

تخمین و جایابی منابع میان‌هارمونیک در سیستم‌های قدرت با استفاده الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده و روش امیدانس میان‌هارمونیک

پریسا سرافراز و حمید رضا محمدی

^۱دانشگاه کاشان ، parisa.sarafraz@yahoo.com

^۲دانشگاه کاشان ، mohammadi@kashanu.ac.ir

چکیده - یکی از مشکلات کیفیت توان، میان‌هارمونیک‌ها می‌باشند که با افزایش کاربرد ادوات الکترونیک قدرت گسترش روزافزونی داشته‌اند. بارهای شامل سیکلوکانورترها، درایوهای تنظیم سرعت و همه‌ی بارهایی که به طور سنکرون با فرکانس اصلی سیستم قدرت نوسان نمی‌کنند، می‌توانند منبع میان‌هارمونیک باشند. با توجه به اثرات منفی میان‌هارمونیک‌ها در شبکه‌ی قدرت نظیر فلیکر و نوسان ولتاژ، شناسایی منابع میان‌هارمونیک توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده است. شناسایی منابع میان‌هارمونیک مستلزم تخمین صحیح مؤلفه‌های میان‌هارمونیک می‌باشد. در این مقاله از روش الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده برای تخمین مؤلفه‌ها استفاده شده است. همچنین روشی بر مبنای امیدانس میان‌هارمونیک برای جایابی منابع میان‌هارمونیک به کار گرفته شده است. برای نمایش کارایی این روش یک سیستم واقعی که در آن یک درایو تنظیم سرعت بعنوان بار میان‌هارمونیک‌زا حضور دارد، با استفاده از نرم افزار متلب/ سیمولینک شبیه‌سازی شده و نتایج مؤید قابلیت روش فوق در جایابی منابع میان‌هارمونیک‌زا می‌باشد.

کلید واژه- جایابی منابع میان‌هارمونیک، درایو تنظیم سرعت، گروه هارمونیک ، میان‌هارمونیک

۱- مقدمه

تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک پرداخته شود. اخیراً مطالعات زیادی در زمینه‌ی اندازه‌گیری میان‌هارمونیک‌ها [۵-۱] و روش‌هایی برای کاهش آنها ارائه شده‌اند [۷-۶]. الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده نیز اخیراً معرفی شده است که نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر می‌باشد [۸]. البته در این مرجع این روش برای تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک یک سیگنال از پیش تعریف شده و معلوم به کار رفته است.

پس از اندازه‌گیری مؤلفه‌های میان‌هارمونیک، بایستی منبع میان‌هارمونیک تشخیص داده شود. روش‌هایی برای تشخیص منابع میان‌هارمونیک نیز پیشنهاد شده است. از جمله روش جهت توان میان‌هارمونیک که این روش هم از نظر مطالعه‌ی موردی و هم از نظر مطالعات شبیه‌سازی در تشخیص منبع میان‌هارمونیک موفق بوده است [۱۰-۹]. اگرچه محدودیت اصلی این روش کوچک بودن اندازه‌ی توان اکتیو میان‌هارمونیک است، بطوری که اندازه‌گیری آنها مشکل بوده و ممکن است منجر به نتیجه‌گیری نادرست شود. روش‌های دیگری نیز در سایر مراجع برای تعیین منابع فلیکر ارائه شده‌اند [۱۲-۱۱]. چون میان‌هارمونیک‌ها نوسانات شکل موج و در نتیجه فلیکر را ایجاد می‌کنند، از این روش‌ها نیز می‌توان استفاده کرد. همچنین روشی بر

در شبکه‌ی قدرت به دلیل استفاده از بارهایی مانند سیکلوکانورترها، درایوهای کنترل سرعت و کوره‌های قوس الکتریکی، علاوه بر هارمونیک‌ها، میان‌هارمونیک‌ها نیز وجود دارند. فرکانس میان‌هارمونیک‌ها ضریب غیرصحیحی از فرکانس اصلی سیستم قدرت می‌باشند که بصورت زیر قابل نمایش‌اند:

$$f_i \neq hf \quad (1)$$

در این رابطه h عدد صحیح بزرگتر از صفر، f_i فرکانس میان‌هارمونیک و f فرکانس اصلی سیستم است.

حضور میان‌هارمونیک‌ها در سیستم قدرت نه تنها مشکلات ناشی از هارمونیک‌ها مانند تداخل سیگنال، اضافه ولتاژ و گرم شدن بیش از حد تجهیزات را به بار می‌آورد، بلکه مشکلاتی نظیر فلیکر، اشباع ترانس‌های جریان، نوسان ولتاژ و غیره را نیز به وجود می‌آورد [۱۱]. از این‌رو اندازه‌گیری و جایابی میان‌هارمونیک‌ها برای کاهش و حذف آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. بدین منظور، اولین قدم، شناسایی منابع تولید آنها می‌باشد که برای رسیدن به این هدف بایستی ابتدا به

مؤلفه‌های هارمونیک تولید شده در لینک dc بعلت حضور اینورتر به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{h_{dc}^{os}}(m_f, j, r) = |m_f j \pm r| \cdot f_{os} \quad v = 1, 2, \dots \quad (3)$$

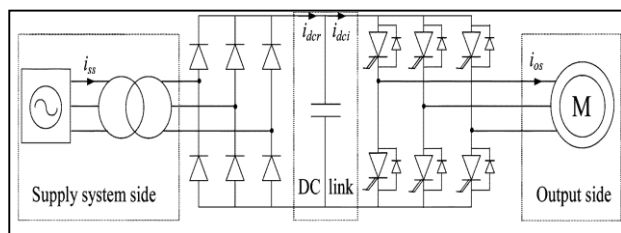
در این رابطه f_{ss} فرکانس اصلی منبع، f_{os} فرکانس اصلی خروجی، $f_{h_{ss}}$ فرکانس هارمونیک سمت منبع، $f_{h_{dc}^{os}}$ فرکانس هارمونیک بخش dc ناشی از اینورتر، تعداد پالس‌های یکسوکننده و m_f ضریب مدولاسیون فرکانس می‌باشد.

همچنین فرکانس‌های میان‌هارمونیک ناشی از مدولاسیون این مؤلفه‌های هارمونیک سمت منبع (i_{ss}) به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{ih_{dc}}(v, m_f, r, j) = |f_{h_{ss}}(v) \pm f_{h_{dc}^{os}}(v)|$$

$$v = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$f_{ih_{dc}}$ فرکانس میان‌هارمونیک سمت منبع بوده و j و r مقادیر صحیحی هستند که در جدول ۱ آورده شد است.



شکل ۱: طرح درایو pwm

جدول (۱): مقادیر مختلف r و j برای مقادیر مختلف m_f

| m_f | فرد | | زوج | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|
| | j | r | j | r |
| غیر مضرب ۲ | صحیح زوج | صحیح زوج | صحیح زوج | صحیح |
| | صحیح فرد | صحیح فرد | صحیح فرد | |
| مضرب ۳ | j | r | j | صحیح زوج |
| | صحیح فرد | صحیح فرد | صحیح زوج | |
| مضرب ۳ | j | r | j | صحیح فرد |
| | صحیح زوج | صحیح زوج | صحیح زوج | |

۳- تخمین میان‌هارمونیک‌ها با استفاده از الگوریتم

مینیمم‌سازی انرژی پخش شده

۳-۱- کلیات تخمین میان‌هارمونیک‌ها

به وسیله‌ی قضیه‌ی فوریه هر شکل موج تکراری غیر سینوسی $i_s(t)$ می‌تواند با مجموعه‌ای از سیگنال‌های سینوسی با فرکانس‌های مختلف نمایش داده شود:

مبنای امیدانس میان‌هارمونیک [۱۳] نیز ارائه شده است. از آنجایی که این روش تنها به اندازه‌ی تقریبی امیدانس میان‌هارمونیک‌ها نیاز دارد نسبت به روش‌های جهت توان قوی‌تر است. در مرجع [۱۳] منبع میان‌هارمونیک به صورت یک منبع جریان با دامنه و فرکانس از پیش تعریف شده در نظر گرفته شده است و در شرایط بار واقعی مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

در این مقاله با استفاده از الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده و روش امیدانس میان‌هارمونیک ضمن تخمین مؤلفه‌ی میان‌هارمونیک جایابی منبع میان‌هارمونیک در یک سیستم با حضور بار واقعی درایو تنظیم سرعت [۱۴-۱۵] ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

ساختار مقاله به این صورت می‌باشد: در بخش ۲ درایو تنظیم سرعت به عنوان منبع میان‌هارمونیک بررسی می‌شود. در بخش ۳ تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بار با استفاده از الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده ارائه شده است. در بخش ۴ نیز جایابی منابع میان‌هارمونیک به روش امیدانس میان‌هارمونیک معرفی شده و نهایتاً در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۲- مؤلفه‌های هارمونیک و میان‌هارمونیک تولید شده در

درایو تنظیم سرعت

یکی از منابع میان‌هارمونیک، درایوهای تنظیم سرعت برای موتورهای سنکرون یا القایی می‌باشند. درایو تنظیم سرعت یک مبدل فرکانسی است که فرکانس تغذیه‌ی ورودی را به یک فرکانس خروجی مورد نظر تغییر می‌دهد. بلوک دیاگرام درایو تنظیم سرعت با تغذیه‌ی اینورتر منبع ولتاژ در شکل ۱ نشان داده شده است. از روش مدولاسیون پهنای پالس برای تولید پالس‌های فرمان سوئیچ‌های اینورتر استفاده شده است. این درایوها به علت تداخل بین یکسوکننده و اینورتر، مؤلفه‌های میان‌هارمونیک را در جریان‌های سمت منبع، لینک dc و سمت خروجی تولید می‌کنند که فرمول‌هایی برای پیش‌بینی آنها ارائه شده است [۱۶]. مؤلفه‌های هارمونیک جریان سمت منبع (i_{ss}) به صورت زیر خواهد بود:

$$f_{h_{ss}}(v) = |(v-1)q_{ss} \pm 1| \cdot f_{ss} \quad (2)$$

$$v = 1, 2, \dots$$

$$I_s^*[f_k] = \sqrt{P^*[f_k]} \quad (۱۳)$$

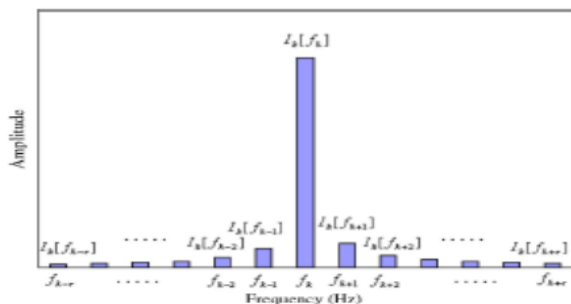
۳-۳- تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک با استفاده

از الگوریتم مینیمم‌سازی انرژی پخش شده

طول پنجره‌ی نمونه برداری شده (N) برای آنالیز تبدیل فوریه گسسته نقش مهم و تعیین کننده‌ای در دقت پاسخ دارد. با توجه به طیف فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه گسسته که در شکل ۲ نشان داده شده است مشاهده می‌شود که در مورد مؤلفه‌ی غالب، مؤلفه‌ی سمت راست آن نسبت به سمت چپ آن بزرگتر است. یعنی $I_h|f_{k+1}| > I_h|f_{k-1}|$ در این شرایط طول پنجره زیاد است. در مقابل اگر دامنه‌ی بزرگتر در سمت چپ مؤلفه‌ی غالب قرار گیرد، یعنی $I_h|f_{k+1}| < I_h|f_{k-1}|$ طول پنجره کافی نخواهد بود. هدف این روش این است که طول پنجره را براساس شرایط پخش انرژی اصلاح کند. به این صورت که کمیتی به عنوان کل انرژی پخش شده حول فرکانس غالب یعنی $p_m^{**}(f_k)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_m^{**}[f_k] = \sum_{\Delta k=\tau}^{+\tau} (I_h[f_{k+\Delta k}])^2 - (I_h[f_k])^2 \quad (۱۴)$$

و هدف مینیمم کردن مقدار انرژی پخش شده می‌باشد.



شکل ۲: پخش انرژی حول مؤلفه غالب

این روش بدنبال یافتن طول پنجره‌ی مناسب می‌باشد. به این صورت که اگر $I_h|f_{k+1}| > I_h|f_{k-1}|$ باید N کاهش یابد و اگر $I_h|f_{k+1}| < I_h|f_{k-1}|$ بایستی N افزایش یابد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که انرژی پخش شده $p_m^{**}(f_k)$ به کمترین مقدار توان از قبل تعریف شده (p_{min}) برسد. جزئیات بیشتر در شکل ۳ آورده شده است.

$$i_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_s(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (۵)$$

$$I_s(k\omega_0) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \quad (۶)$$

که ω_0 فرکانس زاویه‌ای اصلی است و $I_s(k\omega_0)$ ضریب k ام فوریه است. فرض کنید شکل موج $i_s(t)$ با N نقطه‌ی گسسته با استفاده از فرکانس نمونه برداری f_s نمونه برداری شود، به کمک روش پردازش سیگنال دیجیتال، سیگنال پیوسته‌ی $i_s(t)$ به سیگنال گسسته‌ی $i_s[n]$ تبدیل می‌شود و سپس به وسیله‌ی تبدیل فوریه گسسته به حوزه‌ی فرکانس انتقال می‌یابد. که $I_s[k]$ تبدیل فوریه گسسته‌ی $i_s[n]$ در فرکانس f_k است یعنی:

$$I_s[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_s[n] W_N^{kn} \quad (۷)$$

$$f_k = \frac{k}{T}, W_N = \exp(j2\pi/N) \quad (۸)$$

۳-۲- گروه هارمونیک

به کمک رابطه‌ی پارسوال در فرم گسسته، توان شکل موج (P) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} i_s[n]^2 = \sum_{k=0}^{N/2-1} I_s[k]^2 \quad (۹)$$

توان در فرکانس گسسته‌ی f_k اینگونه خواهد بود:

$$p[f_k] = I_s[k]^2 + I_s[N-k]^2 = 2I_s[k]^2 \quad (۱۰)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

و مقدار مؤثر دامنه‌ی هارمونیک در فرکانس گسسته‌ی f_k به صورت زیر می‌باشد:

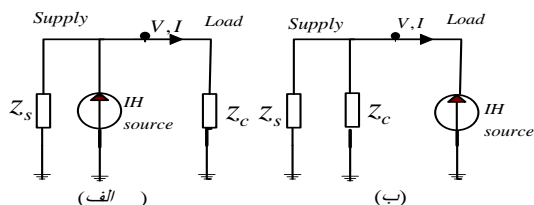
$$I_h[f_k] = \sqrt{p[f_k]} = \sqrt{2}I_s[k] \quad (۱۱)$$

از آنجاییکه توان هارمونیک در فرکانس f_k ممکن است به علت پدیده‌ی نشتی در باند فرکانسی حول f_k پخش شود، بنابراین توان کل هارمونیک‌ها در فرکانس‌های مجاور f_k را می‌توان در یک گروه بدست آورد، به شکل ۲ توجه شود. توان هر گروه یعنی $P^*[f_k]$ بین $f_{k+\Delta k}$ و $f_{k-\Delta k}$ طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P^*[f_k] = \sum_{\Delta k=-\tau}^{+\tau} (I_h[f_{k+\Delta k}])^2 \quad (۱۲)$$

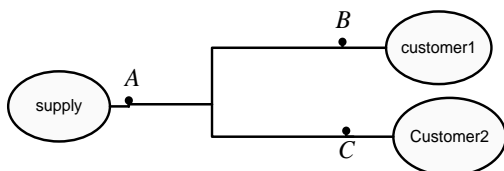
که τ عددی صحیح است و پهنای باند گروه را مشخص می‌کند. در نهایت دامنه‌ی هارمونیک اینگونه تخمین زده می‌شود:

مصرف کننده (پایین دست) را ارائه می دهد. از آنجایی که معمولاً امپدانس شبکه خیلی کوچکتر از امپدانس سمت بار است بنابراین به وسیله ای اندازه گیری امپدانس در نقاط مورد نظر می توان مشخص کرد که امپدانس متعلق به سمت شبکه است یا سمت بار. به این صورت که اگر منبع میان هارمونیک بالادست نقطه ای اندازه گیری باشد (شکل ۴.الف)، امپدانس اندازه گیری شده، همان امپدانس بار خواهد بود و اگر منبع میان هارمونیک در پایین دست نقطه ای اندازه گیری (شکل ۴.ب) باشد، امپدانس اندازه گیری شده، امپدانس شبکه خواهد بود.



شکل ۴: تعیین منبع میان هارمونیک در دو حالت مختلف: مؤلفه ی میان-هارمونیک (الف) از سمت شبکه (ب) از سمت بار می آید

این روش برای سیستم شکل ۵ که شامل دو بار می باشد بررسی می شود.



شکل ۵: دیاگرام سیستم برای منبع میان هارمونیک

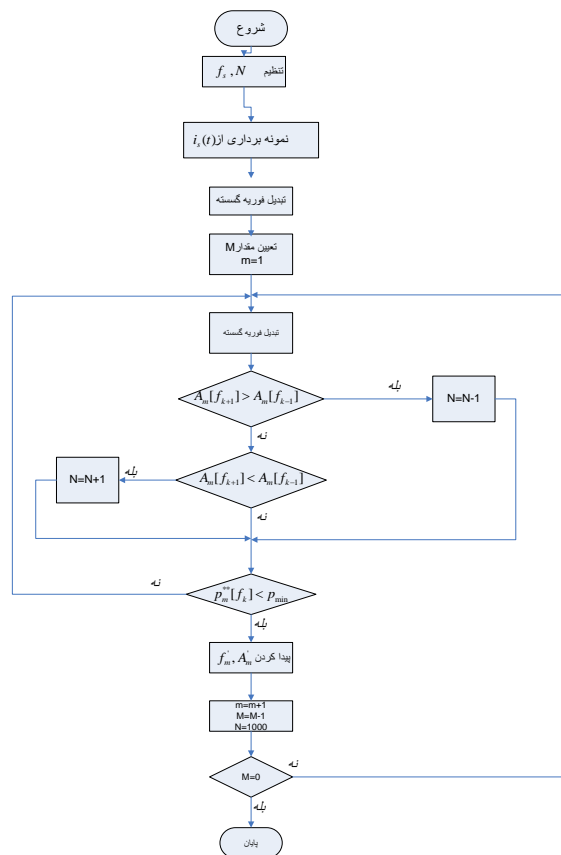
دامنه ی امپدانس میان هارمونیک اندازه گیری شده در هر نقطه ای اندازه گیری $|Z_{IH}|$ و امپدانس سمت شبکه تنظیم شده برای محاسبه ی امپدانس در فرکانس میان هارمونیک $(Z_s(f_{IH}))$ به ترتیب صورت زیر می باشند:

$$|Z_{IH}| = \left| \frac{V_{IH}}{I_{IH}} \right| = \left| \frac{V_{IH}}{I_{IH}} \right| \cos(\varphi_{IH}) + j \left| \frac{V_{IH}}{I_{IH}} \right| \sin(\varphi_{IH}) \quad (15)$$

$$= R_{IH} + jX_{IH}$$

$$Z_s(f_{IH}) = R_s + j \frac{f_{IH}}{f_1} X_s \approx j \frac{f_{IH}}{f_1} X_s \quad (16)$$

در این رابطه V_{IH} و I_{IH} به ترتیب ولتاژ و جریان میان هارمونیک اندازه گیری شده، φ_{IH} زاویه ی بین جریان و ولتاژ میان هارمونیک و X_s و R_s امپدانس اتصال کوتاه سیستم می باشند.



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم مینیمم سازی انرژی پخش شده

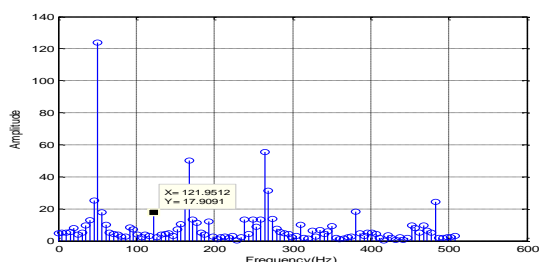
۴- شناسایی منابع میان هارمونیک

با توجه به وابستگی میان هارمونیک ها به پارامترهای مختلف می توان فرض کرد یک فرکانس میان هارمونیک به ندرت توسط بیش از یک مصرف کننده تولید می شود و تحلیل را به موارد تک منبعی برای هر مؤلفه ی میان هارمونیک محدود کرد. مانند درایو تنظیم سرعت که طبق رابطه ی (۴) به تعداد پالس های یکسوکننده، فرکانس عملکرد درایو و فرکانس بار بستگی دارد. معروف ترین روش استفاده شده برای تعیین منابع میان هارمونیک استفاده از جهت توان اکتیو است. اما چون توان اکتیو میان هارمونیک خیلی کوچک است احتمال خطای اندازه گیری زیاد ارائه شده است که جهت جایابی منابع میان هارمونیک عملکرد مطلوبی دارد. شکل ۴ به توضیح این روش کمک می کند. این شکل مدار معادل نورتن مدار مورد نظر را نمایش می دهد و دو حالت مختلف از نقطه ای اندازه گیری بین منبع (بالادست) و

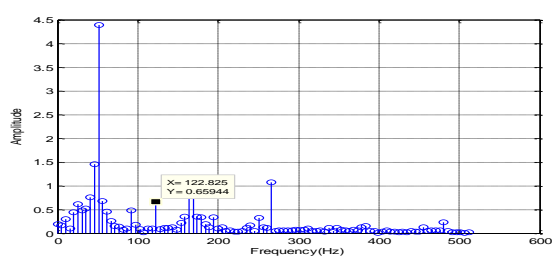
جدول (۲): پارامترهای مدار شبیه‌سازی

| | | | | |
|-----|----------------------|--------|---------------------------|-------------|
| ۲۲۰ | ولتاژ منبع (V) | ۰,۷۲ | شاخص مدولاسیون دامنه | |
| ۵۰ | فرکانس منبع (Hz) | ۹ | شاخص مدولاسیون فرکانس | |
| ۳ | توان نامی موتور (Hp) | ۱۲ | فرکانس خروجی اینورتر (Hz) | |
| ۲۲۰ | ولتاژ نامی موتور (V) | ۶ | تعداد پالس یکسو کننده | |
| ۲۰ | خازن (μf) | ۱۰ | مقاومت | امپدانس خطی |
| | | ۱۲۵,۶۷ | سلف | بارها (Ω) |
| | | ۱ | مقاومت | امپدانس |
| | | ۱۲,۵۶۷ | سلف | شبکه (Ω) |

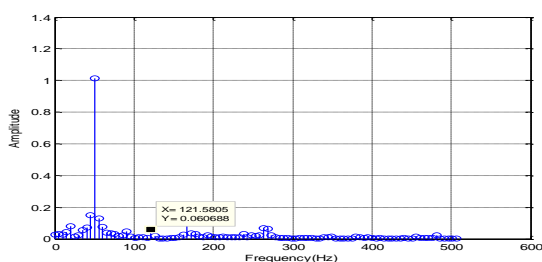
با توجه به رابطه‌ی (۴) و مقادیر ارائه شده در جدول ۲ میان-هارمونیک‌های ۲۲، ۱۲۲ و... در جریان ورودی این سیستم وجود دارند. با استفاده از الگوریتم مینیمم سازی انرژی پخش شده، طیف فرکانسی ولتاژ نقطه مشترک و جریان بارها و منبع برای میان‌هارمونیک ۱۲۲ هرتز در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷: طیف ولتاژ نقطه اتصال مشترک



شکل ۸: طیف فرکانسی جریان مصرف کننده ۱

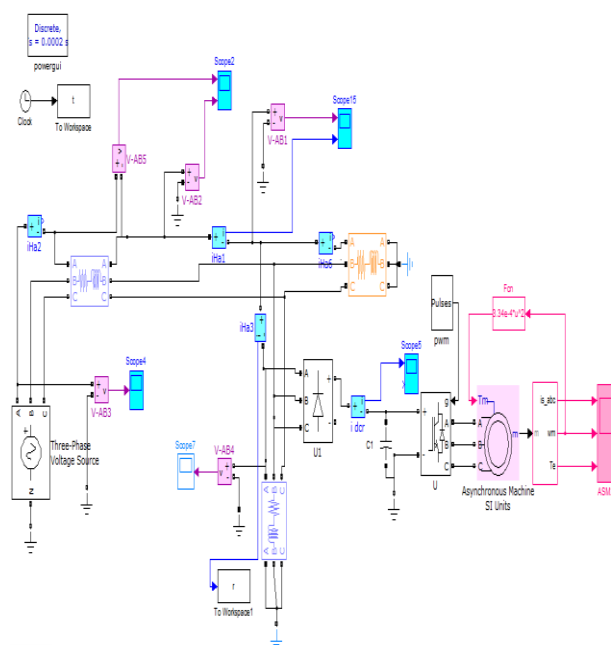


شکل ۹: طیف فرکانسی جریان مصرف کننده ۲

در این صورت برای اندازه‌گیری‌های سمت بار مانند B و C در شکل ۵ اگر $|Z_{IH}|$ و امپدانس شبکه $|Z_S|$ نزدیک به هم نباشند امپدانس اندازه‌گیری شده احتمالاً امپدانس بار است و در نتیجه شبکه، منبع میان‌هارمونیک است. همچنین اگر $|Z_{IH}|$ و $|Z_S|$ نزدیک به هم باشند، امپدانس اندازه‌گیری شده امپدانس شبکه است. بنابراین بار، منبع میان‌هارمونیک است. این روش نیاز به ارزیابی دقیق ندارد و اگر تفاوت نسبی بین امپدانس اندازه‌گیری شده و امپدانس تخمینی سیستم کمتر از ۲۰٪ باشد می‌توان آنها را نزدیک به هم دانست.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای تأیید صحت روش مطرح شده، سیستمی مطابق شکل ۶ در برنامه‌ی متلب شبیه‌سازی شده است. این سیستم از یک منبع سه فاز سینوسی با فرکانس ۵۰ هرتز و دو مصرف کننده تشکیل شده است. یکی از مصرف کننده‌ها بار خطی RLC و دیگری موتور آسنکرون با درایو تنظیم سرعت به عنوان منبع تولید میان‌هارمونیک می‌باشد. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

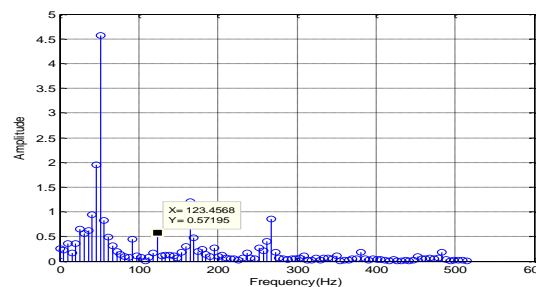


شکل ۶: دیگرام مدار شبیه‌سازی شده

سیستم با حضور درایو تنظیم سرعت و بار خطی، کارایی روش نشان داده شده است.

۷- مراجع

- [1] A. Testa, M.F.Akram, G. carpinelli, G Chang, V. Dinavahi and C.Hatziadoniu. "Interharmonics: Theory and measurement," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, No. 4, pp. 2335-2348, Oct. 2007, IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation.
- [2] T. X. Zhu, "Exact harmonics/interharmonics calculation using adaptive windows width," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, No. 4, pp. 2279-2288, Oct. 2007.
- [3] M. K. Ghartemani and M. R. Iravani, "Measurement of harmonics/interharmonics of time-varying frequencies," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, No. 1, pp. 23-31, Jan. 2005.
- [4] Z. Liu, J. Himmel, and K. W. Bonfig, "Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, No. 4, pp. 2370-2380, Oct. 2005.
- [5] T. Tarasiuk, "Hybrid wavelet- fourier spectrum analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, No. 3, pp. 957-964, Jul. 2004.
- [6] Interharmonics in Power Systems IEEE Interharmonic Task Force, Cigre 36.05/CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group Dec. 1, 1997.
- [7] R. Yacamini, "Power system harmonics: Part 4 interharmonics," *IEE Power Eng. J.*, pp. 185-193, Aug. 1996.
- [8] H.C.Lin, "Ppwer harmonic and interharmonics measurement using recursive group-harmonic power minimizing algorithm," *IEEE Trans. ON INDUSTRIAL ELECTRONICS.*, vol. 59, No. 2, pp. 1184-2543, Feb. 1193.
- [9] T. Tayjasant and W. Xu, "A case study of flicker/interharmonic problems caused by a variable frequency drive," *Proc. Int. Conf. Harmonics Quality of Power*, Lake Placid, NY, pp. 72-76, 2004.
- [10] T. Kim, E. J. Powers, W. M. Grady, and A. Arapostathis, "Real and reactive power analysis for interharmonics," *Proc. Int. Conf. in IEEE Electric Ship Technologies Symp.* Philadelphia, PA, pp. 244-247, 2005.
- [11] A. M. Dan, "Identification of a flicker source," in *Proc. Int. Conf. Harmonics Quality of Power, Athens, Greece*, pp. 1179-1181, 1998,.
- [12] P. G. V. Axelberg and M. J. Bollen, "An algorithm for determining the direction to a flicker source" *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, No. 2, pp. 755-760, Apr. 2006.
- [13] B.Nasif, J. Yong, H. Mazin, X.Wang, and W. Xu, "An impedance-based approach for identifying interharmonic sources," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, No. 1, pp. 333-340, Jun. 2011.
- [14] G. W. Chang and S. K. Chen, "An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, No. 4, pp. 2585-2593, Oct. 2005.
- [15] F. D. Rosa, R. Langella, A. Sollazzo, and A. Testa, "On the interharmonic components generated by adjustable speed drives," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, No. 4, pp. 2535-2543, Oct. 2005.



شکل ۱۰: طیف فرکانسی جریان سمت منبع

بر اساس نتایج اندازه‌گیری، امپدانس میان‌هارمونیک برای فرکانس ۱۲۲ هرتز در سه نقطه‌ی مختلف به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

محاسبه‌ی امپدانس میان‌هارمونیک در محل منبع:

$$Z_{IH,S} = \frac{17.9}{0.5719} = 31.3\Omega \quad (17)$$

محاسبه‌ی امپدانس میان‌هارمونیک در محل مصرف‌کننده ۱:

$$Z_{IH,C1} = \frac{17.9}{0.04} = 378\Omega \quad (18)$$

محاسبه‌ی امپدانس میان‌هارمونیک در محل مصرف‌کننده ۲:

$$Z_{IH,C2} = \frac{17.9}{0.66} = 27.75\Omega \quad (19)$$

همچنین امپدانس تنظیم شده‌ی سمت سیستم در این فرکانس به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Z_S(f_{IH}) = \left| 1 + j12.567 * \frac{122}{50} \right| = 30.65\Omega \quad (20)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود امپدانس میان‌هارمونیک منبع و مصرف‌کننده ۲ با خطای ۱۱٪ به هم نزدیک‌اند. بنابراین مصرف‌کننده ۲ تولیدکننده‌ی میان‌هارمونیک است.

$$\frac{30.65 - 27.55}{30.65} * 100\% \approx 11\% \quad (21)$$

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی به منظور جایابی منابع میان‌هارمونیک در سیستمی با حضور بارهای واقعی ارائه شد. در این روش ابتدا مؤلفه‌های میان‌هارمونیک در فرکانس مورد نظر با استفاده از الگوریتم مینی‌م‌سازی انرژی پخش شده تخمین زده شده و با استفاده از روش مبتنی بر امپدانس میان‌هارمونیک منابع میان‌هارمونیک جایابی شده‌اند. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در یک