

الگوریتم جدید جهت تعیین جریان مرجع فیلتر اکتیو شنت تک فاز به منظور بهینه سازی فیلتر در جبران سازی بارهای غیر خطی

محمد رضا علیزاده پهلوانی^{۱*}، بهنام او جاقلو^۲، حمید ابراهیمی^۳

۱- دانشیار، ۲ و ۳- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(دریافت: ۹۶/۰۱/۱۳، پذیرش: ۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

تغذیه یک بار تک فاز غیر خطی در بسیاری از کاربردهای نظامی محسوس است. جریان کشی غیر خطی این بارها سبب افت کیفیت توان در نقطه PCC خواهد شد. در فیلتر اکتیو جریان لحظه ای به دومولفه جریان اکتیو و جریان راکتیو تجزیه می گردد. ظرفیت فیلتر اکتیو وابسته به مقدار حداکثر مولفه ای از جریان است که باید توسط آن جبران سازی (تامین) گردد. در یک شکل موج جریان مشخص، هرچه مقدار پیک مولفه راکتیو کم تر باشد، ظرفیت فیلتر اکتیو مورد نیاز کم تر و در نتیجه هزینه و ابعاد آن نیز کم تر خواهد بود. این مقاله ابتدا خواستگاه تئوری های سنتی و مدرن تحلیل توانی، انواع آنها را با جزئیات بررسی کرده و سپس با ارائه یک تئوری جدید تحلیل توانی و استفاده از آن برای تعیین جریان مرجع در فیلترهای اکتیو تک فاز، حداقل جریان راکتیو بهینه تحت شکل موج جریان بار ثابت را تضمین کرده است. این تئوری به نتایج آزمایشگاهی یک بار تک فاز به شدت غیر خطی اعمال شده و با تئوری های مرسوم مقایسه گردیده است. نتایج نشانگر بهبود ۲۱،۳ درصدی تئوری ارائه شده در میزان ظرفیت فیلتر اکتیو است.

کلیدواژه ها: تک فاز غیر خطی، کیفیت توان، جریان راکتیو، فیلتر اکتیو، تئوری تعیین جریان مرجع

A New Algorithm for Determination of Single Phase, Shant Active Filter Reference Current to Optimize Nonlinear Loads Compensation

M. R. Alizadeh Pahlavani*, B. Ojaghloo, H. Ebrahimi

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 02/04/2017; Accepted: 20/06/2016)

Abstract

Compensating a single phase nonlinear load in many of critical applications is worth to pay attention. Non-sinusoidal current consumption in these loads would cause power quality deterioration in PCC. This should be compensated using an active filter. In an active filter, instantaneous current would be decomposed to active and reactive components. Active filter capacity deeply depends on the peak value of its supplied current. This is usually reactive component of load current. Classical theories are just for steady state analysis and modern theories are used for determining active filter reference current. This paper firstly introduces power analysis theories in the path of history and in classical and modern category. Then, the paper presents a new theory which determines reference current for single phase active filters and leads to optimization of reactive current and so filter capacity, in constant current waveform. This theory is applied to the waveforms of a deeply nonlinear, single phase load, and results are compared with existing theories. Outputs show suggested theory supremacy by %21.3 in active filter capacity.

Keywords: Nonlinear, Power Quality, Active Filter, Reference Current, New Theory

*Corresponding Author E-mail: mr_alizadeh@mut.ac.ir

۱. مقدمه

به علت استفاده متداول از بارهای غیر خطی و میدل‌های الکترونیک قدرت، اعوجاج ولتاژ در سیستم‌های توان امروزی بسیار متداول شده‌اند [۱-۲]. تئوری‌های سنتی توان برای سیستم‌های سینوسی به‌خوبی بیانگر تبادل توان در این سیستم‌ها است، ولی برای بارهای غیرخطی بیان مؤلفه‌های توان با تئوری‌های سنتی غیرممکن است، چرا که در تئوری‌های سنتی فرض بر این است که توان راکتیو در اثر تبادل توان بین بار و منبع اتفاق می‌افتد. همچنین برای جبران‌سازی نیز نمی‌توان از المان‌های سنتی همچون فیلترهای خازنی ثابت و یا متغیر استفاده کرد. خازن ثابت تنها می‌تواند یک مؤلفه را جبران نماید و خازن متغیر هم اگرچه می‌تواند برای جبران‌سازی چند مؤلفه با استفاده از سویچ بین خازن‌ها و سلف‌ها به کار رود ولی آزادی عمل زیادی ندارد. دلیل این امر عدم امکان تغییر مقدار خازن در یک رنج پیوسته است. بعلاوه عمل سویچ برای جبران‌سازی مؤلفه‌های مختلف نیاز به یک میدل دارد که پیچیدگی سیستم را بالا می‌برد. فیلترهای خازنی-سلفی شنت به‌طور سنتی و پسو برای جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان‌ی به کاررفته است ولی آن‌ها مشکلاتی عدیده‌ای مانند اندازه بزرگ و احتمال ایجاد تشدید را داشته و مشخصات ثابتی برای جبران‌سازی در اختیار قرار می‌دهند. این مشخصه ثابت به معنی توانایی جبران‌سازی چند هارمونیک مشخص و ناتوانی در جبران‌سازی شکل موج‌های دلخواه است [۳]. احتمال تشدید برخی هارمونیک‌ها توسط فیلتر پسو به علت اندوکتانس سیستم قدرت در مقالات بررسی شده‌است. همچنین وابستگی فیلتر پسو به اندوکتانس سیستم را برای کارکرد درست یکی از معایب عمده فیلتر پسو عنوان شده و بیان شده که برآورده کردن شرط کوچک‌تر بودن امپدانس فیلتر پسو نسبت به امپدانس سیستم قدرت همواره ساده نخواهد بود [۴].

بارهای متغیر با استفاده از فیلترهای پسو غیرقابل جبران‌سازی هستند، چرا که این فیلترها برای توان راکتیو خاصی طراحی شده‌اند و تغییرات امپدانس بار می‌تواند فرکانس قطع و پهنای باند آن را جابجا نماید [۵]. یکی دیگر از معایب فیلترهای پسو احتمال اضافه‌بار شدن این فیلترها در اثر جریان چرخشی ناشی از بارهای غیرخطی حاضر در کنار آن است و با استفاده از فیلتر اکتیو می‌توان از این جریان جلوگیری نمود [۶]. با یک فیلتر اکتیو می‌توان رنج وسیع و پیوسته‌ای از فرکانس‌ها را با افزودن کمی پیچیدگی به سیستم جبران‌سازی نمود [۷]. مقالات بسیاری در مورد تعریف، ویژگی‌ها، اندازه‌گیری و جبران‌سازی جریان‌های غیرسینوسی و غیرپریودیک نگاشته شده‌اند. عمده‌تاً این جبران‌سازی بر مبنای تئوری توان لحظه‌ای است. بودانو و فریز در اواخر دهه ۱۹۳۰ به‌طور مستقل تئوری‌هایی برای محاسبه توان در شکل موج‌های پریودیک ولتاژ و جریان بسط دادند، این

تئوری‌ها تنها برای حالات پایدار قابل استفاده‌اند و در حوزه فرکانس تحلیل را انجام می‌دهند. پیشرفت سریع در فناوری نیمه‌هادی‌ها منجر به ورود هرچه بیشتر میدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم‌های توان الکتریکی گردیده‌است و از آنجا که میدل‌های الکترونیک قدرت مانند بارهای غیرخطی رفتار می‌کنند، بررسی اعمال هارمونیک توسط میدل‌های الکترونیک قدرت به سیستم نیازمند به وجود آمدن روش‌های حوزه زمانی برای تحلیل جریان انرژی در مدارهای غیرخطی در حوزه زمان است.

در سال ۱۹۸۳ آکاگی تئوری‌ای را به این منظور برای سیستم‌های سه فاز بنا نهاد. این تئوری بر مبنای توان‌های لحظه‌ای که در حوزه زمان تعریف می‌شوند بوده و علاوه بر حالات پایدار در حالات گذرا نیز صحیح است. این تئوری سیستم سه‌فاز را به‌عنوان یک واحد در نظر گرفته و آن‌ها را به‌صورت مجموع سه سیستم تک‌فاز در نظر نمی‌گیرد. ابتدا ولتاژها و جریان‌ها توسط تبدیل کلارک به دستگاه ثابت $\alpha\beta\theta$ برده شده و در آنجا توان‌های لحظه‌ای تعریف می‌شوند. سه نوع توان لحظه‌ای حقیقی، موهومی و توالی صفر تعریف شده و از توان حقیقی به‌عنوان جریان انرژی لحظه‌ای بین منبع و بار و از توان موهومی به‌عنوان انرژی لحظه‌ای تبدالی بین فازها تعبیر می‌شود [۸]. باید توجه کرد که هر یک از این توان‌ها دارای دومولفه ثابت و نوسانی هستند. در این تئوری دیده می‌شود که توان حقیقی نیز دارای مؤلفه نوسانی است که در جریان انرژی بین منبع و بار مؤثر نیست و باید جبران‌سازی گردد. جبران‌سازی مؤلفه‌های توان موهومی به هدف جبران‌سازی بستگی دارد. برای مثال به‌منظور جبران‌سازی ضریب توان نیاز است تا کل مؤلفه‌ها، اعم از نوسانی و ثابت توسط منبعی مانند فیلتر اکتیو جبران‌سازی گردد. برای جبران اعوجاج هارمونیک کل تنها نیاز به جبران‌سازی مؤلفه نوسانی توان راکتیو است.

تئوری توان لحظه‌ای به صورتی که توسط آکاگی مطرح و بعداً توسط دیگران بسط داده شد، تنها برای تحلیل سیستم‌های سه فاز سه‌سیمه یا چهارسیمه (با سیم خنثی) در شرایط متعادل و غیرمتعادل قابل کاربرد است [۹]. در سیستم‌های تک فاز توان حقیقی لحظه‌ای به‌صورت تغییرات زمانی انرژی تولیدی، انتقالی و یا مصرفی تعریف شده است. این مفهوم یک کمیت فیزیکی بوده و قانون پایداری انرژی را ارضاء می‌نماید. برای یک مدار تک فاز این مفهوم به‌صورت حاصل‌ضرب سیگنال‌های زمانی ولتاژ و جریان تعریف شده است [۱۰]. برای تحلیل مدارهای تک‌فاز در سطح لحظه‌ای نمی‌توان از تئوری آکاگی استفاده کرد، چرا که همان‌طور که عنوان گردید این تئوری سیستم سه‌فاز را به‌صورت یک سیستم واحد در نظر می‌گیرد و نمی‌توان آن را به‌صورت سه سیستم تک‌فاز تجزیه کرد. اما خوشبختانه تئوری‌هایی در این زمینه وجود دارد. این تئوری‌ها به اندازه تئوری‌های سیستم‌های سه‌فاز

فریز در سال ۱۹۳۰ یعنی چند سال بعد از بودانو تئوری ای برای آنالیز توانی سیستم‌های الکتریکی ارائه کرد که روابط آن مطابق زیر است.

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (۶)$$

$$= V_w I = I_w V$$

در رابطه (۶) کمیت‌هایی که با اندیس w مشخص شده‌اند به معنای مولفه اکتیو هستند و کمیت‌های بدون اندیس به معنای مقادیر موثر هستند که با روابط مقادیر موثر در تئوری بودانو محاسبه می‌شوند.

$$P_s = V I \quad (۷)$$

$$P_q = \sqrt{P_s^2 - P_w^2} = V_q I = I_q V \quad (۸)$$

در روابط (۷) و (۸) کمیت‌هایی که با اندیس q مشخص شده‌اند به معنای مولفه راکتیو هستند که طبق روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$V_w = \lambda V \quad I_w = \lambda I \quad (۹)$$

$$V_q = \lambda_q V \quad I_q = \lambda_q I \quad (۱۰)$$

λ و λ_q به ترتیب ضریب توان‌های اکتیو و راکتیو هستند و با استفاده از رابطه (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند.

$$\lambda = \frac{P_w}{P_s} \quad (۱۱)$$

$$\lambda_q = \sqrt{1 - \lambda^2} \quad (۱۲)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، فریز توان راکتیو را طوری تعریف کرد که تمامی مولفه‌هایی از ولتاژ و جریان که در توان اکتیو شرکت ندارند، در آن وجود داشته باشند. باید توجه کرد که توان اکتیو، میانگین توان لحظه‌ای است.

در شرایط غیر سینوسی Q و S شاخص‌های خوبی برای ارزیابی کیفیت توان و کیفیت انتقال توان نخواهند بود، چرا که در روابط مربوط به این شاخص‌ها در تئوری بودانو هیچ رابطه‌ای بین ولتاژ و جریان مولفه‌های مختلف باهم وجود ندارد. برای مثال هرگز V_1 در I_3 ضرب نمی‌شود و این تعریف تنها مجموع توان راکتیو مولفه‌های مختلف را شامل می‌شود و از تأثیرهای بین مولفه‌ای صرف نظر می‌نماید. مولفه‌های مختلف در تئوری بودانو می‌توانند مثبت یا منفی باشند و حتی می‌توانند در هنگام جمع کردن همدیگر را خنثی نمایند. به همین دلیل Q شاخص خوبی از کیفیت توان نخواهد بود. روابط بودانو در تحلیل سیستم‌های غیر سینوسی بسیار به کار گرفته شده‌اند. اما تنها رابطه P معنای فیزیکی درستی در شرایط غیر سینوسی داراست و به معنی متوسط توان لحظه‌ای تبادل شده بین منبع و بار است.

توسعه یافته نیستند و پتانسیل کاری بسیار بالایی دارند که در بخش دوم مقاله تشریح می‌گردند. در بخش ۳ و ۴ به ترتیب انواع فیلترهای اکتیو و تشریح بار غیرخطی به همراه منبع تغذیه آن آورده شده‌است. در بخش ۵ جریان‌های مرجع حاصل از تئوری‌های مختلف محاسبه شده و با جریان مرجع تئوری پیشنهادی مقایسه شده‌است. مقایسه دامنه مولفه راکتیو حاصل از تئوری‌های مختلف که به نوعی جریان مرجع فیلتر اکتیو است، مزیت تئوری پیشنهادی را در کاهش ظرفیت و حجم فیلتر اکتیو نسبت به سایر تئوری‌ها به وضوح نشان می‌دهد.

۲. تئوری‌های تحلیل توانی

در این بخش تئوری‌های تحلیل توانی سنتی، مدرن و پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲-۱. تئوری‌های سنتی

این تئوری‌ها برای تحلیل حالت پایدار سیستم‌ها مفید بوده و در حالت گذرا درست نخواهند بود. بنابراین از آن‌ها نمی‌توان در مقاصد جبران‌سازی لحظه‌ای مانند فیلتر اکتیو استفاده کرد. اما در تحلیل و مقایسه توانی حالت پایدار مفید خواهند بود. این تئوری‌ها عبارت‌اند از تئوری‌های بودانو و فریز.

در تئوری بودانو شاخص‌هایی به صورت روابط (۱) تا (۵) تعریف شده‌اند. در این شاخص‌ها که تقریباً آشناترین و پر قدمت‌ترین شاخص‌ها هستند، P_n و Q_n به ترتیب مولفه‌های n ام توان‌های اکتیو و راکتیو نامیده می‌شوند. همچنین V_n و I_n و ϕ_n به ترتیب مولفه n ام ولتاژ و جریان و اختلاف زاویه این دو است. همچنین P و Q و S توان‌های اکتیو، راکتیو و ظاهری نامیده می‌شوند. با دقت در روابط (۱) تا (۵) ویژگی‌های تعریف هر یک از این کمیت‌ها مشخص می‌گردد.

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (۱)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots} \quad (۲)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (۳)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \phi_n \quad (۴)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \phi_n \quad (۵)$$

$$V^2 = V_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} V_{nr}^2 \quad (13)$$

$$I^2 = I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nr}^2 \quad (14)$$

در واقع طبق معادلات (۱۳) و (۱۴) با تفکیک مقادیر موثر ولتاژ و جریان به مولفه اول و سایر مولفه‌ها، توان ظاهری به صورت معادله (۱۵) نوشته شده است و حاصل ضرب مقدار موثر مولفه اول ولتاژ در مقدار موثر سایر مولفه‌های جریان و بالعکس (مولفه اول جریان در سایر مولفه‌های ولتاژ) توان راکتیو مولفه اول نامیده شد که با Q_1 نمایش داده شده است.

$$S_t^2 = (VI)^2 = S_1^2 + S_n^2 = P_1^2 + Q_1^2 + S_n^2 \quad (15)$$

$$P_1^2 = (V_1 I_1)^2 \quad (16)$$

$$Q_1^2 = (V_1 I_n)^2 + (V_n I_1)^2 \quad (17)$$

$$S_n^2 = (V_n I_n)^2 \quad (18)$$

برای شرایط غیر سینوسی با تعریف شکل موج‌های ولتاژ و جریان به صورت معادلات ۱۹ و ۲۰ بیان حوزه زمانی طبق معادلات ۲۱ تا ۲۳ خواهد بود [۱۲].

$$v(t) = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + \sqrt{2} \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (19)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (20)$$

$$p(t) = V(t)i(t) = p_a(t) + p_q(t) \quad (21)$$

$$p_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (22)$$

$$p_q(t) = - \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{m \neq n \\ m}} 2V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \quad (23)$$

p_a در واقع شامل همه ترم‌هایی است که مقدار متوسط غیر صفر دارند و مقدار متوسط کل آن برابر توان اکتیو است. ترم دوم یعنی p_q شامل تمام ترم‌هایی است که در انتقال انرژی تأثیری نخواهند داشت. بخش اول این ترم مربوط به هارمونیک‌های موجود در هرودی ولتاژ و جریان است و بخش دوم مربوط به هارمونیک‌هایی است که یا در ولتاژ و یا در جریان موجودند و در دیگری وجود

بنابراین نکته منفی اول تئوری بودانو این است که روابط S و Q برخلاف رابطه P تنها برای تعمیم حالت سینوسی آمده‌اند و در حالات غیر سینوسی معنای فیزیکی خاصی ندارند. نکته منفی دوم در تئوری بودانو با مثال زیر روشن خواهد شد. اگر یک منبع ولتاژ ثابت ۵۰ هرتزی در حالت اول یک بار خطی با جریان ۱ آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز را تغذیه نماید و در حالت دوم به یک بار غیرخطی با جریان ۱ آمپر در ۵۰ هرتز و ۰٫۱ آمپر در مولفه هفتم ۵۰ هرتز متصل شود، آنگاه P و Q حاصل از روابط بودانو برای هر دو حالت یکسان خواهد بود. در حالی که حداکثر توان لحظه‌ای (حاصل ضرب موج زمانی ولتاژ در موج زمانی جریان) در حالت دوم ۸ درصد بیشتر از حالت اول است و S تنها ۵٫۰ درصد بیش از حالت اول است. همین مثال ساده فوق نشانگر ضعف شاخص‌های بودانو در توصیف وضعیت فیزیکی سیستم است.

تفاوت بودانو و فریز در این است که بودانو توان اکتیو را در حوزه فرکانس و فریز آن را در حوزه زمان تعریف کرده است. به سادگی می‌توان ثابت کرد که توان‌های اکتیو و ظاهری در روابط فریز و بودانو به مقادیر دقیقاً یکسانی خواهند رسید ولی مقادیر توان‌های راکتیو متفاوت خواهد بود. فریز تأکید کرد که ضریب توان اکتیو λ ، زمانی که ولتاژ و جریان هم‌فاز باشند، به ماکزیمم خود یعنی ۱ می‌رسد ولی می‌دانیم در شرایط غیر سینوسی هم‌فاز بودن لزوماً سیلان توان بهینه را تضمین نخواهد کرد. باید توجه نمود که روابط بودانو و فریز به محاسبه سری فوریه نیازی ندارند و تنها محاسبه مقدار موثر ولتاژ و جریان در آن‌ها مورد نیاز است و بنابراین در شرایط گذرا بی‌معنا خواهند بود. ویژگی‌های تئوری‌های بودانو و فریز به‌طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱. خلاصه ویژگی‌های اساسی تئوری‌های بودانو و فریز

تئوری بودانو	تئوری فریز	
در نظر نمی‌گیرد	در نظر می‌گیرد	در نظر گرفتن تأثیر بین مولفه‌های
مناسب است	مناسب است	مناسب بودن شاخص توان اکتیو
مناسب نیست	مناسب‌تر است	مناسب بودن شاخص توان راکتیو
ندارد	ندارد	کارکرد در حالت گذرا

بعدها IEEE^۱ پیشنهاد داد تا در شرایط غیر سینوسی مولفه اصلی از سایر مولفه‌ها جدا شود تا درک بهتری از توان‌های اکتیو و راکتیو حاصل آید [۱۱].

¹ International Electrical and Electronics Engineering Committee

باشد. این انتخاب بستگی به هدف جبران سازی دارد. برای مثال زمانی که هدف تنها حذف مولفه راکتیو جریان است، $v_p(t) = v(t)$ و زمانی که هدف علاوه بر جبران مولفه راکتیو جریان، حذف مولفه های اکتیو هارمونیک نیز باشد، $v_p(t) = v_f(t)$ انتخاب مناسبی است. باید توجه کرد که تعاریف فوق هم در سیستم های تک فاز و هم در سیستم های چندفاز درست بوده و تفسیر مناسبی به دست می دهند. با توجه به روابط بالا می توان دریافت که به ازای انتخاب هر $v_p(t)$ یک شکل موج برای $i_q(t)$ به دست خواهد آمد.

تئوری سه مولفه ای: در این تئوری جریان به صورت معادله (۲۹) بیان می شود. در این معادله I_p ، I_q و θ به ترتیب برابر پیک مولفه اکتیو، پیک مولفه راکتیو و زاویه بین ولتاژ و جریان هستند

$$i(t) = I_p \cos \theta + I_q \sin \theta + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\theta + \varphi_n) \quad (29)$$

اگر بخش اول را در معادله فوق $i_p(t)$ و بخش دوم را $i_q(t)$ بنامیم، باقی مولفه ها $i_h(t)$ نام خواهند گرفت و جریان به صورت معادله (۳۰) در می آید.

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (30)$$

با ضرب طرفین $i(t)$ در $\cos \theta$ معادله (۳۱) حاصل خواهد شد.

$$\begin{aligned} i(t) \cos \theta = & \frac{I_p}{2} (1 + \cos 2\theta) + \frac{I_q}{2} \sin 2\theta \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{2} [(\cos(n+1)\theta + \varphi_n) \\ & + (\cos(n-1)\theta + \varphi_n)] \quad (31) \end{aligned}$$

همین طور با ضرب طرفین در $\sin \theta$ معادله (۳۲) به دست می آید.

$$\begin{aligned} i(t) \sin \theta = & \frac{I_q}{2} (1 - \cos 2\theta) + \frac{I_p}{2} \sin 2\theta \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{2} [(\sin(n+1)\theta + \varphi_n) \\ & + (\sin(n-1)\theta + \varphi_n)] \quad (32) \end{aligned}$$

با دقت در دو معادله اخیر متوجه خواهیم شد که با اعمال یک فیلتر پایین گذر مناسب به هریک از معادلات (۳۱) و (۳۲) می توان مقادیر حداکثر I_p و I_q را به دست آورد [۱۴]. این امر، یعنی به دست آوردن مقادیر حداکثر جریان های اکتیو و راکتیو از این لحاظ حائز اهمیت است که در جبران سازی به روش فیلتر اکتیو لازم است شکل موج جریانی که توسط فیلتر اکتیو تأمین می شود به صورت برخط موجود بوده و به سیستم کنترلی اعمال شود. به علت لزوم برخط بودن، استفاده از دو ضرب (مطابق معادلات ۳۱ و ۳۲) و اعمال دو فیلتر پایین گذر برای به دست

ندارند. باید توجه کرد که $\varphi = \alpha - \beta$ برابر اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان در هر مولفه است.

۲-۲. تئوری های مدرن

این تئوری ها با توجه به تقسیم جریان به مولفه های اکتیو، راکتیو و هارمونیک (دومولفه ای و سه مولفه ای) تقسیم بندی می شوند.

تئوری دومولفه ای: درحالی که در شرایط پایدار هر سه تئوری سنتی مذکور مفید بوده و جواب های یکسانی ارائه می نمایند ولی برای شرایط گذرا حتماً باید از حوزه زمان و تئوری توان لحظه ای سود برد. البته این به این معنا نیست که هدف تمامی تئوری های توان لحظه ای شرایط گذراست، بلکه این تئوری ها هم در شرایط گذرا و هم در حالات پایدار قابل کاربرد هستند. اکثر تئوری های توان لحظه ای به سیستم های سه فاز قابل اعمال اند و به آسانی به سیستم های تک فاز قابل تقلیل نیستند. تئوری های مبتنی بر قاب گردان سنکرون همگی دارای چنین نقصی هستند.

برای یک مدار تک فاز مفهوم توان لحظه ای به صورت حاصل ضرب سیگنال های زمانی ولتاژ و جریان تعریف شده است.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (24)$$

میانگین زمانی این تعریف در طول یک پریود سیگنال $p(t)$ به عنوان توان حقیقی شناخته می شود و با $P(t)$ نشان داده می شود. $P(t)$ برابر میانگین توان لحظه ای $p(t)$ بر روی بازه $[t-T_c, t]$ است که به صورت معادله (۲۵) قابل تعریف است.

$$P(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p(\tau) d\tau \quad (25)$$

بر این مبنا می توان به روش معادله (۲۶) جریان های اکتیو و راکتیو را به دست آورد. نکته خاص تعریف زیر این است که بر اساس اهداف مختلف می توان انتخاب های مختلفی برای $v_p(t)$ و در نتیجه نتایج مختلفی برای مولفه های اکتیو و راکتیو جریان داشت [۱۳].

$$i_p(t) = \frac{P(t)}{V_p^2(t)} v_p(t) \quad (26)$$

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) \quad (27)$$

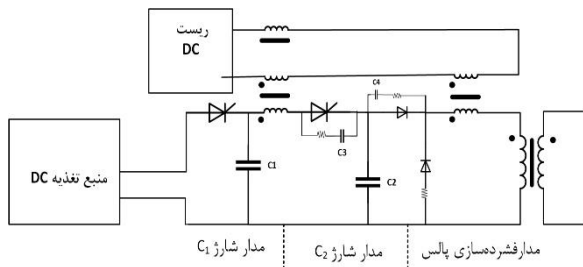
$$V_p(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v_p^2(\tau) d\tau} \quad (28)$$

در معادله (۲۶)، $i_p(t)$ مولفه حقیقی جریان است و $i_q(t)$ نیز در معادله (۲۷) مولفه راکتیو جریان است. $V_p(t)$ در معادله (۲۸) مقدار موثر ولتاژ $v_p(t)$ است که بر روی همان بازه $[t-T_c, t]$ محاسبه می گردد. باید توجه کرد که $v_p(t)$ می تواند برابر مولفه اصلی ولتاژ $v_f(t)$ یا ولتاژ لحظه ای $v(t)$ یا هر مقدار دیگری

دامنه جریان نسبتاً بالاست. تئوری پیشنهادی با یافتن مقدار i بهینه در رابطه (۳۶) سعی در همزمان‌سازی این بازه‌ها در جریان‌های اکتیو و راکتیو دارد. باید توجه کرد که به دلیل مشخص بودن مجموع جریان‌های اکتیو و راکتیو در هر بازه زمانی، همزمان بودن بازه‌های با دامنه جریان بالا به معنی کوچک‌تر بودن دامنه جریان در هریک از این بازه‌ها است. در واقع زمانی که یکی از دو عامل جمع در حوزه زمان جابجا می‌گردد و شکل ثابت خود را دارد، عامل دوم مجبور به تغییر شکل خواهد شد و پیک آن تغییر خواهد نمود.

۳. تشریح بار غیرخطی و منبع تغذیه آن

در این مقاله با یک بار به شدت غیرخطی موسوم به HCG^۱ که در واقع یک فرستنده مخابراتی است، به‌عنوان بار استفاده می‌شود. شمای داخلی مداری و آزمایشگاهی این بار در شکل‌های (۱) و (۲) آمده‌است.



شکل ۱. شمای مداری بخش‌های داخلی HCG



شکل ۲. شکل آزمایشگاهی HCG (یک بار به شدت غیرخطی)

سیستم موسوم به HCG توسط UPS^۲ در شرایط بحرانی تغذیه می‌شود. بار اصلی یک آنتن بوده که در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴) نیز مدل آزمایشگاهی تغذیه کننده HCG با سطح توان ۳۰۰۰ ولت-آمپر، از شرکت Faratel را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از این شکل قابل درک است، UPS از سه بخش اصلی کنترل شارژ، بخش حفاظت و بخش اینورتر تشکیل شده است.

آوردن شکل موج جریان راکتیو بسیار ساده‌تر از روش‌هایی نظیر تبدیل فوریه است.

تئوری توان پیشنهادی: برای یافتن شکل موج جریان راکتیو و در نتیجه شکل موج جریان مرجع فیلتر اکتیو بهینه پیشنهاد نویسندگان با تغییرات در تئوری دو مولفه ای مطابق روابط (۳۳) تا (۳۷) می‌باشد. با دقت در این روابط رسیدن به دامنه حداقل جریان مرجع فیلتر اکتیو و در نتیجه ظرفیت و حجم و قیمت حداقل برای آن قابل درک است. که در این تئوری نیز توان لحظه‌ای به صورت حاصل ضرب ولتاژ و جریان لحظه‌ای تعریف شده‌است.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (33)$$

در این تئوری انتگرال رابطه (۳۳) را در بازه $[0, T_c]$ که بر طول بازه تقسیم شده‌است برابر توان حقیقی متوسط در نظر گرفته شده و با $P(0)$ نمایش داده می‌شود.

$$P(0) = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} p(\tau) d\tau \quad (34)$$

همچنین مقدار مؤثر ولتاژ که با $V_p(0)$ نشان داده شده است، بر اساس رابطه (۳۵) تعریف می‌شود.

$$V_p(0) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} v_p^2(\tau) d\tau} \quad (35)$$

تعریف جریان‌های اکتیو و راکتیو در این تئوری در روابط (۳۶) و (۳۷) آمده‌است.

تعریف جریان اکتیو به صورت معادله (۳۶) موجب امکان تعریف جریان راکتیو در شکل ثابت ولی زوایای مختلف خواهد شد.

$$i_p(t) = \frac{P(0)}{V_p^2(0)} v\left(t - \frac{i}{18000}\right) \quad (36)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, 358, 359 \quad (37)$$

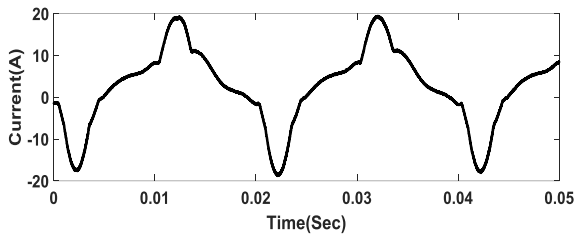
$$i_q(t) = i(t) - i_p(t)$$

برای انتخاب مقدار i لازم است شکل موج $i_q(t)$ به ازای i های مختلف به دست آید و مقدار i ای که منجر به کمترین پیک جریان راکتیو (جریان مرجع فیلتر اکتیو) می‌شود، برگزیده شود. کم‌تر شدن پیک جریان راکتیو که باید توسط فیلتر اکتیو تأمین شود به معنی کمترین ظرفیت سیستم جبران‌ساز و کمترین هزینه است، به دست خواهد آمد. مزیت این روش، بهینه‌سازی بر اساس شکل موج‌های هر سیستم، با استفاده از یک روش سراسر است و یکسان است.

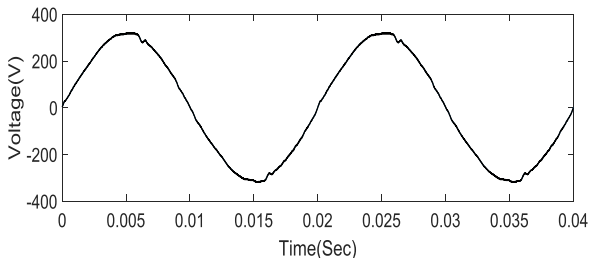
می‌توان بدون کاستن از کلیت مطلب فرض کرد که در هریک از جریان‌های اکتیو و راکتیو بازه‌های زمانی‌ای وجود دارد که

¹ Half Cycle Generator

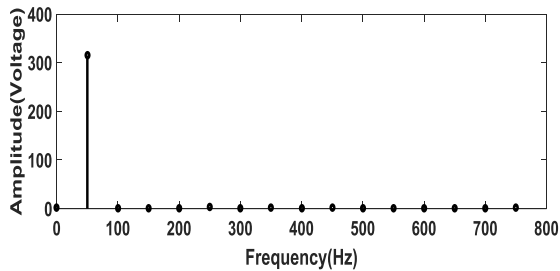
² Uninterruptible Power Supply



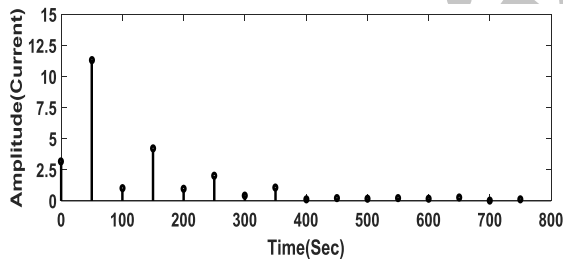
شکل ۵. شکل موج جریان خروجی UPS آزمایشگاهی تحت بار اصلی



شکل ۶. شکل موج ولتاژ خروجی UPS آزمایشگاهی تحت بار اصلی



شکل ۷. مولفه‌های هارمونیک ولتاژ خروجی UPS تحت بار اصلی

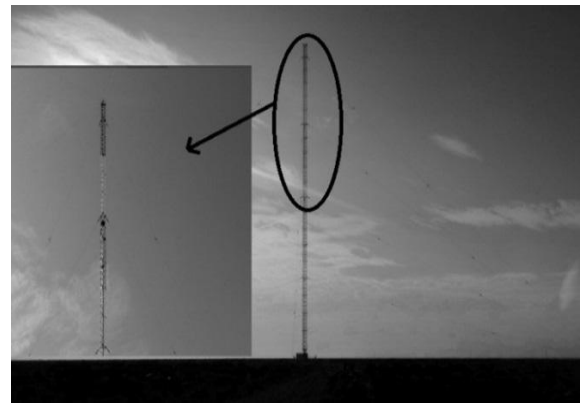


شکل ۸. مولفه‌های هارمونیک جریان خروجی UPS تحت بار اصلی

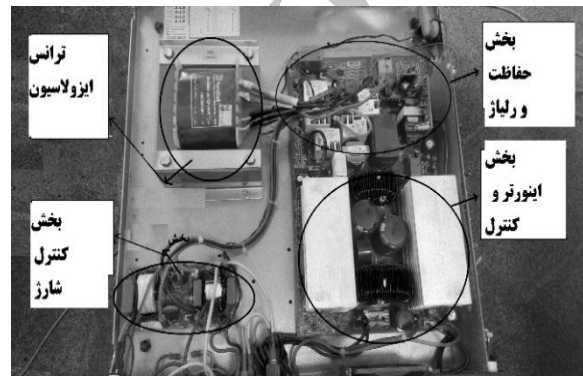
جدول ۲. مقادیر به دست آمده برای متغیرهای مختلف توانی و کیفیت توانی در آزمایش UPS تحت بار نامی

THD _i	THD _v	S	Q	P	آزمایش در سایت بار کامل
۴۴٫۹	۲٫۶	۳۹۸۴	۳۷۲۳	۱۴۱۸	

با استفاده از شکل های (۷) و (۸) می‌توان به محاسبات تئوری‌های دومولفه‌ای و سهمولفه‌ای و تئوری پیشنهادی برای تعیین جریان مرجع فیلتر اکتیو شنت پرداخت. نتایج این محاسبات در ادامه آمده‌است. قابل ذکر است که در محاسبات بعدی فرض شده است که سیستم کنترلی فیلتر اکتیو به درستی کار می‌کند و در واقع نتایج بیان شده مستقل از نحوه کنترل فیلتر اکتیو است.



شکل ۳. بار اصلی سیستم HCG



شکل ۴. مدل آزمایشگاهی UPS تغذیه کننده

باید توجه کرد که UPS مذکور از نوع در ارتباط با خط^۱ است و در حالت عادی که برق شبکه متصل باشد، از طریق سیستم رلیاژ، که سیستمی متشکل از چندین رله است، شبکه را به بار متصل می‌نماید و در حالت قطع شبکه با استفاده از باتری و اینورتر خروجی را تغذیه می‌نماید.

۴. نتایج و بحث

۱-۴. ورودی‌های محاسبات و نتایج تئوری بودانو

شکل موج جریان و ولتاژ خروجی UPS تحت بار اصلی در دو شکل (۵) و (۶) نشان داده شده‌است.

با استفاده از روش‌های عددی FFT^۲ محاسبه مولفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان خروجی UPS انجام شده و به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) آمده‌است.

در ادامه با معلوم بودن مولفه‌های مختلف ولتاژ و جریان و تئوری سنتی بودانو با فرض پریودیک بودن شکل موج‌ها توان‌های اکتیو، راکتیو، توان ظاهری، ضریب توان، THD^۳ ولتاژ و THD^۳ جریان محاسبه می‌شود. این مقادیر در جدول (۲) آمده است.

¹ Line Interactive

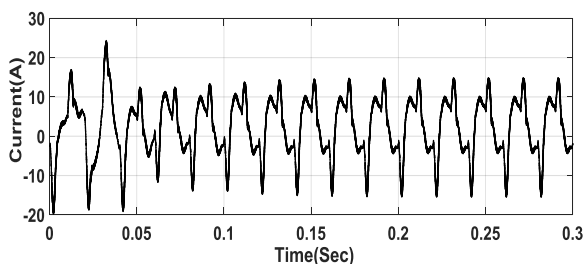
² Fast Fourier Transform

³ Total Harmonic Distortion

است. همچنین مولفه اکتیو جریان که در صورت تأمین مولفه راکتیو توسط فیلتر اکتیو، تنها جریانی است که از منبع تغذیه کشیده می‌شود، کاملاً سینوسی خواهد بود. اما با دقت در شکل (۱۱) می‌توان استنباط کرد که مولفه راکتیو جریان که بایستی توسط فیلتر اکتیو تأمین گردد، دارای دامنه نسبتاً بالایی است و ظرفیت فیلتر اکتیو و در نتیجه هزینه و ابعاد را بالا خواهد برد.

۳-۴. نتایج تئوری سه‌مولفه‌ای

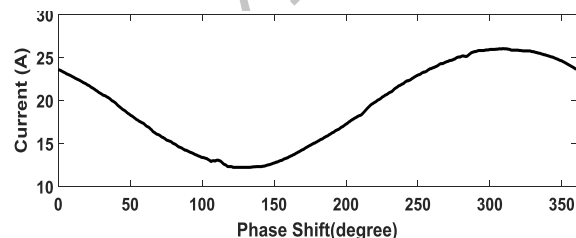
یک فیلتر پایین گذر از نوع باترورث مرتبه ۳ و فرکانس گوشه ۲۰ هرتز به‌صورت با پاسخ ضربه نامحدود طراحی شده و به معادلات (۳۰) و (۳۱) اعمال شده است. با اعمال تئوری فوق به شکل موج‌های ولتاژ و جریان حاصل از تست سیستم HCG در شرایط واقعی (شکل‌های (۵) و (۶)) شکل (۱۲) برای جریان مرجع فیلتر اکتیو با استفاده از تئوری سه‌مولفه‌ای به دست می‌آید. با دقت در شکل (۱۲) پیک جریان راکتیو در این حالت ۱۵ آمپر است.



شکل ۱۲. جریان مرجع فیلتر اکتیو در تئوری سه‌مولفه‌ای

۴-۴. نتایج تئوری پیشنهادی و مقایسه نتایج

با اعمال تئوری پیشنهادی توصیف شده در روابط (۳۲) تا (۳۶) نمودار پیک مولفه جریان راکتیو برحسب مقدار شیفت فازی ولتاژ به‌صورت شکل (۱۳) خواهد بود.

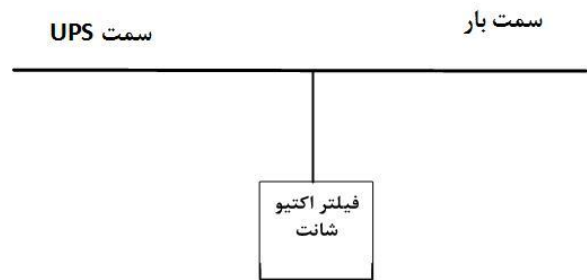


شکل ۱۳. نمودار حداکثر جریان راکتیو برحسب شیفت فازی ولتاژ

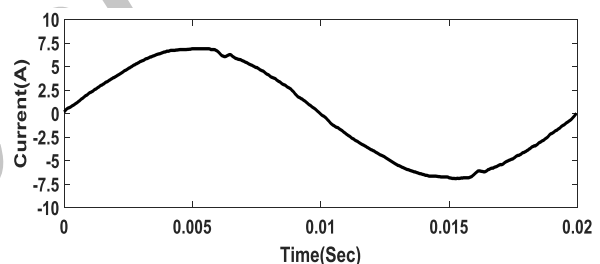
همان‌طور که در شکل (۱۳) مشخص است، در شیفت فاز ۱۳۵ درجه کمترین مقدار پیک برای جریان مولفه راکتیو یا همان جریان مرجع فیلتر اکتیو اتفاق می‌افتد و این همان‌طور که قبلاً بحث شد به معنی کاهش ظرفیت و حجم فیلتر اکتیو مورد استفاده خواهد بود. همچنین از روی شکل (۱۳) مشخص می‌شود که تئوری پیشنهادی به پیک جریان ۱۱٫۸ آمپر برای جریان

۲-۴. نتایج تئوری دومولفه‌ای

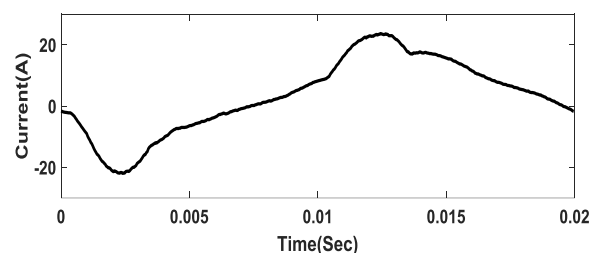
در محاسبات تئوری‌های دومولفه‌ای و تئوری پیشنهادی به علت سینوسی بودن ولتاژ تنها یک انتخاب برای V_p داریم و تنها یک حالت جبران‌سازی خواهیم داشت. این جبران‌سازی، جبران‌سازی تمامی مولفه‌های راکتیو جریان است. دیاگرام سیستم در این حالت در شکل (۹) آمده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، در این حالت UPS به‌عنوان منبع تغذیه اصلی عمل می‌کند. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب مولفه‌های اکتیو و راکتیو را در فیلتر اکتیو با تئوری دومولفه‌ای نشان می‌دهند.



شکل ۹. شکل اتصال فرضی فیلتر اکتیو در سیستم



شکل ۱۰. مولفه اکتیو جریان در تئوری دومولفه‌ای



شکل ۱۱. جریان مرجع فیلتر اکتیو در تئوری دومولفه‌ای

شکل (۱۰) سینوسی بودن مولفه اکتیو را تأیید کرده و شکل (۱۱) جریان مرجع فیلتر اکتیو را با استفاده از این تئوری نمایان می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، حداکثر دامنه جریان مرجع فیلتر اکتیو در تئوری دومولفه‌ای ۲۳٫۶ آمپر است. این مقدار بعداً در مقایسه تئوری‌های موجود و تئوری پیشنهادی به کار خواهد رفت.

با استفاده از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) که مولفه‌های اکتیو و راکتیو جریان را در تئوری دومولفه‌ای نشان می‌دهند، می‌توان استدلال نمود که با استفاده از فیلتر اکتیو فرضی که از روابط (۲۴) تا (۲۷) استفاده می‌کند، هارمونیک‌های جریان به‌خوبی جبران‌سازی شده

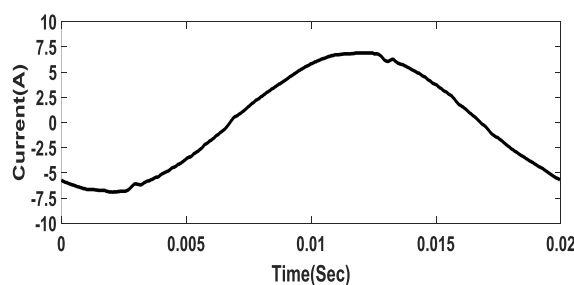
۵. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا علل کاربرد و خواستگاه تئوری‌های تحلیل توانی و تئوری‌های مورد استفاده در فیلترهای اکتیو مورد بحث قرار گرفته است. سپس با تمرکز بر روی سیستم تک فاز و جبران سازی این سیستم‌ها بخصوص در بارهای غیرخطی تئوری کلی‌ای که دربردارنده روش‌های مورد استفاده تاکنون است، معرفی شده است. سپس ایده مورد نظر برای تئوری جدید به منظور کاهش ظرفیت، ابعاد و هزینه سیستم جبران ساز مطرح شده است. سپس تحلیل‌های هارمونیک با تئوری سنتی بودانو به شکل موج‌های ولتاژ و جریان اعمال شده و مقادیر توان‌ها و پارامترهای کیفیت توانی محاسبه گردیده‌اند. سپس تئوری‌های دو و سه مولفه‌ای برای یافتن جریان مرجع فیلتر اکتیو تک فاز به این شکل موج‌ها اعمال و شکل موج‌های مرجع برای تئوری‌های مذکور به دست آمده‌اند. در ادامه با توجه به بالا بودن مقدار جریان مرجع، تئوری پیشنهادی نیز برای تعیین جریان مرجع به کار رفته و نتایج حاصل تئوری‌های دو و سه مولفه‌ای مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از تئوری پیشنهادی با تئوری‌های دیگر نشانگر حداکثر جریان مرجع کنترل کننده فیلتر اکتیو ۲۳/۶ آمپر برای تئوری دو مولفه‌ای و ۱۵ آمپر برای تئوری سه مولفه‌ای و ۱۱/۸ آمپر برای تئوری پیشنهادی است. این نتایج بهبودی ۲/۳ درصد را نسبت به تئوری سه مولفه‌ای و ۵۰ درصد نسبت به تئوری دو مولفه‌ای با استفاده از تئوری پیشنهادی نشان می‌دهد.

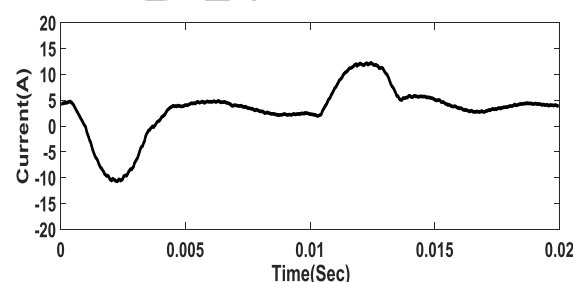
۶. مراجع

- [1] Mattavelli, P. "A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation for Active Filters"; IEEE Trans. Ind. Appl. 2001, 1, 81-89.
- [2] Corasanti, V.; Barbieri, M.; Arnera, P.; Valla, M. "Hybrid Active Filter for Reactive and Harmonics Compensation in a Distribution Network"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2009, 3, 670-677.
- [3] Block, P.; Salamanca, H. "Power Quality Analyses of a Large Scale Photovoltaic System"; Proc. Int. Conf. Renewable Energy 2014, 1-6.
- [4] Ginn, H.; Czarniecki, L. "An Optimization Based Method for Selection of Resonant Harmonic Filter Branch Parameters"; IEEE Trans. Power Deliver 2006, 21, 1445-1451.
- [5] Pomilio, J.; Deckmann, S. "Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads"; IEEE Trans. Power Deliver 2007, 22, 1049-1055.
- [6] Salmeron, P.; Litran, S. "Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters"; IEEE Trans. Power Deliver 2010, 25, 1058-1067.
- [7] Izhar, M.; Hadzer, C. "Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in The Distribution System"; Proc. Int. Conf. PECon. 2004, 104-108.
- [8] Salmerón, P.; Herrera, R. "Instantaneous Reactive Power Theory - A General Approach to Poly-Phase Systems"; Elect. Power Syst. Res. 2009, 79, 1263-1270.

مرجع فیلتر اکتیو منجر خواهد شد. حال با فرض شیفت فاز ۱۳۵ درجه شکل موج‌های جریان مولفه اکتیو و جریان مولفه راکتیو به ترتیب مانند شکل‌های (۱۴) و (۱۵) خواهند بود. همان‌طور که از شکل (۱۵) قابل برداشت است، ماکزیمم جریان مرجع فیلتر اکتیو با استفاده از تئوری پیشنهادی به ۱۱/۸ آمپر کاهش پیدا کرده است که از روی شکل (۱۳) نیز قابل مشاهده بود.



شکل ۱۴. مولفه اکتیو جریان در تئوری پیشنهادی



شکل ۱۵. جریان مرجع فیلتر اکتیو در تئوری پیشنهادی

در جدول (۳) نتایج تئوری‌های دو مولفه‌ای، سه مولفه‌ای و پیشنهادی به صورت کمی مقایسه شده است. با دقت در این نتایج روشن است که روش پیشنهادی به کیفیتی بهتر از روش‌های مرسوم با محاسبات ساده‌تر و کم‌تری رسیده است. در واقع فیلتر اکتیو پیشنهادی به THD_v برابر با دو نوع فیلتر قبلی دست یافته است در حالی که دامنه مولفه راکتیو جریان و جریان مرجع فیلتر اکتیو در این روش ۱۱/۸ آمپر و در تئوری دو مولفه‌ای ۲۳/۶ و در تئوری سه مولفه‌ای ۱۵ آمپر است و این امر به معنای کاهش ظرفیت فیلتر اکتیو با استفاده از روش پیشنهادی تا ۲/۳ درصد نسبت به تئوری سه مولفه‌ای و ۵۰ درصد نسبت به تئوری دو مولفه‌ای در نتیجه کاهش ابعاد و قیمت آن خواهد بود.

جدول ۳. مقایسه کمی جریان‌های مرجع تئوری‌های ۲ و ۳ مولفه‌ای و پیشنهادی

THD_i	THD_v	دامنه مولفه راکتیو	
۳/۱	۲/۴	۲۳/۶	تئوری دو مولفه‌ای
۳/۱	۲/۴	۱۱/۸	تئوری پیشنهادی
۲/۷	۲/۴	۱۵	تئوری سه مولفه‌ای

- [13] Salmeron, P.; Herrera, R. "Distorted and Unbalanced Systems Compensation within Instantaneous Reactive Power Framework"; IEEE Trans. Power Deliver 2006, 21, 1655-1662.
- [14] Zhang, G.; Stephen, O. O.; Sun, H. "Analysis of Single Phase Active Power Filter"; Proc. Int. Conf. Intelligent Control and Information Processing 2010, 629-632.
- [15] Grama, L.; Lodin, A.; Rusu, A.; Takala, J. "Method to Convert Analog Filters to Digital Filters"; Proc. Int. Conf. Image and Signal Processing and Analysis (ISPA) 2013, 438-443.
- [9] Akagi, H. "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning"; John Wiley, Hoboken, 2017.
- [10] Yoshida, H.; Wada, K. "Compensation Characteristics and Power Rating of a Single-Phase Active Filter With Frequency Imitation Function"; Proc. Int. Conf. IEEE ECCE Asia Downunder 2013, 1163-1169.
- [11] Emanuel, A. "Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions"; IEEE Trans. Ind. Appl. 2004, 3, 869-876.
- [12] Bernieri, A.; Ferrigno, L. "Efficiency of Active Electrical Power Consumption in the Presence of Harmonic Pollution: a Sensitive Analysis"; Proc. Int. Conf. IEEE Instrumentation & Measurement Technology 2010, 1447-1452.

Archive of SID