

استفاده از روش‌های پردازش سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین در محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz

محمد مهدی علیان نژادی، حمید حسن پور و فیروز زارع

تا ۱۵۰ kHz انجام شده است. امروزه این موضوع، یکی از مسایل مهم کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC, TC77A) است. کارگروه هشت از این کمیسیون (IEC - TC77A - WGA) روی تعریف سطوح سازگاری برای محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz کار می‌کند و تا کنون هیچ استاندارد برای این محدوده ارائه نشده است [۲] تا [۶]. پیش‌بینی زمانی برای کار روی این محدوده فرکانسی توسط IEC برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است [۷]. سطوح سازگاری بر اساس میزان انتشار هارمونیک و میزان ایمنی شبکه مشخص می‌شود. بنابراین دانستن امپدانس شبکه در این محدوده فرکانسی اهمیت زیادی در تعیین سطح اعوجاجات شبکه دارد.

عمدتاً تخمین امپدانس شبکه برای فرکانس‌های پایین (زیر ۲ kHz) بر اساس امپدانس خط و مبدل‌ها (با ماهیت مقاومتی و سلفی) مشخص می‌شود. تخمین امپدانس در این محدوده فرکانسی در کارهای زیادی انجام شده است [۸] تا [۱۰]. تحقیقات ما نشان می‌دهد تخمین امپدانس و کیفیت توان شبکه در محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. دانستن رفتار شبکه (امپدانس و فرکانس رزونانس) به منظور پیدا کردن محدودیت‌های استفاده از این مبدل‌ها در مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی لازم است.

کاربردها و نیاز به تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت فقط منوط به موارد بالا نمی‌شود. تخمین امپدانس شبکه در مواردی مانند افزایش پایداری کنترلر جریان با انتخاب برخط پارامترهای آن [۱۱]، طراحی مبدل پایدار با توجه به تغییرات امپدانس مدار در طول زمان [۱۲]، طراحی فیلتر [۱۳] و [۱۴] برای کاهش هارمونیک‌های شبکه، کنترل سیستم‌های تولید توزیع شده [۱۵] و شناسایی جزیره‌ها در شبکه (ناحیه‌هایی که از شبکه سراسری قطع شده ولی منبع تولید توزیع شده همچنان به تأمین انرژی در آن ناحیه می‌پردازد) [۱۶] و [۱۷] کاربرد دارد.

در [۱۸] ما روشی به منظور انتخاب سیگنال‌های تزریقی به کمک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادیم. همچنین در [۱۹] روشی به منظور حذف نویز به کمک تبدیل موجک پیشنهاد کردیم. در نهایت در [۲۰] روشی به منظور تخمین امپدانس در بازه فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz بر پایه انتخاب سیگنال‌های تزریقی و حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری پیشنهاد گردید.

در این مقاله روشی به منظور تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت در محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz به کمک روش‌های پردازش سیگنال پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر روی چندین شبکه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده توانمندی روش پیشنهادی است.

این مقاله در پنج بخش سازماندهی شده است: بخش دوم به بررسی تئوری تخمین امپدانس و مروری کوتاه بر روش‌های تخمین امپدانس اختصاص داده شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی معرفی شده و

چکیده: در این مقاله با تزریق پالس مربعی به شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین و بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال، امپدانس شبکه در محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz تخمین زده می‌شود. امپدانس شبکه از دید یک نقطه به صورت نسبت سیگنال ولتاژ به جریان عبوری از آن نقطه در حوزه فرکانس محاسبه می‌شود. در شرایط نویزی دقت تخمین امپدانس با انرژی سیگنال تزریقی رابطه مستقیم دارد. به منظور تخمین امپدانس باید سیگنال‌های تزریقی انرژی کافی در محدوده فرکانسی مورد اندازه‌گیری را داشته باشد. در روش ارائه شده، ابتدا تعدادی پالس مربعی با عرض متفاوت به کمک الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شوند. پس از تزریق سیگنال‌های انتخاب شده به شبکه و اندازه‌گیری پاسخ شبکه به هر تزریق، سیگنال‌های اندازه‌گیری حذف نویز می‌شوند و بنابراین دقت تخمین امپدانس بیشتر می‌شود. اگر مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌ها کم باشد، همه حالت‌های گذرای شبکه اندازه‌گیری نشده و تخمین امپدانس نادرست خواهد بود. بنابراین در این مقاله روشی مبتنی بر توزیع‌های زمان-فرکانس به منظور تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود. نتایج آزمایش روش پیشنهادی بر روی چندین شبکه نشان‌دهنده توانایی و دقت روش پیشنهادی در تخمین امپدانس شبکه می‌باشد.

کلیدواژه: پاسخ فرکانسی، تبدیل موجک، تخمین امپدانس شبکه، توزیع زمان-فرکانس.

۱- مقدمه

پایش امپدانس شبکه‌های قدرت از جنبه‌های مختلف مورد توجه می‌باشد. گسترش نفوذ سیستم‌های قدرت تجدیدپذیر باعث اعمال هارمونیک‌هایی به شبکه‌های قدرت می‌شود. این هارمونیک‌ها می‌تواند بر روی وسایل متصل به شبکه و سیگنال‌های ارتباطی درون شبکه تأثیر بگذارد [۱]. این تأثیرات می‌تواند منجر به کاهش کیفیت شبکه‌های قدرت شود. شبکه‌های قدرت از انواع مختلفی از مبدل‌های سیستم‌های قدرت تشکیل می‌شود و هر کدام هارمونیک‌های مختلفی را در محدوده‌های فرکانسی مختلف تولید می‌کنند.

استانداردها و مستندات علمی بین‌المللی، شبکه‌های قدرت را در محدوده فرکانس‌های زیر ۲ kHz (۲-۳-۶۱۰۰۰ IEC، ۱۲-۳-۶۱۰۰۰ IEC و IEEE ۵۱۹) و بالای ۱۵۰ kHz (CISPR) پوشش می‌دهند. در حال حاضر تحقیقات کمی روی هارمونیک‌های محدوده فرکانسی ۲ kHz

این مقاله در تاریخ ۳ مهر ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

محمد مهدی علیان نژادی (نویسنده مسئول)، آزمایشگاه پردازش تصویر و داده‌کاوی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، (email: alyan.nezhadi@gmail.com).
حمید حسن پور، آزمایشگاه پردازش تصویر و داده‌کاوی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، (email: h.hassanpour@shahroodut.ac.ir).
فیروز زارع، گروه الکترونیک قدرت، دانشگاه کوئینزلند، کوئینزلند، استرالیا، (email: f.zare@uq.edu.au).

محاسبه امپدانس شبکه در یک بازه فرکانسی وسیع دشوارتر است. هدف این مقاله تخمین امپدانس در محدوده وسیع فرکانسی است.

شبکه‌های غیر فعال^۲ حاوی منبع تغذیه (با فرکانس ۵۰ Hz یا ۶۰ Hz) نیستند و بنابراین آنها را می‌توان به صورت یک عنصر^۳ با امپدانس Z_g مدل کرد. برای تخمین امپدانس یک نقطه از شبکه (PCC) نسبت به زمین کافی است به آن نقطه از شبکه سیگنالی تزریق نمود. سپس امپدانس به صورت نسبت سیگنال ولتاژ به جریان در حوزه فرکانس در نظر گرفته می‌شود. در این حالت برای تخمین امپدانس می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC}}{I_{PCC}} \quad (1)$$

که در آن V_{PCC} ، I_{PCC} و $Z_g(f)$ به ترتیب ولتاژ نقطه PCC، جریانی عبوری از نقطه PCC و امپدانس شبکه در حوزه فرکانس می‌باشد. برای محاسبه امپدانس شبکه در فرکانس f_λ سیگنال تزریقی باید شامل مؤلفه فرکانسی f_λ باشد و به عبارت دیگر $V_{PCC}(f_\lambda) \neq 0$. بنابراین انتخاب سیگنال تزریقی اهمیت زیادی دارد.

بر اساس قضیه تونن هر شبکه فعال را می‌توان به صورت یک عنصر با امپدانس Z_g و سری شده با منبع ولتاژ $V_{Thevenin}(f)$ مدل کرد. در منابع، از مدار معادل تونن برای مدل کردن شبکه‌های قدرت استفاده می‌شود [۱۴]. در این حالت برای محاسبه امپدانس شبکه در فرکانس f می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC}(f) - V_{Thevenin}(f)}{I_{PCC}(f)} \quad (2)$$

در این رابطه $V_{Thevenin}(f)$ ، V_{PCC} و I_{PCC} به ترتیب ولتاژ تونن شبکه، ولتاژ نقطه PCC و جریانی عبوری از PCC در حوزه فرکانس است. مؤلفه‌های فرکانسی ولتاژ تونن شبکه در فرکانس‌های ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz تقریباً صفر است زیرا اولین هارمونیک موجود در این بازه فرکانسی، هارمونیک بیستم است که انرژی خیلی کمی دارد و بنابراین رابطه بالا را برای بازه فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz می‌توان به صورت (۱) ساده کرد.

در منابع برای محاسبه امپدانس شبکه در یک بازه فرکانسی از سیگنال‌های مختلفی مانند ضربه و پالس مربعی [۲۷]، سیگنال باینری [۲۸] و [۲۹]، سیگنال مدولاسیون خطی [۲۵]، دنباله پالس‌های مربعی [۳۰] و [۳۱] و دنباله پالس‌های سه‌تایی [۳۲] استفاده شده است. نویسندگان در [۳۳] روشی برای تخمین امپدانس بر پایه اندازه‌گیری پارامترهای شبکه در نقاط گره شبکه‌های بی‌سیم موردی^۴ پیشنهاد کرده‌اند. روش پیشنهادی این مقاله با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان گره‌های مختلف به تخمین امپدانس می‌پردازد و بنابراین به صورت عمومی برای تخمین امپدانس مناسب نیست.

در [۳۴] روشی به منظور تخمین امپدانس شبکه در فرکانس ۶۰ Hz (فرکانس پایه شبکه) بدون هیچ تزریقی پیشنهاد شده است. در این مقاله، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری ۱۹۲ kHz (به عبارت دیگر ۳۲ نمونه از هر سیکل کامل ولتاژ) انتخاب شده است. از آنجایی که هدف اندازه‌گیری ولتاژ در فرکانس ۶۰ Hz است،

در بخش چهارم روش پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته است. در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آمده است.

۲- تئوری تخمین امپدانس و مروری بر کارهای گذشته

امپدانس میزان مقاومت مدار برای گذر جریان هنگام اعمال یک ولتاژ ورودی مشخص به مدار را نشان می‌دهد. امپدانس شبکه در همه فرکانس‌ها یکسان نیست و به عبارت دیگر، میزان مقاومت یک شبکه قدرت نسبت به ولتاژ ورودی، وابسته به فرکانس ولتاژ ورودی است. بر اساس رابطه مهم، امپدانس یک عنصر به صورت نسبت ولتاژ دو سر المان بر جریان عبوری از آن در حوزه فرکانس تعریف می‌شود [۲۱].

روش‌های تخمین امپدانس بر اساس عملکرد به دو دسته روش‌های غیر فعال [۲۲] و [۲۳] و فعال [۲۴]، [۲۵] تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیر فعال برای محاسبه امپدانس شبکه از دید PCC^۱، سیگنال ولتاژ و سیگنال جریانی گذرا از PCC اندازه‌گیری می‌شود. سپس امپدانس به صورت نسبت این دو سیگنال در حوزه فرکانس در نظر گرفته می‌شود. در این دسته از روش‌ها برای تخمین امپدانس در فرکانس f شبکه حتماً باید دارای ولتاژی با فرکانس f باشد. معمولاً سیگنال ولتاژ شبکه‌های قدرت دارای طیف محدودی از فرکانس‌ها است (زیر ۲ kHz) و بنابراین روش‌های غیر فعال توانایی تخمین امپدانس در همین طیف محدود فرکانسی را دارند.

در روش‌های فعال، یک اعوجاج به PCC اضافه می‌شود و سپس نسبت سیگنال ولتاژ به جریان محاسبه می‌شود. این اعوجاج می‌تواند به صورت سیگنال ولتاژ یا جریان به شبکه تزریق شود. از آنجایی که دقت تخمین امپدانس در روش‌های فعال نسبت به روش‌های غیر فعال بیشتر است، در دهه اخیر توجه زیادی به این دسته شده است. از طرف دیگر، تزریق سیگنال به شبکه می‌تواند کیفیت شبکه را کاهش دهد. از همین رو در تخمین امپدانس به کمک تزریق سیگنال همواره یک مسئله مهم آن است که انرژی سیگنال تزریقی از حد مشخصی بیشتر نباشد [۱۹] و [۲۶]. همان طور که پیشتر بیان شد برای تخمین امپدانس شبکه در فرکانس f ، سیگنال تزریقی باید دارای مؤلفه ولتاژی (یا جریانی) با فرکانس f باشد. در شرایط بدون نویز، درستی تخمین امپدانس شبکه به انرژی سیگنال تزریقی وابسته نیست اما در شرایط نویزی (نویز اندازه‌گیری یا نویز هارمونیک منبع ولتاژ شبکه)، درستی تخمین امپدانس به انرژی سیگنال تزریقی وابسته است [۱۸].

روش‌های تخمین امپدانس شبکه به کمک تزریق سیگنال به دو دسته تخمین امپدانس در یک فرکانس مشخص و تخمین امپدانس در یک بازه فرکانسی تقسیم می‌شود. در تخمین امپدانس شبکه در یک فرکانس مشخص، یک پالس سینوسی با فرکانس f به مدار اعمال می‌شود و با استفاده از تقسیم مؤلفه فرکانسی سیگنال ولتاژ به سیگنال جریانی، امپدانس مدار در فرکانس f محاسبه می‌شود. برای محاسبه امپدانس شبکه در بازه فرکانسی از سیگنال‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. با اعمال مکرر پالس در فرکانس‌های مختلف و عمل درونیابی می‌توان فرکانس را در یک بازه مشخص نمود ولی این کار باعث افزایش تعداد تزریق‌های سیگنال و تغییر رفتار شبکه می‌شود. از طرف دیگر به جای تزریق مکرر سیگنال می‌توان از سیگنال با پهنای باند بیشتر استفاده کرد. مهم‌ترین ویژگی سیگنال تزریقی، پهنای باند آن می‌باشد که هرچه بیشتر باشد امپدانس در فرکانس‌های بیشتری را می‌توان با کمک آن تخمین زد.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم ژنتیک.

پارامتر	مقدار/ چگونگی تعریف
اندازه جمعیت اولیه	۱۰۰
طول کروموزوم	K
تابع انتخاب	Tournament
تابع ترکیب	Cross over single point
تابع جهش	Mutation adapt feasible
حداکثر تولید نسل	۳۰۰
محدودیت تولید نسل بدون تغییر	۵۰
تعداد نخبه‌گرایی	۳

فیلتر LCL به شبکه تزریق شود. مهم‌ترین اشکال این روش آن است که تنها برای تخمین امپدانس در فرکانس‌های زیر ۹ kHz مناسب است.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش روشی جهت تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت با پردازش اثر سیگنال‌های تزریقی به شبکه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از شش مرحله اصلی تشکیل می‌شود. در ادامه، هر یک از مراحل توضیح داده شده است.

مرحله اول: انتخاب سیگنال‌های تزریقی

تخمین امپدانس به کمک تزریق سیگنال در فرکانس‌هایی به درستی انجام خواهد شد که سیگنال تزریقی در آن فرکانس‌ها انرژی کافی داشته باشد. هر پالس مربعی در فرکانس‌ها دارای انرژی کم (نزدیک صفر) می‌باشد و بنابراین هر پالس مربعی توانایی تخمین درست امپدانس را در بعضی فرکانس‌ها با توجه به عرض خود ندارد [۱۸]. در این مرحله K سیگنال تزریقی به نحوی انتخاب می‌شود که اجتماع محدوده فرکانسی توانایی سیگنال‌های تزریقی، 2 kHz تا 150 kHz باشد. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب عرض سیگنال‌های مربعی تزریقی استفاده شده است. شایان ذکر است از سایر الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز می‌توان استفاده کرد. اگرچه در الگوریتم ژنتیک تضمینی وجود ندارد که نتایج به دست آمده بهترین جواب ممکن باشد، ولی قطعاً جواب به دست آمده جزء جواب‌های قابل قبول است. از این رو از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب سیگنال‌های تزریقی استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول ۱ آورده شده است. هر کروموزوم الگوریتم ژنتیک شامل K ژن است که هر ژن عرض یک سیگنال تزریقی را مشخص می‌کند و مقادیر ژن‌ها بین $1 \mu\text{s}$ تا $600 \mu\text{s}$ است.

مهم‌ترین پارامتر الگوریتم ژنتیک، تابع برازندگی است. هدف ژنتیک کمینه (یا بهینه) کردن مقدار این تابع است. برای تخمین درست امپدانس، حداقل یک سیگنال تزریقی با انرژی کافی در هر فرکانس باید انتخاب شود. از این رو تابع برازندگی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$Fit = \sum_{f \in \Phi} fit(f) \quad (3)$$

$$fit(f) = \begin{cases} \Gamma - \max_{1 \leq g \leq k} (|Sig_g(f)|^2), \max_{1 \leq g \leq k} (|Sig_g(f)|) < T \\ 0, \text{ o.w.} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $fit(f)$ تابع برازندگی جزئی است. همچنین در رابطه بالا $Sig_g(f)$ ، g امین سیگنال تزریقی با عرض مشخص شده در ژن g است. در رابطه بالا Φ و T به ترتیب محدوده تخمین امپدانس (در این مقاله 2 kHz تا 150 kHz) و حد آستانه قابل قبول برای انرژی سیگنال در هر فرکانس است. در روابط بالا تابع برازندگی از مجموع توابع برازندگی جزئی در هر فرکانس محاسبه می‌شود. هر تابع برازندگی جزئی نماینده میزان برازندگی کروموزوم در یک فرکانس مشخص f است. اگر یکی از سیگنال‌های تزریقی دارای حداقل انرژی T در فرکانس f باشد، تابع برازندگی جزئی برای آن فرکانس صفر در نظر گرفته می‌شود زیرا حد آستانه انرژی قابل قبول برای تخمین در فرکانس f در سیگنال‌های موجود در کروموزوم وجود دارد. اگر هیچ سیگنال تزریقی‌ای در کروموزوم نتواند به حد آستانه مطلوب برسد، سیگنال تزریقی با بیشترین انرژی در کروموزوم انتخاب می‌شود و به اندازه اختلاف انرژی آن

یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع 300 Hz بر روی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده اعمال می‌شود. برای تخمین امپدانس شبکه، اگر اختلاف توان دو اندازه‌گیری متوالی (از دو دوره تناوب کامل متوالی از سیگنال ولتاژ) از یک مقدار حد آستانه بیشتر باشد، امپدانس به کمک اندازه‌گیری‌های انجام‌شده محاسبه شود. سپس امپدانس تخمینی با فیلتر میانگین‌گیر تصحیح می‌گردد.

در بعضی از منابع، از روش‌های بازگشتی برای تخمین امپدانس استفاده شده است. در [۱۴] نویسندگان روشی بر پایه فیلتر کالمن توسعه یافته از دسته روش‌های غیر فعال پیشنهاد کرده‌اند. همان طور که مطرح شد روش‌های غیر فعال فقط می‌توانند امپدانس را در فرکانس‌هایی تخمین بزنند که در شبکه وجود دارد. همچنین در [۳۵] نویسندگان روشی برای تخمین امپدانس مقاوم‌تری‌های لیتیومی بر پایه روش‌های بازگشتی پیشنهاد کرده‌اند. این تخمین به منظور تعیین وضعیت شارژ لحظه‌ای باتری مفید است.

در روش‌های فعال، سیگنال‌های مختلفی مانند ضربه و پالس مربعی [۲۷]، سیگنال باینری [۲۸] و [۲۹] و سیگنال مدولاسیون خطی [۲۵] به شبکه تزریق می‌شود. مقاله [۲۹] با تزریق سیگنال بی‌تبی مربعی به مبدل ولتاژ، امپدانس را تخمین زده است. هدف این مقاله تخمین امپدانس در سیستم‌های توزیع شده است.

نویسندگان [۳۶] از تبدیل موجک برای تخمین امپدانس شبکه استفاده کرده‌اند. در این روش نویسندگان سیگنال ولتاژ و جریان عبوری از نقطه PCC را از حوزه زمان به صفحه زمان-مقیاس انتقال داده‌اند. صفحه امپدانس از تقسیم صفحه ولتاژ به جریان به وجود خواهد آمد. با میانگین‌گیری بر روی برخی از زمان‌ها در صفحه زمان-مقیاس، امپدانس تخمینی به حوزه مقیاس انتقال می‌یابد. سپس در نهایت امپدانس از حوزه مقیاس به حوزه فرکانس انتقال می‌یابد. تمرکز این مقاله بر روی فرکانس‌های کمتر از 2 kHz است. همچنین اشکال عمده این روش تزریق طولانی‌مدت (حدود 1 ms) پالس مربعی است که باعث می‌شود روش در فرکانس‌های بالا ناتوان باشد.

در [۱۲] امپدانس شبکه‌های متصل به مبدل از دید نقطه اتصال آن دو به هم (نقطه اتصال شبکه به مبدل) تخمین زده شده است. در این روش یک پالس جریان به کمک مبدل به شبکه تزریق شده و سپس نسبت سیگنال ولتاژ به جریان در حوزه فرکانس محاسبه می‌گردد. روش پیشنهادی هنگامی که هدف تخمین امپدانس از دید نقاط مختلف شبکه باشد کارآمد نیست. همچنین در این روش فرض شده که شبکه خاصیت سلفی دارد که امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی شبکه‌ها دارای خاصیت خازنی هم هستند.

در [۳۲] نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که یک سیگنال سه‌حالت با یک

که $w(\tau, t)$ پنجره مربعی است که به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$w(\tau, t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tau \leq t \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases} \quad (6)$$

از آنجایی که سیگنال‌های جریان و ولتاژ در نقاط زمانی گسسته اندازه‌گیری می‌شوند، توزیع زمان-فرکانس نیز باید گسسته‌سازی شود. توزیع زمان-فرکانس زمان گسسته با کمک DFT^T را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد

$$X(n, f) = DFT\{x[k]w[k, n]\} \quad (7)$$

$$w[k, n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq n \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases} \quad (8)$$

توزیع زمان-فرکانس بالا را می‌توان به عنوان یک نسخه تغییر یافته از $STFT^T$ در نظر گرفت. در $STFT$ ، یک پنجره با عرض ثابت بر روی سیگنال در حوزه زمان حرکت می‌کند. در حالی که در توزیع زمان-فرکانس بالا، موقعیت پنجره ثابت بوده و عرض آن تا جایی افزایش می‌یابد که کل سیگنال در حوزه زمان را پوشش دهد. در این بخش توزیع زمان-فرکانس سیگنال‌های ولتاژ و جریان محاسبه می‌شود و سپس توزیع زمان-فرکانس امیدانس به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Z^{(i)}(n, f) = \frac{V^{(i)}(n, f)}{I^{(i)}(n, f)} \quad (9)$$

که $V^{(i)}(n, f)$ و $I^{(i)}(n, f)$ بازنمایی زمان-فرکانس سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده از تزریق i ام است. همچنین $Z^{(i)}(n, f)$ امیدانس تخمینی در حوزه زمان-فرکانس است.

گام دوم) حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحات زمان-فرکانس
هنگامی که زمان اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان کم باشد، تخمین امیدانس نادرست است زیرا همه حالات گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود. از این رو نواحی با تخمین نادرست باید از صفحات زمان-فرکانس حذف شود. روند زیر باید برای هر صفحه زمان-فرکانس محاسبه شده در گام قبل به صورت مجزا انجام گیرد. انرژی یک پالس مربعی با عرض α ثانیه در نقاط فرکانسی زیر دارای مینیمم‌های محلی است

$$f = \left\{ \frac{1}{a}, \frac{2}{a}, \frac{3}{a}, \dots \right\} \quad (10)$$

تخمین امیدانس در فرکانس‌هایی که انرژی سیگنال تزریقی در آن کم است درست نخواهد بود و بنابراین تخمین امیدانس در فرکانس‌های موجود در (۱۰) نادرست است. در این بخش یک ماسک باینری $(mask(f))$ بر اساس همین نقاط فرکانسی محاسبه می‌شود. مقادیر ماسک برای فرکانس‌های با انرژی کم برابر صفر و برای سایر فرکانس‌ها برابر یک است و به عبارت ریاضی می‌توان نوشت

$$mask(f) = \begin{cases} 0, & |V_{inject}(f)| < Threshold \\ 1, & |V_{inject}(f)| \geq Threshold \end{cases} \quad (11)$$

در این رابطه $V_{inject}(f)$ سیگنال تزریقی در حوزه فرکانس است. مقدار $V_{inject}(f)$ به صورت تئوری از روی پالس مربعی (نه از روی سیگنال

تا حد آستانه به تابع برازندگی جزئی مقدار اختصاص داده می‌شود. این مقدار در واقع جریمه کروموزوم در فرکانس f است.

مرحله دوم: تزریق هر یک از سیگنال‌های انتخابی به شبکه به صورت مجزا

هر سیگنال انتخاب شده باید به صورت مجزا به شبکه تزریق شود. پس از تزریق هر سیگنال به شبکه، سیگنال‌های ولتاژ و جریان عبوری از PCC اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری سیگنال‌ها تا چند میلی‌ثانیه انجام می‌شود.

مرحله سوم: حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

هنگامی که سطح انرژی سیگنال و نویز نزدیک هم باشند، دقت تخمین امیدانس پایین خواهد بود. در این بخش به کمک حذف نویز موجک ایستا^۱ نویز در سیگنال‌های ولتاژ و جریان کاهش می‌یابد. این کار باعث می‌شود تا دقت تخمین امیدانس بالا برود. الگوریتم حذف نویز شامل چهار گام اساسی است. این الگوریتم باید بر روی سیگنال‌های ولتاژ و جریان به صورت مجزا انجام شود.

۱) انتخاب موجک مادر: نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که موجک sym^4 یک موجک مادر مناسب برای حذف نویز از سیگنال‌های ولتاژ و جریان است.

۲) تجزیه هر سیگنال به N سطح: هر سیگنال باید به پنج سطح تجزیه شود. در مقاله، تعداد سطوح بر اساس آزمایش‌های انجام شده انتخاب گردیده است.

۳) آستانه‌گذاری: در این گام یک حد آستانه برای فیلتر کردن انتخاب می‌شود و سپس به روش آستانه‌گذاری نرم^۲ هر سطح حذف نویز می‌شود.

۴) بازسازی سیگنال: در این گام از روی سطوح حذف نویز شده باید سیگنال حذف نویز شده بازسازی شود.

کیفیت حذف نویز سیگنال‌ها به انتخاب درست پارامترها (تعداد سطوح تجزیه، موجک مادر و قاعده آستانه‌گذاری [۳۷] و [۳۸]) وابسته است. از این رو فرایند حذف نویز می‌تواند با بهینه‌کردن این پارامترها بهبود پیدا کند.

مرحله چهارم: تعیین بازه زمانی اندازه‌گیری

اگر مدت زمان نمونه‌برداری از سیگنال‌ها کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود و تخمین امیدانس به کلی نادرست خواهد بود. از طرف دیگر اگر زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امیدانس کاهش می‌یابد. از این رو در این مرحله ابتدا امیدانس به کمک هر جفت سیگنال اندازه‌گیری شده (سیگنال ولتاژ و جریان) در حوزه زمان-فرکانس محاسبه می‌شود. سپس نواحی صفحات زمان-فرکانس که تخمین در آنها نادرست است حذف می‌شود. این مرحله در دو گام اصلی به شرح زیر انجام می‌شود:

گام اول) تخمین امیدانس شبکه به کمک هر سیگنال تزریقی در حوزه زمان-فرکانس

بازنمایی زمان-فرکانس [۳۹] یک سیگنال $x(t)$ به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau, t)e^{-j\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

جدول ۲: خطای تخمین امپدانس برای آزمایش اول.

روش	SNR (dB)	MAPE (%)
روش پیشنهادی	۲۱٫۶۲	۰٫۵۱
روش ارائه شده در [۱۸]	۲۰٫۲۳	۰٫۷۲
روش ارائه شده در [۲۰]	۲۰٫۳۴	۰٫۶۶
روش ارائه شده در [۱۹]	۱۴٫۸۲	۳٫۰۸

$$\forall f \in [2 \text{ kHz} - 150 \text{ kHz}]: Z(f) = Z_k(f), \quad (15)$$

$$k = \arg \max_{1 \leq i \leq K} (V_{PCC}^{(i)}(f))$$

۴- آزمایش‌ها و نتایج

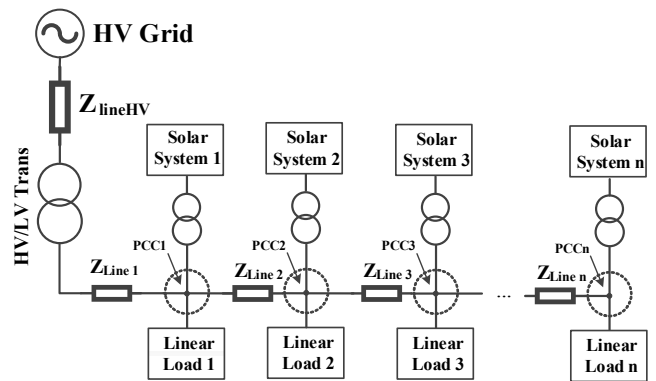
در این بخش به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، آن را بر روی شبکه قدرت نمایش داده شده در شکل ۱ اعمال نمودیم. برای این شبکه فرض شده است که ده سیستم خورشیدی و ده بار خطی وجود دارد (به عبارت دیگر $n = 10$). هر بار خطی با یک RL موازی با خازن با پارامترهای $100 \mu\text{H}$ و 25Ω مدل شده است. همچنین سیستم‌های خورشیدی و ترانسفورماتور متناظر با آن نیز با یک منبع جریان موازی با RL با پارامترهای $(10 \text{ A}, 50 \text{ Hz})$ و $(2 \Omega, 50 \mu\text{H})$ مدل شده است. خطوط انتقال Z_{line1} تا Z_{line10} نیز با RL سری با پارامترهای $30 \mu\text{H}$ و $25 \text{ m}\Omega$ مدل گردیده است. در نهایت بخش ولتاژ بالای شبکه نیز با یک منبع تغذیه 50 Hz و 220 V سری شده با یک RL سری $30 \mu\text{H}$ و $25 \text{ m}\Omega$ مدل شده است. در آزمایش‌های انجام شده در این بخش، فرکانس نمونه‌برداری 10 MHz در نظر گرفته شده است.

۴-۱ آزمایش اول

در این آزمایش، امپدانس شبکه از دید نقطه $PCC1$ با خطای اندازه‌گیری $SNR = 10 \text{ dB}$ اندازه‌گیری شده است. در مرحله اول چهار پالس مربعی با بیشینه دامنه 1 kV و عرض پالس‌های 7 ، 11 ، 14 و 26 میکروثانیه به صورت مجزا به شبکه تزریق شد. در هر بار تزریق، سیگنال‌های ولتاژ $PCC1$ و جریان عبوری از آن تا زمان 5 ms اندازه‌گیری گردید. سپس هر یک از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده حذف نویز گردید. در مرحله بعد به کمک هر جفت سیگنال ولتاژ و جریان (متناظر با هر تزریق) یک تخمین امپدانس در حوزه زمان-فرکانس محاسبه گردید. به عنوان نمونه دو مورد از این صفحات در شکل ۲ آمده است. همان طور که در صفحات مشخص است تخمین امپدانس با زمان‌های اندازه‌گیری کم نادرست است. در مرحله بعد این نواحی از صفحات زمان-فرکانس حذف گردید (شکل ۳). پس از حذف نواحی با تخمین نادرست، با محاسبه میانگین صفحه زمان-فرکانس در راستای فرکانس، یک تخمین به ازای هر صفحه محاسبه شد. به عنوان مثال در شکل ۴ دو مورد از این تخمین‌ها آورده شده است. در نهایت با ترکیب نتایج به دست آمده، امپدانس نهایی محاسبه می‌شود. این تخمین در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول ۲ خطای تخمین امپدانس آمده و همان طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در تخمین امپدانس دارد.

۴-۲ آزمایش دوم

در این آزمایش، امپدانس شبکه از دید نقطه $PCC5$ با خطای اندازه‌گیری $SNR = 0 \text{ dB}$ تخمین زده شده است. سایر شرایط آزمایش و نحوه تخمین امپدانس دقیقاً مشابه آزمایش اول است. امپدانس تخمینی



شکل ۱: شماتیک شبکه مورد آزمایش.

ولتاژ اندازه‌گیری شده) محاسبه می‌شود. در این گام امپدانس تخمینی به منظور حذف اثر نقاط فرکانسی با انرژی کم، ماسک می‌شود. امپدانس تخمینی ماسک شده $Z_M(n, f)$ به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$Z_M(n, f) = Z(n, f) \cdot \text{mask}(f) \quad (12)$$

هنگامی که همه حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نشود، امپدانس تخمینی ماسک شده با زمان‌های اندازه‌گیری مختلف تغییرات زیادی دارد. به هر حال، امپدانس تخمینی ماسک شده در شرایطی که همه حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری شود، تقریباً ثابت است. به منظور پیدا کردن یک زمان مسطح (مدت زمانی که امپدانس ماسک شده تغییرات زیادی نداشته باشد)، از امپدانس ماسک شده در راستای زمان گردان گرفته می‌شود و به عبارت ریاضی

$$\nabla_{time}(n, f) = Z_M(n+1, f) - Z_M(n, f) \quad (13)$$

میانگین گردان در راستای فرکانس از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\text{Mean}_{\nabla_{time}}(n) = \frac{1}{\|F\|} \sum_{f \in F} |\nabla_{time}(n, f)| \quad (14)$$

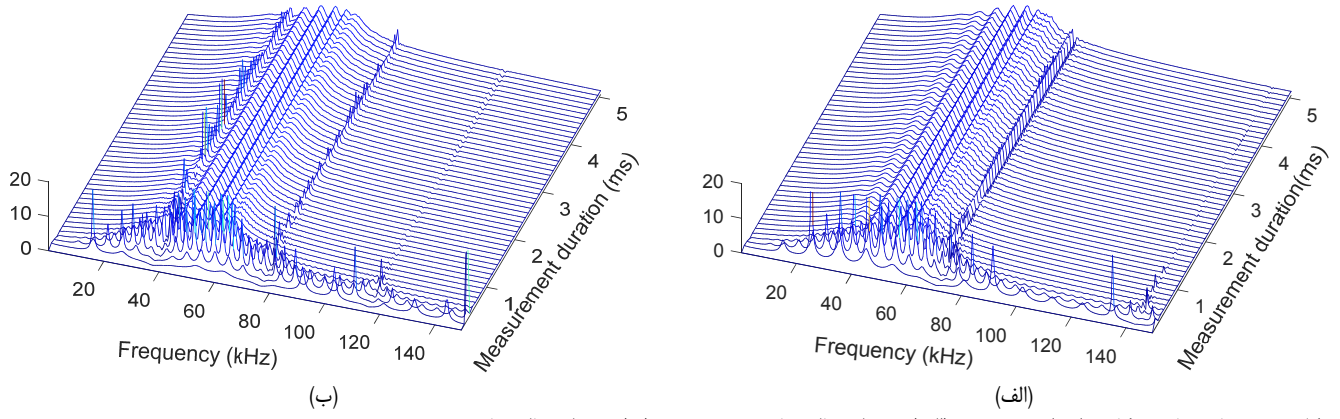
در رابطه بالا $\|F\|$ تعداد نقاط فرکانسی محاسبه شده در تبدیل فوریه گسسته است. میانگین گردان سیگنال در راستای فرکانس برای ناحیه‌های مسطح نزدیک صفر است و بنابراین می‌توان بر اساس $\text{Mean}_{\nabla_{time}}$ یک محدوده زمانی مسطح را انتخاب کرد. پس از انتخاب این محدوده زمانی، امپدانس‌های تخمینی کاندیدا برای تخمین نهایی می‌تواند انتخاب شود.

مرحله پنجم: تخمین امپدانس از روی صفحات زمان-فرکانس

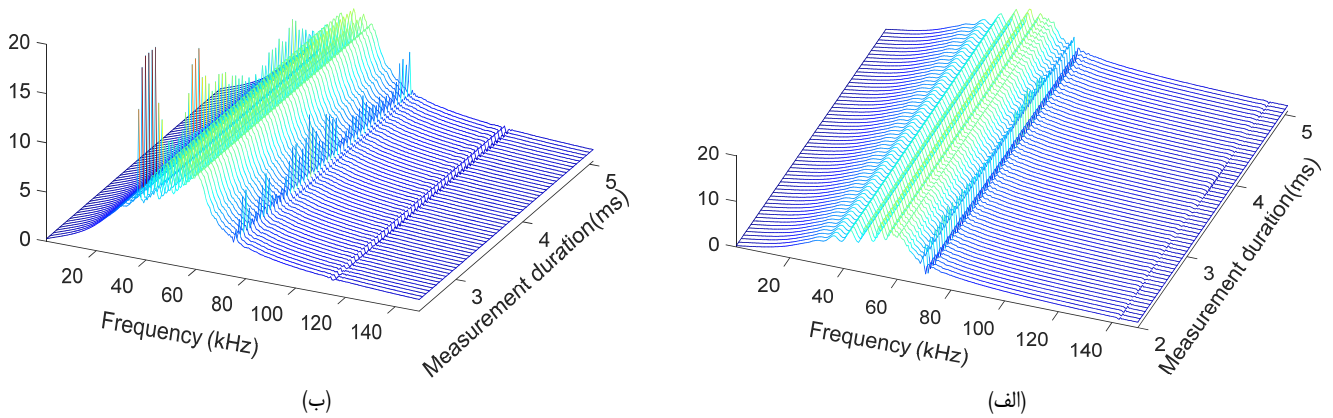
تا این مرحله به ازای هر سیگنال تزریقی یک صفحه زمان-فرکانس از تخمین امپدانس تشکیل شده است. در این گام برای هر صفحه میانگین صفحه در راستای زمان به عنوان تخمین نهایی محاسبه شده به کمک سیگنال تزریقی متناظر محاسبه می‌گردد.

مرحله ششم: ارائه یک تخمین نهایی

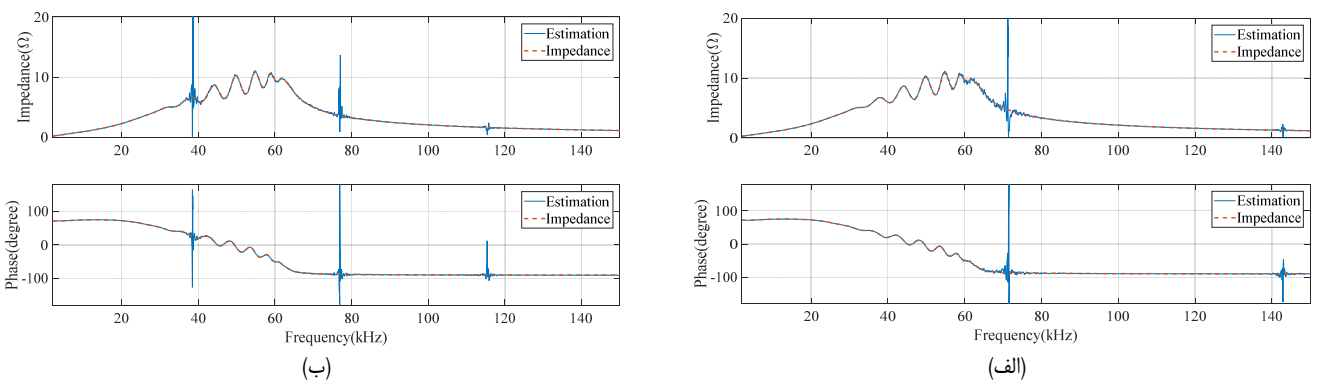
در مرحله قبل به ازای هر سیگنال تزریقی یک تخمین امپدانس محاسبه شد. فرض کنید که این تخمین‌ها با $Z^{(i)}(f)$ مشخص شود که $Z^{(i)}(f)$ امپدانس تخمینی از روی تزریق i ام است. در این مرحله به ازای هر فرکانس، یکی از امپدانس‌های تخمین زده شده به عنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شود. همان طور که بیان شد هرچه انرژی سیگنال در یک فرکانس بالاتر باشد، امپدانس تخمینی به کمک آن دقیق‌تر خواهد بود و بنابراین امپدانس تخمینی از رابطه زیر محاسبه می‌شود



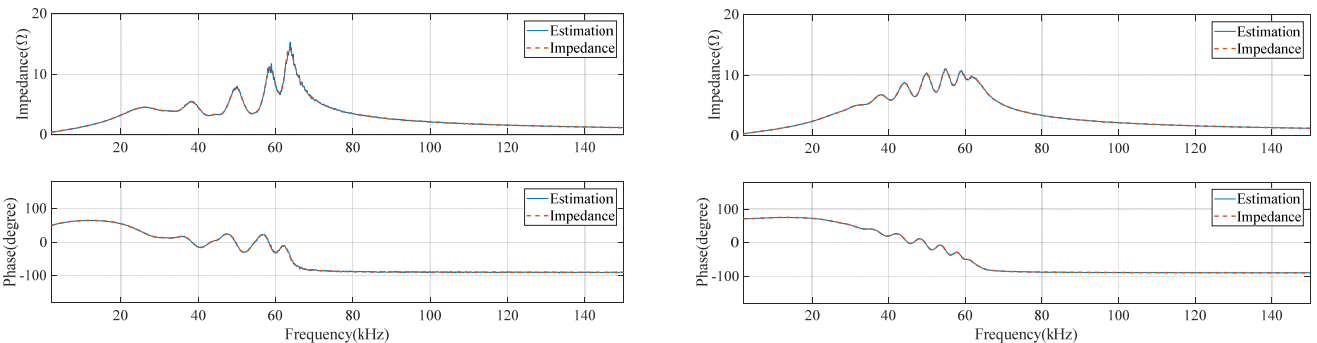
شکل ۲: صفحات زمان-فرکانس امپدانس تخمینی، (الف) مربوط به پالس با عرض ۱۴ μs و (ب) مربوط به پالس با عرض ۲۶ μs.



شکل ۳: صفحات زمان-فرکانس که از آنها نواحی با تخمین نادرست حذف شده است، (الف) مربوط به پالس با عرض ۱۴ μs و (ب) مربوط به پالس با عرض ۲۶ μs.



شکل ۴: امپدانس تخمین زده شده به کمک هر تخمین، (الف) مربوط به پالس با عرض ۱۴ μs و (ب) مربوط به پالس با عرض ۲۶ μs.



شکل ۵: امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش اول.

شکل ۶: امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش دوم.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله یک روش برای تخمین امپدانس شبکه مبتنی بر تزریق سیگنال با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال ارائه شد. در تخمین

در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ مقایسه‌ای بین خطای روش پیشنهادی و سایر روش‌ها آمده که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها دقیق‌تر است.

- [8] J. Dannehl, M. Liserre, and F. W. Fuchs, "Filter-based active damping of voltage source converters with LCL filter," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3623-3633, Aug. 2011.
- [9] H. Langkowsky, T. Do Thanh, K. D. Dettmann, and D. Schulz, "Grid impedance determination-relevancy for grid integration of renewable energy systems," in *Proc. 35th Annual Conf. of Industrial Electronics*, pp. 516-521, Porto, Portugal, 3-5 Nov. 2009.
- [10] M. H. Bierhoff and F. W. Fuchs, "Active damping for three-phase PWM rectifiers with high-order line-side filters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 371-379, Oct. 2009.
- [11] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "On-line grid impedance estimation based on harmonic injection for grid-connected PV inverter," in *Proc. Int. Symp. on Industrial Electronics*, pp. 2437-2442, Vigo, Spain, 4-7 Jun. 2007.
- [12] M. Cespedes and J. Sun, "Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 516-523, Jan. 2014.
- [13] A. Tarkiaainen, R. Pollanen, M. Niemela, and J. Pyrhonen, "Identification of grid impedance for purposes of voltage feedback active filtering," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 6-10, Mar. 2004.
- [14] J. Ye, Z. Zhang, A. Shen, J. Xu, and F. Wu, "Kalman filter based grid impedance estimating for harmonic order scheduling method of active power filter with output LCL filter," in *Proc. Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM'16*, pp. 359-364, Anacapri, Italy, 22-24 Jun. 2016.
- [15] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and U. Borup, "A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1480-1490, Nov. 2005.
- [16] K. Jia, H. Wei, T. Bi, D. W. Thomas, and M. Sumner, "An islanding detection method for multi-DG systems based on high-frequency impedance estimation," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 74-83, Jan. 2017.
- [17] A. Ghanem, M. Rashed, M. Sumner, M. A. Elsayes, and I. I. Mansy, "Grid impedance estimation for islanding detection and adaptive control of converters," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 11, pp. 1279-1288, Jul. 2017.
- [18] M. M. AlyanNezhadi, F. Zare, and H. Hassanpour, "Grid impedance estimation using several short-term low power signal injections," *AUT J. of Electrical Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 169-176, Dec. 2018.
- [19] M. M. AlyanNezhadi, H. Hassanpour, and F. Zare, "Grid impedance estimation using low power signal injection in noisy measurement condition based on wavelet denoising," in *Proc. 3rd Iranian Conf. on Intelligent Systems and Signal Processing*, pp. 81-86, Shahrood, Iran, 20-21 Dec. 2017.
- [20] M. M. AlyanNezhadi, H. Hassanpour, and F. Zare, "A new high frequency grid impedance estimation technique for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz," *International J. of Engineering, Trans. A: Basics*, vol. 31, no. 10, pp. 1666-1674, Oct. 2018.
- [21] H. Gong, D. Yang, and X. Wang, "Impact of synchronization phase dynamics on DQ impedance measurement," in *Proc. 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, 7 pp., Padua, Italy, 25-28 Jun. 2018.
- [22] Y. Familiant, K. A. Corzine, J. Huang, and M. Belkhat, "AC impedance measurement techniques," in *Proc. Int. Conf. on Electric Machines and Drives*, pp. 1850-1857, San Antonio, USA, 15-15 May 2005.
- [23] L. S. Czarniecki and Z. Staroszczyk, "Dynamic on-line measurement of equivalent parameters of three-phase systems for harmonic frequencies," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 6, no. 5, pp. 329-336, Sept. 1996.
- [24] T. Roinila, M. Vilkkko, and J. Sun, "Online grid impedance measurement using discrete-interval binary sequence injection," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 985-993, Dec. 2014.
- [25] Z. Shen, M. Jaksic, P. Mattavelli, D. Boroyevich, J. Verhulst, and M. Belkhat, "Three-phase AC system impedance measurement unit using chirp signal injection," in *Proc. 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'13*, pp. 2666-2673, Long Beach, USA, 17-21 Mar. 2013.
- [26] M. Ciobotaru, V. Agelidis, and R. Teodorescu, "Line impedance estimation using model based identification technique," in *Proc. of the 14th European Conf. on Power Electronics and Applications*, 9 pp., Birmingham, UK, 30 August-1 Sept. 2011.
- [27] Z. Staroszczyk, "A method for real-time, wide-band identification of the source impedance in power systems," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, pp. 377-385, Jan. 2005.

جدول ۳: خطای تخمین امپدانس برای آزمایش دوم.

روش	SNR (dB)	MAPE (%)
روش پیشنهادی	۱۷٫۱۴	۱٫۴۱
روش ارائه شده در [۱۸]	۱۵٫۳۵	۲٫۱۶
روش ارائه شده در [۲۰]	۱۵٫۸۲	۱٫۹۲
روش ارائه شده در [۱۹]	۹٫۶۴	۸٫۷۲

امپدانس شبکه به کمک تزریق سیگنال، یک سیگنال به شبکه تزریق شده و پاسخ شبکه به سیگنال تزریقی اندازه‌گیری می‌شود. در شرایط وجود نویز، دقت تخمین امپدانس با انرژی سیگنال تزریقی رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر برای تخمین امپدانس در فرکانس f ، سیگنال تزریقی باید حاوی مؤلفه فرکانسی با انرژی کافی در همان فرکانس باشد. از آنجایی که هدف این مقاله، تخمین امپدانس در یک بازه وسیع فرکانسی است، بنابراین از پالس مربعی که پهنای باندی وسیع دارد استفاده شده است. پالس مربعی دارای دو پارامتر عرض پالس و بیشینه دامنه پالس است.

با افزایش عرض پالس تزریقی، انرژی سیگنال افزایش می‌یابد ولی باعث کاهش پهنای باند آن نیز می‌شود. با توجه به آن که هر پالس مربعی توانایی تخمین امپدانس در برخی فرکانس‌ها را دارد از این رو در روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس، چند پالس مربعی به نحوی برای تزریق انتخاب شد که با ترکیب نتایج آنها بتوان امپدانس را در محدوده فرکانسی ۲ kHz تا ۱۵۰ kHz تخمین زد.

اگرچه از نظر تئوری با افزایش بیشینه دامنه پالس مربعی، دقت تخمین امپدانس بالا می‌رود ولی افزایش بیش از حد این پارامتر باعث آسیب‌زدن به شبکه می‌شود. در روش پیشنهادی، یک مرحله حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری قرار داده شده تا نسبت سطح انرژی سیگنال به سطح انرژی نویز افزایش یابد.

اگر مدت زمان اندازه‌گیری کم باشد، تخمین امپدانس نادرست خواهد بود. بنابراین در این مقاله، روشی مبتنی بر توزیع زمان-فرکانس برای تعیین مدت زمان اندازه‌گیری مناسب پیشنهاد گردید. در گام آخر امپدانس‌های تخمینی به کمک سیگنال‌های تخمینی با یکدیگر ترکیب شده و امپدانس نهایی محاسبه می‌شود. آزمایش‌های انجام شده نشانگر توانایی روش پیشنهادی در تخمین درست امپدانس است.

مراجع

- [1] D. Frey, J. Schanen, and I. Dia, "Harmonics propagation in industrial networks in the range of 2 to 150 kHz," in *Proc. 28th Annual, Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'13*, pp. 2649-2654, Long Beach, USA, 17-21 Mar. 2013.
- [2] P. Davari, F. Blaabjerg, E. Hoene, and F. Zare, "Improving 9-150 kHz EMI performance of single-phase PFC rectifier," in *Proc. 10th Int. Conf. on Integrated Power Electronics Systems*, 6 pp., Stuttgart, Germany, 20-22 Mar. 2018.
- [3] F. Zare, et al., "Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2819-2833, Feb. 2017.
- [4] S. K. Ronnberg, M. H. J. Bollen, H. Amaris, G. W. Chang, I. Y. H. Gu, L. H. Kocewiak, et al., "On waveform distortion in the frequency range of 2kHz-150kHz-review and research challenges," *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 1-10, May 2017.
- [5] S. Schottke, S. Rademacher, J. Meyer, and P. Schegner, "Transfer characteristic of a MV/LV transformer in the frequency range between 2 kHz and 150 kHz," in *Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, EMC'15*, pp. 114-119, Dresden, Germany, 16-22 Aug 2015.
- [6] D. Heirman, "EMC standards activity," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 100-103, Jul. 2014.
- [7] I. E. Commission, *TC 77-Electromagnetic Compatibility*, 2017.

- [37] M. R. M. Yusof and A. K. B. Ariffin, "Using Steins Unbiased Risk Estimate to Optimize Level of Decomposition in Stationary Wavelet Transform Denoising," arXiv preprint arXiv:1701.03594, 2017.
- [38] M. Srivastava, C. L. Anderson, and J. H. Freed, "A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3862-3877, Jul. 2016.
- [39] L. Stankovic, M. Dakovic, and T. Thayaparan, *Time-Frequency Signal Analysis with Applications*, Artech house, 2014.
- [28] T. Roinila, M. Vilkkko, and J. Sun, "Broadband methods for online grid impedance measurement," *Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3003-3010, Denver, USA, 15-19 Sept 2013.
- [29] S. Neshvad, S. Chatzinotas, and J. Sachau, "Wideband identification of power network parameters using pseudo-random binary sequences on power inverters," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2293-2301, Feb. 2015.
- [30] P. Davari, N. Ghasemi, F. Zare, P. O'shea, and A. Ghosh, "Improving the efficiency of high power piezoelectric transducers for industrial applications," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 213-221, Jul. 2012.
- [31] T. Messo, R. Luhtala, T. Roinila, D. Yang, X. Wang, and F. Blaabjerg, "Real-time impedance-based stability assessment of grid converter interactions," in *Proc. 18th Workshop on, Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL'17*, 8 pp., Stanford, USA, 9-12 Jul. 2017.
- [32] T. Roinila and T. Messo, "Online grid-impedance measurement using ternary-sequence injection," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5097-5103, Apr. 2018.
- [33] S. Han, D. Kodaira, S. Han, B. Kwon, Y. Hasegawa, and H. Aki, "An automated impedance estimation method in low-voltage distribution network for coordinated voltage regulation," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1012-1020, Nov. 2016.
- [34] B. L. Eidson, D. L. Geiger, and M. Halpin, "Equivalent power system impedance estimation using voltage and current measurements," in *Proc. Power Systems Conf., PSC'14*, 6 pp., Clemson, USA, 11-14 Mar. 2014.
- [35] B. Fridholm, T. Wik, and M. Nilsson, "Robust recursive impedance estimation for automotive lithium-ion batteries," *J. of Power Sources*, vol. 304, pp. 33-41, Feb. 2016.
- [36] M. Sumner, D. Thomas, A. Abusorrah, and P. Zanchetta, "Power system impedance estimation for improved active filter control, using continuous wavelet transforms," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission Distribution Conf. Exhibit*, pp. 653-658, Dallas, TX, USA, 21-24 May 2006.
- محمد مهدی علیان نژادی** مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی کامپیوتر اخذ کرده است. ایشان در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی کامپیوتر از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ کرده است. ایشان بیش از ۱۵ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های مختلف انتشار داده است. زمینه تحقیقاتی ایشان پردازش سیگنال، پردازش تصویر و داده کاوی است.
- حمید حسن پور** مدرک دکتری خود را در سال ۲۰۰۴ از دانشگاه صنعتی کوپیزلند، استرالیا اخذ کرده است. در حال حاضر، ایشان استاد تمام در دانشکده مهندسی کامپیوتر در دانشگاه صنعتی شاهرود است. از ایشان بیش از ۲۰۰ مقاله در مجله‌ها و کنفرانس‌های مختلف به چاپ رسیده است. زمینه تحقیقاتی ایشان پردازش تصویر، پردازش سیگنال و داده کاوی است.
- فیروز زارع** مدرک دکتری خود را در رشته الکترونیک قدرت از دانشگاه صنعتی کوپیزلند در سال ۲۰۰۲ اخذ کرده است. وی در حال حاضر استاد تمام دانشکده مهندسی برق دانشگاه کوپیزلند می‌باشد. ایشان سال‌ها مدیر پروژه‌های تحقیقاتی در زمینه الکترونیک قدرت با مبلغ بیش از هشت میلیون دلار بوده است. ایشان جوایز بین‌المللی متعددی نظیر John Madsen Medal و Australian Future Fellowship دریافت کرده است. از ایشان بیش از ۲۰۰ مقاله در مجله‌ها و کنفرانس‌های مختلف به چاپ رسیده است.