

ارائه یک مدل مبتنی بر آزمایش جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی موثر بر نویز صوتی در موتور سنکرون

محمد رضا بقایی پور^{۱*}، احمد دارابی^۲ و علی دستفان^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵	تحلیل و بررسی نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی به دلیل کاربردهای گسترده و ویژه‌ای که دارند از اهمیت زیادی برخوردار است. خطای روش‌های تحلیلی و عددی در پیش‌بینی و محاسبه دقیق دامنه نویز صوتی منتشر شده از ماشین‌های الکتریکی بویژه در فرکانس‌های بالا غیرقابل چشم پوشی است و برای بررسی و تحلیل دقیق نویز صوتی منتشر شده از ماشین‌های الکتریکی نیاز به اندازه‌گیری عملی و دقیق نویز صوتی است. در این مقاله، یک مدل کارآمد و مبتنی بر آزمایش جهت تحلیل نویز صوتی منتشر شده از یک موتور سنکرون، شناسایی منابع نویز و همچنین استخراج فرکانس‌های طبیعی طراحی شده است. ابتدا سرعت مکانیکی موتور سنکرون توسط درایو کنترل سرعت (VFD) از صفر شروع به افزایش می‌کند و در طول زمان شتاب‌گیری موتور سنکرون نویز صوتی منتشر شده از آن توسط "میکروفن اندازه‌گیری" و در شرایط استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از ابزار پردازش تصویر نتایج حاصل از اندازه‌گیری مورد پردازش قرار گرفته و منابع نویز موتور سنکرون و همچنین فرکانس‌های طبیعی آن تشخیص داده می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱	
واژگان کلیدی: موتور سنکرون، اندازه‌گیری نویز صوتی، منابع نویز، فرکانس‌های طبیعی ارتعاش.	

۱- مقدمه

هارمونیک‌های میدان، نیروهای شعاعی و ریبیل گشتاور بطور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحقیقات جامعی در زمینه نویز صوتی ایجاد شده توسط ماشین‌های الکتریکی با در نظر گرفتن منابع الکترومغناطیسی، مکانیکی و آیرودینامیکی در [۵] انجام شده است. مرجع [۶] منابع ایجاد نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی را به همراه راهکار کاهش آنها معرفی نموده است. در [۷] نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور بررسی شده و روشی برای پیش‌بینی آن ارائه گردیده است. مرور کلی منابع ایجاد نیروهای شعاعی و همچنین مجموعه فرکانس‌های نویز تولید شده توسط هر کدام از منابع نویز الکترومغناطیسی، مکانیکی و آیرودینامیکی در [۸] ارائه شده است. مرجع [۹] ضمن بررسی جامع منابع نویز صوتی و روش‌های اندازه‌گیری آن، به معرفی روش‌های تحلیلی و اجزاء محدود

امروزه با گسترش روزافزون استفاده از ماشین‌های الکتریکی در کاربردهای ویژه و همچنین استفاده از ادوات الکترونیک قدرت برای کنترل ماشین‌های الکتریکی، نیاز به بررسی و کاهش نویز صوتی حاصل از آنها بیش از پیش احساس می‌شود. طراحان ماشین‌های الکتریکی از حدود ۸۰ سال پیش علاقه‌مند به بررسی و کاهش نویز صوتی ماشین‌های مورد طراحی خود بوده‌اند. برای مثال، مرجع [۱] نیروهای الکترومغناطیسی شعاعی و فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور و روتور ماشین‌های الکتریکی سنکرون را به صورت مقدماتی مطالعه نموده است. همچنین، مراجع [۲] و [۳] به بررسی نویز صوتی منتشر شده از ماشین‌های القایی سه‌فاز و تک‌فاز با در نظر گرفتن اثر شیار پرداخته‌اند. در [۴]

۲. استاد، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳. دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mbpower@gmail.com
۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود

لازم به ذکر است که استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی مستلزم آگاهی از مقادیر دقیق پارامترهای ابعادی و جنس قسمت‌های مختلف ساختار مورد مطالعه می‌باشد. با این وجود، این روش‌ها به دلیل ساده‌سازی‌های صورت گرفته دقیق نمی‌باشند [۹].

موتور سنکرون از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که ممکن است با اعمال نیرو، مرتعش شده و باعث تولید صوت شوند. ارتعاش استاتور در اثر نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی یکی از منابع اصلی ایجاد نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی است [۱-۹]. با این وجود، ارتعاش قسمت‌های دیگر نظیر ارتعاش درپوش‌ها، پوش فن و یا لرزش روتور نیز در ایجاد صوت مؤثر است [۱ و ۱۵ و ۱۷]. اغلب روش‌های عملی ارائه شده برای تشخیص فرکانس‌های طبیعی، برپایه آنالیز ارتعاش استاتور استوارند [۱۹]. در صورتی که قسمت‌های دیگر نیز ممکن است مرتعش شده و باعث ایجاد صوت شوند. علاوه بر این، ارتعاش استاتور لزوماً باعث ایجاد صوت نمی‌شود [۲۰]. یک روش عملی برای استخراج فرکانس‌های طبیعی، اندازه‌گیری صوت در تغذیه هارمونیک می‌باشد. در این روش با استفاده از $RPWM^1$ طیف وسیعی از هارمونیک‌های با دامنه یکسان در ولتاژ ورودی موتور القایی ایجاد شده و با مقایسه رفتار صوت منتشر شده بدون استفاده از درایو، فرکانس‌های طبیعی استخراج می‌شوند [۲۱]. با این وجود، روش مزبور قادر به تشخیص آن دسته از فرکانس‌های طبیعی که بدون استفاده از درایو نیز تحریک می‌شوند نمی‌باشد.

برخلاف روش‌های فوق، روش ارائه شده در این مقاله قادر است تمام فرکانس‌های طبیعی یک ماشین الکتریکی شامل فرکانس‌های طبیعی استاتور، روتور، درپوش‌ها و درپوش فن را تشخیص داده و نیز، فرکانس‌های طبیعی تحریک شده توسط منابع الکترومغناطیسی را از سایر فرکانس‌های طبیعی تفکیک کند. با استفاده از این روش همچنین می‌توان تعیین نمود که هر کدام از فرکانس‌های طبیعی در چه سرعتی و توسط کدام یک از منابع نویز (به عنوان مثال ناهم‌محوری استاتیک، ناهم‌محوری دینامیک و اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور) تشدید خواهند شد.

برای محاسبه و پیش‌بینی نویز صوتی ماشین‌های القایی و سنکرون مغناطیس دائم پرداخته است. برخی از مراجع تاثیر ناهم‌محوری و همچنین نقص بلبرینگ را بر چگالی شار فاصله هوایی و نویز منتشر شده از ماشین‌های القایی بررسی نموده‌اند [۱۰ و ۱۱]. در [۱۲] نویز حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مرجع، نویز حاصل از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور به عنوان منبع اصلی نویز در ماشین سنکرون مغناطیس دائم معرفی شده است. مطابق با بررسی‌های انجام شده در [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]، در صورت استفاده از درایو برای تغذیه ماشین‌های الکتریکی طیف هارمونیک‌های شعاعی وارد بر استاتور غنی‌تر شده و میزان نویز صوتی افزایش می‌یابد. از این رو، می‌توان با استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش پوسته استاتور و انتخاب بهینه فرکانس سوئیچینگ درایو، میزان نویز صوتی منتشر شده از ماشین را تا حد ممکن کاهش داد. علاوه بر این، در [۱۶] تاثیر استفاده از درایو بر نویز صوتی منتشر شده از موتورهای آسنکرون در سرعت‌های مختلف بررسی شده است.

محاسبه و پیش‌بینی نویز صوتی یک ماشین الکتریکی (بویژه در صورت استفاده از درایو) بدون تعیین فرکانس‌های طبیعی آن میسر نیست. از سوی دیگر، روش‌های ارائه شده برای تشخیص منابع نویز در ماشین‌های الکتریکی مستلزم تعیین فرکانس‌های طبیعی هستند [۱۷ و ۱۸]. بنابراین، ضرورت وجود روشی کارآمد در تعیین فرکانس‌های طبیعی ماشین‌های الکتریکی کاملاً محسوس می‌باشد.

استخراج روابط تحلیلی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور یک ماشین الکتریکی شار شعاعی تنها در صورت چشم‌پوشی از اثر شیار و همچنین برجستگی‌های پوسته استاتور امکان‌پذیر خواهد بود. از این رو در [۱، ۵، ۸ و ۹]، روابط تحلیلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی با این فرض که ساختار استاتور به صورت یک پوسته استوانه‌ای باشد، ارائه شده‌اند. علاوه بر این، روش‌های عددی (روش‌های اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی) نیز برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹ و ۱۹].

1. Random Pulse Width Modulation

روتور و استاتور و همچنین ناهم‌محوری استاتیک و دینامیک، گذردهی الکترومغناطیسی فاصله هوایی تابعی از زمان و زاویه فضایی خواهد بود. از این رو می‌توان چگالی شار استاتور و روتور را بصورت رابطه (۴) و (۵) نوشت:

$$B_s(\alpha, t) = F_s(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) \quad (4)$$

$$= \sum_{v=1}^{\infty} B_{mv} \cos(vpa \mp \omega t)$$

$$B_r(\alpha, t) = F_r(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) \quad (5)$$

$$= \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu pa \mp \omega_{\mu} t + \phi_{\mu})$$

$B_r(t, \alpha)$ و $B_s(t, \alpha)$ به ترتیب موج چگالی شار روتور و استاتور هستند. براساس تانسور مغناطیسی ماکسول، فشار مغناطیسی شعاعی وارد بر استاتور را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان نمود.

$$p_r = B^2(t, \alpha) / 2\mu_0 \quad (6)$$

$B(t, \alpha)$ مولفه شعاعی چگالی شار فاصله هوایی، μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی هوا، و p_r فشار مغناطیسی وارد بر استاتور است. طبق [۹]، رابطه (۶) را می‌توان بر حسب چگالی شار روتور و استاتور به صورت رابطه (۷) نوشت.

$$p_r = [B_r^2(t, \alpha) + B_s^2(t, \alpha) + 2B_r(t, \alpha)B_s(t, \alpha)] / 2\mu_0 \quad (7)$$

دو عبارت اول در رابطه (۷) به تاثیر مستقل چگالی شار روتور و استاتور بر فشار مغناطیسی وارد بر استاتور مربوط بوده و عبارت سوم، با اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور مرتبط می‌باشد. تاثیر ناهم‌محوری روتور و استاتور در عبارت سوم شدیدتر از دو عبارت اول است. همچنین برخی تحقیقات نشان داده‌اند که این عبارت در ارتعاش پوسته استاتور و در نتیجه ایجاد صوت تأثیر بیشتری نسبت به دو عبارت اول دارد [۴، ۵، ۹ و ۱۲].

عوامل زیادی مانند توزیع غیرسینوسی MMF استاتور و روتور، ناهم‌محوری، خمیدگی شفت، اثر شیار و اشباع باعث ایجاد هارمونیک در چگالی شار فاصله هوایی می‌شوند. فرکانس و مرتبه (تعداد قله‌های موج) نیروهای شعاعی حاصل از منابع اصلی نويز الکترومغناطیسی بر حسب سرعت مکانیکی روتور ماشین سنکرون روتور سیم‌پیچی شده، در جدول ۱ آورده شده‌اند [۴ و ۵ و ۹].

۲- روابط فرکانس‌های صوت حاصل از منابع مختلف نويز بر حسب سرعت موتور

بطور کلی، منابع نويز صوتی منتشر شده از یک ماشین الکتریکی شار شعاعی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود [۵]. دسته اول منابعی هستند که باعث ایجاد هارمونیک‌های فضایی یا زمانی در چگالی شار فاصله هوایی می‌شوند. این دسته از منابع نويز، با ایجاد نیروی‌های شعاعی باعث ارتعاش پوسته استاتور و در نتیجه ایجاد نويز صوتی می‌شوند (مانند هارمونیک‌های چگالی شار روتور و استاتور، ناهم‌محوری استاتور و روتور و اشباع). دسته دوم منابعی هستند که بدون ایجاد ارتعاش در پوسته استاتور باعث ایجاد نويز صوتی می‌شوند (مانند منابع آیرودینامیکی، بلبرینگ‌ها و زغال‌ها). هر کدام از منابع فوق، دسته هارمونیک‌های مختلفی را در طیف فرکانسی فشار صوت موتور به وجود می‌آورند که فرکانس‌آنها در حالت کلی تابعی از سرعت مکانیکی موتور می‌باشند [۹]. روابط تحلیلی مربوط به این توابع در ادامه این بخش به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های فضایی چگالی شار فاصله هوایی

با در نظر گرفتن یک مجموعه جریان سینوسی متعادل سه‌فاز برای استاتور به صورت زیر:

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I \sin(\omega t) \\ i_b &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

توزیع زمانی و فضایی MMF^۱ استاتور و روتور به صورت روابط (۲) و (۳) خواهد شد [۹].

$$F_s(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cos(vpa \mp \omega t) \quad (2)$$

$$F_r(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{m\mu} \cos(\mu pa \mp \omega_{\mu} t + \phi_{\mu}) \quad (3)$$

که در آن $F_s(t, \alpha)$ و $F_r(t, \alpha)$ به ترتیب موج MMF روتور و استاتور بر حسب زمان (t) و زاویه فضایی (α)، هستند. $F_{m\mu}$ و F_{mv} به ترتیب دامنه هارمونیک μ ام و v ام MMF استاتور و روتور می‌باشند. با در نظر گرفتن اثر شیارهای

1- Magneto Motive Force

می‌شوند. فرکانس نیروی شعاعی ایجاد شده f_r و مرتبه آن r به صورت رابطه (۹) خواهد بود.

$$f_r = \begin{cases} |\pm f_k - np/60| \\ \left| f_k \pm \left(\frac{np}{60} \right) \left(1 + k \frac{s_2}{p} \right) \right|, \quad r = 0, 2 \end{cases} \quad (9)$$

که در آن f_k فرکانس هارمونیک k ام جریان استاتور است. دامنه این دسته از نیروها که به دلیل توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی استاتور ایجاد می‌شوند، با افزایش بار موتور بیشتر می‌شود.

• موج نیروی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک‌های حاصل از سوئیچینگ و سایر هارمونیک‌های جریان استاتور. در این حالت f_r به صورت زیر خواهد شد:

$$f_r = |\pm f_n - np/60| \quad (10)$$

f_n هارمونیک زمانی ایجاد شده توسط درایو است که به دلیل مدولاسون برداری ایجاد می‌شود. هارمونیک‌های ایجاد شده در ولتاژ خروجی درایو مورد استفاده در این مقاله (از نوع SVM^۱) به صورت زیر است:

$$f_n = |n_1 f_{sw} + n_2 (np/60)| \quad (11)$$

f_{sw} فرکانس سوئیچینگ درایو است. n_1 و n_2 اعداد صحیح هستند بطوریکه حاصل $n_1 + n_2$ یک عدد فرد است.

۲-۳- هارمونیک‌های حاصل از منابع مکانیکی، آیرودینامیکی و یاتاقان‌ها

طبق تحقیقات صورت گرفته به وسیله [۵ و ۹ و ۱۷] در مورد فرکانس نویز صوتی ایجاد شده توسط منابع مکانیکی و آیرودینامیکی، فرکانس نویز ایجاد شده توسط منابع مکانیکی طبق رابطه (۱۲) ضرایب صحیحی از سرعت مکانیکی موتور خواهد بود. حال آنکه، پیش‌بینی دقیق فرکانس نویز ایجاد شده توسط منابع آیرودینامیکی نیازمند انجام محاسبات بسیار پیچیده و دشوار است. از این رو رابطه (۱۳) تنها برای پیش‌بینی فرکانس نویز صوتی حاصل از حرکت پره‌های فن، برپایه نتایج آماری ارائه شده است. علاوه بر اینها، مجموعه فرکانس‌های محتمل حاصل از تویی‌های یاتاقان از نوع بلبرینگ نیز مطابق با رابطه (۱۴) قابل محاسبه می‌باشد.

جدول ۱- فرکانس و مرتبه‌ی نیروی وارد بر پوسته استاتور

ماشین سنکرون قطب صاف

شماره	منابع نویز	مرتبه نیرو r	فرکانس نیرو f_r (Hz)
۱	هارمونیک‌های فضایی چگالی شار استاتور	$2(ks_1 \pm p)$	$(p/30)n$ $(p/60)(ks_2/p \pm 2)n$
۲	هارمونیک‌های فضایی چگالی شار روتور	$2(ks_2 \pm p)$	$(p/30)(1 \pm ks_2/p)n$
۳	اثر متقابل هارمونیک‌های استاتور و روتور	$ks_1 \pm ks_2 \pm 2p$	$(p/60)(ks_2/p \pm 2)n$ $(p/60)(ks_2/p)n$
۴	ناهم‌محوری استاتیک	1 2	$(p/60)(ks_2/p + 2)n$ $(p/60)(ks_2/p)n$
۵	ناهم‌محوری دینامیک	1 2	$(p/60)(2 \pm 1/p + ks_2/p)n$ $(p/60)(1/p + ks_2/p)n$
۶	اشباع مغناطیسی	$ks_1 + ks_2 + 4p$ $ks_1 - ks_2 + 2p$	$(p/60)(ks_2/p + 4)n$ $(p/60)(ks_2/p + 2)n$

در جدول ۱، f_r فرکانس نیرو بر حسب هرتز (Hz)، r مرتبه نیرو، n سرعت مکانیکی بر حسب دور بر دقیقه (rpm)، p تعداد جفت قطب، s_1 تعداد شیار استاتور، s_2 تعداد شیار روتور و ... $k = 1, 2, 3, \dots$ می‌باشد. تحقیقات انجام شده در [۴ و ۵ و ۹] نشان می‌دهند که دامنه ارتعاش پوسته استاتور (Δd) تنها توسط یک موج نیرو با فرکانس f_r و مرتبه r به صورت رابطه (۸)، با مرتبه نیرو مرتبط خواهد بود. از این رو، در بررسی ارتعاش پوسته استاتور و نویز صوتی ایجاد شده توسط ماشین‌های الکتریکی می‌توان از نیروهایی که مرتبه آن‌ها بیشتر از ۵ می‌باشد صرف‌نظر نمود.

$$\Delta d \propto 1/r^4$$

۲-۲- نیروی‌های شعاعی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور

در صورت تغذیه موتور با VFD، ولتاژ و جریان ورودی شامل هارمونیک‌های متعددی خواهد بود که به دلیل سوئیچینگ ایجاد می‌شوند. در نتیجه، محتوای هارمونیکی نیروی شعاعی وارد بر پوسته استاتور غنی‌تر شده و نویز صوتی حاصل از موتور افزایش می‌یابد. در [۹] فرکانس نیروهای حاصل از جریان هارمونیکی استاتور تحلیل و پیش‌بینی شده است. دو گروه مهم از نیروهای شعاعی ایجاد شده توسط هارمونیک‌های جریان عبارتند از:

• موج نیروی حاصل از اثر متقابل بین توزیع غیر یکنواخت فاصله هوایی و هارمونیک‌های فضایی MMF که به دلیل توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی ایجاد

شده از یک موتور سنکرون قطب صاف ارائه می‌گردد. مشخصات موتور مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. تجهیزات مورد نیاز و همچنین سیستم اندازه‌گیری در شکل ۱ نشان داده شده است. لیست تجهیزات سیستم اندازه‌گیری عبارتند از:

- (۱) موتور سنکرون روتور سیم‌پیچی شده قطب صاف با مشخصات نامی داده شده در جدول ۲.
- (۲) منبع تغذیه DC جهت تحریک روتور (جریان ۸ آمپر)
- (۳) درایو کنترل سرعت (VFD) با فرکانس سوئیچینگ ۳ kHz
- (۴) میکروفن اندازه‌گیری فشار صوت، محصول شرکت SINUS Messtechnik GmbH
- (۵) ماژول رابط بین میکروفن و کامپیوتر Apollo™ محصول شرکت SINUS Messtechnik GmbH
- (۶) کامپیوتر و نرم‌افزار پردازشگر داده‌های اندازه‌گیری شده توسط میکروفن (SAMURAI) و نرم‌افزار MATLAB جهت پس‌پردازش داده‌ها

جدول ۲- پارامترهای نامی موتور سنکرون مورد استفاده

واحد	نماد	مقدار	پارامتر
-	-	Siemens	مدل
kW	P	6.3	توان خروجی
-	m	3	تعداد فاز
V	V_T	360	ولتاژ نامی (ولتاژ خط)
-	-	Y	نوع اتصال
Hz	f_n	50	فرکانس نامی
-	p	2	تعداد جفت قطب
-	s_1	36	تعداد شیار استاتور
-	s_2	48	تعداد شیار روتور
-	-	Ball Bearing 6208-C3	یاتاقان
-	N_b	9	تعداد توپی‌های بلبرینگ
-	N_{bl}	10	تعداد پره‌های فن

در روش پیشنهادی این مقاله موتور سنکرون توسط VFD به صورت بی‌بار راه‌اندازی شده و سرعت موتور سنکرون به تدریج افزایش داده می‌شود. طیف فرکانسی فشار صوت منتشر شده از موتور سنکرون در سرعت‌های مختلف یکسان نبوده و با تغییر سرعت سنکرون موتور، نقاط پیک موجود در طیف فرکانسی فشار صوت نیز جابجا می‌شوند. فرکانس خروجی VFD و سرعت مکانیکی موتور به قدری آرام افزایش می‌یابند که در هر لحظه از زمان می‌توان از اثرات

$$f_r = k(n/60) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

$$f_r = kN_{bl}(n/60) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

$$f_{\text{Bearing}} = kN_b(n/60)(d_i/d_i + d_o), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

در روابط فوق N_b و N_{bl} به ترتیب نماینده تعداد پره‌های فن و تعداد توپی‌های بلبرینگ می‌باشند.

۲-۴- جمع‌بندی روابط تئوری ارائه شده

با توجه به تمامی معادلات فوق ملاحظه می‌شود که با صرف‌نظر از هارمونیک‌های حاصل از درایو (یا جریان غیرسینوسی)، مجموعه سایر فرکانس‌های هارمونیکی موجود در طیف فرکانسی فشار صوت موتور همواره ضرایب صحیحی از سرعت مکانیکی آن می‌باشند. بنابراین این فرکانس‌ها را می‌توان در حالت کلی به صورت $f_r = Kn$ نوشت، بطوریکه:

$$K \in \left\{ \begin{array}{l} (p/30), (p/60)(ks_2/p \pm 2), \\ (p/30)(1 \pm ks_2/p), (p/60)(ks_2/p), \\ (p/60)(2 \pm 1/p + ks_2/p), \\ (p/60)(1/p + ks_2/p), (p/60)(ks_2/p + 4), \\ k/60, kN_{bl}/60, (kN_b/60)(d_i/d_i + d_o) \end{array} \right\}$$

$, k = 1, 2, 3, \dots$

(۱۵)

۳- آزمایش استخراج طیف رنگی فشار صوت بر

حساب سرعت موتور

روش ارائه شده در این مقاله بر مبنای پاسخ صوتی موتور سنکرون روتور سیم‌پیچی شده به تغییرات سرعت مکانیکی روتور می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۵)، با افزایش فرکانس تغذیه موتور و در نتیجه افزایش سرعت مکانیکی روتور، از صفر تا حدود ۱۶۰ درصد سرعت نامی، می‌توان فرکانس نیروهای شعاعی حاصل از منابع مختلف نويز الکترومغناطیسی را در یک محدوده وسیع تغییر داد. حال می‌توان با اندازه‌گیری فشار صوت منتشر شده از موتور و استخراج طیف فرکانسی نويز صوتی آن، به ازای فرکانس‌های تغذیه مختلف، فرکانس‌های طبیعی ارتعاش اجزاء مختلف ماشین را استخراج کرد. بدین منظور، در ابتدا سیستم اندازه‌گیری و همچنین تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش معرفی می‌شوند. سپس نحوه انجام آزمایش معرفی شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری نويز صوتی منتشر

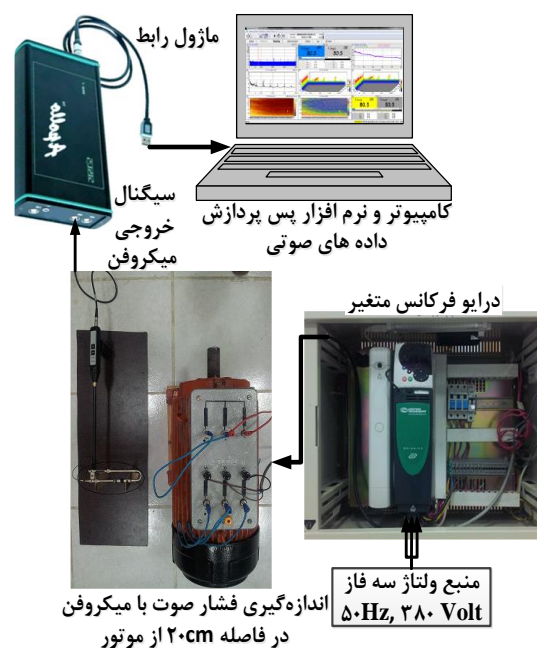
همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مکانیکی موتور نقاط پیک موجود در طیف فرکانسی فشار صوت نیز جابجا شده و مکان هندسی آنها بصورت خطوط مورب در طیف رنگی دیده می‌شود. همچنین، با توجه به روابط ارائه شده در جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های فضایی چگالی شار فاصله هوایی، خطوط مورب گذرنده از مبدأ را در طیف رنگی فشار صوت ایجاد خواهند کرد. علاوه بر این تعدادی خطوط مورب با طول از مبدأ برابر با فرکانس سوئیچینگ درایو (۳ kHz) و ضرایب صحیحی از آن نیز در طیف رنگی فشار صوت مشاهده می‌شود. با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که این دسته از خطوط که به شکل پراش نور گذرنده از یک روزنه هستند، به نوبت حاصل از VFD مربوط می‌باشند. فرکانس‌های نویز صوتی متناظر با این خطوط در بازه محدودی در اطراف فرکانس سوئیچینگ درایو و ضرایب صحیح آن پراکنده شده‌اند. با کاهش فرکانس سوئیچینگ درایو، فرکانس نویز حاصل از آن با فرکانس نویز حاصل از سایر منابع نویز تلاقی نموده و سبب افزایش میزان نویز صوتی خواهد شد. از سوی دیگر، با کاهش فرکانس سوئیچینگ درایو، تعداد بیشتری از ضرایب فرکانس سوئیچینگ در بازه صفر تا ۲۰ kHz (محدوده شنوایی گوش انسان) قرار گرفته، و در نتیجه، میزان نویز صوتی حاصل افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس سوئیچینگ درایو، نویز صوتی منتشر شده از موتور کاهش خواهد یافت، بطوریکه با انتخاب فرکانس سوئیچینگ بیشتر از ۲۰ kHz می‌توان نویز صوتی حاصل از درایو را به صفر رساند.

۴- تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش و عوامل آنها بر اساس پردازش طیف رنگی فشار صوت حاصل از آزمایش

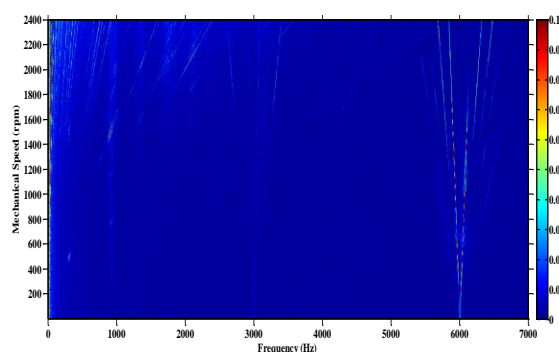
۴-۱- تعیین اولیه فرکانس‌های طبیعی ارتعاش

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که ۴ خط عمودی در فرکانس‌هایی حدود ۹۲۰ Hz، ۱۳۶۰ Hz، ۱۷۵۰ Hz و ۲۱۲۰ Hz بصورت هاله‌هایی از ذرات پراکنده (اصطلاحاً نمک-فلفی) در طیف رنگی ایجاد شده‌اند، بطوریکه تعدادی از خطوط مورب در نقاط تلاقی با این خطوط رؤیت پذیر شده و بعد از عبور از این مناطق مجدداً ناپدید می‌شوند. تعدادی از نقاط تلاقی خطوط مورب و خطوط عمودی در

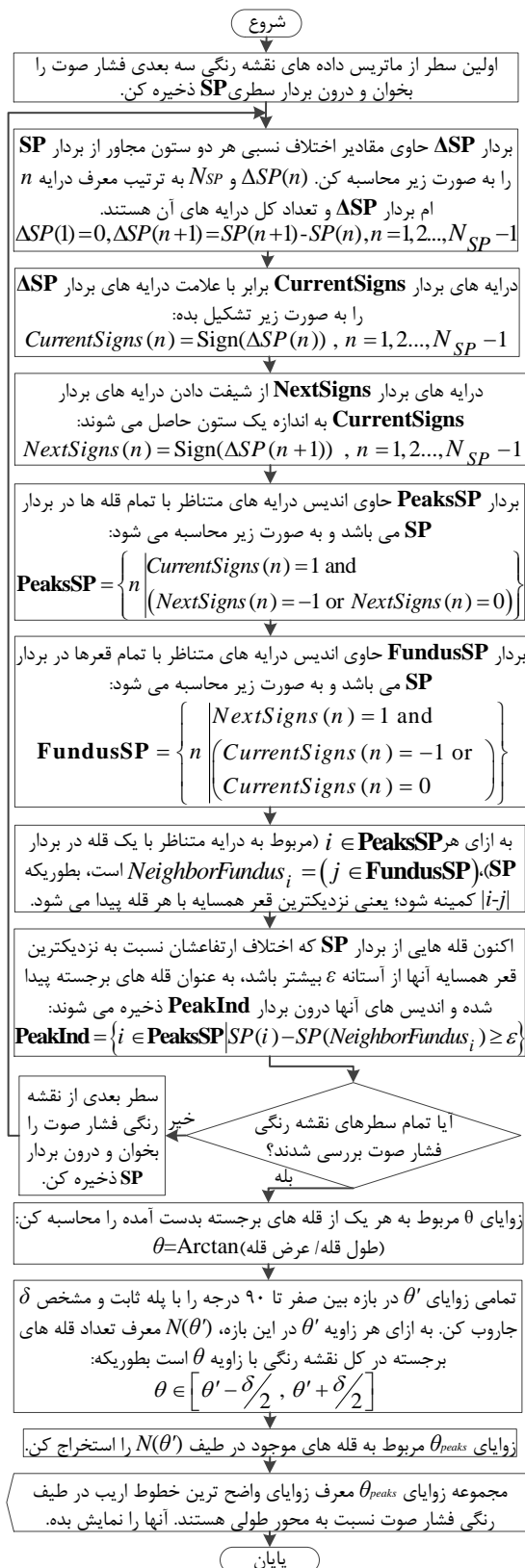
گذرای تغییر سرعت موتور صرف نظر نمود. با قرار دادن میکروفن اندازه‌گیری در فاصله ۲۰ cm از موتور سنکرون در طول زمان شتابگیری آن (مطابق شکل ۱)، فشار صوت منتشر شده از موتور در سرعت‌های مختلف مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. با استخراج طیف فرکانسی فشار صوتی در سرعت‌های مختلف، طیف رنگی مقدار مؤثر فشار صوت منتشر شده از موتور در طول زمان آزمایش به صورت شکل ۲ خواهد بود. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده سرعت مکانیکی روتور، محور افقی نشان‌دهنده فرکانس طیف فشار صوت و رنگ صفحه نیز نمایشگر دامنه فشار صوت می‌باشد. با توجه به نرخ نمونه‌برداری بالای سیستم اندازه‌گیری فشار صوت (۱۰۲ kHz)، این سیستم قادر به اندازه‌گیری فشار صوت در رنج وسیعی از صفر تا ۵۱ kHz می‌باشد، اما برای وضوح بیشتر در تصویر تنها بازه فرکانسی صفر تا ۷ kHz نشان داده شده است.



شکل ۱- تجهیزات اصلی مورد نیاز برای سیستم اندازه‌گیری

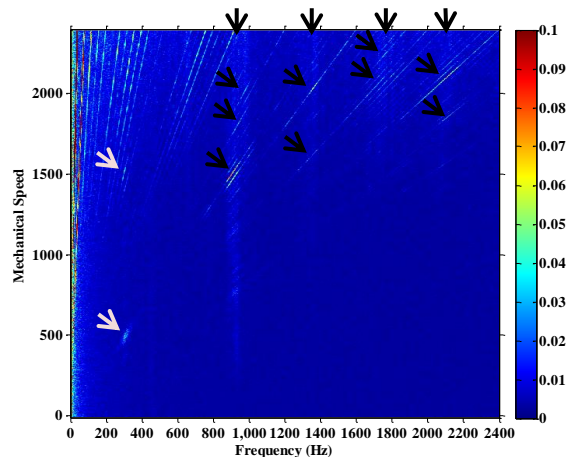


شکل ۲- طیف رنگی حاصل از اندازه‌گیری فشار صوت موتور



شکل ۴- فلوجارت الگوریتم پردازش تصویر ابداعی جهت استخراج زوایای خطوط مورب در طیف رنگی فشار صوت

شکل (۳) نشان داده شده‌اند. با توجه به آنچه که بیان شد، می‌توان این چهار فرکانس را به عنوان کاندید برای فرکانس طبیعی معرفی نمود. علاوه بر اینها، در شکل ۳ مشاهده می‌شود که تعدادی از خطوط مورب در عبور از فرکانس ۳۱۰ Hz ظاهر شده و بعد از آن دوباره ناپدید گشته‌اند. بر این اساس، علی‌رغم این که فرکانس ۳۱۰ Hz خط عمودی در طیف رنگی ایجاد نکرده، می‌تواند به عنوان کاندید برای فرکانس طبیعی ماشین مد نظر قرار گیرد. با توجه به آنچه که تاکنون بیان شد، تعداد پنج فرکانس به عنوان فرکانس‌های طبیعی معرفی شدند. با این وجود، این فرکانس‌ها بصورت تقریبی تعیین شده و هنوز بصورت قطعی نمی‌توان آنها را به عنوان فرکانس طبیعی معرفی کرد. جهت تعیین دقیق فرکانس‌های طبیعی، تحلیل دقیق‌تری در ادامه ارائه خواهد شد.



شکل ۳- تعیین اولیه فرکانس‌های طبیعی

۴-۲- ابداع و استفاده از یک الگوریتم پردازش تصویر جهت پس پردازش نتایج حاصل از آزمایش

هریک از منابع نویز ذکر شده در جدول ۱ و یا منابع مکانیکی یا آیرودینامیکی می‌توانند عامل بوجود آورنده هر کدام از خطوط مورب موجود در طیف رنگی باشند. با این وجود، با مطالب بیان شده تاکنون نمی‌توان منابع دقیق هر کدام از خطوط را مشخص نمود. به همین دلیل، ابتدا زوایای تمام خطوط مورب موجود در طیف رنگی با استفاده از یک برنامه پردازش تصویر نوشته شده در محیط نرم افزار MATLAB استخراج شده‌اند. جزئیات این الگوریتم در فلوجارت شکل (۴) نمایش داده شده است.

جدول ۳- منابع کاندید برای هر کدام از خطوط مشخص شده

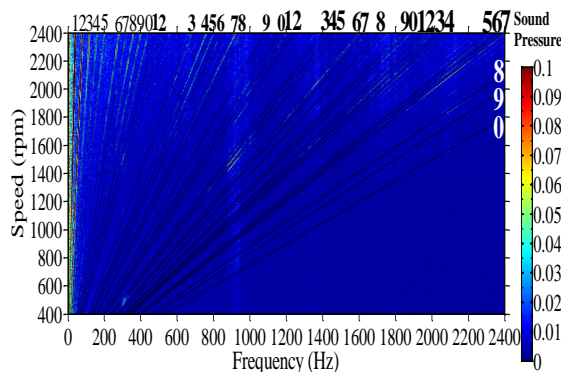
منابع کاندید برای خط			شماره منابع الکترومغناطیسی	منابع کاندید برای خط		
شماره منابع الکترومغناطیسی	تایید	ردیف		شماره منابع الکترومغناطیسی	تایید	ردیف
-	*	*	1	5	-	*
6 و 3 ←	-	*	2	-	-	*
-	-	*	3	5	*	*
4 و 3 ←	*	*	4	6 و 4, 3, 2, 1	-	*
5 ←	-	*	5	5	-	*
6 و 4, 3 ←	-	*	6	-	-	*
5	-	*	7	6 و 3	-	*
-	-	*	8	-	*	*
-	-	*	9	-	-	*
-	-	*	0	-	-	*
5	-	*	1	4 و 3 ←	*	*
-	-	*	2	5 ←	-	*
5	*	*	3	5	-	*
4 و 3, 2	*	*	4	-	-	*
-	-	*	5	6 و 3, 2	-	*
-	-	*	6	-	*	*
4 و 3	*	*	7	-	-	*
6 و 3 و 2	-	*	8	4 و 3 ←	*	*
4 و 3	*	*	9	5 ←	*	*
6 و 3	-	*	0	5 ←	-	*

در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که منابع مکانیکی به عنوان کاندید برای ایجاد تمامی خطوط مطرح می‌باشند. البته، برای بعضی از خطوط، برخی منابع الکترومغناطیسی نیز به‌عنوان کاندید تعیین گردیده‌اند. اکنون جهت تعیین دقیق منابع غالب در ایجاد نویز صوتی و فرکانس‌های طبیعی مربوط به آنها، منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط شکل (۵) به‌همراه منابع کاندید تعیین شده در جدول ۳ مد نظر قرار می‌گیرند. همانگونه که پیش از این نیز بیان شد، منابع الکترومغناطیسی نویز صوتی باعث ارتعاش اجزاء ماشین شده و به این طریق نویز صوتی ایجاد می‌کنند. هنگامی که فرکانس نیرو با یکی از فرکانس‌های طبیعی اجزاء ماشین برابر شود، تشدید (رزونانس) رخ داده و دامنه ارتعاش و در نتیجه نویز صوتی حاصل افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که دسته منحنی‌هایی در شکل (۶) که در فرکانس‌های طبیعی اولیه (یعنی 920 Hz, 1360 Hz, 1750 Hz و 2120 Hz) به مقدار ماکزیمم خود رسیده و پس از

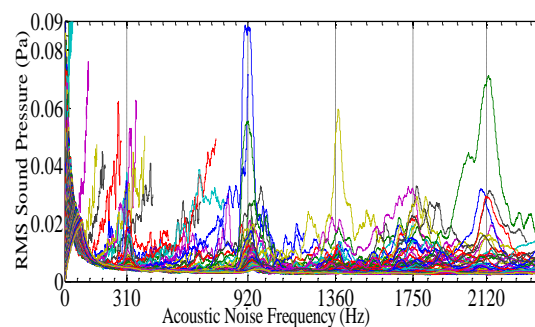
۳-۴- تحلیل تکمیلی جهت تعیین دقیق فرکانس‌های

طبیعی ارتعاش ماشین و عوامل آنها

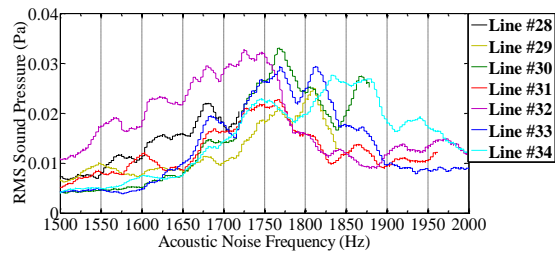
با پیاده‌سازی الگوریتم پردازش تصویر شکل (۴)، تعداد ۱۳۲ خط مورب گذرنده از مبدا در طیف رنگی فشار صوت مشخص شده‌اند. تعداد ۴۰ خط از این خطوط که وضوح بیشتری داشته و نقش پررنگ‌تری در نویز صوتی ماشین ایفا می‌کنند در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. جهت سهولت در فراخوانی، این خطوط در چهار گروه ۱۰ تایی با شماره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ (معرف مضارب ۱۰) شماره‌گذاری گردیده‌اند، بطوریکه ده تایی‌های بالاتر اندازه فونت بزرگتری دارند. به عنوان مثال، اعداد ۸ و ۰ با بزرگترین فونت به ترتیب معرف شماره‌های ۳۸ و ۴۰ می‌باشند. جهت وضوح بیشتر، با حرکت بر روی هر یک از خطوط مشخص شده، منحنی‌های تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت برحسب فرکانس صوت نیز مطابق شکل ۶ بررسی می‌شوند. اکنون با مقایسه شیب خطوط مشخص شده با روابط جدول ۱ (به انضمام روابط (۱۲) تا (۱۴) برای منابع مکانیکی و آیرودینامیکی)، برای هر خط یک یا چند منبع نویز کاندید معرفی می‌شود. نتایج بر اساس شماره‌گذاری‌های جدول ۱ و شکل (۵)، در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند.



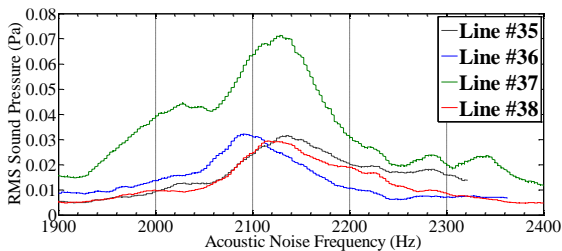
شکل ۵- خطوط عمده مشخص شده توسط پردازش تصویر



شکل ۶- منحنی‌های تغییرات فشار صوت بر حسب فرکانس صوت به‌ازای حرکت بر روی تمامی خطوط شکل ۵



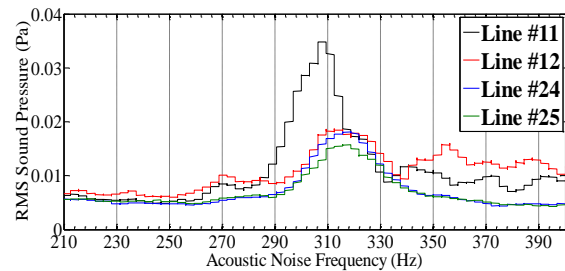
شکل ۱۰- منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط اصلی محرک فرکانس طبیعی ۱۷۵۰ هرتز



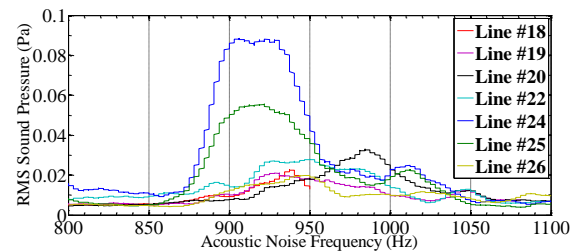
شکل ۱۱- منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط اصلی محرک فرکانس طبیعی ۲۱۲۰ هرتز

تمامی خطوط متناظر با منحنی‌های مورد نمایش در شکل-های (۷) و (۸) رفتاری مشابه با خط شماره ۱۱ دارند، بطوریکه وابستگی خاصی میان سرعت مکانیکی موتور و مقدار مؤثر فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی این خطوط وجود نداشته و تنها عامل افزایش فشار صوت بر روی این خطوط، تلاقی آنها با فرکانس‌های طبیعی مشخص شده می‌باشد. این خطوط به‌وسیله علامت فلش ← در ستون مربوط به منابع الکترومغناطیسی در جدول ۳ مشخص شده‌اند. با توجه به جدول ۳ ملاحظه می‌شود که برای تمامی خطوط مزبور علاوه بر منابع مکانیکی، منابع الکترومغناطیسی نیز به‌عنوان کاندید مطرح گردیده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خطوط مزبور به‌طور قطعی به وسیله منابع الکترومغناطیسی مشخص شده در جدول ۳ ایجاد شده‌اند. نتیجه مهم دیگر این است که فرکانس‌های طبیعی 310 Hz و 920 Hz یقیناً به اجزائی از ماشین وابسته‌اند که به‌وسیله هارمونیک‌های موجود در نیروهای شعاعی حاصل از میدان‌های دوار استاتور و روتور مرتعش می‌شوند. در مقابل، برای خطوط متناظر با منحنی-های مورد نمایش در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، منابع کاندیدی متنوعی (اعم از مکانیکی یا الکترومغناطیسی) در جدول ۳ پیشنهاد شده‌اند. برای برخی از این خطوط، تنها منابع مکانیکی پیشنهاد شده و برای برخی دیگر، منابع الکترومغناطیسی نیز مد نظر قرار گرفته‌اند. بر این اساس، نمی‌توان این خطوط را به‌عنوان محصول مستقیم منابع

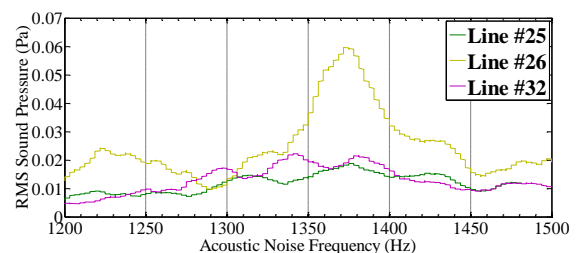
آن مجدداً افت نموده‌اند، به خطوطی با منبع الکترومغناطیسی مربوط می‌باشند. جهت وضوح بیشتر، منحنی‌های تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی عمده‌ترین خطوط تحریک‌کننده هر کدام از فرکانس‌های طبیعی معرفی شده، در شکل‌های (۷ تا ۱۱) نمایش داده شده‌اند. به‌عنوان مثال، فرکانس هارمونیک ایجاد شده متناظر با خط شماره ۱۱ در سرعت 1500 RPM برابر با ۳۱۰ Hz است. با توجه به شکل‌های (۳)، (۵) و (۷) ملاحظه می‌شود که مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی این خط در فرکانس ۳۱۰ Hz بصورت ناگهانی افزایش، و بعد از عبور از این فرکانس کاهش یافته است، بطوریکه حتی در فرکانس‌ها (سرعت‌های) بالاتر نیز اثری از این خط نیست. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این خط از یک منبع الکترومغناطیسی نشأت گرفته و با ایجاد رزونانس در فرکانس ۳۱۰ Hz باعث ارتعاش اجزاء ماشین شده است.



شکل ۷- منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط اصلی محرک فرکانس طبیعی ۳۱۰ هرتز



شکل ۸- منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط اصلی محرک فرکانس طبیعی ۹۲۰ هرتز



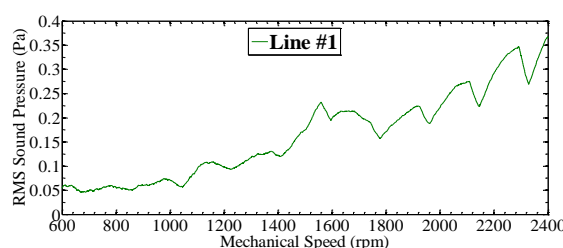
شکل ۹- منحنی‌های تغییرات فشار صوت به‌ازای حرکت بر روی خطوط اصلی محرک فرکانس طبیعی ۱۳۶۰ هرتز

ایجاد شده توسط اکثر منابع مکانیکی، یاتاقان‌ها و مخصوصاً منابع آیرودینامیکی به شدت وابسته به سرعت مکانیکی ماشین بوده و با افزایش سرعت به صورت صعودی افزایش می‌یابند [۵]. از طرفی، با دقت در شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که با حرکت بر روی برخی از خطوط مشخص شده، مقدار مؤثر فشار صوت به‌طور کاملاً صعودی و بدون نقاط پیک افزایش می‌یابد. واضح‌ترین خط از این گروه، خط شماره ۱ است که منحنی تغییرات فشار صوت بر حسب سرعت مکانیکی موتور به‌ازای حرکت بر روی این خط در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همچنین، جهت وضوح بیشتر منحنی‌های مربوط به سایر خطوط مکانیکی نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. مطابق با این شکل به وضوح ملاحظه می‌شود که تمامی خطوط با منشأ مکانیکی رفتاری مشابه داشته و سبب ایجاد تشدید در فرکانس‌های طبیعی مشخص شده نمی‌شوند.

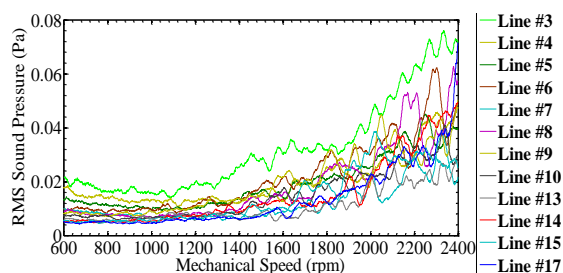
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش عملی و کارآمد برای تحلیل نویز صوتی و همچنین استخراج فرکانس‌های طبیعی ماشین‌های الکتریکی ارائه شد. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نویز صوتی یک موتور سنکرون قطب صاف ۶/۳ kW با استفاده از این روش اندازه‌گیری شد و تأثیر استفاده از درایو برای تغذیه موتور سنکرون بر روی مشخصه‌های صوتی آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این روش با کمک ابزار پردازش تصویر منابع نویز صوتی موتور سنکرون استخراج شده و همچنین پنج فرکانس طبیعی برای موتور سنکرون مورد بررسی تشخیص داده شد. در نهایت با تحلیل دقیق‌تر نتایج حاصل از اندازه‌گیری، فرکانس‌های طبیعی اجزاء مختلف ماشین از یکدیگر تفکیک گردید و منابع ایجاد آنها با دقت بیشتری مورد شناسایی و بررسی قرار گرفت.

الکترومغناطیسی در نظر گرفت. علی‌الخصوص، برای بیشتر خطوط متناظر با منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۱۰)، تنها منابع مکانیکی در جدول ۳ پیشنهاد شده‌اند. قابل توجه است که این خطوط تنها در تحریک فرکانس 1750 Hz مؤثر بوده و در تحریک سایر فرکانس‌های طبیعی نقشی ندارند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که این خطوط و فرکانس‌های طبیعی متناظر با آنها (یعنی 1360 Hz، 1750 Hz و 2120 Hz) از ارتعاش اجزاء مکانیکی و گردان ماشین نظیر یاتاقان‌ها، فن و درپوش‌ها حاصل شده‌اند که از نیروهای شعاعی و هارمونیک‌های میدان‌های دوار استاتور و روتور تأثیر نمی‌پذیرند.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات فشار صوت بر حسب سرعت مکانیکی موتور به‌ازای حرکت بر روی خط شماره ۱



شکل ۱۳- منحنی‌های تغییرات فشار صوت بر حسب سرعت مکانیکی موتور به‌ازای حرکت بر روی واضح‌ترین خطوط با منبع مکانیکی، آیرودینامیکی یا یاتاقان

برخلاف منابع الکترومغناطیسی، منابع مکانیکی نویز لزوماً باعث ارتعاش اجزاء ماشین نمی‌شوند. میزان نویز صوتی

مراجع

- [1] Q. Graham, S. Beckwith, and F. H. Milliken, "Magnetic noise in synchronous machines", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 50, NO. 30, September 1931, pp. 1056 – 1062.
- [2] P. L. Alger, "The Magnetic Noise of Poly-phase Induction Motors", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 73, NO. 1, January 1954, pp. 118 – 125.
- [3] W. J. Morill, "Harmonic Theory of Noise in Induction Motors", Electrical Engineering, Vol. 59, NO. 8, August 1940, pp. 474 – 480.
- [4] B. Heller, and V. Hamata, Harmonic Field Effects in Induction Machines, 1th ed., New York, NY, USA: Elsevier Science, 1977.

- [5] P. L. Timar, A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos, and S. J. Yang, *Noise and Vibration of Electrical Machines*, 4th ed., New York, NY, USA: Elsevier Science, 1989.
- [6] S. L. Nau, and H. G. G. Mello "Acoustic Noise In Induction Motors: Causes And Solutions", Conf. 47th Annu Ind. App. Society, Petroleum and Chemical Industry, San Antonio, TX, August 2002, pp. 253-263.
- [7] B. Kaku, I. Miyashita, and S. Sone, "A Novel Prediction Method of Acoustic Magnetic Noise Based on Induction Motor's NHCC Function", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, NO. 2, April 1999, pp. 399 – 406.
- [8] P. Vijayraghavan, and R. Krishnan, "Noise in Electric Machines: A Review", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 35, NO. 5, September 1999, pp. 1007 – 1013.
- [9] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, *Noise of Polyphase Electric Motors*, 1th ed., M. O. Thurston, Ed. Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2006.
- [10] A. Rezig, M. R. Mekideche, and N. Ikhlef, "Effect of Rotor Eccentricity On Magnetic Noise Generation In Induction Motors", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 3, NO. 4, 2014, pp. 200 – 208.
- [11] I. Ozelgin, "Analysis of magnetic flux density for air gap eccentricity and bearing faults", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 2, NO. 4, 2008, pp. 162 – 169.
- [12] V. Li, X. Jiang, J. Xia, S. Li, and F. Zhang "Research of Vibration and Noise Source Identification Method of Surface-mounted", *Int. Conf. on Electrical Machines and Systems*, Bussan, October 2013, pp. 42-45.
- [13] C. Grabner "Variable Speed Drive Application Based Acoustic Noise Reduction Strategy", *Proc. World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, San Francisco, USA, 2010, pp. 1-6.
- [14] W. C. Lo, C. C. Chan, Z. Q. Zhu, L. Xu, D. Howe, K. T. Chau, "Acoustic noise radiated by PWM-controlled induction machine drives", *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol. 47, NO. 4, 2000, pp. 880 – 889.
- [15] Z. Q. Zhu, L. Xu, and D. Howe "Influence of the fan cowl on the acoustic noise radiated from PWM controlled induction machines", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2001, pp. 218-224.
- [16] H. Tischmacher, I. P. Tsoumas, B. Eichinger, and U. Werner, "Case Studies of Acoustic Noise Emission From Inverter-Fed Asynchronous Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, NO. 5, September 2011, pp. 2013 – 2022.
- [17] C. Ma, and S. Zuo, "Black-Box Method of Identification and Diagnosis of Abnormal Noise Sources of Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, NO. 10, October 2014, pp. 5538 – 5549.
- [18] C. Ma, Q. Liu, D. Wang, Q. Li, and L. Wang, "A Novel Black and White Box Method for Diagnosis and Reduction of Abnormal Noise of Hub Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, NO. 2, February 2016, pp. 1153 – 1167.
- [19] J. P. Lecointe, R. Romary, J. F. Brudny, and T. Czaplá, "Five methods of stator natural frequency determination: case of induction and switched reluctance machines", *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 18, NO. 5, September 2004, pp. 1133 – 1159.
- [20] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, E. Ritchie, and P. Nielsen, "Determination of Mechanical Resonances in Induction Motors by Random Modulation and Acoustic Measurement", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, NO. 4, July 1995, pp. 823 – 829.

[21] M. Sarrazin, S. Gillijns, K. Janssens, H. V. D. Auweraer, and K. Auweraer “Vibro-acoustic measurements and techniques for electric automotive applications”, 43rd Int. Congress on Noise Control Engineering, Melbourne, Australia, Vol. 249, October 2014, pp. 5128-5137.