبی از الگوریتم بهینه سازی آموزش و یادگیری به منظور بهینه سازی و آموزش خود استفاده کرده است. در ادامه سناریو های مختلف و کنترل کننده تشریح شده است.



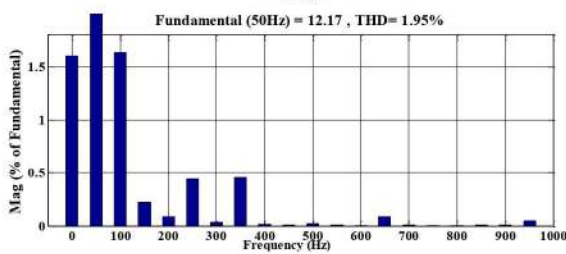
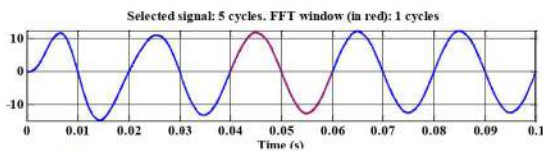
(شکل-۱۰): ساختار مبدل الکترونیک قدرت



(شکل-۱۶): جریان شبکه توزیع



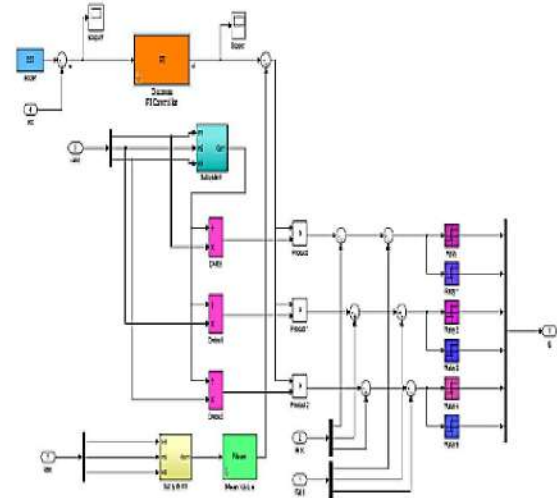
(شکل-۱۷): ولتاژ شبکه توزیع



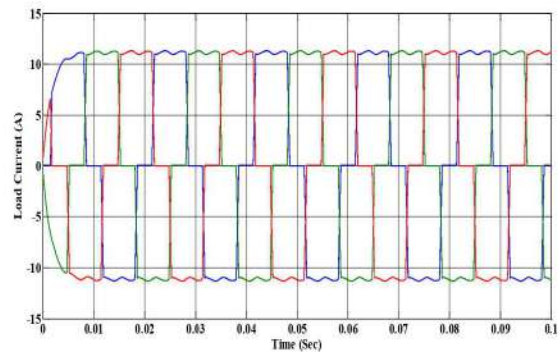
(شکل-۱۸): نتایج بدست آمده از جمع کل هارمونیکی فیلتر اکتیو با

کنترل کننده کلاسیک

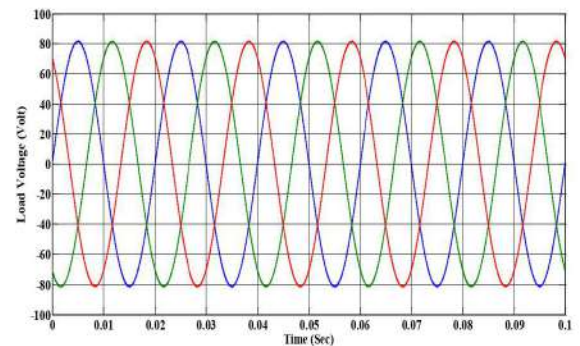
۴-۲- کنترل کننده کلاسیک (سناریو ۲): تفاوت این بخش با بخش قبل در اعمال تغییرات بار هارمونیکی در ساختار شبکه می‌باشد. که در زمان ۰/۱ ثانیه یک بار هارمونیکی به شبکه اضافه می‌شود این ساختار در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. براساس تغییرات انجام شده ولتاژ و جریان شبکه توزیع بعد از جبران‌سازی توسط کنترل کننده کلاسیک در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نمایش داده شده‌اند. همچنین در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) تغییرات ولتاژ و جریان هارمونیکی بار نمایش داده شده است.



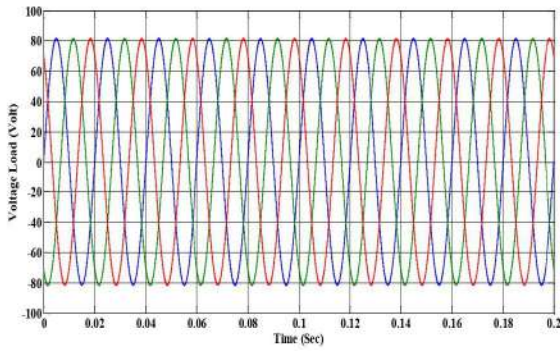
(شکل-۱۹): ساختار کلیدزنی مبدل فیلتر اکتیو در حضور کنترل کننده کلاسیک



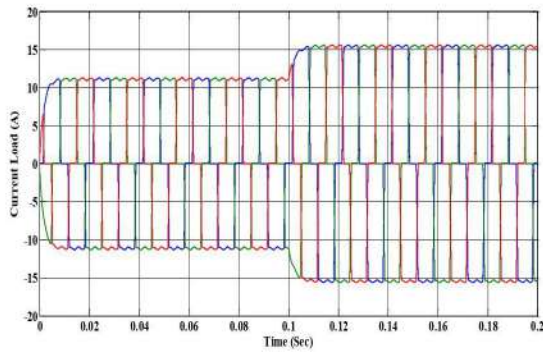
(شکل-۱۴): ساختار جریان بار هارمونیکی



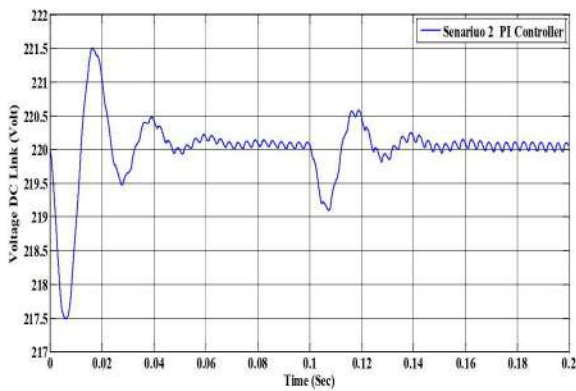
(شکل-۱۵): ساختار ولتاژ بار هارمونیکی



(شکل-۲۲): تغییرات ولتاژ بار

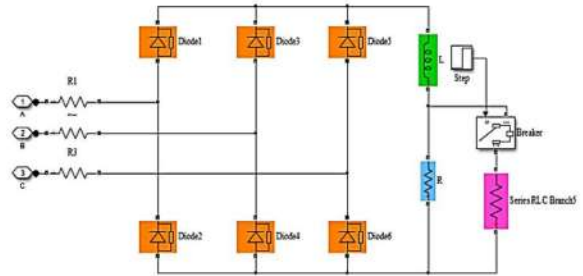


(شکل-۲۳): جریان بار هارمونیک در سناریو ۲

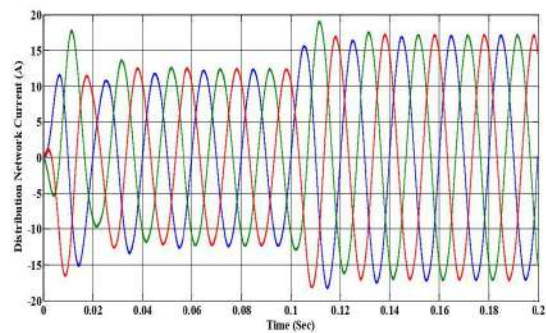


(شکل-۲۴): تغییرات ولتاژ لینک خازن دی سی فیلتر اکتیو در حضور کنترل کننده

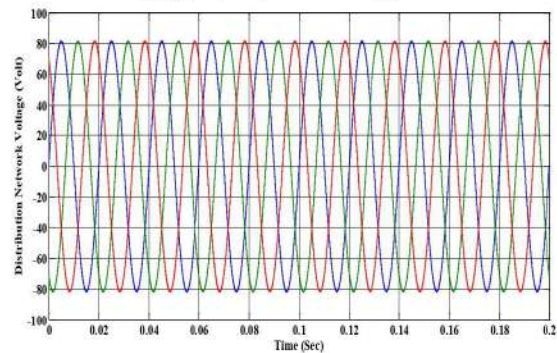
براساس این شکل‌ها، جریان هارمونیک در زمان ۰/۱ تغییر کرده است. در شکل (۲۴) تغییرات ولتاژ لینک خازن دی سی و در شکل (۲۵) جمع کل هارمونیک شبکه نمایش داده شده است. براساس این شکل کنترل کننده کلاسیک کارایی خوبی از خود به نمایش گذاشته است.



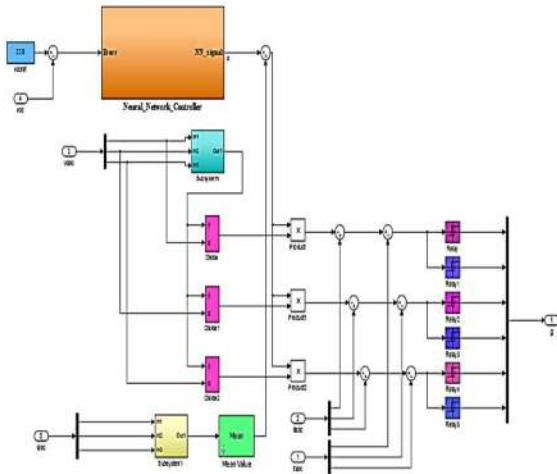
(شکل-۱۹): تغییرات بار هارمونیک شبکه



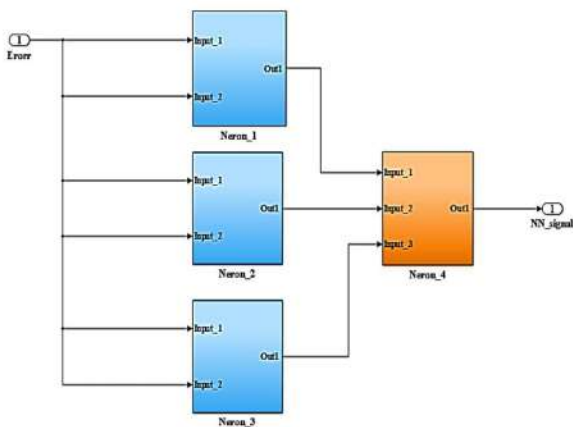
(شکل-۲۰): تغییرات جریان شبکه توزیع در حضور فیلتر اکتیو و کنترل کننده کلاسیک (سناریو ۲)



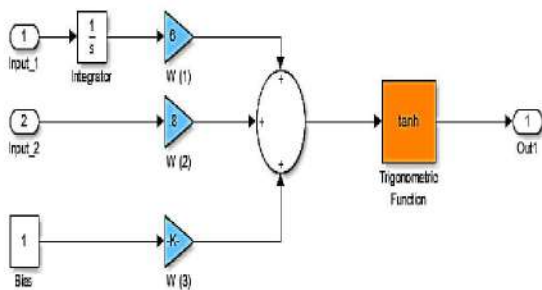
(شکل-۲۱): تغییرات ولتاژ شبکه توزیع



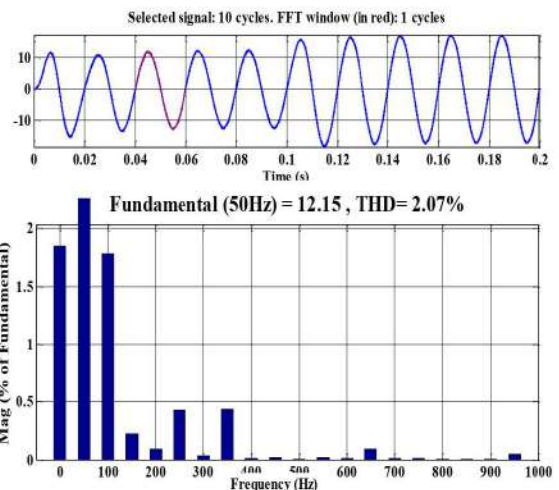
(شکل-۲۶): ساختار کلی کنترل کننده عصبی



(شکل-۲۷): ساختار کلی کنترل کننده عصبی



(شکل-۲۸): ساختار کلی کنترل کننده عصبی

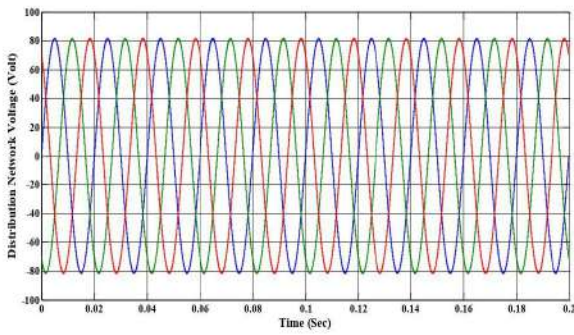


(شکل-۲۵): نتایج بدست آمده از جمع کل هارمونیک‌های فیلتر

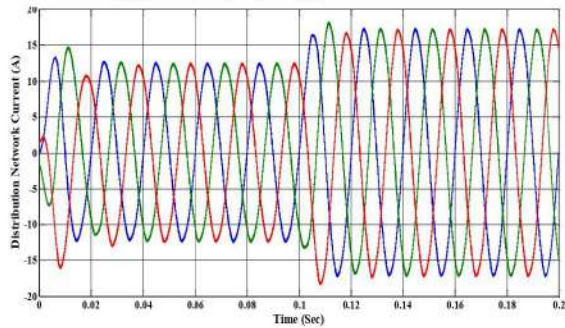
اکتیو با کنترل کننده کلاسیک سناریو ۲

۳-۴- کنترل کننده عصبی: با توجه به قابلیت‌های خوب موجود در شبکه‌های عصبی از این کنترل کننده برای کنترل موتور فیلتر اکتیو استفاده شده است. مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، غیرخطی بودن و قابلیت حذف نویز می‌باشد. شبکه‌های عصبی نیاز به دستورات کاملاً صریح و مشخص و مدل‌های ریاضی محض ندارند و برای حل مسائلی که فرمول حل آنها ناشناخته است و یا ابهامی در آنها دیده می‌شود، کاربرد دارند. با توجه به این توضیحات این کنترل کننده می‌تواند یک راه حل خوب برای کنترل فیلتر اکتیو می‌باشد.

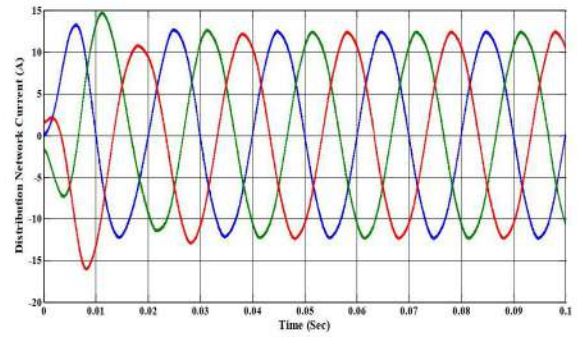
۳-۴-۱- کنترل کننده عصبی در نرم افزار (سناریو ۱): در شکل (۲۶) ساختار کلی سیستم کنترلی مبدل فیلتر اکتیو به همراه کنترل کننده عصبی نمایش داده شده است. در شکل‌های (۲۷) و (۲۸) اجرای داخلی کنترل کننده عصبی نمایش داده شده است که از ۳ نرون میانی و یک نرون خروجی تشکیل شده است. در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) تغییرات جریان و ولتاژ هارمونیک بعد از جبران سازی نمایش داده شده است. در شکل (۳۱) نتایج بدست آمده از جبران سازی هارمونیک توسط کنترل کننده عصبی نمایش داده شده است. براساس این شکل تغییرات هارمونیک کل شبکه ۱/۲۵ می‌باشد که بسیار کمتر از کنترل کننده کلاسیک است.



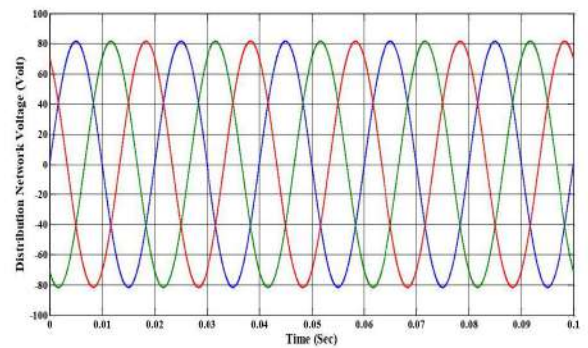
شکل-۳۲: تغییرات ولتاژ شبکه توزیع



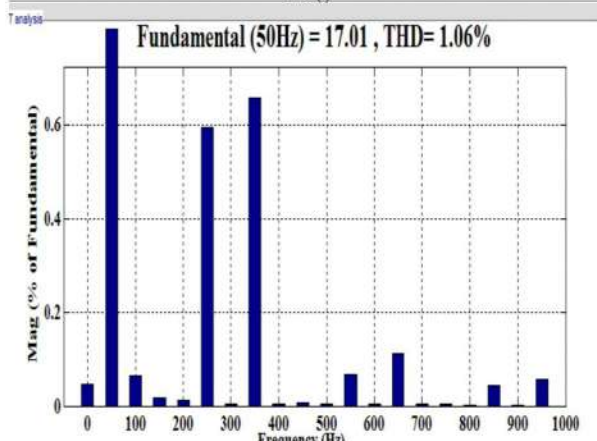
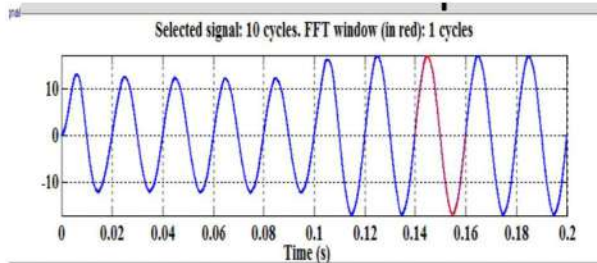
شکل-۳۳: تغییرات جریان شبکه توزیع



شکل-۲۹: جریان شبکه توزیع



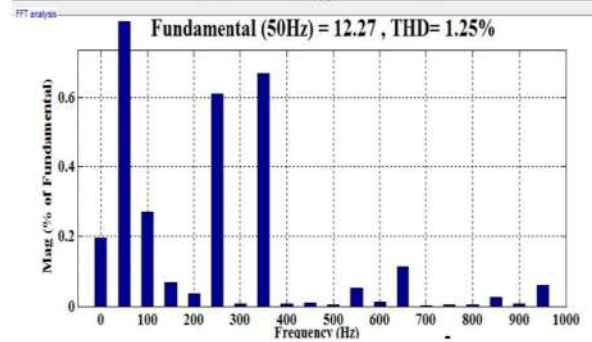
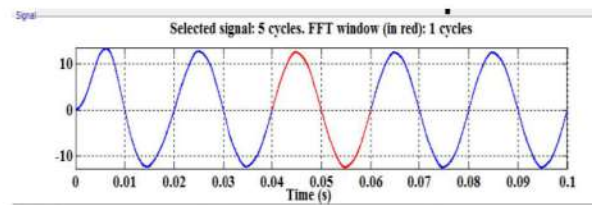
شکل-۳۰: ولتاژ شبکه توزیع



شکل-۳۴: نتایج بدست آمده از کنترل کننده عصبی سناریو ۲

### ۵- نتیجه گیری

هارمونیک ها در سیستم قدرت عوارض نامطلوبی دارند و موجب کاهش کیفیت توان، ضریب قدرت و افزایش تلفات می شوند از این رو به کارگیری فیلترهای هارمونیک مناسب در



شکل-۳۱: نتایج بدست آمده از جبران سازی هارمونیک توسط

### کنترل کننده عصبی

۴-۳-۲- کنترل کننده عصبی (سناریو ۲): در این بخش تغییرات بار مصرفی هارمونیک برای سیستم در نظر گرفته شده است. براساس این تغییرات جریان جبران سازی شده شبکه توزیع و ولتاژ آن نمایش داده شده است. در شکل های (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) این تغییرات نمایش داده شده که براساس آن، جمع کل هارمونیک کمترین مقدار ممکن می باشد.

- [7] Angulo, Mauricio, Domingo A. Ruiz-Caballero, Jackson Lago, Marcelo Lobo Heldwein, and Samir Ahmad Mussa. "Active power filter control strategy with implicit closed-loop current control and resonant controller." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60, no. 7 (2012): 2721-2730.
- [8] Wang, Xianwei, Fang Zhuo, Jing Li, Lin Wang, and Song Ni. "Modeling and Control of Dual-Stage High-Power Multifunctional PV System in  $d$ - $Q$ - $\theta$  Coordinate." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60, no. 4 (2012): 1556-1570.
- [9] Tang, Yi, Poh Chiang Loh, Peng Wang, Fook Hoong Choo, Feng Gao, and Frede Blaabjerg. "Generalized design of high performance shunt active power filter with output LCL filter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59, no. 3 (2011): 1443-1452.
- [10] Chen, Zhong, Yingpeng Luo, and Miao Chen. "Control and performance of a cascaded shunt active power filter for aircraft electric power system." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59, no. 9 (2011): 3614-3623.
- [11] Rahmani, Salem, Ab Hamadi, Kamal Al-Haddad, and A. I. Alolah. "A DSP-based implementation of an instantaneous current control for a three-phase shunt hybrid power filter." *Mathematics and Computers in Simulation* 91 (2013): 229-248.
- [12] Lam, Chi-Seng, Wai-Hei Choi, Man-Chung Wong, and Ying-Duo Han. "Adaptive DC-link voltage-controlled hybrid active power filters for reactive power compensation." *IEEE Transactions on power electronics* 27, no. 4 (2011): 1758-1772.
- [13] Rechka, Sanae, Eloi Ngandui, Jianhong Xu, and Pierre Sicard. "Analysis of harmonic detection algorithms and their application to active power filters for harmonics compensation and resonance damping." *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 28, no. 1 (2003): 41-51.
- [14] Jain, Sachin K., and S. N. Singh. "Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges." *Electric power systems research* 81, no. 9 (2011): 1754-1766.
- [15] Ghosh, Arindam, and Gerard Ledwich. *Power quality enhancement using custom power devices*. Springer science & business media, 2012.

شبکه‌های قدرت امری ضروری و لاینفک می‌باشد. در این مقاله با توجه به قابلیت‌های خوب موجود در شبکه‌های عصبی از این کنترل‌کننده برای کنترل موتور فیلتر اکتیو استفاده شد. مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، غیرخطی بودن و قابلیت حذف نویز می‌باشد. شبکه‌های عصبی نیاز به دستورات کاملاً صریح و مشخص و مدل‌های ریاضی محض ندارند و برای حل مسائلی که فرمول حل آنها ناشناخته است و یا ابهامی در آنها دیده می‌شود، کاربرد دارند. با توجه به این توضیحات و نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده از این کنترل‌کننده می‌تواند یک راه حل خوب برای کنترل فیلتر اکتیو باشد.

#### ۶- مراجع

- [1] Khodaparast, Aryorad, Mohammad Javad Hassani, Erfan Azimi, M. Ebrahim Adabi, Jafar Adabi, and Edris Poursmaeil. "Circuit Configuration and Modulation of a Seven-Level Switched-Capacitor Inverter." *IEEE Transactions on Power Electronics* 36, no. 6 (2021): 7087-7096.
- [2] Xu, Zhiyuan, Xiaofeng Zheng, Tong Lin, Jia Yao, and Adrian Ioinovici. "Switched-capacitor multi-level inverter with equal distribution of the capacitors discharging phases." *Chinese Journal of Electrical Engineering* 6, no. 4 (2020): 42-52.
- [3] Zeng, Jun, Weijie Lin, Dehai Cen, and Junfeng Liu. "Novel K-type multilevel inverter with reduced components and self-balance." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8, no. 4 (2019): 4343-4354.
- [4] Boutoubat, M., L. Mokrani, and M. Machmoum. "Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement." *Renewable Energy* 50 (2013): 378-386.
- [5] Hamadi, Abdelhamid, Salem Rahmani, and Kamal Al-Haddad. "A hybrid passive filter configuration for VAR control and harmonic compensation." *IEEE transactions on Industrial Electronics* 57, no. 7 (2009): 2419-2434.
- [6] Flores, Patricio, Juan Dixon, Micah Ortúzar, Rodrigo Carmi, Pablo Barriuso, and Luis Morán. "Static var compensator and active power filter with power injection capability, using 27-level inverters and photovoltaic cells." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56, no. 1 (2008): 130-138.



### حسین اصغرپور علمداری در بابل

متولد شده است (۱۳۵۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی برق- قدرت (۱۳۷۵)، کارشناسی ارشد برق- قدرت از دانشگاه شهید رجایی تهران (۱۳۸۰) و دکتری مهندسی برق- قدرت از

دانشگاه سمنان (۱۳۹۶) سپری کرده است. عضو هیات علمی دانشگاه فنی و حرفه ای استان مازندران بوده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ماشین های الکتریکی، الکترونیک قدرت، حفاظت و دینامیک سیستم های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشکده فنی امام صادق (ع) بابل می باشد. نشانه رایانامه ایشان عبارتند از :

asgharpour\_alamdari@tvu.ac.ir



### حسن زارع در محمودآباد متولد

شده است (۱۳۵۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی برق- قدرت (۱۳۷۵)، کارشناسی ارشد برق- قدرت از دانشگاه شهید رجایی تهران (۱۳۸۰) و

دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه سمنان (۱۳۹۷) سپری کرده است. عضو هیات علمی دانشگاه فنی و حرفه ای استان مازندران بوده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ماشین های الکتریکی و درایو، حفاظت و دینامیک سیستم های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشکده فنی امام صادق (ع) بابل می باشد.

**روش ارجاع به مقاله :** بررسی هارمونیک ها در شبکه های توزیع در شرایط نامتقارنی بارهای الکتریکی، ح. اصغرپور علمداری، ح. زارع، دوفصلنامه محاسبات و سامانه های توزیع شده، سال سوم، شماره اول، شماره پیاپی ۵، صفحه ۴۵ تا ۵۷، سال ۱۳۹۹