بسمه تعالی
هفتمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق
انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

کد مقاله: DNEF107

نوع پذیرش : رزرو برای ارائه

محاسبه بهای توان راکتیو عبوری از شبکه های توزیع

محمدرضا گلساز شیرازی احمد فرشچیان فسایی
mshirazi@frec-ir.org afarshchian@lycos.com
شرکت برق منطقه ای فارس

کلمات کلیدی : توان راکتیو – شبکه توزیع – تلفات هارمونیکی - هزینه

چکیده :

سرمایه گذاری در صنعت برق با هدف بالابردن کیفیت انرژی تحویلی به مشترکین، امری مهم و دقیق می‌باشد که بدون درنظرگرفتن جنبه های مختلف فنی و اقتصادی میسرنمی‌گردد. در این مقاله روشی فنی-اقتصادی معرفی شده که به کمک آن ارزش تلفات توان راکتیودرشبکه های توزیع محاسبه گردیده است.

روش متداول کاهش تلفات توزیع استفاده ازجبران کننده های توان راکتیومی‌باشد تاضمن کاهش تلفات توان، جریانهای هارمونیکی نیز کاهش یابد ازسوی دیگراستفاده از جبران کننده ها مستلزم صرف هزینه میباشد بنابراین سرمایه گذاری انجام گرفته به منظور خرید اسباب و تجهیزات جبرانگر بایستی حداقل با هزینه صرفه جویی شده بواسطه کاهش تلفات هارمونیکی برابری کند.

دراین مقاله کاربرد یک ضریب توان تنظیم شده به عنوان مناسبترین روش تعیین بهای منابع توان راکتیو پیشنهاد شده است وبا درج مبانی تئوری ونتایج اقدامات عملی انجام پذیرفته در یک شبکه واقعی (شبکه استرالیا)، امید آن راداریم که بهره برداران شبکه های توزیع با مشاهده نتایج و محسنات این روش درصدد تحقق آن درشبکه های داخلی برآیند.

۱. مقدمه

توزیع انرژی الکتریکی از ایستگاههای قدرت به مصرف کنندگان از مباحث مهمی است که در آن انرژی و تلفات توان در شبکه های انتقال و توزیع به شکل جدی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. تلفات در شبکه های انتقال در مقایسه با تلفات درشبکه های توزیع کمتر است، زیرا :

- مقادیرجریان، در ولتاژهای بالای مربوط به شبکه های انتقال درمقایسه باشبکه های توزیع ولتاژ پایین یا متوسط کمتر است.
- در شبکه های انتقال محاسبه پخش بار بهینه توان اکتیو و راکتیو معمول بوده و شیوه های متعدد و ابزار فراوان متعددی جهت انجام آن وجود دارد.

تلفات انرژی و توان در فیدرهای توزیع از اهمیت خاصی برخوردار است و اکثراً به٦ الی ۹ درصد انرژی تولید شده میتواند برسد .بسیاری از عوامل مؤثر در تلفات بزرگ توزیع شناسایی شده اند،تعدادی از آن عوامل عبارتند از :

- درشبکه های توزیع اغلب کشورها همانند ایران، ازخطوط بلند (خطوط شعاعی) استفاده شده است.
- جریانها در شبکه های توزیع (۱۱ و۲۰ کیلوولت) بالاتر از جریان در سیستمهای انتقال میباشد.
- عبورشار توان راکتیو
- اعوجاج هارمونیکی ناشی از جریانها و ولتاژهای تغییریافته بواسطه کاربرد عناصرالکترونیک قدرت

موارد فوق بستگی زیادی به منبع تولید توان راکتیوداردزیرا تعیین کننده جهت عبور شار و غرامتی است که بواسطه تلفات بوجودآمده ازآن بایستی پرداخت شود.یک راه حل، تشویق مصرف کنندگان برای نصب بانکهای خازنی جبران کننده توان راکتیومیباشد. اما ایراد این راه حل اینستکه جبران کننده های خازنی در معرض اضافه بار ناشی از جریانهای هارمونیکی قرارمی گیرند. در اکثر حالتها اثر جریانهای هارمونیکی روی بانکهای خازنی بالا بوده بنا براین کارخانه های صنعتی مجبور به جدا کردن خازنهای نصب شده میباشند.

اجتناب ناپذیر بودن وجود اعوجاج هارمونیکی در شبکه های توزیع باعث گردیده تا نصب خازن ها به تنهایی کافی نباشد. بنابراین سیستمهای جبران کننده توان راکتیوبایستی مجهزبه فیلترهای قابل تنظیم باشند.

۲. بهای نصب این فیلترها را چه کسانی باید بپردازند؟

مزیت استفاده۲از فیلترها در شبکه، شامل:کاستن از تلفات توان راکتیو و کاستن آلودگی هارمونیکی میباشد.ازطرفی در حال حاضریکی ازمهمترین ا هداف شرکتهای توزیع کاستن ازتلفات توزیع و بهبود بخشیدن به کیفیت انرژی موجود می باشد.بنابراین نصب سیستمهای مجهز به فیلتر میتواند تلفات انرژی شبکههای توزیع راکاسته واز افزایش فیدرهای خازنی بکاهد همچنین باعث کاسته شدن اثرات منفی گردش هارمونیک روی تجهیزات الکتریکی می‌گردد. ازسوی دیگرمصرف کنندگان علاقمند به استفاده از سیستمهای مجهز به فیلتر میباشند زیراباعث کاستن تلفات انرژی و هزینه تقاضا گردیده واز تداخل هارمونیک تجهیزات صنعتی الکترونیکی و شبکه های کامپیوتری جلوگیری می نماید.

باتوضیخ فوق روشن می گرددکه شرکت برق و مصرف کننده هردودر نصب سیستمهای مجهز به فیلتر ذینفع می‌باشند، اما در واقعیت پاسخ به موارد مهم زیر است که تصمیم گیری را با مشکل مواجه می سازد :

- تا چه میزان هزینه نصب مقرون به صرفه و اقتصادی میباشد؟
- چه کسی بهای آن را باید پرداخت کند؟
- دخالت کردن در هزینه هاازسوی چه مقامی، مجازمی‌باشد؟

از دیدگاه شرکت توزیع، یک مشتری بایستی هزینه نصب را بطور شفاف بداند همچنین بایستی از بارهای غیر خطی که منجر به تولید اعوجاج هارمونیکی در شبکه میشوند نیز مطلع باشد.در بسیاری از موارد مشترکین ممکن است این ادعا را داشته باشند که اعوجاجهای تولید شده بوسیله دیگر مشترکین متصل به همان فیدر ایجادشده است یا ساختار شبکه ممکن است با تقویت هارمونیکها منجر به بالا رفتن سطح اعوجاج گردد.

به عنوان مثال و تأییدی بر مطالب فوق ،نتایج آنالیزجریانهای هارمونیکی دو منبع را که مولد اعوجاج های هارمونیکی هستنددر شکلهای ۱ و ۲ آورده شده است که عبارتند از : یکسو کننده شش پالسه و لامپهای فلورسنت.

مقدار هارمونیک نهم از جریان و ولتاژ نشان ازتوپولوژی مساعد شبکه جهت وقوع تشدید میباشد. در این حالت واضح است که مشتری جریانهای هارمونیک را تولید میکند اما تشخیص آن خیلی مشکل است که آیا

مستقیماًسهمی در آلودگی هارمونیکی دارد و یا اینکه مقدار درجه هارمونیک بوسیله تشدید شبکه بالا رفته است.

در استانداردهای شناخته شده هارمونیک مانند استاندارد IEEEStd519 [1] و یا استاندارد استرالیا 2279 [1].تنها ولتاژهای هارمونیکی درنقطه اعوجاج بحث وبررسی شده است. اطلاعاتی در مورد چگونگی هدایت اعوجاج هارمونیکی ذکرنشده است و میان مشترکین و شرکت‌های‌توزیع، مباحثه ای صورت نپذیرفته و توافقی نیز حاصل نشده است. شیوه جدیدی در استاندارد اروپایی IEC555-2 ارائه شده است که در آن مستقیماً کاهش آلودگی هارمونیکی به جای تولید آن مورد توجه قرار گرفته است [3].

بعلاوه بایستی شیوه جدیدی در محاسبه ارزش هارمونیکی اعمال گردد که در آن به جای ولتاژهای هارمونیکی از جریان هارمونیکی استفاده شده باشد.

۳. تلفات توان

تعریف توان مسأله ای است که در قرن بیستم مطرح گردیده و اولین بار توسط بادنیو[1] در سال ۱۹۲۷ ارائه شده است. صرفنظر از ایراد مهمی که به این تعریف وارد است نزد مهندسان کاملا شناخته شده و در مراکز دانشگاهی تدریس می شود. در تعریف بادنیو توان ظاهری به سه مؤلفه تجزیه می شود :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \qquad (۱)$$

که :

P : توان اکتیو Q : توان راکتیو D : توان اعوجاج

نمونه های متعددی که به چاپ رسیده است، نشان میدهند که در اکثر حالتهای خاص وقتیکه از اعوجاج ولتاژ نمی توان صرفنظر کرد، چنین روشی اشتباه بوده و و ما را به اشتباه می اندازد [4].مهمترین مزیت این روش درنبود ولتاژ ناشی از اعوجاج است که منجر به ایجاد یک روش ساده جهت جبران توان راکتیو توسط خازن می شود.

معادله توان پیشنهادی بوسیله فرایز[2] در سال ۱۹۳۱ مبتنی براین اساس است که جریان را به دو عامل عمود بر هم در حوزه زمان تجزیه‌می‌کند[4] جریان راکتیوبه شکل زیر تعریف شده است:

$$i_a = \frac{P}{|u^2|} u \qquad (۲)$$

که u منبع ولتاژ است. :

$$i_b = i - i_a \qquad (۳)$$

[1] -Budeanu

[2] -Fryze

قسمت باقی ماندهٔ جریان مبین بارگیری زائد منبع و خطوط انتقال می باشد. استفاده از این معیار به معادله توان زیر منجر می گردد:

$$S^2 = P^2 + Q^2_F \qquad (٤)$$

معادله فوق که بوسیله شپرد و زکیخانی[1] در سال ۱۹۷۲ پیشنهاد شده بر اساس تجزیه جریان اصلی به دو مؤلفهٔ جریان i_R [4] ((همفاز با ولتاژ منبع)) و جریان i_r ((عمود بر ولتاژ منبع)) می باشد،

$$i = i_R + i_r \qquad (٥)$$

معادلهٔ توان شپرد و زکیخانی بصورت زیر است ،

$$S^2 = S^2_R + Q^2_r \qquad (٦)$$

که در آن توان راکتیو :

$$Q_r = |u||i_r| \qquad (٧)$$

معادلهٔ توان فوق بسیار مفید بوده زیرا شامل توان اکتیو نمی باشد. بنابراین برای اولین باراین توانایی را ایجاد می کند که تنها با استفاده از جبرانسازی توان راکتیو، توان ظاهری راحداقل سازیم کم کردن توان راکتیو {رابطهٔ (۷)} به کمینه کردن جریان منبع منجر می شود.

تعاریف متعددی از توان الکتریکی وجود دارد که در آنها آثار هارمونیکی لحاظ شده است [4]. مهمترین آنها عبارتند از :

- معادله توان کیمبارک[2]
- تعریف توان زارنکی[2]
- معادله توان دپنبراک[3]
- معادله توان کاستر و مور[4]
- معادله توان انسلین و وان ویک[5]

اهمیت این تعاریف وقتی آشکارمیگرددکه‌شکل موج ولتاژ بشدت دچار اعوجاج شده باشد.وقتیکه اعوجاج ولتاژ کوچکتر است نظیرمواردی که اعوجاج درسمت تغذیه‌کننده فیدررخ داده است،فرم معادلات‌توان‌ساده‌ترمی شود و اغلب آنها با مقدار مشابهی از توان راکتیو جبران می شوند. ضریب توان واقعی بصورت زیر تعریف شده است :

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{\sqrt{I^2_1 + I^2_2 + \ldots + I^2_n}} \cos\Phi = k_1 \cos\Phi \qquad (٨)$$

ضریب تصحیح ضریب توان در معادلهٔ (۸) بصورت تابعی از ضریب اعوجاج هارمونیک کل تعریف شده است:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \qquad (٩)$$

[1] -Shepard & Zakikhani

[2] -Kimbark

[2] -Czarnecki

[3] -Depenbrock

[4] -Kusters & Moore

[5] –Enslin & Van Wyk

که :

$$THD = \frac{\sqrt{\Sigma_{i=2} I_i^2}}{|I_1|} \qquad (۱۰)$$

حداقل کردن ضریب توان تعریف شده در معادلهٔ (۸) به کمینه شدن تلفات در شبکه های توزیع منجر می گردد. جریان اصلی به دو مؤلفه تقسیم شده است :

$$I^2 = I^2_{active} + I^2_{non-active} \qquad (۱۱)$$

که منجر به دو تعریف از تلفات توزیع می شود :

$$\Delta P = \Delta P_{active} + \Delta P_{non-active} = RI^2_{active} + RI^2_{non-active} \qquad (۱۲)$$

که $\Delta P_{non-active}$ تلفات در شبکه های توزیع ناشی از شار توان غیر اکتیو می باشد. تلفات غیر اکتیو در شبکه های تغذیه کننده با جبرانسازی توان راکتیو و کاهش اعوجاج هارمونیکی ،کاهش یافته است. استفاده از روابط (۸) ،(۹)،(۱۰)و(۱۱) در معادلهٔ(۱۲) منجر به فرمول (۱۳) شده است که در آن تلفات تابعی از ضریب اعوجاج هارمونیکی کل گردیده که اعوجاج جریان و ضریب جابجایی را توأماً شامل می شود.

$$\Delta P = RI^2_{active} \frac{(1+THD^2)}{\cos^2 \Phi} \qquad (۱۳)$$

٤. محاسبهٔ هزینهٔ شار توان راکتیو

به منظور محاسبهٔ کیفی وکمی شار توان راکتیو و تلفات متناظر با منابع مولد توان راکتیوواعوجاجهای هارمونیکی، بایستی شبیه سازی انجام گیرد تا تلفات برای یک مقدار دادهشده ازتوان ماکزیمم درمقادیرمختلفضریب توان محاسبه گردد. در این مقاله نتایج مطالعات بدست آمده در شبیه سازی بر روی مصرف کننده های صنعتی تغذیه شده از فیدرهای ۱۱ کیلوولت آورده شده است. چنین مشترکینی مشخصهٔ بارز شبکه های توزیع کشور استرالیا می باشد. برخی از نتایج در شکلهای ۳ و ٤ نشان داده شده است.

کاملاً واضح است که تأثیر ضریب اعوجاج هارمونیکی کل در تلفات توان خیلی مهم نبوده و استفاده از رابطهٔ (۱۳) آثار شار هارمونیکی در سیستمهای قدرت را شامل می باشد. بنابراین نیاز به یک تعریف جدید از ضریب توان می باشد که در آن آثار هارمونیکهای بالاترمنظورشده باشد.اخیراً شیوهٔ جدیدی ابداع گردیده که در آن اثر توپولوژی مداردرتلفات دخالت داده شده است[5].در این شیوه کاربرد ضریب توان تنظیمی هارمونیک به عنوانمعیاراصلی در تنظیم تعرفه های برق معرفی شده است.ضریبتوانتنظیم شدهٔ

هـارمونیکی‌بـرای محاسـبهٔ آثـار مـنفی شـار هـارمونیکی تغذیـه کنـنده هـا اسـتفاده شـده است.

ضـریب اعوجـاج هـارمونیکی کـل بـه شکل زیر تعریف شده است :

$$THD_{adjusted} = \frac{\sqrt{\Sigma_{i=2} k_i I_i^2}}{|I_1|} \qquad (١٤)$$

که k_i ضریب وزنی می باشد.

روشـهای بسـیاری بـرای تعییـن ضـرائب وزنـی وجـود دارد کـه آنهـا را بصورت تابعی از جـریانها یـا مؤلفـه هـای هارمونیکی معرفی مـی کـند. بـرخی از ایـن روابـط در زیر آورده شده است[5] :

A. $k_i = N$

B. $k_i = N^{1.333}$

C. $k_i = \sqrt{N}$

D. $k_i = \left[1 + X(N^2 - 1)\right]$

لیسـت فـوق تـنها شـامل بـرخی از تعـاریف ممکـن مـی باشـد و تعییـن ایـنکه بهـترین تـابع بـرای ضـرائب وزنـی چگونـه است هنوز تحت بررسی می باشد.

وقـتی کـه ضـریب اعوجـاج هـارمونیکی جدیـد بـرای محاسـبهٔ تـلفات در شبکهٔ توزیع بکـار بـرده شـود، نمـی توانـد مستقیماً تلفات ناشـی از شـار تـوان راکـتیو را شـامل شـود بـلکه تـلفات و آثـار مـنفی هـارمونیکی را توأمـاً در تغذیـه کنـنده هـای شـبکه در نظـر می گیرد.

کاربـرد ضـریب تـوان تـنظیم شـده بـا اسـتفاده از فرمولاسـیون B (نظیـر مـواردی که درشـکل ۲ نشـان داده شـده) در جـدول ۱ درج گـردیده اسـت. کاربـرد ضـریب تـوان تـنظیمی در یکسـو کنـنده هـای شـش فـازهٔ تغذیـه کنـندهٔ بـار مقاومـتی نیـزدر جـدول ۲ آورده شده است.

مورد	تنظیم نشده	تنظیم شده
$I_1[A]$	505	505
$\sqrt{I_i^2}$	70	232
THD[%]	14	46
pf	0.79	0.72
$\Delta P[kW]$	254	302

جدول ۱- تأثیر ضریب توان تنظیمی بر تلفات محاسبه شده

مورد	تنظیم نشده	تنظیم شده
$I_1[A]$	100	100
$\sqrt{I_i^2}$	27	112
THD[%]	27%	112%
pf	0.94	0.65
$\Delta P[kW]$	116	225

جدول ۲- تأثیر ضریب توان تنظیمی بر تلفات محاسبه شده

۵. نتیجه گیری

افـزایش آلودگـی هـارمونیکی سیسـتمهای قـدرت ناشـی از نصـب وسـایل جـبران کنـندهٔ گـران قیمـت مـی باشـد. بررسـی هـایی بمـنظور محاسـبهٔ اقتصـادی

بایستی انجام پذیرد که در آن ارزش توان راکتیو تحویل داده شده به شبکه، محاسبه شده باشد. درتعریف ضریب توان واقعی بصورت حاصلضرب ضریب اعوجاج جریان و ضریب جابجایی، ارزش شار هارمونیکی بطور کامل منظور نشده است. یکی از راه حلهای ممکن، دخالت دادن ضرائب وزنی می باشد که منجر به ضریب توان تنظیم شدهٔ هارمونیکی می شود. این ضریب، اولاً برای محاسبهٔ بهای توان راکتیو تحویل داده شده به شبکه و ثانیاً بمنظور تشویق نمودن مشترکین جهت سهیم شدن در توسعه و ترمیم شبکه، استفاده می شود.

انتخاب بهترین تابع تنظیم کننده نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. اما مهمترین آثار در سوق دهی حل مسائل جریان با جبرانسازی آلودگی هارمونیکی در شبکه های توزیع را بهمراه خواهد داشت.

٦. مراجع

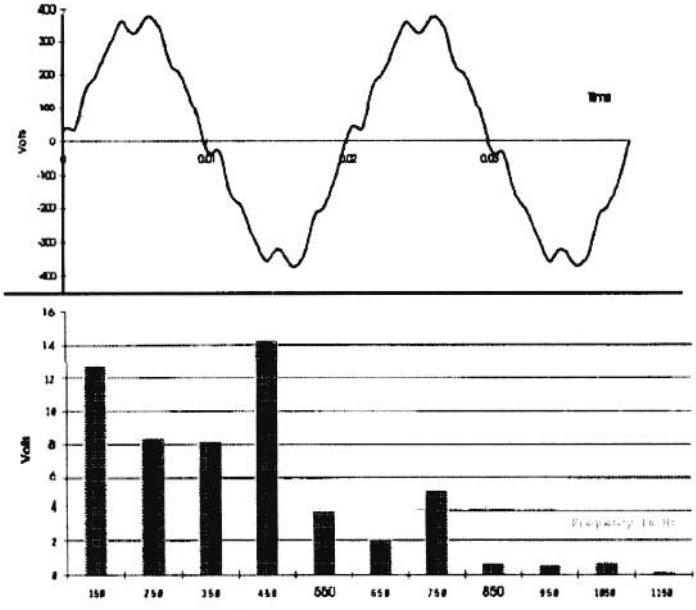
1. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992.

2. Australian Standard 2279, "Disturbances in mains supply networks", Part 1 & 2,1991.

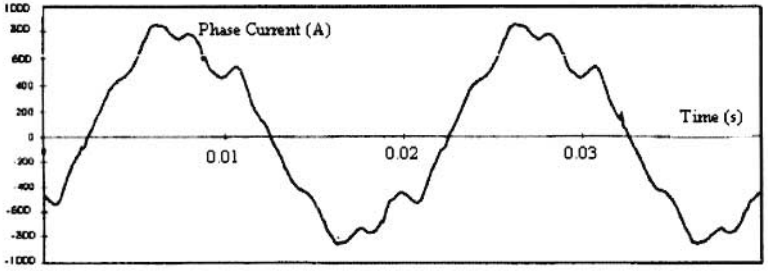
3. IEC 555-2, "Disturbances in supply systems caused by household appliances in similar electrical equipment" ,Part 2,Harmonics, 1982.

4. Czarneki L. S. , "Comparison on power definitions for circuits with nonsinusoidal waveforms", IEEE "Nonsinusoidal situations: Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power" , 1990.

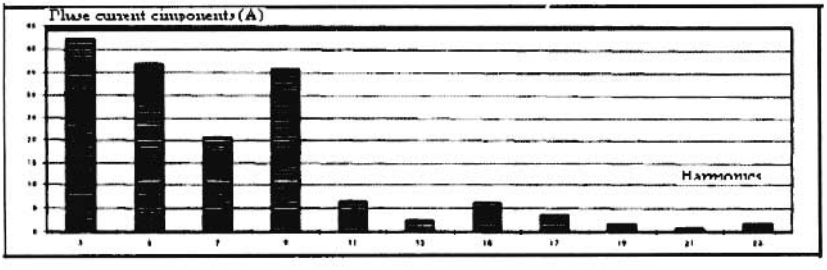
5. McEachern A., Grady W. M., Moncrief W. A., Heydt G. T., McGranaghan M., "Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some proposed Rate Structures", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 10, No1, Jan. 95.



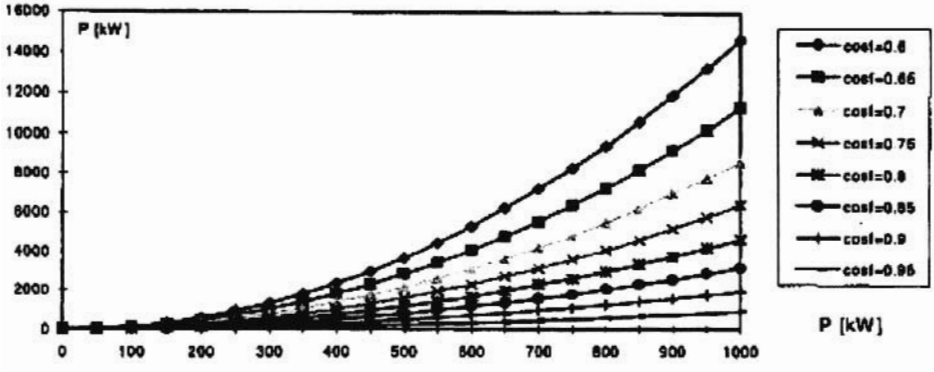
شکل ۱ – منبع ولتاژ – بالاتر – شکل موج . پایین تر – آنالیزهای هارمونیکی THD=9.4%



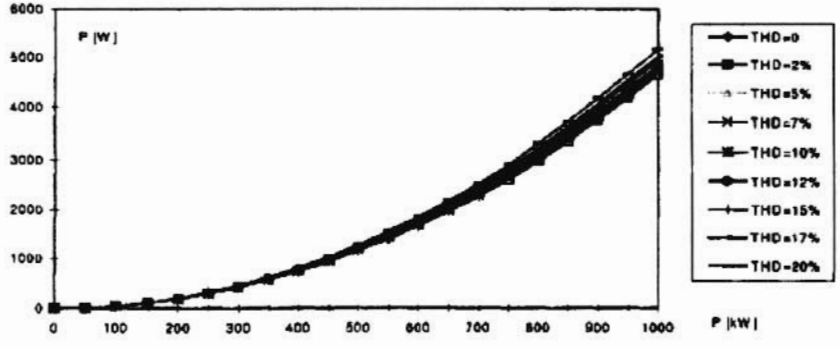
شکل ۲-الف: منبع جریان . شکل موج جریان



شکل ۲-ب: منبع جریان . آنالیزهای هارمونیکی THD=14%



شکل ۳: تلفات توان در یک اهم از فیدرهای تغذیه برای THD=0



شکل٤ : تلفات توان در یک اهم از فیدرهای تغذیه برای $\cos\varphi = 0.8$ برحسب تابعی از THD