

## کاهش هارمونیک جریان بارهای غیرخطی با استفاده از روش تزریق هارمونیک در شبکه‌های توزیع

جلال نظرزاده ..... دانشجوی دوره دکترای مهندسی برق  
سید کمال الدین نیک روش ..... استاد دانشکده برق  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

### چکیده:

امروزه با گسترش کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت، قسمت عمده‌ای از مصارف شبکه‌های فشار ضعیف و متوسط و مراکز صنعتی را بارهای غیرخطی شامل گردیده است. رشد مصارف فوق باعث گردیده است که هارمونیک‌های جریان ناشی از بارهای غیرخطی فوق افزایش یابد و در نتیجه، تلفات شبکه‌های توزیع نیز افزایش یافته و اختلالات وسیعی در آن ایجاد گردد.

در گذشته به منظور رفع مشکل فوق از فیلترهای خط (Line Filter) در محل تغذیه بار غیرخطی استفاده می‌شد که از نظر اقتصادی روش پر هزینه و آثار بهبود هارمونیکی آن نیز چندان رضایت بخش نبود. اخیراً روش دیگری جهت بهبود توزیع هارمونیکی بارهای غیرخطی در یکسو سازهای قدرت مورد توجه قرار گرفته است، که به روش تزریق هارمونیک موسوم می‌باشد (Harmonic Injection). با استفاده از روش فوق توزیع هارمونیک‌های جریان یکسوساز در طرف تغذیه آن بهبود می‌یابد علاوه بر بهبود توزیع هارمونیکی، از نظر اقتصادی نیز روش فوق بسیار کم هزینه‌تر از سایر روشهای موجود می‌باشد.

در این مقاله ابتداء به معرفی روش تزریق هارمونیک پرداخته سپس میزان تزریق هارمونیک جهت بهینه‌سازی توزیع جریان تعیین می‌گردد. همچنین اثبات می‌گردد میزان بهبود توزیع هارمونیکی جریان یکسوساز، لزوماً نقطه کار مناسبی جهت بهبود رفتار بار غیرخطی در شبکه نخواهد بود. در این راستا به تعیین نقطه کار بهینه روش تزریق هارمونیک در یک شبکه از دیدگاه توزیع هارمونیکی و لذا نیز پرداخته می‌شود و نتایج روش فیلتر خط، تزریق بهینه توزیع جریان و تزریق بهینه توزیع هارمونیکی و لذا نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

با رشد تکنولوژی نیمه هادی قدرت، مصارف سیستمهای الکترونیکی نظیر محرکهای AC و DC و منابع تغذیه قدرت به سرعت رشد نموده است در سال ۱۹۹۰ حدود یک بیلیون کیلووات ساعت که حدود نیمی از مصرف انرژی الکترونیکی کشورهای صنعتی را شامل می‌گردد را بارهای غیرخطی از نوع فوق تشکیل می‌داد [۱]. قسمت اعظمی از مصارف فوق در ولتاژهای زیر 20 KV (حدود 11 KV) تغذیه می‌گردیدند که به صورت منبع تولید هارمونیک (جریان) رفتار می‌نمایند.

علاوه بر مشکلات هارمونیک جریان، اصلاح ضریب قدرت یکسوسازیهایی قدرت الزامی می‌باشد استفاده از خازنهای جبران‌ساز باعث بهبود ضریب قدرت مؤلفه اصلی می‌گردد. ولی در مقابل خازن جبران‌ساز امکان بروز تشدید در اثر حضور هارمونیکهای مراتب بالا را افزایش می‌دهد. حضور هارمونیک جریان باعث می‌گردد اولاً شکل موج ولتاژ متصل به سایر بارهای مداری نیز از شکل سینوسی خارج شده (هارمونیک ولتاژ) در ثانی تلفات شبکه‌های توزیع نیز افزایش یابد. لذا دو دیدگاه متفاوت در زمینه بهبود آثار هارمونیک مطرح می‌باشد اولین نظریه بهبود بهینه توزیع هارمونیک جریان و دیدگاه دیگر بهبود بهینه توزیع هارمونیک ولتاژ می‌باشد در مراجع [۵] و [۷] آنالیز دیدگاه اول در یک مدار ساده یکسوساز مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ضمن بررسی روش فوق در شبکه‌های توزیع، با یافتن توزیع بهینه هارمونیک ولتاژ، اثبات می‌گردد که توزیع بهینه هارمونیک جریان لزوماً با توزیع بهینه هارمونیک ولتاژ معادل نمی‌باشد. در نهایت نیز با استفاده از روشهای بهینه توزیع جریان و ولتاژ و فیلتر خط در یک شبکه توزیع، نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

### منابع ایجاد هارمونیک در مصارف الکترونیک قدرت :

کاربرد سیستمهای الکترونیک قدرت، نظیر محرکهای DC و AC به لحاظ قابلیت‌های فراوانی که از نظر مشخصه‌های خروجی به مصرف‌کننده ارائه می‌دهند به سرعت افزایش یافته است. ساختار اکثر سیستمهای مزبور به گونه‌ای است که همواره طبقه ورودی (متصل به شبکه) آنرا یکسوسازهای سه فاز پل دیودی و سه فاز تریستوری تشکیل می‌دهد [۲]. طراحی سیستمهای فوق برای استفاده از حداکثر ظرفیت مبدل و داشتن حداقل تلفات به صورتی است که همواره سعی می‌گردد تا از توجع جریان خروجی یکسوساز اجتناب گردد. بنابراین عموماً شکل موج جریان یکسوسازهای قدرت به صورت پله‌ای ظاهر می‌گردد. در صورتی که مبدل از ترانسفورماتور مثلث

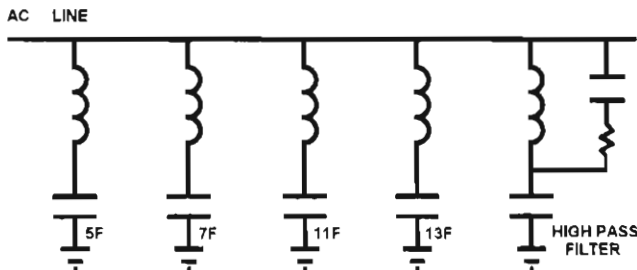
ستاره استفاده نماید شکل موج جریان خط یکسوسازی به صورت شبه مربعی (quasi-square) ظاهر می‌شود [۳]. در این حالت دامنه هارمونیک جریان شبکه AC عبارت است از:

$$i_n = \begin{cases} \frac{4I_d}{n\pi} \left( 1 + \cos \left( \frac{n\pi}{3} \right) \right) & n = 1, 5, 7, 11, \dots \\ 0 & n = 3, 6, 9, \dots \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $n$  مرتبه هارمونیک،  $I_d$  جریان DC یکسوساز و  $i_n$  دامنه هارمونیک  $n$  ام جریان می‌باشد.

### کاهش هارمونیک جریان یکسوساز پل دیودی توسط فیلتر خط :

جهت رفع مشکلات ناشی از حضور هارمونیک جریان، از فیلترهای خط که به صورت ستاره به تغذیه یکسوساز متصل می‌شوند به صورت شکل (۱) استفاده می‌گردد. با توجه به رابطه (۱)، هارمونیکهای جریان خط در طرف تغذیه شامل هارمونیکهای مراتب ۵ و ۷ و ۱۱ و ... می‌باشد لذا فیلترهای RLC متصل به خطوط سه فاز به گونه‌ای انتخاب می‌گردند تا در فرکانسهای فوق به صورت تشدید کامل عمل نمایند. در طراحی فیلتر بایستی آثار فیلتر در هارمونیک اصلی نیز در نظر گرفته شود به طوری که در هارمونیک پایه به صورت امپدانس بزرگ (مدار باز) عمل نماید. برای تحقق شرایط فوق لازم است ضریب کیفی فیلتر (Q) تا حد ممکن کوچک انتخاب گردد. اتصال فیلترهای خط به صورت ستاره زمین شده برای هارمونیکهای ۵ و ۷ و ۱۱ و ... انجام می‌گردد. از آنجائی که اثرات هارمونیکهای مراتب پایین (۵ ام) جریان بیش از سایر هارمونیکها است، لذا معمولاً فیلتر خط برای فرکانس پایین در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱: روش فیلتر خط جهت بهبود آثار هارمونیکی جریان.

## بهبود توزیع هارمونیک جریانی توسط روش تزریق هارمونیک :

اولین بار ایده بهبود THD توسط Bird ارائه گردید [۴]. سپس روش فوق توسط Anetaian توسعه یافت. در این روش مطابق شکل ۲ منبع جریان با فرکانس  $3f$  به مرکز ستاره طرف ثانویه ترانس تغذیه یکسوساز متصل می‌گردد. اگر جریان تزریقی  $i_j(t)$  را به صورتی زیر نشان دهیم.

$$i_j(t) = -\sqrt{2} I_j \cos(3\omega t - \beta) \quad (2)$$

در آن صورت جریان سیستم‌بندی هر فاز در طرف ثانویه یکسوساز به صورت شکل ۳ خواهد بود. رابطه جریان فوق به صورت زیر می‌باشد.

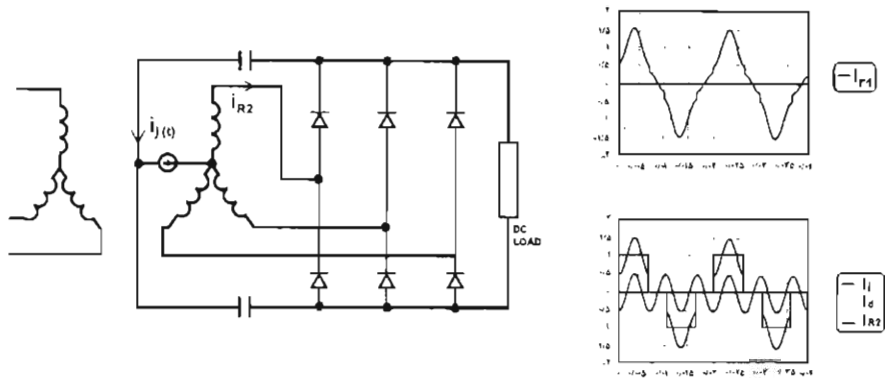
$$i_{R2}(t) = \begin{cases} I_d \left( 1 - \sqrt{2} \rho \cos(3\omega t - \beta) \right) & 0 < \omega t < \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \frac{2\pi}{3} < \omega t < \pi \\ -I_d \left( 1 - \sqrt{2} \rho \cos(3\omega t - \beta) \right) & \pi < \omega t < \frac{4\pi}{3} \\ 0 & \frac{4\pi}{3} < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $\rho = \frac{I_j}{I_d}$  در نظر گرفته شده است.  
دامنه هارمونیک  $n$ ام جریان  $i_{Rn}(t)$  به صورت زیر است:

$$i_{Rn}(t) = \frac{4}{\pi} I_d \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \left[ \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{\sqrt{2} n^2}{n^2 - 9} \rho \cos(\beta) \right) \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \right. \\ \left. + \frac{3\sqrt{2}}{n^2 - 9} \rho \sin(\beta) \cos\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \right] \quad (4)$$

$$i_{R3}(t) = \frac{2\sqrt{2}}{3} \rho I_d \sin\left(\beta - 3\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad n = 3 \quad (5)$$

حداکثر تضعیف هارمونیک جریانی طرف اولیه تحت  $\beta = 0$  رخ می‌دهد [۵ و ۶]. تحت شرایط فوق هارمونیک تزریقی به مرکز ستاره طرف ثانویه بایستی هم فاز با ولتاژ تغذیه آن صورت پذیرد.



شکل ۲: ایده اصلی روش تزریق هارمونیک و شکل موج جریان خط و تزریق.

میزان جریان تزریقی بستگی به مرتبه هارمونیک مورد نظر دارد. معیار مناسبی که برای تضعیف بهینه هارمونیک‌های یک موج سینوسی مطرح می‌گردد (THD) (Total Harmonic Distortion) می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{T.H.D.} = (i_5^2 + i_7^2 + i_{11}^2 + \dots + i_k^2 + \dots)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

لذا لازم است دامنه جریان تزریق ( $I_j$ ) چنان تعیین شود تا THD حداقل گردد. برای این منظور رابطه [۴] با توجه به  $\beta = 0$  به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$i_{Rn}(t) = KP_n (1 - S_n \rho) \sin \left( n \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad (7)$$

که

$$K = \frac{4I_d}{\pi}, P_n = \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right), S_n = \frac{\sqrt{2} n^2}{n^2 - 9} \quad (8)$$

در صورتی که از اتصال ستاره - ستاره (بدون سیم زمین در طرف تغذیه) و یا اتصال مثلث ستاره استفاده شود هارمونیک سوم جریان حذف می‌گردد لذا در طرف اولیه  $i_{R3n}(t)$  همواره صفر خواهد بود.

با جایگزینی رابطه [۷] در [۶] داریم:

$$\text{T.H.D.} = \left( \sum K^2 P_n^2 (1 - S_n \rho)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad n = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (9)$$

در نتیجه مسأله یافتن  $\rho$  به گونه‌ای است که THD جریان حداقل گردد. برای این منظور داریم:

$$\frac{\partial \text{T.H.D.}}{\partial \rho} = 0 \quad (10)$$

$$\rho^* = \frac{\sum S_n P_n^2}{\sum S_n^2 P_n^2} \quad n = 5,7,11,13, \dots \quad \text{و یا} \quad (11)$$

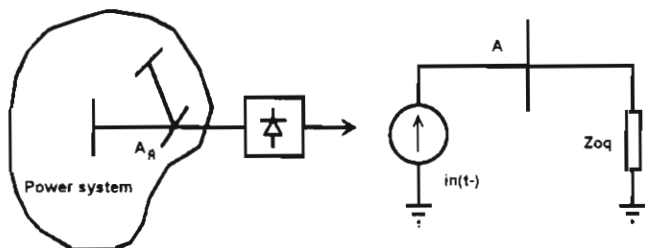
چنانچه از رابطه [۱۱] مشاهده می‌گردد میزان  $\rho^*$  بستگی به شرایط یکسوساز ندارد. اگر  $S_n$  و  $P_n$  از رابطه [۸] محاسبه شوند در آن صورت  $\rho^*$  برابر است با:

$$\rho^* = 0.5193 \quad (12)$$

### بهبود توزیع هارمونیکی ولتاژ توسط تزریق جریان در شبکه توزیع :

همانطور که اشاره گردید نقطه کار بهینه توزیع هارمونیکی جریان یکسوساز لزوماً معادل نقطه کار بهینه توزیع هارمونیکی جریان نمی‌باشد.

در شکل ۴ - الف شبکه‌ای نشان داده شده است که در باس A به یکسوساز (بار غیرخطی) متصل شده است. ولتاژ هارمونیک ناشی از جریان غیرخطی یکسوساز توسط مدار معادل شکل ۴ - ب بدست می‌آید.



شکل ۴: اتصال یکسوساز به شبکه توزیع و مدار معادل هارمونیک آن.

در شکل ۴ - ب منبع جریان، مدل جریان هارمونیکی یکسوساز را نشان می‌دهد. امپدانس معادل تونن شبکه از دید باس A با استفاده از نتایج محاسبات اتصال کوتاه (بدون صرف نظر از بارهای محلی) بدست می‌آید. اگر امپدانس هارمونیک معادل باس A را به  $Z_{eq}$  نمایش دهیم (شکل ۴-ب) در آن صورت داریم:

$$V_n(t) = Z_{eq} i_{Rn}(t) \quad (13)$$

با استفاده از تعریف THD (رابطه ۶) برای ولتاژ گره A داریم:

$$T.H.D. = (V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + \dots + V_k^2 + \dots)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

با جایگزینی از رابطه [۱۳] و [۷] در رابطه [۱۴] داریم:

$$T.H.D. = \left( \sum Z_{eq}^2 K^2 P_n^2 (1 - S_n \rho)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad n = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (15)$$

در اینجا هدف یافتن  $\rho^*$  به گونه‌ای است که THD ولتاژ حداقل گردد. در این صورت داریم:

$$\frac{\partial T.H.D.}{\partial \rho} = 0 \quad (10)$$

و یا

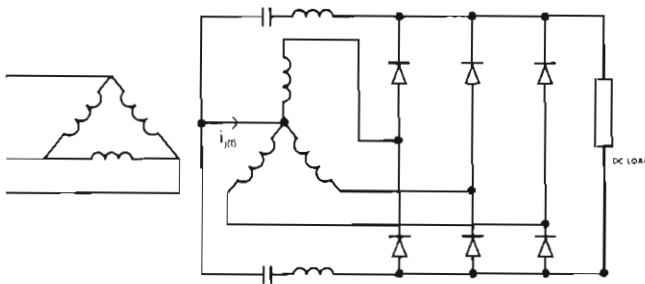
$$\rho^* = \frac{\sum S_n Z_{eq}^2 P_n^2}{\sum S_n^2 Z_{eq}^2 P_n^2} \quad n = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (16)$$

با محاسبه امپدانس هارمونیک معادل شبکه از باس A ( $Z_{eq}$ ) مقدار بهینه  $\rho^*$  تعیین می‌گردد باید توجه نمود در این حالت  $\rho^*$  بستگی به شرایط شبکه دارد. لذا مشاهده می‌گردد برخلاف روش ارائه شده در مراجع [۵] و [۷] لازم است فیلتر تزریق هارمونیک متناسب با شرایط شبکه متصل به آن تعیین شود.

برای کاربرد عملی، به جای استفاده از منبع جریان مستقل (تزریقی) از آرایش شکل ۵ استفاده می‌گردد. در این ساختار با استفاده از هارمونیکهای سوم ولتاژ خروجی ترمینال مثبت و منفی یکسوساز (نسبت به صفر ترانس تغذیه)، فیلترهای RLC چنان طراحی می‌گردند که در هارمونیک سوم به صورت اتصال کوتاه ظاهر گردند. ولتاژ هارمونیک سوم گره مثبت و منفی یکسوساز عبارت است از:

$$V_{3+} = V_{3-} = \frac{1.17V}{4} \quad (17)$$

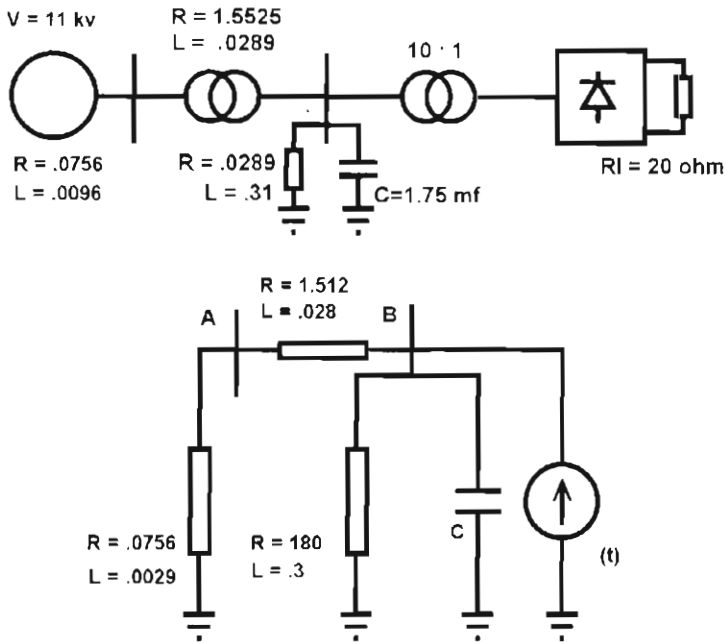
که  $V_{3+}$  و  $V_{3-}$  به ترتیب دامنه هارمونیک سوم ترمینال مثبت و منفی و  $V$  ولتاژ مؤثر فازی طرف ثانویه یکسوساز می‌باشد.



شکل ۵. ساختار مثلث - ستاره بدون منبع جریان مستقل

## بررسی و مقایسه روشهای موجود :

جهت شبیه‌سازی یک شبکه توزیع مطابق شکل (۶) در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ  $132\text{KV}$  شبکه بی‌نهایت توسط ترانسفورماتور ستاره ستاره به ولتاژ  $11\text{KV}$  تبدیل می‌گردد و پس از آن به یکسوساز و بار محلی متصل می‌گردد. خازن جبران‌ساز هارمونیک اصلی نیز به باس تغذیه متصل می‌باشد. یکسوساز توسط ترانسفورماتور مثلث - ستاره به یکسوساز سه فاز متصل گردیده است.

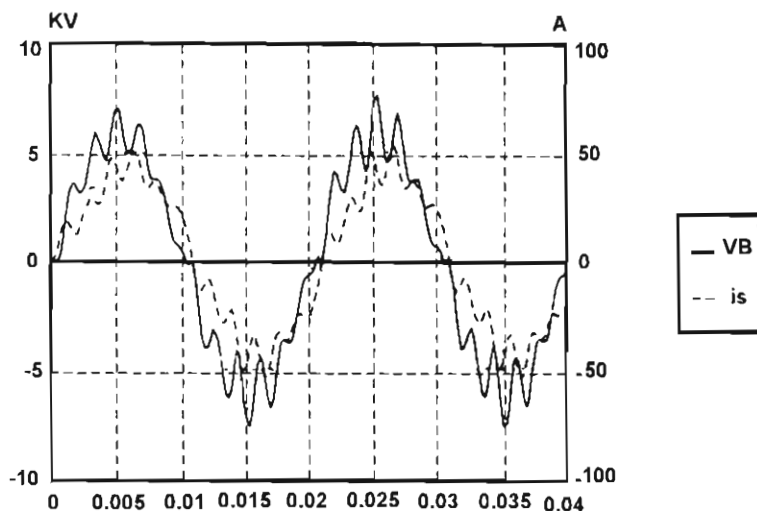


شکل ۶: مثالی از یک شبکه محلی جهت بررسی.

مقادیر امدانسی نشان داده شده نسبت به ولتاژ  $11\text{KV}$  در نظر گرفته شده‌اند.

با اتصال یکسوساز به شبکه (شکل ۶) شکل موج ولتاژهای باس تغذیه (A) و باس یکسوساز B به صورت شکل ۷ ظاهر می‌گردند. ولتاژ باس B به شدت تحت تأثیر جریان هارمونیک خط واقع شده است. این اثر در روی ولتاژ باس A کمتر ظاهر شده است جریان یکسوساز و جریان خط شبکه نیز نشان داده شده است، به صورت غیر قابل قبولی از شکل سینوسی خارج است. ولتاژ باس B به گونه‌ای است که سایر بارهای متصل به آن نیز تحت تأثیر هارمونیک جریان یکسوساز قرار گرفته است.



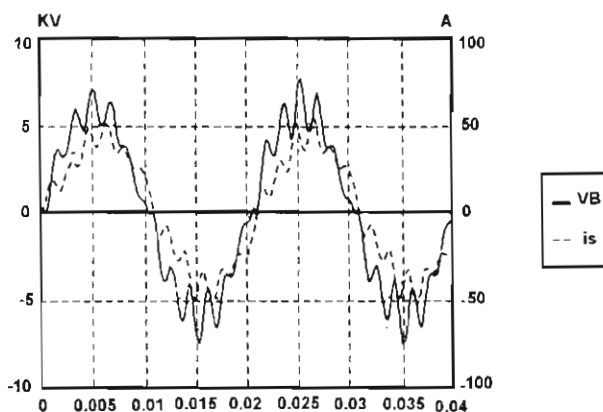


شکل ۷: شکل موج ولتاژ و جریان شبکه در حالت عادی.

برای بررسی، فیلتر خط هارمونیک  $5f$  به باس B با مقادیر زیر متصل می‌گردد.

$$C = 1\mu f ; L = 400 \text{ mb}$$

به منظور آنکه در جبران‌ساز خازنی تغییری صورت نپذیرد میزان خازن متصل به باس B به مقدار اثر خازنی فیلتر خط کاهش می‌یابد. مقدار  $C = 700 \text{ nf}$  در نظر گرفته می‌شود. در این حالت شکل موج ولتاژ باس B و جریان خط یکسوساز مطابق شکل ۸ خواهد گردید.



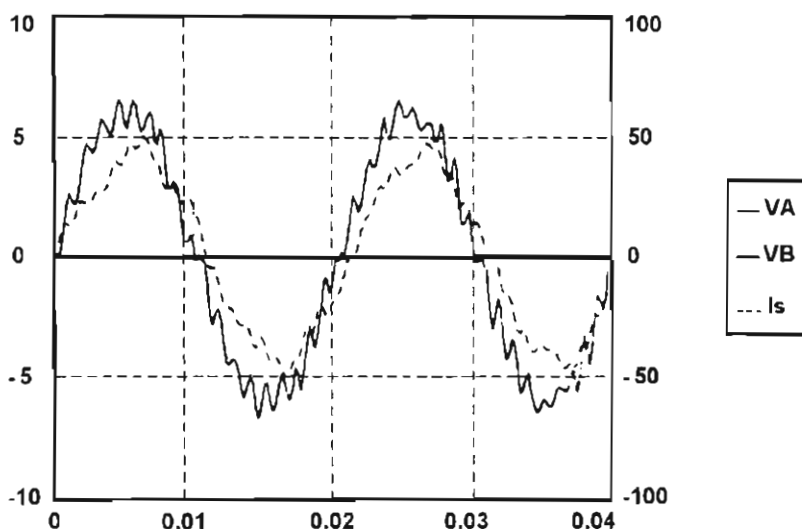
شکل ۸: شکل موج ولتاژ و جریان شبکه در حالت اتصال به فیلتر خط.

مطابق شکل ۸ دامنه نوسانات ولتاژ باس B کاهش ولی فرکانس آن افزایش یافته است. شکل موج جریان خط نیز دچار تغییرات فوق گردیده است ولی هنوز به شکل سینوسی کامل ظاهر نشده است.

در صورتی که از فیلتر تزریق هارمونیک مطابق شکل ۵ استفاده شود. با استفاده از مقدار بهینه جریان  $\rho^* = 0.513$ ، مقاومت مدار فیلتر خازن و اندوکتانس آن عبارت است از:

$$C = 40 \mu f \quad L = 28 \text{ mh} \quad R = 4.1 \Omega$$

نتایج ولتاژ و جریان یکسوساز به شکل ۹ ظاهر می‌گردد.



شکل ۹. شکل موج ولتاژ و جریان شبکه در حالت اتصال به فیلتر بهینه تزریق هارمونیک جریان.

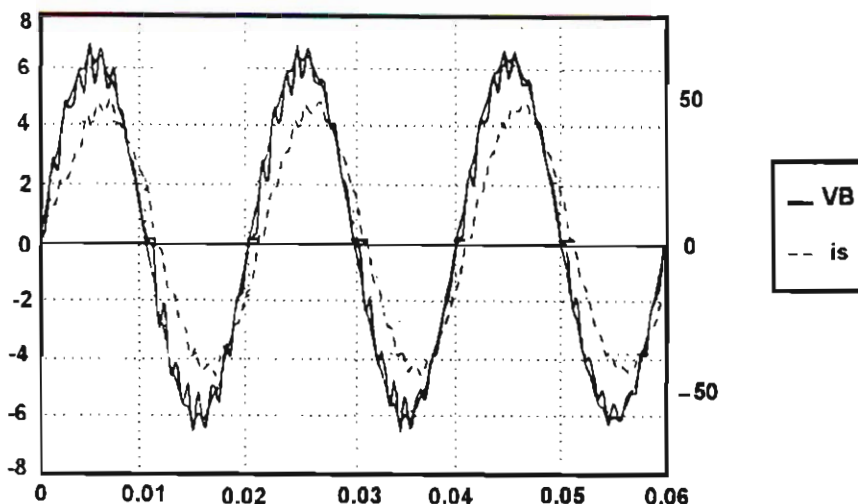
چنانچه مشاهده می‌گردد و با وجود آنکه جریان یکسوساز تا حدودی بهبود یافته است. ولی ولتاژ باس B دارای تموج بالائی است. برای مقایسه از روش بهبود توزیع ولتاژ استفاده می‌گردد. با استفاده از رابطه (۱۶) و استفاده از مقادیر شکل ۶ مقدار  $\rho^*$  بهینه بهبود توزیع ولتاژ عبارت است از:

$$\rho^* = .6793$$

بنابراین مقادیر فیلتر تزریقی عبارتند از:

$$C = 40 \mu f \quad L = 28 \text{ mh} \quad R = 3 \Omega$$

نتایج این حالت در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: شکل موج ولتاژ و جریان شبکه در حالت بهینه تزریق هارمونیک ولتاژ

### نتیجه گیری :

تحقیق فوق نشان می دهد هارمونیک جریان بارهای غیرخطی علاوه بر ایجاد مشکلات موضعی برای مصرف کننده، امکان بروز اختلالات وسیعی را در شبکه امکان پذیر می سازد. در صورتی که مقدار بار غیرخطی نسبت به سایر بارهای مصرفی، قابل ملاحظه باشد، مشکل به صورت جدی تری ظاهر می شود. در گذشته برای رفع مشکل از فیلترهای خط استفاده می گردید. استفاده از فیلتر خط علاوه بر مشکل پدیده نوسان ولتاژ، هزینه بسیار بالایی را نیز به دنبال دارد. در مقابل استفاده از روش تزریق هارمونیک علاوه بر بهبود مناسب طیف هارمونیک جریان و ولتاژ از نظر اقتصادی نیز دارای موقعیت مناسبتری است.

مقدار جریان تزریقی هارمونیک بستگی به دو دیدگاه توزیع بهینه هارمونیک جریان و یا ولتاژ دارد. در این مقاله نشان داده شد، توزیع بهینه جریان مستقل از نوع شبکه می باشد و بستگی به شرایط مصرف کننده دارد در حالی که توزیع بهینه هارمونیک ولتاژ به شرایط شبکه مصرف بستگی کامل دارد.

- [1]: IEEE Power Electronic Society Newsletter. oct. 1990
- [2] :Gopal K.Dubey "Power Semiconductor Controlled Drives" 1989. Prentice-Hall, Inc, USA.
- [3] :C.W.Lander "Power Electronic" Second Edition, 1987, MCGRAW-Hill Book Compand UK.
- [4] :B.M.Brid "Harmonic Reduction in Multiplex Converters by Triple Frequency Current Injection" Proc. IEEE, Vol. 116, No. 10 Oct. 1969.
- [5] :W.B.Lawrance, W. Mielczarski "Harmonic Current Reduction in a Three-phase Diode Bridge Rectifier" IEEE Trans. on Industrial Elect. Vol 39. No 6. Dec. 1992.
- [6] :A. Ametani "Generalised Method of Harmonic Reduction in AC-DC Converters by Harmonic Current Injection" In Proc. IEEE. Vol 119, No 7. July. 1973.

محسن حاجی کرم، "بهبود ضریب قدرت و توزیع هارمونیک جریان خط در یکسوسازهای قدرت به کمک نرم افزار تحلیل مدارهای الکترونیک قدرت PECA پروژه پایانی کارشناسی قدرت، سال ۱۳۷۳ استاد راهنما جلال نظرزاده - دانشگاه صنعتی امیرکبیر.