





پردیس بین‌المللی خوارزمی

رشته مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی

رساله دکتری

استفاده از روش‌های پردازش سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین

نگارنده: محمدمهدی علیان‌نژادی

استاد راهنما

دکتر حمید حسن‌پور

استاد مشاور

دکتر فیروز زارع

شهریور ۱۳۹۷

نمره

تقدیم به پدر، مادر و همسر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و آسمانی شان از اشار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و کرمای امید بخش وجودشان

به پاس قلب های بزرگشان

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بر خود لازم می‌دانم که از کلیه سرورانی که بنده را در این پژوهش یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از وی بتوان حرفی زد.

در ابتدا بایستی از آقای دکتر حمید حسن پور که زحمت راهنمایی این رساله را برعهده گرفتند، تشکر و قدردانی نمایم. ایشان با صبر و حوصله و همچنین راهنمایی‌های دقیق و ارزشمند، مرا در این پژوهش یاری کردند. بدون شک بدون راهنمایی‌های ایشان رسیدن به این مقصود ممکن نبود.

همچنین از استاد فرزانه، آقای دکتر فیروز زارع، استاد تمام دانشگاه کوئیزلند استرالیا که زحمت مشاوره این رساله را بر عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. نظرات و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان روشنگر مسیر من در این پژوهش بوده است.

در پایان از تمامی کسانی که به هر نحو ممکن مرا در این پژوهش یاری کردند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

تعهد نامه

اینجانب محمدمهدی علیان‌نژادی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی کامپیوتر دانشکده پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه استفاده از روش‌های پردازش سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین تحت راهنمایی دکتر حمید حسن‌پور متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده:

تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت در موارد زیادی، مانند تحلیل کیفیت توان شبکه‌های هوشمند و امنیت شبکه در برابر سوانح طبیعی، مانند صاعقه کاربرد دارد. در این رساله با بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال و تزریق سیگنال به شبکه‌های قدرت، امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین در محدوده فرکانسی $2\text{ kHz} - 150\text{ kHz}$ تخمین زده می‌شود.

در روش تزریق سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه در فرکانس f ، لازم است که سیگنال ولتاژ تزریق شده به شبکه حاوی مؤلفه فرکانسی f باشد. همچنین در شرایط نویزی میزان درستی تخمین امپدانس با انرژی سیگنال تزریقی رابطه مستقیم دارد. در این رساله با بهره‌گیری از ویژگی‌های پالس مربعی که حاوی محدوده وسیع فرکانسی است و تزریق آن به شبکه، تخمین امپدانس در محدوده وسیعی امکان‌پذیر می‌شود. در انتخاب پالس مربعی دو پارامتر بیشینه دامنه پالس و عرض پالس نقش اساسی دارد. هر چه عرض پالس بیشتر باشد، انرژی سیگنال نیز بیشتر خواهد بود؛ بنابراین دقت تخمین امپدانس به کمک آن بالاتر خواهد بود. از طرف دیگر، افزایش عرض پالس باعث کاهش پهنای باند سیگنال و در نتیجه کاهش محدوده فرکانسی تخمین می‌شود. اگرچه از نظر تئوری افزایش بیشینه دامنه پالس باعث افزایش دقت تخمین امپدانس خواهد شد، ولی سبب کاهش کیفیت توان شبکه می‌شود. همچنین، با حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به جای افزایش انرژی سیگنال تزریقی می‌توان دقت تخمین امپدانس را افزایش داد. در این رساله روشی برای حذف نویز از این سیگنال‌ها بر پایه تبدیل موجک پیشنهاد می‌شود.

عرض پالس تزریقی با پهنای باند فرکانسی آن رابطه عکس دارد. همچنین هر پالسی توانایی تخمین امپدانس در بعضی فرکانس‌ها را ندارد؛ بر این اساس در این رساله روشی برای انتخاب چندین پالس مربعی با عرض پالس‌های مختلف برای تخمین درست امپدانس در محدوده وسیع فرکانسی پیشنهاد می‌شود.

اگر زمان نمونه‌برداری از سیگنال کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود. در این حالت، تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین، اگر زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می‌یابد. بر اساس همین نتایج روشی برای تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری بر پایه توزیع زمان-فرکانس پیشنهاد می‌شود.

در این رساله، با در نظر گرفتن پارامترهای بررسی شده، روشی جامع برای تخمین امپدانس با کمک تزریق چندین سیگنال با عرض کم و حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و انتخاب درست زمان اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های مختلف اعمال و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده توانمندی روش پیشنهادی است. مطالعات ما نشان می‌دهد در منابع، روشی برای تخمین

امپدانس شبکه در این بازه فرکانسی جهت مقایسه وجود ندارد. در نهایت به منظور اعتبارسنجی رساله، ایده رساله بر روی یک شبکه واقعی آزمایش گردید.

واژگان کلیدی: پردازش سیگنال، تخمین امپدانس، پاسخ فرکانسی، توزیع زمان-فرکانس

لیست مقالات مستخرج از رساله

مجلات عملی - پژوهشی

[Paper 1]. M. M. AlyanNezhadi, F. Zare, and H. Hassanpour. "Grid Impedance Estimation using Several Short-term Low Power Signal Injections", *AUT Journal of Electrical Engineering*. (DOI: 10.22060/EEJ.2017.12501.5091) (Accepted in August 2017)

[Paper 2]. M. M. AlyanNezhadi, and H. Hassanpour, F. Zare, "A New High Frequency Grid Impedance Estimation Technique for the Frequency Range of 2 kHz to 150 kHz", *International Journal of Engineering*. (Accepted in August 2018)

[Paper 3]. M. M. AlyanNezhadi, and H. Hassanpour, F. Zare, "Grid Impedance Estimation in Frequencies 2–150 kHz with a Single Signal Injection Using Time-Frequency Distribution", *IET Generation, Transmission & Distribution*. (Submitted in August 2018)

[مقاله ۴]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور، ف. زارع، «استفاده از روش‌های پردازش

سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین در محدوده

فرکانسی 2kHz- 150 kHz»، مجله مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران. (ارسال

شده در شهریور ۱۳۹۷)

مجلات عملی - ترویجی

[مقاله ۵]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور، «تحلیل و پردازش سیگنال به کمک

روش‌های زمان - فرکانس»، مجله علوم رایانشی، جلد دوم، ۱۳۹۵.

کنفرانس

[Paper 6]. M. M. AlyanNezhadi, F. Zare and H. Hassanpour, "Passive grid impedance estimation using several short-term low power signal injections", *2nd International Conference of Signal Processing and*

Intelligent Systems (ICSPIS), Tehran, Iran, pp. 1-5, 2016. (**Outstanding paper**) (DOI: 10.1109/ICSPIS.2016.7869883)

[Paper 7]. M. M. AlyanNezhadi, H. Hassanpour and F. Zare, "**Grid impedance estimation using low power signal injection in noisy measurement condition based on wavelet denoising**", *3rd Iranian Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ICSPIS)*, Shahrood, Iran, pp. 81-86, 2017. (DOI: 10.1109/ICSPIS.2017.8311594)

[مقاله ۸]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور و ف. زارع، «بررسی تأثیر زمان نمونه‌برداری

بر روی درستی تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت»، اولین کنگره و نمایشگاه

بین‌المللی علوم و تکنولوژی‌های نوین، بابل، ایران، ۱۳۹۷.

فهرست مطالب

۱ - مقدمه‌ای بر تخمین امپدانس شبکه	۱
۱-۱ - مقدمه	۲
۱-۲ - هدف و فرضیات رساله	۷
۱-۳ - چالش‌های رساله	۷
۱-۴ - دستاوردهای رساله	۸
۱-۵ - سازماندهی طرح تحقیق	۱۲
۱-۶ - جمع‌بندی	۱۲
۲ - تئوری تخمین امپدانس و مروری بر کارهای پیشین	۱۵
۲-۱ - تخمین امپدانس	۱۶
۲-۲ - انواع روش‌های تخمین امپدانس	۱۶
۲-۳ - تخمین امپدانس شبکه به کمک تزریق سیگنال	۱۸
۲-۴ - انواع نویزهای موجود در شبکه‌های قدرت	۲۰
۲-۵ - تخمین امپدانس شبکه در حضور نویز	۲۲
۲-۶ - انواع سیگنال‌های تزریقی	۲۳
۲-۶-۱ - سیگنال ضربه و پالس مربعی	۲۳
۲-۶-۲ - سیگنال باینری	۲۴
۲-۶-۳ - سیگنال با مدولاسیون خطی	۲۵

۲۶.....	۲- ۷ - سایر روش‌های پیشین.....
۲۹	۲- ۸ - معیارهای ارزیابی.....
۲۹	۲- ۹ - جمع بندی.....
۳۱	۳ - روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت
۳۲	۳- ۱ - مقدمه.....
۳۳	۳- ۲ - عامل اول: انتخاب پالس‌های مناسب جهت تزریق به شبکه
۳۳	۳- ۲- ۱ - اثر عرض پالس مربعی بر روی درستی تخمین امپدانس
۳۶.....	۳- ۲- ۲ - انتخاب پالس‌های مناسب برای تزریق و تخمین امپدانس.....
۳۹	۳- ۲- ۳ - آزمایش‌ها و نتایج.....
۴۱	۳- ۳ - عامل دوم: حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده
۴۲	۳- ۳- ۱ - استفاده از تبدیل موجک برای حذف نویز
۴۴	۳- ۳- ۲ - آزمایش‌ها و نتایج.....
۵۲	۳- ۴ - عامل سوم: تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری سیگنال‌ها.....
۵۲	۳- ۴- ۱ - بررسی اثر زمان اندازه‌گیری بر روی درستی تخمین امپدانس
۵۵	۳- ۴- ۲ - روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌ها.....
۵۹	۳- ۴- ۳ - آزمایش‌ها و نتایج.....
۶۲.....	۳- ۵ - روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت.....
۶۵.....	۳- ۶ - جمع بندی.....

۴ - ارزیابی و نتایج ۶۷

۴-۱ - مقدمه ۶۸

۴-۲ - آزمایش‌های شبیه‌سازی ۶۸

۴-۲-۱ - آزمایش اول ۶۸

۴-۲-۲ - آزمایش دوم ۷۱

۴-۳ - اعتبارسنجی ایده رساله ۷۲

۴-۴ - جمع‌بندی ۷۴

۵ - جمع‌بندی و کارهای آینده ۷۵

۵-۱ - جمع‌بندی ۷۶

۵-۲ - کارهای آینده ۷۸

ضمیمه ۸۱

مراجع ۸۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: الف) یک شبکه توزیع؛ ب) مدل هارمونیکی شبکه. ۴
- شکل ۱-۲: استانداردهای بین المللی برای فرکانس‌های مختلف شبکه‌های قدرت. ۴
- شکل ۲-۱: شماتیک بلاک تخمین امپدانس برای شبکه‌های فعال و غیرفعال. ۱۸
- شکل ۲-۲: شماتیک نحوه اعمال نویز اندازه‌گیری در تخمین امپدانس. ۲۲
- شکل ۲-۳: سیگنال ضربه ایده‌آل در حوزه زمان و فرکانس. ۲۴
- شکل ۲-۴: نمونه‌ای از یک سیگنال باینری. ۲۵
- شکل ۲-۵: سیگنال با مدولاسیون خطی با فرکانس شروع ۱ هرتز و فرکانس پایان $500Hz$ (فرکانس نمونه‌برداری یک کیلوهرتز). ۲۶
- شکل ۳-۱: طیف دامنه یک پالس مربعی با عرض τ و دامنه بیشینه A . ۳۴
- شکل ۳-۲: شماتیک مدار مورد آزمایش در بخش ۳-۲. ۳۵
- شکل ۳-۳: یک توپولوژی عمومی برای یک سیستم قدرت. ۳۵
- شکل ۳-۴: تخمین امپدانس شبکه نشان داده شده در شکل ۳-۲ با پالس مربعی با عرض الف) $1\mu s$ ، ب) $10\mu s$ ، ج) $50\mu s$ ، د) $100\mu s$ ، ه) $150\mu s$ ، ز) $200\mu s$. ۳۷
- شکل ۳-۵: طیف دامنه سیگنال‌های انتخاب شده به کمک الگوریتم ژنتیک. ۴۰
- شکل ۳-۶: امپدانس تخمین زده شده با سیگنال‌های منتخب به کمک الگوریتم ژنتیک در بخش ۳-۲. ۴۱
- شکل ۳-۷: موجک sym4. ۴۲

- شکل ۳-۸ : شماتیک شبکه مورد آزمایش در بخش ۳-۳..... ۴۵
- شکل ۳-۹ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بار کامل با کمک چهار سیگنال تزریقی..... ۴۶
- شکل ۳-۱۰ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بار جزئی با کمک چهار سیگنال تزریقی..... ۴۷
- شکل ۳-۱۱ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بدون بار با کمک چهار سیگنال تزریقی..... ۴۷
- شکل ۳-۱۲ : انواع مختلف خطوط انتقال (همزمان فقط یکی از دو خط انتقال وجود دارد)..... ۴۸
- شکل ۳-۱۳ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت خط انتقال زیرزمینی با کمک چهار سیگنال تزریقی..... ۴۹
- شکل ۳-۱۴ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در خط انتقال هوایی با کمک چهار سیگنال تزریقی..... ۴۹
- شکل ۳-۱۵ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در زمان روز با کمک چهار تزریق..... ۵۱
- شکل ۳-۱۶ : تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در زمان شب با کمک چهار تزریق..... ۵۱
- شکل ۳-۱۷ : شبکه مورد آزمایش در بخش ۳-۴..... ۵۳
- شکل ۳-۱۸ : خطای امپدانس تخمین زده شده برای شبکه موجود در شکل ۳-۱۷ با مدت زمان‌های اندازه‌گیری مختلف..... ۵۴
- شکل ۳-۱۹ : امپدانس تخمین زده شده برای شبکه موجود در شکل ۳-۱۷ با مدت زمان اندازه‌گیری ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکروثانیه..... ۵۴
- شکل ۳-۲۰ : امپدانس تخمینی با مدت زمان‌های مختلف (گام اول)..... ۵۹

- شکل ۳- ۲۱ : مراحل مربوط به حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحه زمان-فرکانس. ۶۰
- شکل ۳- ۲۲ : امپدانس‌های تخمینی کاندیدا. ۶۱
- شکل ۳- ۲۳ : امپدانس تخمینی شبکه موجود در شکل ۳- ۱۷ با کمک روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان اندازه‌گیری. ۶۱
- شکل ۳- ۲۴ : الگوریتم پیشنهادی برای تخمین امپدانس ۶۲
- شکل ۴- ۱ : شبکه مورد آزمایش در بخش ۴- ۲. ۶۹
- شکل ۴- ۲ : صفحات زمان-فرکانس امپدانس تخمینی. ۶۹
- شکل ۴- ۳ : صفحات زمان-فرکانس که از آن‌ها نواحی با تخمین نادرست حذف شده است. ۷۰
- شکل ۴- ۴ : امپدانس تخمین زده شده به کمک هر تخمین. ۷۰
- شکل ۴- ۵ : امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش اول. ۷۱
- شکل ۴- ۶ : امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش دوم. ۷۲
- شکل ۴- ۷ : الف) شماتیک شبکه، ب) مجموعه آزمایش. ۷۳
- شکل ۴- ۸ : سیگنال‌های ولتاژ و جریان عبوری از PCC پس از تزریق سیگنال. ۷۳
- شکل ۴- ۹ : امپدانس تخمینی برای آزمایش عملی. ۷۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ : پارامترهای شبکه نشان داده شده در شکل ۳-۲.....	۳۵
جدول ۳-۲ : پارامترهای نویز هارمونیکی.....	۳۶
جدول ۳-۳ : پارامترهای الگوریتم ژنتیک.....	۳۸
جدول ۳-۴ : خطای امیدانس تخمین زده شده با سیگنال‌های منتخب به کمک الگوریتم ژنتیک در بخش ۳-۲-۲.....	۴۱
جدول ۳-۵ : پارامترهای عمومی مدار نشان داده شده در شکل ۳-۸.....	۴۵
جدول ۳-۶ : پارامترهای شبکه موجود در شکل ۳-۸ برای تخمین امیدانس در حالت اول.....	۴۶
جدول ۳-۷ : نتایج تخمین امیدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت اول.....	۴۶
جدول ۳-۸ : پارامترهای خطوط انتقال موجود در شکل ۳-۱۲.....	۴۸
جدول ۳-۹ : نتایج تخمین امیدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت دوم.....	۴۸
جدول ۳-۱۰ : نتایج تخمین امیدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت سوم.....	۵۰
جدول ۳-۱۱ : پارامترهای هر ساختمان در شبکه موجود در شکل ۳-۱۲.....	۵۰
جدول ۳-۱۲ : نتایج تخمین امیدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت چهارم.....	۵۱
جدول ۳-۱۳ : خطای امیدانس تخمین زده شده.....	۶۲
جدول ۴-۱ : خطای تخمین امیدانس برای آزمایش اول.....	۷۱
جدول ۴-۲ : خطای تخمین امیدانس برای آزمایش دوم.....	۷۲

واژه‌های اختصاری

علامت اختصاری	واژه اصلی
APE	Absolute Percentage Error
DFT	Discrete Fourier Transform
DTFT	Discrete Time Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
IEC	International Electrotechnical Commission
LFM	Linear Frequency Modulation
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
PCC	Point of Common Coupling
RLC	Resistor Inductor Capacitor
SNR	Signal to Noise Ratio
STFT	Short Time Fourier Transform
SWD	Stationary Wavelet Denoising
TF	Time-Frequency

واژه نامه

معادل فارسی	واژه انگلیسی
قدر مطلق خطای نسبی	Absolute Percentage Error
شبکه فعال	Active Grid
روش فعال	Active technique
ناهمزمان و همزمان	Asynchronous & Synchronous
همدوسی	Correlation
تبدیل فوریه گسسته	Discrete Fourier Transform
تبدیل فوریه زمان گسسته	Discrete Time Fourier Transform
عنصر	Element
تبدیل فوریه سریع	Fast Fourier Transform
کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک	International Electrotechnical Commission
سیگنال مدولاسیون خطی	Linear Frequency Modulation
میانگین قدر مطلق خطای نسبی	Mean Absolute Percentage Error
شبکه غیرفعال	Passive Grid
روش غیرفعال	Passive technique
تبدیل فوریه زمان کوتاه	Short Time Fourier Transform
نسبت سیگنال به نویز	Signal to Noise Ratio
ایستا	Stationary
حوزه زمان-فرکانس	Time-Frequency domain
بازنمایی زمان-فرکانس	Time-Frequency Representation

۱ – مقدمه‌ای بر تخمین امپدانس شبکه

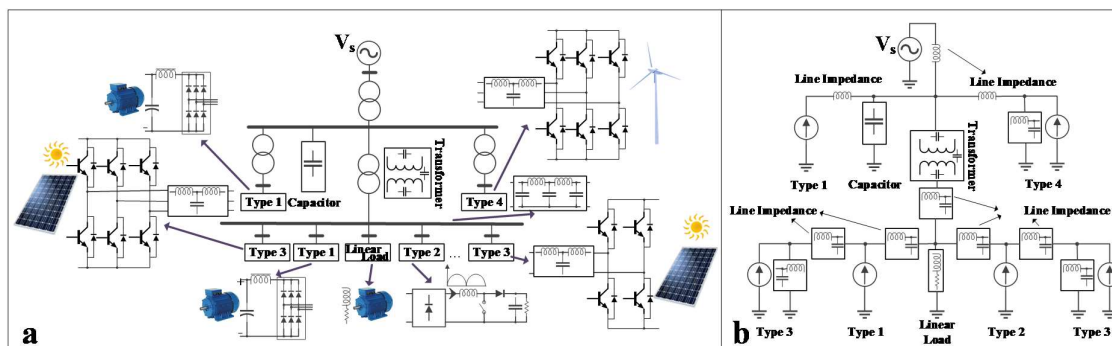
۱-۱ - مقدمه

وظیفه اصلی یک سیستم قدرت، تولید و انتقال انرژی از واحدهای تولید به سمت مصرف کننده‌ها است. سیستم‌های قدرت به سه زیرسیستم تولید، انتقال و توزیع تقسیم می‌شود. یکی از نیازهای جوامع صنعتی، انتقال انرژی با حداقل هزینه است؛ به عبارت دیگر، سیستم‌های انتقال انرژی باید بتوانند با حداقل تلفات انرژی را به دست مشتریان برسانند. تطبیق امپدانس می‌تواند باعث انتقال توان بیشینه یا حداقل شدن توان بازتابی شود [۱، ۲]. تطبیق امپدانس فرایندی است که در آن هم‌خوان‌سازی امپدانس الکتریکی دو بخش از یک مدار الکتریکی به هم متصل، صورت می‌گیرد. یکی دیگر از مسائل مهم در جوامع صنعتی، امنیت عناصر متصل به شبکه‌های قدرت در مقابل خطراتی مانند صاعقه است. با اطلاع از امپدانس شبکه در یک نقطه، می‌توان رفتار شبکه را تحت تأثیر اصابت صاعقه به آن نقطه تحلیل نمود. از این‌رو لازم است تا تخمین امپدانس شبکه با دقت مناسبی انجام شود.

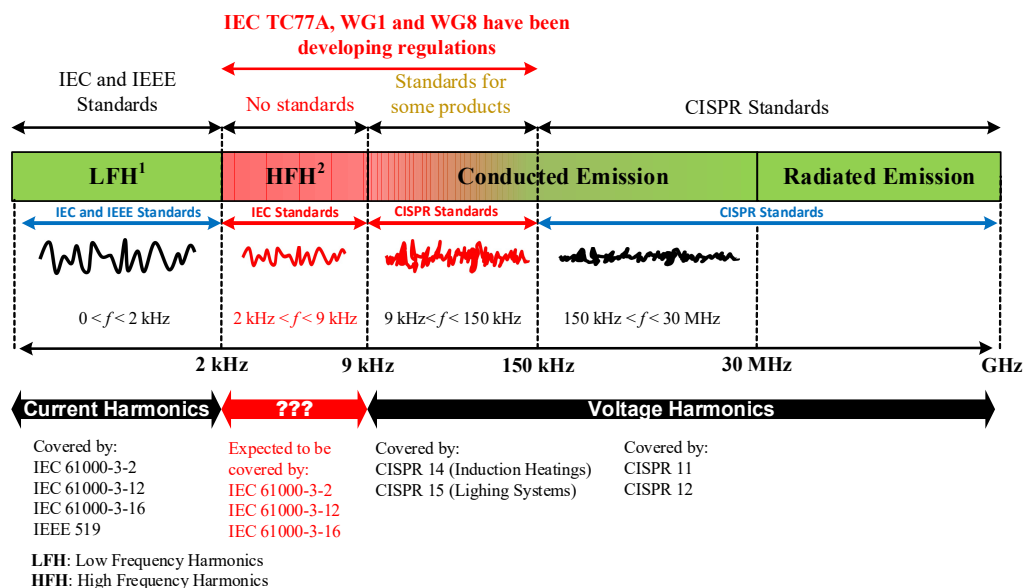
امروزه، صرفه جویی انرژی و تامین انرژی الکتریکی تجدیدپذیر یک شرط لازم برای مستقل شدن از تامین انرژی به کمک سوخت‌های فسیلی است. طبق پیش بینی گروه تحقیقاتی Pike [۳]، وسایل جانبی هوشمند متصل به شبکه‌های قدرت تا سال ۲۰۱۹ با رشد سالیانه ۲۶/۱ میلیارد دلار پیش خواهند رفت. به عنوان مثال سیستم‌های حمل و نقل به مدد تکنولوژی‌های نوین سیستم‌های قدرت به سمت الکتریکی شدن پیش می‌روند. این نفوذ سیستم‌های قدرت تجدیدپذیر در بسیاری از کشورهای جهان مانند استرالیا قابل مشاهده است. یکی از نقاط ضعف سیستم‌های الکترونیک قدرت، هارمونیک‌های موجود در شبکه است [۴]. این هارمونیک‌ها می‌تواند بر روی وسایل متصل به شبکه و سیگنال‌های ارتباطی درون شبکه تأثیر بگذارد [۵]. 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 عظیم تولید می‌کنند (شکل ۱-۱).

استانداردها و مستندات علمی بین‌المللی، شبکه‌های قدرت را در محدوده فرکانس‌های زیر 2 kHz (IEC 61000-3-2، IEC 61000-3-12 و IEEE 519) و بالای 150 kHz (CISPR) پوشش می‌دهند (شکل ۱-۲). در حال حاضر تحقیقات کمی بر روی هارمونیک‌های محدوده فرکانسی 2-150 kHz انجام شده است. امروزه این موضوع، یکی از مسائل مهم کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC, TC77A) است. کارگروه هشت از این کمیسیون (IEC-TC77A-WG8) بر روی تعریف سطوح سازگاری برای محدوده فرکانسی 2-150 kHz کار می‌کند. تاکنون هیچ استاندارد برای این محدوده ارائه نشده است [۶-۱۰]. پیش‌بینی زمانی برای کار روی این محدوده فرکانسی توسط کمیته بین‌المللی استاندارد برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است [۱۱]. شکل ۱-۲ استانداردهای موجود برای محدوده‌های فرکانسی مختلف را نشان می‌دهد. 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 2 kHz) بر اساس امپدانس خط و مبدل‌ها (با ماهیت مقاومتی و سلفی) مشخص می‌شود. تخمین امپدانس در این محدوده فرکانسی توسط محققین مختلفی انجام شده است [۱۲]. اما تحقیقات ما نشان می‌دهد که تخمین امپدانس و بررسی کیفیت توان شبکه در محدوده فرکانسی 2-150 kHz انجام نشده 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.



شکل ۱- ۱: الف) یک شبکه توزیع؛ ب) مدل هارمونیک شبکه.



شکل ۲- ۱: استانداردهای بین المللی برای فرکانس های مختلف شبکه های قدرت.

در این رساله، امپدانس شبکه به منظور تعیین تغییرات امپدانس در گذر زمان و در فرکانس های مختلف مدل شده است. به عنوان مثال، سیستم های روشنایی هوشمند در شب به عنوان یک فیلتر مقاومتی عمل می کنند. از طرف دیگر، سیستم های خورشیدی در شب توانایی تولید انرژی را ندارند ولی فیلترهای LCL متصل کننده آنها به شبکه همواره وجود دارد و این فیلترها ضریب میرایی پایینی دارند که باعث افزایش انتشار هارمونیک ها می شود. بنابراین، امپدانس شبکه در طول روز و شب متفاوت خواهد بود. کاربردها و نیاز به تخمین امپدانس شبکه های قدرت فقط منوط به موارد بالا نمی شود. در زیر تعدادی از این کاربردها آمده است:

- افزایش پایداری کنترلر جریان با انتخاب برخط پارامترهای آن [۱۳]
 - طراحی مبدل پایدار با توجه به تغییرات امپدانس مدار در طول زمان [۱۴]
 - طراحی فیلتر [۱۵] برای کاهش هارمونیک‌های شبکه
 - کنترل سیستم‌های تولید توزیع شده [۱۶]
 - شناسایی ناحیه‌هایی که از شبکه سراسری قطع شده ولی منبع تولید توزیع شده همچنان به تامین انرژی در آن ناحیه می‌پردازد [۱۷].
 - کنترل ولتاژ در شبکه‌های ولتاژ پایین توزیع شده [۱۸]
 - محاسبه فرکانس‌های رزونانس مدار [۱۹]
 - تحلیل کیفیت توان شبکه‌های توزیع شده و هوشمند
 - طراحی مبدل‌های مبتنی بر منبع امپدانس [۲۰, ۲۱]
- امپدانس میزان مقاومت یک یا چند عنصر تحت اختلاف پتانسیل نسبت به گذر جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. به بخش حقیقی و موهومی امپدانس به ترتیب مقاومت الکتریکی و راکتانس گفته می‌شود. ادمیتانس نیز عکس امپدانس است. هدف این تحقیق، استفاده از روش‌های پردازش سیگنال به منظور تخمین امپدانس شبکه تا فرکانس 150 kHz است. امپدانس شبکه در همه فرکانس‌ها یکسان نیست؛ به عبارت دیگر، میزان مقاومت یک شبکه قدرت نسبت به ولتاژ ورودی، وابسته به فرکانس ولتاژ ورودی است.
- همه روش‌های تخمین امپدانس شبکه از قانون اهم استفاده می‌کنند. بر اساس آن، امپدانس یک عنصر به صورت نسبت ولتاژ دو سر المان بر جریان عبوری از آن در حوزه فرکانس تعریف می‌شود [۲۲].

روش‌های تخمین امپدانس شبکه به دو دسته روش‌های غیرفعال^۱ [۲۳، ۲۴] و روش‌های فعال^۲ [۱۴، ۲۵، ۲۶] تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرفعال بدون تغییر یا تزریقی در شبکه، امپدانس را تخمین می‌زنند؛ بنابراین کیفیت توان شبکه را کاهش نمی‌دهند. در این دسته از روش‌ها، ابتدا جریان و ولتاژ عبوری از یک نقطه مدار محاسبه می‌شود، و سپس با کمک قانون اهم در حوزه فرکانس، امپدانس شبکه تخمین زده می‌شود. این روش‌ها فقط امپدانس شبکه را در فرکانس‌هایی تخمین می‌زنند که در زمان نمونه‌برداری در شبکه وجود دارد. از آنجایی که معمولاً شبکه در شرایط کاری عادی شامل فرکانس‌های کمی (فرکانس‌های ۵۰ یا ۶۰ هرتز) می‌باشد، اگر اعوجاج‌های^۳ شبکه به قدر کافی نباشد، این روش‌ها کارآمد نیستند [۲۷، ۲۸].

در روش‌های فعال با تزریق سیگنال به شبکه، اعوجاج‌هایی در شبکه ایجاد می‌شود و به کمک آن می‌توان امپدانس شبکه را تخمین زد. مزیت روش‌های فعال، دقت بالای تخمین به کمک آن‌ها است [۲۸]. از همین رو، روش‌های فعال خیلی مورد توجه هستند [۲۹].

از طرف دیگر روش‌های تخمین امپدانس شبکه به دو دسته روش‌های تخمین تک فرکانسی و تخمین بازه‌ای تقسیم می‌شود. در روش‌های تخمین تک فرکانسی، هدف تخمین امپدانس در فرکانس مشخصی است. در حالیکه در روش‌های تخمین بازه‌ای، هدف تخمین امپدانس در بازه وسیعی از فرکانس‌ها است. همانطور که بیان شد امپدانس الکتریکی در حوزه فرکانس تعریف می‌شود. برای تبدیل یک سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس از تبدیل فوریه استفاده می‌شود. اگرچه تبدیل فوریه یک سیگنال، تنها تابعی از فرکانس سیگنال است، ولی تبدیل فوریه نمایش کاملی از سیگنال است؛ به عبارت دیگر سیگنال $s(t)$ می‌تواند از روی $S(\omega)$ محاسبه شود [۳۰]. هدف آنالیز فوریه، شکستن سیگنال به مؤلفه‌های

¹ Passive techniques

² Active techniques

³ Distortions

فرکانسی ثابت و محاسبه دامنه و فاز آن‌ها است. اگرچه تبدیل فوریه نمایش کاملی از سیگنال است ولی طیف دامنه (اندازه تبدیل فوریه) و طیف فاز (زاویه تبدیل فوریه) یک سیگنال به تنهایی کامل نمی‌باشند [۳۱].

۱-۲ - هدف و فرضیات رساله

هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت به کمک روش‌های پردازش سیگنال در محدوده وسیع فرکانسی است. مطالعات ما نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات کمی در بازه فرکانسی $2kHz$ تا $150kHz$ انجام شده است (شکل ۱-۲). همانطور که مطرح شد، پیش‌بینی زمانی برای کار روی این محدوده فرکانسی توسط IEC برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است [۱۱]. از آنجایی که محدوده فرکانسی تخمین در این رساله وسیع است، انتخاب سیگنال تزریقی و چگونگی پردازش سیگنال‌ها اهمیت فراوانی دارد.

در این رساله محدودیتی بر روی شبکه‌های قدرت از نظر ساختار در نظر گرفته نشده است و هدف ارائه راه حلی عمومی برای تخمین امپدانس شبکه از دید یک نقطه دلخواه در شبکه است. همچنین در این رساله فرض شده است که شبکه فقط دارای عناصر خطی است و امپدانس شبکه با زمان تغییری نمی‌کند. اگرچه این فرض همواره درست نیست، ولی در زمان‌های کوتاه که در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته است، فرض درستی است. در این رساله تنها امپدانس شبکه‌های تک فاز مورد بررسی قرار گرفته است. در این رساله، دو مدل نوین اندازه‌گیری و هارمونیک برای شبکه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

۱-۳ - چالش‌های رساله

هدف این تحقیق تخمین امپدانس شبکه در باند وسیع فرکانسی است. برای تخمین امپدانس در یک باند وسیع فرکانسی، سیگنال تزریقی باید در پهنای باند وسیعی دارای انرژی کافی باشد. انتخاب این سیگنال و پارامترهای تنظیم آن اهمیت فراوانی دارد. یکی از سیگنال‌های تزریقی مهم برای تخمین

امپدانس شبکه، پالس مربعی است. پالس مربعی در برخی فرکانس‌ها انرژی نزدیک به صفر دارد؛ بنابراین باید چندین پالس برای تخمین امپدانس انتخاب کرد. تنظیم پارامترهای این پالس (عرض پالس و بیشینه دامنه پالس) و همچنین تعیین تعداد پالس لازم برای تخمین امپدانس اهمیت فراوانی دارد. در شبکه‌های قدرت نویز متنوع و قوی‌ای وجود دارد که مسئله تخمین امپدانس را پیچیده می‌کند. در شبکه‌های قدرت دو نوع نویز را می‌توان متصور شد: نویز شبکه، و خطای اندازه‌گیری. همچنین امپدانس شبکه‌های مختلف قدرت بسیار متفاوت با یکدیگر است.

۱-۴ - دستاوردهای رساله

اولین پارامتر در تخمین امپدانس شبکه با کمک روش‌های فعال، انتخاب نوع سیگنال تزریقی است. از آنجایی که هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه در محدوده وسیع فرکانسی است، از پالس مربعی جهت تزریق استفاده شده است؛ زیرا پالس مربعی شامل طیف فرکانسی وسیعی است. این موضوع در بخش ۳-۲-۱ به دقت بررسی شده است.

در انتخاب پالس مربعی دو پارامتر بیشینه دامنه پالس و عرض آن نقش اساسی دارد. در شرایط وجود نویز، هر چه بیشینه عرض پالس بیشتر باشد، انرژی سیگنال نیز بیشتر خواهد بود؛ بنابراین دقت تخمین امپدانس به کمک آن بالاتر خواهد بود. اگرچه از نظر تئوری افزایش بیشینه دامنه پالس باعث افزایش دقت تخمین امپدانس خواهد شد، ولی با افزایش بیشینه دامنه پالس کیفیت توان شبکه نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به جای افزایش انرژی سیگنال تزریقی می‌توان دقت تخمین امپدانس را افزایش داد. در این رساله روشی برای حذف نویز از این سیگنال‌ها بر پایه تبدیل موجک پیشنهاد شده است. ایده اولیه طرح در مقاله زیر ارائه شده است.

[Paper 1]. M. M. AlyanNezhadi, H. Hassanpour and F. Zare, "Grid impedance estimation using low power signal injection in noisy measurement condition based on wavelet denoising", 3rd Iranian

Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ICSPIS),

Shahrood, Iran, pp. 81-86, 2017. (DOI: 10.1109/ICSPIS.2017.8311594)

عرض پالس تزریقی با پهنای باند فرکانسی آن رابطه عکس دارد. همچنین هر پالسی توانایی محدودی در تخمین درست امپدانس دارد. این مسئله در مقاله زیر بررسی گردیده است. این مقاله به عنوان مقاله برگزیده در دومین کنفرانس بین‌المللی پردازش سیگنال و سیستم‌های هوشمند انتخاب گردید.

[Paper 2]. M. M. AlyanNezhadi, F. Zare and H. Hassanpour, "**Passive grid impedance estimation using several short-term low power signal injections**", *2nd International Conference of Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS)*, Tehran, Iran, pp. 1-5, 2016. (**Outstanding paper**) (DOI: 10.1109/ICSPIS.2016.7869883)

ایده پیشنهادی در این مقاله این بود که با انتخاب چندین پالس مربعی مناسب می‌توان امپدانس را در محدوده وسیع فرکانسی تخمین زد. در نهایت روشی به منظور انتخاب پالس‌های مربعی بر پایه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد گردید. این موضوع در مقاله زیر آمده است.

[Paper 3]. M. M. AlyanNezhadi, F. Zare, and H. Hassanpour. "**Grid Impedance Estimation using Several Short-term Low Power Signal Injections**", *AUT Journal of Electrical Engineering*, 2017. (DOI: 10.22060/EEJ.2017.12501.5091) (Accepted in August 2017)

همچنین روشی بر اساس تزریق چند سیگنال با عرض کم و حذف نویز به کمک تبدیل موجک پیشنهاد شده است. این موضوع در مقاله زیر آمده است.

[Paper 4]. M. M. AlyanNezhadi, and H. Hassanpour, F. Zare, "**A New High Frequency Grid Impedance Estimation Technique for the Frequency Range of 2 kHz to 150 kHz**", *International Journal of Engineering*. (Accepted in August 2018).

پس از انتخاب سیگنال مناسب (پالس با عرض کم و انرژی کافی) برای تزریق به شبکه، جریان عبوری از PCC¹ و ولتاژ PCC باید اندازه‌گیری شود. در اندازه‌گیری این دو سیگنال، انتخاب درست دو پارامتر

¹ Point of Common Coupling

فرکانس نمونه‌برداری و زمان اندازه‌گیری اهمیت دارد. بر اساس تئوری نایکوئیست فرکانس نمونه‌برداری باید حداقل دو برابر حداکثر فرکانس مورد نظر برای اندازه‌گیری امپدانس باشد [۳۲]. با توجه به آن که در این رساله حداکثر فرکانس تخمین امپدانس 150kHz است، بنابراین فرکانس نمونه‌برداری باید حداقل 300kHz باشد. وسایل اندازه‌گیری موجود، فرکانس‌های نمونه‌برداری بالا مانند 10MHz ^۱ را پشتیبانی می‌کند؛ بنابراین از این جهت، مشکلی وجود ندارد.

مطالعات ما نشان می‌دهد در تحقیقات گذشته پارامتر زمان نمونه‌برداری بررسی نشده است. نتایج شبیه‌سازی‌های ما نشان می‌دهد که زمان نمونه‌برداری در دقت تخمین امپدانس مؤثر است. این تأثیر ناشی از دو موضوع زیر است. اول، اگر زمان نمونه‌برداری کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود. در این حالت، تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. دوم، اگر زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می‌یابد. این مسئله در مقاله زیر بررسی شده است.

[مقاله ۵]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور و ف. زارع، «بررسی تأثیر زمان نمونه‌برداری

بر روی درستی تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت»، اولین کنگره و نمایشگاه

بین‌المللی علوم و تکنولوژی‌های نوین، بابل، ایران، ۱۳۹۷.

در این رساله، یک روش زمان-فرکانس^۲ به منظور بازنمایی امپدانس شبکه با زمان‌های اندازه‌گیری مختلف ارائه شده است. پس از بازنمایی امپدانس در حوزه زمان-فرکانس بایستی بخشی از صفحه امپدانس که تخمین در آن ناحیه نادرست است (نواحی با زمان اندازه‌گیری کم)، حذف شود. ناحیه حذف

^۱ اسیلوسکوپ‌ها معمولاً با معیار تعداد نقاط گسسته سازی برای ذخیره سازی در حافظه مشخص می‌شوند که مشخص می‌کند دستگاه می‌تواند

تصویر لحظه جاری در اسیلوسکوپ را به چند نقطه از نظر زمانی گسسته نماید. در هر صورت، اسیلوسکوپ‌هایی مانند Rohde & Schwarz RTE1000 به خوبی می‌توانند با فرکانس 10MHz نمونه‌برداری را انجام دهند.

^۲ در ضمیمه به صورت مختصر روش‌های تحلیل و پردازش زمان-فرکانس سیگنال آمده است.

به کمک محاسبه گرادیان صفحه زمان-فرکانس در راستای زمان انجام می‌شود. پس از حذف این ناحیه، باید بهترین تخمین از میان بقیه صفحه انتخاب شود. منحنی امپدانس شبکه نباید دارای پالس‌های ضربه باشد. از اینرو، به کمک آنالیز ویینر^۱ بهترین تخمین انتخاب می‌شود. این روش در مقاله زیر آمده است.

[Paper 6]. M. M. AlyanNezhadi, and H. Hassanpour, F. Zare, "Grid Impedance Estimation in Frequencies 2–150 kHz with a Single Signal Injection Using Time-Frequency Distribution", IET Generation, Transmission & Distribution. (Submitted in August 2018)

در زمینه بررسی روش‌های مختلف حوزه زمان-فرکانس مقاله مروری زیر مستخرج گردید.

[مقاله ۷]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور، «تحلیل و پردازش سیگنال به کمک

روش‌های زمان - فرکانس»، مجله علوم رایانشی، جلد دوم، ۱۳۹۵.

در نهایت با جمع‌بندی نتایج حاصل از بخش‌های قبلی، روشی برای تخمین امپدانس با کمک تزریق چندین سیگنال با عرض کم و حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و انتخاب درست زمان اندازه‌گیری پیشنهاد شده است. این روش در مقاله زیر آمده است.

[مقاله ۸]. م.م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور، ف. زارع، «ارائه روشی برای تخمین

امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین در محدوده فرکانسی 2-150 KHz به

کمک روش‌های زمان-فرکانس»، مجله مهندسی برق ومهندسی کامپیوتر ایران.

(ارسال شده در شهریور ۱۳۹۷)

¹ Wiener entropy

۱-۵ - سازماندهی طرح تحقیق

این رساله در پنج فصل سازماندهی شده است. در فصل دوم به بررسی تئوری تخمین امپدانس شبکه و مروری بر کارهای گذشته پرداخته شده است. در فصل سوم پارامترهای موثر در تخمین امپدانس بررسی شد. نتیجه بررسی‌ها در مقالات مختلف گزارش شده است. در فصل چهارم با بهره‌گیری بررسی‌های انجام شده در فصل سوم، یک روش جامع برای تخمین امپدانس بر پایه حذف نویز به کمک تبدیل موجک و روش‌های زمان-فرکانس ارائه شده است. در نهایت در فصل پنجم یک جمع‌بندی از کل رساله ارائه گردیده است. ضمناً پیشنهادهایی نیز برای ادامه کار ارائه می‌شود.

۱-۶ - جمع‌بندی

تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت در موارد زیادی کاربرد دارد. هدف این رساله ارائه روشی به منظور تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت در محدوده فرکانسی $2 - 150 \text{ kHz}$ به کمک روش‌های پردازش سیگنال است. همه روش‌های تخمین امپدانس شبکه از قانون اهم استفاده می‌کنند. بر اساس آن، امپدانس یک عنصر به صورت نسبت ولتاژ دو سر المان بر جریان عبوری از آن در حوزه فرکانس تعریف می‌شود. به منظور محاسبه امپدانس شبکه در یک فرکانس مشخص، سیگنال ولتاژ باید شامل مولفه فرکانسی در همان فرکانس باشد. از آنجایی که شبکه‌های قدرت شامل مولفه‌های فرکانسی در همه بازه $2 \text{ kHz} - 150 \text{ kHz}$ نیستند، بنابراین این مولفه‌ها به کمک تزریق سیگنال ایجاد می‌شود. همچنین در شرایط نویزی، درستی تخمین امپدانس در یک فرکانس مشخص، به انرژی مولفه فرکانسی در همان فرکانس وابسته است. از اینرو انتخاب درست این سیگنال‌ها اهمیت زیادی دارد. معمولاً سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده از شبکه حاوی نویز است. به منظور کاهش این اثر می‌توان انرژی سیگنال تزریقی را افزایش داد ولی اینکار باعث کاهش کیفیت توان شبکه می‌شود. از اینرو، به کمک روش‌های رفع نویز می‌توان اثر نویز به درستی تخمین امپدانس را کاهش داد.

اگر مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان کم باشد، همه حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود و تخمین نادرست خواهد بود. همچنین اگر مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌ها زیاد باشد، تاثیر نویز در تخمین بیشتر شده و امیدانس به درستی تخمین زده نمی‌شود.

۲ – تئوری تخمین امیدانس و مروری بر کارهای پیشین

۲-۱ - تخمین امپدانس

برای تخمین امپدانس شبکه از یک نقطه (PCC) نسبت به زمین کافی است ولتاژ و جریان عبوری از PCC اندازه‌گیری شود. 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.

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC}(f)}{I_{PCC}(f)}, \quad (2-1)$$

که در آن $V_{PCC}(f)$ ، $I_{PCC}(f)$ و $Z_g(f)$ به ترتیب ولتاژ، جریان عبوری از نقطه PCC و امپدانس شبکه در حوزه فرکانس می‌باشد. برای محاسبه امپدانس شبکه در فرکانس f_f سیگنال تزریقی باید شامل مؤلفه فرکانسی f_f باشد؛ به عبارت دیگر $V_{PCC}(f_f) \neq 0$.

۲-۲ - انواع روش‌های تخمین امپدانس

روش‌های تخمین امپدانس بر اساس عملکرد به دو دسته روش‌های غیرفعال [۲۳، ۲۴] و فعال [۱۴، ۲۵، ۲۶] تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرفعال، صرفاً سیگنال‌های ولتاژ و جریان گذرا از PCC اندازه‌گیری می‌شود. در این روش‌ها، هیچ تغییری در شبکه ایجاد نمی‌شود. 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؛ بنابراین این روش‌ها 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 غیرفعال 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 که از آن می‌توان به عنوان اشکال روش‌های فعال نام برد. از همین رو، در تخمین امپدانس به کمک تزریق سیگنال همواره یک مسئله مهم آن است که انرژی سیگنال تزریقی نباید از حد مشخصی بیشتر باشد که بتواند کیفیت شبکه را تحت تأثیر خود قرار دهد [۲۷، ۳۳].

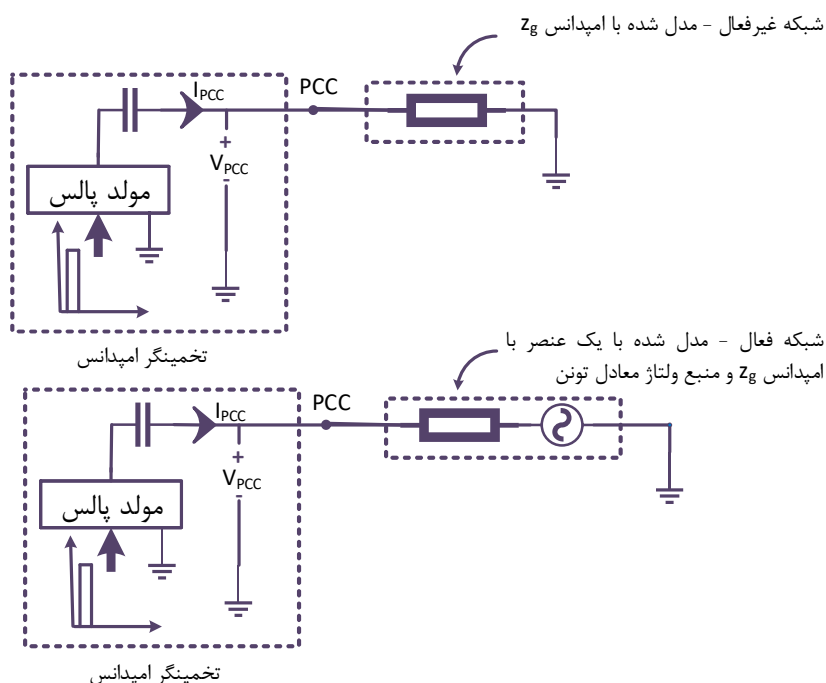
در شرایط بدون نویز، درستی تخمین امپدانس شبکه به انرژی سیگنال تزریقی وابسته نیست. در شرایط نویزی (نویز اندازه‌گیری یا نویز هارمونیک منبع ولتاژ شبکه)، درستی تخمین امپدانس به انرژی سیگنال تزریقی وابسته است [۳۴]. این موضوع در بخش ۲-۵ بررسی شده است.

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_f به مدار اعمال می‌شود و با استفاده از تقسیم مؤلفه فرکانسی سیگنال ولتاژ به سیگنال جریان، امپدانس مدار در فرکانس f_f محاسبه می‌شود [۱۳].

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 هر چه بیشتر باشد امپدانس در فرکانس‌های بیشتری را می‌توان با کمک آن تخمین زد. محاسبه امپدانس شبکه در یک بازه فرکانسی وسیع دشوارتر است. هدف این پژوهش تخمین امپدانس در محدوده وسیع فرکانسی است.

۲-۳ - تخمین امپدانس شبکه به کمک تزریق سیگنال

شبکه‌های غیر فعال^۱ حاوی منبع تغذیه (با فرکانس 50Hz یا 60Hz) نیستند؛ بنابراین آن‌ها را می‌توان به صورت یک عنصر^۲ با امپدانس Z_g مدل کرد. برای تخمین امپدانس یک نقطه (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 (شکل ۲-۱). در این حالت، برای تخمین امپدانس می‌توان از رابطه ۱-۲ استفاده کرد.



شکل ۲-۱: شماتیک بلاک تخمین امپدانس برای شبکه‌های فعال و غیرفعال

بر اساس قضیه تونن [۳۵] هر شبکه فعال را می‌توان به صورت یک عنصر با امپدانس Z_g و سری شده با منبع ولتاژ $V_{Thevenin}$ مدل کرد. در منابع، از مدار معادل تونن برای مدل کردن شبکه‌های قدرت استفاده

^۱ Passive

^۲ Element

می‌شود [۳۵]؛ بنابراین برای محاسبه امپدانس شبکه می‌توان از مدار شکل ۲-۱ استفاده کرد. در این حالت، برای محاسبه امپدانس شبکه در فرکانس f می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC}(f) - V_{Thevenin}(f)}{I_{PCC}(f)} \quad (۲-۲)$$

در این رابطه $V_{Thevenin}(f)$ ، $V_{PCC}(f)$ و $I_{PCC}(f)$ به ترتیب ولتاژ تونن شبکه، ولتاژ نقطه PCC و جریان عبوری از PCC در حوزه فرکانس است. از آنجایی که عملاً اندازه‌گیری ولتاژ تونن شبکه کار دشواری است [۳۶]، استفاده مستقیم از رابطه بالا کارآمد نیست [۳۷]. یکی از راهکارهای استفاده از این رابطه، تخمین همزمان $V_{Thevenin}(f)$ و $Z_g(f)$ می‌باشد. برای اینکار کافی است شبکه را تحت آزمایش با دو سیگنال تزریقی قرار داد. در رابطه زیر $V_{Thevenin,n_1}(f)$ ، $V_{PCC,n_1}(f)$ و $I_{PCC,n_1}(f)$ به ترتیب ولتاژ تونن شبکه، ولتاژ نقطه PCC و جریان عبوری از PCC برای تزریق دفعه اول می‌باشد. همینطور، $V_{Thevenin,n_2}(f)$ ، $V_{PCC,n_2}(f)$ و $I_{PCC,n_2}(f)$ به ترتیب ولتاژ تونن شبکه، ولتاژ نقطه PCC و جریان عبوری از PCC برای تزریق دفعه دوم می‌باشد. با توجه به آن که امپدانس شبکه به صورت تنک در بازه‌های زمانی تغییر می‌کند [۳۸، ۳۹]، رابطه زیر را می‌توان نوشت.

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC,n_1}(f) - V_{Thevenin,n_1}(f)}{I_{PCC,n_1}(f)} = \frac{V_{PCC,n_2}(f) - V_{Thevenin,n_2}(f)}{I_{PCC,n_2}(f)} \quad (۳-۲)$$

فرض کنید b و d مخالف صفر باشند و $b \neq d$ باشد، اگر فرض زیر برای آن‌ها برقرار باشد:

$$x = \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (۴-۲)$$

داریم:

$$\begin{cases} a = x.b \\ c = x.d \end{cases} \Rightarrow a - c = x(b - d) \Rightarrow x = \frac{a - c}{b - d} \quad (۵-۲)$$

با توجه به رابطه بالا می‌توان امپدانس $Z_g(f)$ را به صورت زیر نوشت:

$$Z_g(f) = \frac{(V_{PCC,n_1}(f) - V_{Thevenin,n_1}(f)) - (V_{PCC,n_2}(f) - V_{Thevenin,n_2}(f))}{I_{PCC,n_1}(f) - I_{PCC,n_2}(f)} \quad (۶ - ۲)$$

از آنجایی که معمولاً پارامترهای شبکه در گام‌های تنک تغییر می‌کند، می‌توان ولتاژ تونن شبکه را تا حد زیادی ایستا در نظر گرفت [۳۸]. بنابراین می‌توان فرض کرد که فرکانس‌های ولتاژ تونن شبکه در دو تزریق اول و دوم تغییری نمی‌کند و امپدانس شبکه از روی رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Z_g(f) = \frac{V_{PCC,n_1}(f) - V_{PCC,n_2}(f)}{I_{PCC,n_1}(f) - I_{PCC,n_2}(f)} \quad (۷ - ۲)$$

در رابطه بالا فقط سیگنال ولتاژ PCC و سیگنال جریان عبوری از نقطه PCC مورد نیاز می‌باشد که اندازه‌گیری آن‌ها به آسانی انجام می‌شود. برای استفاده از رابطه بالا برای تخمین امپدانس در فرکانس f باید مؤلفه ولتاژ در فرکانس f در دو تزریق اول و دوم با یکدیگر برابر نباشد.

۲-۴ - انواع نویزهای موجود در شبکه‌های قدرت

معمولاً در همه شبکه‌های قدرت نویز وجود دارد که تخمین امپدانس را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. همچنین همه سیستم‌های اندازه‌گیری دارای خطا می‌باشند که در این رساله در نظر گرفته شده است. خطای اندازه‌گیری را می‌توان به صورت نویز گوسی جمع‌شونده در نظر گرفت.

تنوع نویزهای شبکه‌های قدرت بسیار زیاد است و نویز می‌تواند رفتارهای متفاوتی داشته باشد. نویز شبکه‌های قدرت دارای دو منشأ است. یکی نویز تولید شده توسط دستگاه‌های متصل به شبکه قدرت و دیگری نویز خارجی افزوده شده به شبکه از طریق انتقال یا تابش است [۴۰]. نویز شبکه‌های قدرت را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

نویز با ماهیت ضربه: این نویز خود شامل چندین زیر دسته می‌باشد:

الف: نویز ضربه متناوب همزمان با خطوط انتقال برق: این نویز همزمان با خطوط انتقال برق (با فرکانس 50Hz یا 60Hz) است. معمولاً این نویز بخاطر یکسوسازهای سیلیکونی به وجود می‌آید.

ب: نویز ضربه متناوب ناهمزمان با خطوط انتقال برق: این نویز به صورت ضربه‌های متناوب با فرکانس تکرار 50kHz تا 100kHz است. این نویز توسط منابع تغذیه سوییچینگ در شبکه ایجاد می‌شود. معمولاً این نویز در محدوده فرکانس چند کیلوهرتز تا 11MHz ظاهر می‌شود [۴۱].

ج: نویز ضربه غیر متناوب: این نویز را می‌توان ناشی از اتصال یا قطع دستگاه‌های الکترونیکی از شبکه دانست؛ بنابراین معمولاً این نویز وابسته به فعالیت‌های انسانی است. این مدل نویز ممکن است به صورت تک پالس ضربه یا قطار ضربه به شبکه اعمال شود. چگالی توان این نویزها می‌تواند به ده‌ها دسی بل برسد. همچنین عرض این ضربه‌ها (پالس مربعی) می‌تواند به چندین میلی‌ثانیه برسد [۴۱]. از آنجایی که معمولاً این نویز وابسته به فعالیت‌های انسانی است، پیش‌بینی رخدادن این نویز غیرممکن [۴۱] و یا بسیار دشوار است.

نویز باریک باند: این نویز بخاطر اثر سیگنال‌های رادیویی بر روی شبکه ایجاد می‌شود.

نویز رنگی پشت زمینه: این نویز را می‌توان به صورت مجموع نویزهای ایجاد شده توسط منابع مختلف با چگالی انرژی نویز کم در نظر گرفت [۴۱]. معمولاً این نویز به صورت نویز گوسی رنگی در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. این نویز با فرکانس به صورت نمایی [۴۳] و یا چند جمله‌ای [۴۴] رابطه عکس دارد.

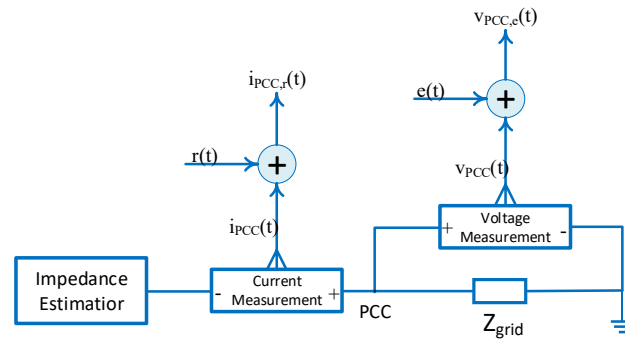
۲-۵ - تخمین امپدانس شبکه در حضور نویز

فرض کنید سیگنال‌های اندازه‌گیری شده $v_{PCC,e}(t)$ و $i_{PCC,r}(t)$ حاوی نویز جمع شونده $e(t)$ و $r(t)$ باشند (شکل ۲-۲). اگر بر اساس رابطه اهم امپدانس شبکه محاسبه شود، امپدانس شبکه و خطای نسبی آن به صورت زیر خواهد بود.

$$Z_n(f) = \frac{V_{PCC,e}(f)}{I_{PCC,r}(f)} = \frac{V_{PCC}(f) + E(f)}{I_{PCC}(f) + R(f)} = \frac{V_{PCC}(f)}{I_{PCC}(f) + R(f)} + \frac{E(f)}{I_{PCC}(f) + R(f)} \quad (۲-۸)$$

$$Err(f) = \frac{|Z(f) - Z_n(f)|}{|Z(f)|} \quad (۲-۹)$$

که در آن $Z_n(f)$ و $Err(f)$ به ترتیب امپدانس تخمینی با سیگنال‌های نویزی و خطای نسبی امپدانس تخمینی در فرکانس f است. برای تخمین با دقت بالا خطای نسبی تخمین باید نزدیک صفر باشد. رابطه‌های قبلی نشان می‌دهد اگر سطح نویز در مقابل سطح V_{PCC} و I_{PCC} قابل توجه باشد، خطای تخمین زیاد می‌شود. از همین رو، انرژی سیگنال تزریقی باید به قدر کافی از انرژی نویز بیشتر باشد. این موضوع چالش‌های زیادی را به دنبال دارد.



شکل ۲-۲: شماتیک نحوه اعمال نویز اندازه‌گیری در تخمین امپدانس.

بخاطر وجود نویزهای خارجی، استفاده از قانون اهم با تزریق تک پالس عملاً همراه با خطا می‌باشد. در مواردی که پالس ورودی ثابت است به منظور کاهش اثر نویز می‌توان به صورت مکرر آن را به سیستم

اعمال کرد و میانگین نتایج را محاسبه نمود [۴۵]. یکی دیگر از روش‌ها، استفاده از میانگین لگاریتمی برای محاسبه امپدانس شبکه می‌باشد. میانگین لگاریتمی امپدانس مدار از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Z(f) = \left(\prod_{k=1}^P \frac{V_{PCC,k}(f)}{I_{PCC,k}(f)} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (۲ - ۱۰)$$

که در آن P تعداد دفعات تزریق سیگنال می‌باشد [۲۵]. همچنین برای کاهش اثر نویز می‌توان از روش همبستگی متقابل (معرفی شده در [۴۶]) استفاده کرد [۴۵].

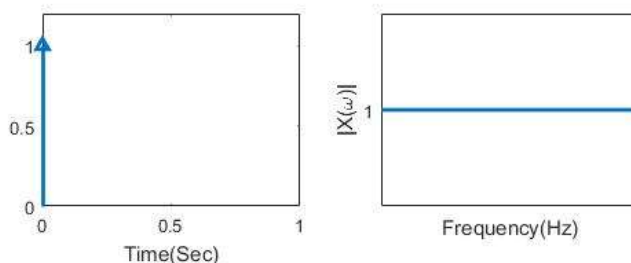
۲-۶ - انواع سیگنال‌های تزریقی

همانطور که قبلاً بحث شد مشخصه سیگنال تزریقی اهمیت زیادی در تخمین امپدانس دارد؛ زیرا برای تخمین امپدانس در یک فرکانس مشخص، سیگنال تزریقی باید حاوی مؤلفه فرکانسی در همان فرکانس باشد. همچنین انرژی سیگنال تزریقی در همان فرکانس نیز اهمیت زیادی دارد. برای محاسبه امپدانس شبکه در یک بازه فرکانسی از سیگنال‌های مختلفی مانند ضربه و پالس مربعی [۴۷]، سیگنال باینری [۴۵، ۴۸]، سیگنال مدولاسیون خطی [۲۶] و دنباله‌ای از پالس‌های مربعی [۴۹، ۵۰]، دنباله پالس‌های سه تایی [۵۱] می‌توان استفاده کرد.

۲-۶-۱ - سیگنال ضربه و پالس مربعی

سیگنال ضربه یکی از سیگنال‌های مناسب برای تخمین امپدانس در بازه فرکانسی است؛ زیرا سیگنال تزریقی ضربه حاوی همه فرکانس‌ها می‌باشد. سیگنال ضربه ایده‌آل فقط در یک نمونه (در فضای گسسته) غیر صفر است در حالی که در سیگنال ضربه غیر ایده‌آل (پالس مربعی) به مدت زمان δ ثانیه مقداری غیر صفر دارد. در شکل ۲-۳ سیگنال ضربه ایده‌آل در حوزه زمان و فرکانس آمده است. اگرچه ضربه

ایده‌آل پهنای باند کامل دارد ولی ساخت آن عملاً امکان‌پذیر نیست در حالیکه ضربه غیرایده‌آل دارای پهنای باند کامل نمی‌باشد.



شکل ۲-۳: سیگنال ضربه ایده‌آل در حوزه زمان و فرکانس

برای افزایش انرژی سیگنال ضربه دو راه وجود دارد.

الف: افزایش دامنه بیشینه سیگنال

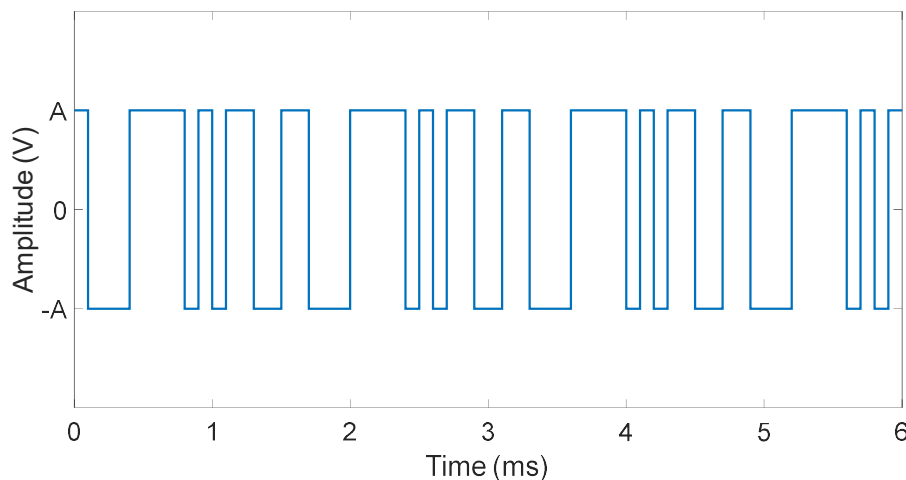
ب: افزایش عرض پالس (منجر به کاهش پهنای باند سیگنال می‌شود).

اگرچه افزایش دامنه بیشینه سیگنال ضربه نتایج خوبی را به همراه دارد ولی در شبکه‌های قدرت دامنه بیشینه سیگنال تزریقی ضربه تا 1kV کنترل می‌شود. این موضوع بخاطر انرژی لحظه‌ای است که تحت تزریق به شبکه اعمال می‌شود. از طرف دیگر افزایش عرض سیگنال ضربه (به عبارت دیگر استفاده از پالس مربعی) باعث کاهش پهنای باند سیگنال تزریقی می‌شود. رفتار فرکانسی پالس مربعی به دقت در بخش ۳-۲-۱ بررسی گردیده است.

۲-۶-۲ - سیگنال باینری

در مقاله [۴۵] از سیگنال تحریک باینری برای محاسبه امپدانس شبکه استفاده شده است. هدف این سیگنال جمع کردن انرژی سیگنال در یک محدوده فرکانسی کوچک است. این محدوده فرکانسی همواره از فرکانس DC شروع می‌شود و بر اساس نتایج مقاله تا فرکانس‌های حدود 2kHz مناسب است. سیگنال پیشنهادی سیگنالی باینری و قطعی با سه ویژگی است: (۱) مقادیر سیگنال فقط در زمان‌های مشخص

... $t = k\Delta t, k = 0.1.2.3.$ می‌تواند تغییر کند. (۲) سیگنالی متناوب با دوره تناوب $T = N\Delta t$ می‌باشد که در آن $N = 2^n - 1$ طول سیگنال و n یک عدد صحیح است. (۳) سیگنال به ترتیب دارای $\frac{N+1}{2}$ و $\frac{N-1}{2}$ سطح یک و سطح غیر یک است. این سیگنال برای سیستم‌هایی مناسب است که نمی‌توان سیگنال با توان بالا به آن اعمال کرد [۴۵]. ویژگی این سیگنال آن است که مناسب تخمین امپدانس برای فرکانس‌های پایین (زیر 2 kHz) است. نمونه‌ای از این سیگنال در شکل ۲-۴ آمده است.



شکل ۲-۴: نمونه‌ای از یک سیگنال باینری

۲-۶-۳ - سیگنال با مدولاسیون خطی

در مقاله [۲۶] از سیگنالی با مدولاسیون خطی برای محاسبه امپدانس شبکه استفاده شده است. سیگنال با مدولاسیون خطی سیگنالی است که فرکانس آنی در طول زمان به صورت خطی تغییر می‌کند. این سیگنال را می‌توان برای هر بازه دلخواه فرکانسی تولید کرد ولی معمولاً استفاده از سیگنال با مدولاسیون خطی باعث اعمال انرژی زیادی به شبکه می‌شود. یک سیگنال با مدولاسیون خطی با فرکانس شروع f_0 و فرکانس پایان $f_0 + B$ را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

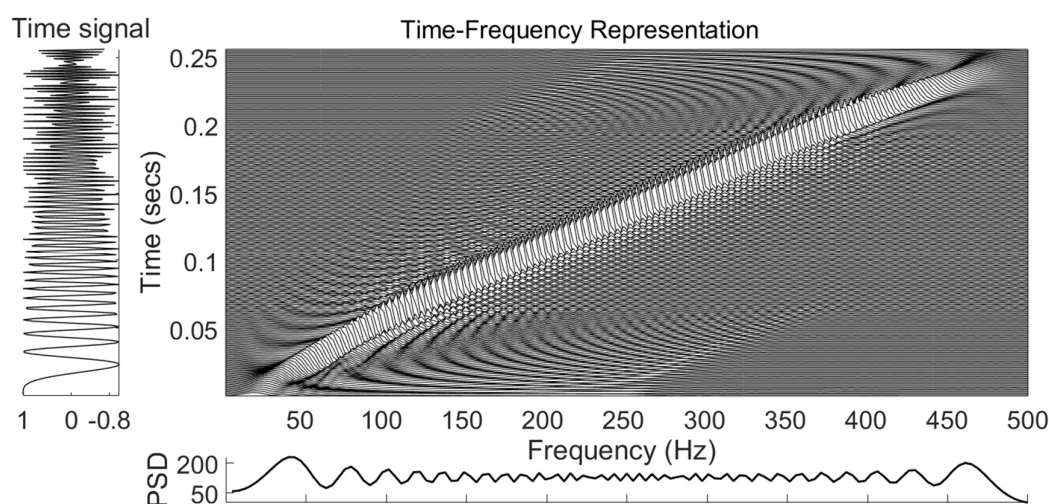
$$s(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T}\right) \cos\left(2\pi\left[f_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2\right] + \psi\right) \quad (۲-۱۱)$$

$$rect(\tau) = \begin{cases} 1 & |\tau| < \frac{1}{2} \\ 0 & o.w. \end{cases} \quad (2-12)$$

که در آن A ، T و ψ به ترتیب بیشینه دامنه سیگنال، پهنای زمانی سیگنال و اختلاف فاز سیگنال می باشد. مقدار ثابت α نیز مقدار افزایش فرکانس در هر لحظه را نشان می دهد و برابر $\alpha = \frac{B}{T}$ می باشد. فرکانس آنی چنین سیگنالی به صورت زیر می باشد [۵۲].

$$f_i(t) = f_0 + \alpha t; 0 \leq t \leq T \quad (2-13)$$

نمونه ای از این سیگنال در شکل ۲-۵ آمده است. از این سیگنال نیز نمی توان برای تخمین بازه وسیع فرکانسی $2kHz - 150kHz$ استفاده کرد زیرا باعث تزریق انرژی زیاد به شبکه می شود. همچنین چنین پالسی نیاز به زمان طولانی برای تزریق دارد.



شکل ۲-۵: سیگنال با مدولاسیون خطی با فرکانس شروع ۱ هرتز و فرکانس پایان ۵۰۰Hz (فرکانس نمونه برداری یک کیلوهرتز)

۲-۷ - سایر روش های پیشین

تحقیقات ما نشان می دهد در منابع گذشته بر روی محدوده فرکانسی $2 kHz - 150 kHz$ مطالعه انجام نشده است. IEC در سال ۲۰۱۶ تصمیم گرفت تا استاندارد جهانی را تا فرکانس های بالا افزایش

دهد. در خلال این فصل، روش‌های پیشین معرفی شد. سایر مطالعات پیرامون تخمین امپدانس که بررسی نشدند، در این بخش گردآوری شده است.

نویسندگان در مقاله [۵۳] روشی برای تخمین امپدانس بر پایه اندازه‌گیری پارامترهای شبکه در نقاط گره شبکه‌های بیسیم موردی^۱ پیشنهاد کرده‌اند. روش پیشنهادی این مقاله با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان گره‌های مختلف به تخمین امپدانس می‌پردازد. بنابراین به صورت عمومی برای تخمین امپدانس مناسب نیست.

در مقاله [۳۷] روشی به منظور تخمین امپدانس شبکه در فرکانس 60 Hz (فرکانس پایه شبکه) بدون هیچ تزریقی پیشنهاد شده است. در این مقاله، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری 1.92 kHz (به عبارت دیگر ۳۲ نمونه از هر سیکل کامل ولتاژ) انتخاب شده است. از آنجایی که هدف اندازه‌گیری ولتاژ در فرکانس 60 Hz است، 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 حد‌آستانه بیشتر باشد، امپدانس به کمک اندازه‌گیری‌های انجام شده محاسبه می‌شود. سپس امپدانس تخمینی با فیلتر میانگین‌گیر تصحیح می‌گردد.

در منابع گذشته از روش‌های بازگشتی برای تخمین امپدانس استفاده شده است. در مقاله [۳۵] نویسندگان روشی بر پایه فیلتر کالمن توسعه یافته از دسته روش‌های غیرفعال پیشنهاد کرده است. همانطور که مطرح شد روش‌های غیرفعال فقط می‌توانند امپدانس را در فرکانس‌هایی تخمین بزنند که در شبکه وجود دارد. همچنین در مقاله [۵۴] نویسندگان روشی برای تخمین امپدانس مقاومتی باتری‌های لیتومی بر پایه روش‌های بازگشتی پیشنهاد کرده‌اند. این تخمین به منظور تعیین وضعیت شارژ لحظه‌ای باتری مفید است.

¹ Ad hoc

در روش‌های فعال، سیگنال‌های مختلفی به شبکه تزریق می‌شود. مقاله [۴۸] با تزریق سیگنال باینری به مبدل ولتاژ، امپدانس را تخمین زده است. هدف این مقاله تخمین امپدانس برای فرکانس‌های زیر 2 kHz در سیستم‌های توزیع شده است.

نویسندگان مقاله [۵۵] 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 2kHz است. همچنین اشکال عمده این روش تزریق طولانی مدت (حدود 1ms) پالس مربعی است که باعث عدم توانایی این روش در فرکانس‌های بالا می‌شود.

در [۱۴]، 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 می‌شود. سپس نسبت سیگنال ولتاژ به جریان در حوزه فرکانس محاسبه می‌شود. روش پیشنهادی هنگامی که هدف تخمین امپدانس از دید نقاط مختلف شبکه باشد، کارآمد نیست. همچنین در این روش فرض شده است که شبکه خاصیت سلفی دارد که امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی شبکه‌ها خاصیت خازنی هم دارند.

در [۵۱]، نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که از یک سیگنال سه حالتی با یک فیلتر LCL به شبکه تزریق شود. مهمترین اشکال این روش آن است که تنها برای تخمین امپدانس در فرکانس‌های زیر 9 kHz مناسب است.

۲-۸ - معیارهای ارزیابی

در این تحقیق دو معیار ارزیابی برای بررسی دقت امیدانس تخمینی مورد استفاده قرار گرفته است. خطای تخمین بر اساس توان سیگنال به نویز در بازه فرکانسی Φ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SNR_{dB}(\Phi) = 10 \log \left(\frac{\sum_{f \in \Phi} (Z_{ref}(f))^2}{\sum_{f \in \Phi} (Z_{ref}(f) - Z_{est}(f))^2} \right) \quad (۲-۱۴)$$

در رابطه بالا $Z_{ref}(f)$ و $Z_{est}(f)$ به ترتیب امیدانس مرجع و امیدانس تخمینی در فرکانس f می‌باشد. همچنین درصد خطای مطلق نسبی ($APE\%$) در فرکانس f به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$APE\%(f) = \left| \frac{Z_{ref}(f) - Z_{est}(f)}{Z_{ref}(f)} \right| * 100 \quad (۲-۱۵)$$

معیار میانگین درصد خطای نسبی ($MAPE\%$) برای یک بازه‌ی فرکانسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MAPE\%(\Phi) = Mean_{f \in \Phi}(APE\%(f)) \quad (۲-۱۶)$$

که در آن $Mean_{f \in \Phi}(\cdot)$ عملگر میانگین‌گیر بر روی بازه‌ی فرکانسی Φ است.

۲-۹ - جمع بندی

در این فصل، تئوری تخمین امیدانس شبکه برای شبکه‌های فعال و غیر فعال مطرح گردید. همچنین روش‌های تخمین امیدانس به دو دسته روش‌های فعال و غیرفعال دسته‌بندی گردید، و تفاوت عمده آن‌ها در این است که در روش‌های فعال یک اعوجاج (از طریق تزریق سیگنال) در شبکه ایجاد می‌شود. ولی در روش‌های غیر فعال هیچ تزریقی به شبکه انجام نمی‌شود. اگر چه روش‌های غیرفعال کیفیت توان شبکه را کاهش نمی‌دهند ولی هم دقت پایینی دارند و هم فقط توانایی تخمین در فرکانس پایه و هارمونیک‌های شبکه را دارند. در این فصل مشخص شد که دقت درستی تخمین امیدانس به انرژی

سیگنال تزریقی وابسته است. همچنین انواع سیگنال‌های تزریقی شبکه مطرح و بررسی شد. جهت ارزیابی روش‌ها نیز معیارهای ارزیابی معرفی گردید.

۳ – روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت

۳-۱- مقدمه

هر سیگنال تزریقی توانایی ایجاد مولفه‌های فرکانسی در بعضی فرکانس‌ها را دارد؛ بنابراین انتخاب سیگنال‌هایی مناسب که بتواند در محدوده فرکانسی $2\text{ kHz} - 150\text{ kHz}$ مولفه مناسبی ایجاد کند، اهمیت دارد. بنابراین اولین عامل موثر در تخمین امپدانس، انتخاب پالس‌های مناسب برای تزریق است. پس از انتخاب و تزریق سیگنال‌ها به شبکه باید سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از آن اندازه‌گیری شود. معمولاً سیگنال‌های اندازه‌گیری شده شامل نویز است. همچنین درستی تخمین امپدانس به انرژی سیگنال تزریقی وابسته است. در این رساله به جای افزایش انرژی سیگنال تزریقی پیشنهاد شده است که سیگنال‌های اندازه‌گیری شده حذف نویز شوند. بنابراین عامل دوم موثر در تخمین امپدانس را چگونگی حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری در نظر می‌گیریم.

در اندازه‌گیری سیگنال‌ها، انتخاب درست مدت زمان اندازه‌گیری و فرکانس نمونه‌برداری اهمیت دارد. بر اساس تئوری ناپکوئیست فرکانس نمونه‌برداری باید حداقل دو برابر حداکثر فرکانس مورد نظر برای اندازه‌گیری امپدانس باشد. همانطور که قبلاً مطرح شد، وسایل اندازه‌گیری موجود، فرکانس‌های نمونه‌برداری بالا مانند 10 MHz را پشتیبانی می‌کند؛ بنابراین از این جهت، مشکلی وجود ندارد.

اگر مدت زمان نمونه‌برداری از سیگنال کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود. در این حالت، تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین، اگر زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می‌یابد. بنابراین سومین عامل موثر، تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری سیگنال‌ها جهت تخمین امپدانس است.

پس از حذف نویز سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری سیگنال‌ها، به کمک هر زوج سیگنال ولتاژ و جریان متناظر با آن می‌توان یک امپدانس را تخمین زد؛ بنابراین به

ازای هر زوج سیگنال، یک تخمین محاسبه می‌شود. در نهایت با ترکیب امپدانس‌های تخمین زده شده می‌توان یک تخمین نهایی ارائه کرد.

۳-۲ – عامل اول: انتخاب پالس‌های مناسب جهت تزریق به شبکه

همانطور که قبلاً مطرح شد، اولین عامل در تخمین امپدانس شبکه به کمک روش‌های فعال، انتخاب سیگنال‌های مناسب برای تزریق به شبکه است. از آنجایی که هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه در محدوده وسیع فرکانسی است، از پالس مربعی جهت تزریق استفاده شده است زیرا پالس مربعی شامل طیف فرکانسی وسیعی است. انرژی پالس مربعی وابسته به دو پارامتر بیشینه دامنه پالس و عرض پالس می‌باشد. اگرچه با افزایش عرض پالس تزریقی، انرژی سیگنال تزریقی افزایش می‌یابد ولی پهنای باند آن کاهش می‌یابد. این موضوع به دقت در ادامه بررسی می‌شود.

از نظر تئوری، افزایش بیشینه دامنه پالس مربعی باعث افزایش دقت تخمین امپدانس می‌شود؛ ولی به لحاظ عملی افزایش بیش از حد این پارامتر باعث کاهش کیفیت توان شبکه می‌شود. از اینرو این پارامتر تا 1 kV کنترل می‌شود. در بررسی عامل دوم، روشی به منظور حذف نویز به جای افزایش بیشینه دامنه پالس پیشنهاد شده است.

۳-۲-۱ – اثر عرض پالس مربعی بر روی درستی تخمین امپدانس

فرض کنید پالس مربعی با عرض τ به صورت زیر تعریف شده باشد:

$$g(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & O.W. \end{cases} \quad (۳-۱)$$

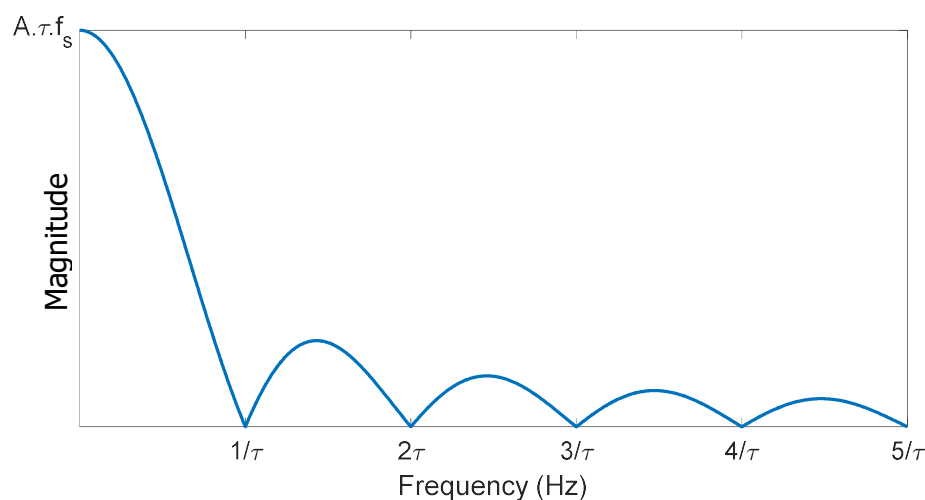
که در آن A بیشینه دامنه پالس است. طیف دامنه پالس مربعی $g(t)$ برای فرکانس‌های مثبت به صورت زیر است:

$$|G(\omega)| = \frac{2A}{\omega} \left| \sin\left(\frac{\tau\omega}{2}\right) \right| \quad (۳-۲)$$

همانطور که مشخص است طیف دامنه پالس مربعی دارای رفتاری سینوسی میرا است و بنابراین پیوسته انرژی آن تغییر می‌کند. با حل رابطه زیر می‌توان تعیین کرد که در چه فرکانس‌هایی انرژی پالس مربعی صفر است (شکل ۳-۱).

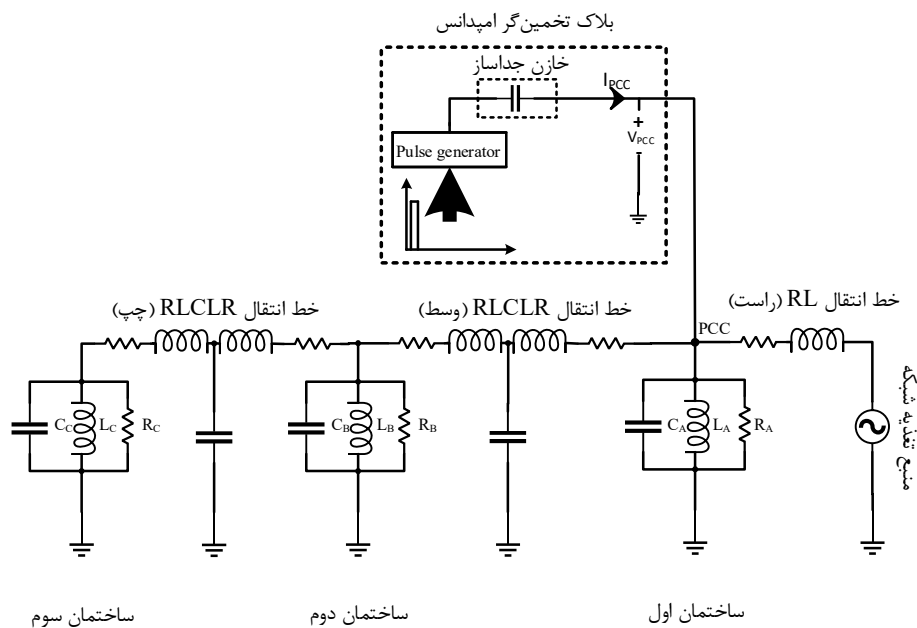
$$|G(\omega)| = 0 \Rightarrow \sin\left(\frac{\tau\omega}{2}\right) = 0 \Rightarrow \frac{\tau\omega}{2} = k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{2k\pi}{\tau}, & k = 0, 1, 2, \dots \\ f = \frac{k}{\tau}, & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (۳-۳)$$



شکل ۳-۱: طیف دامنه یک پالس مربعی با عرض τ و دامنه بیشینه A .

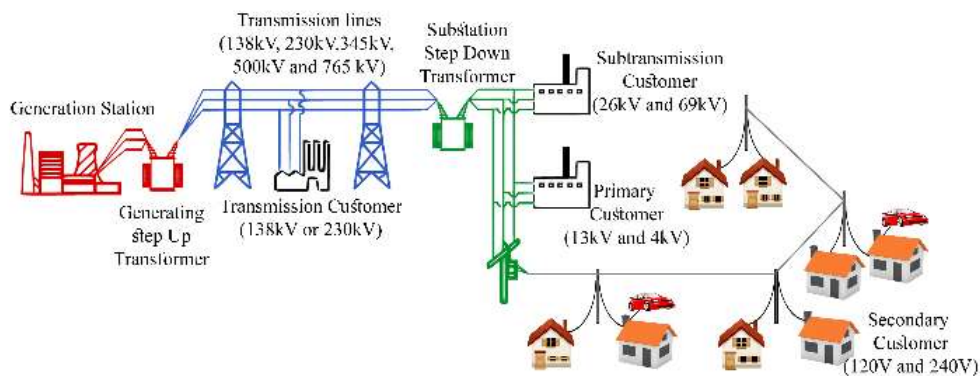
در این بخش یک شبیه‌سازی برای نشان دادن اثر عرض پالس مربعی تزریقی در درستی تخمین امپدانس آورده شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه موجود در شکل ۳-۲ آورده شده است. پارامترهای این شبکه در جدول ۳-۱ آمده است. این شبکه می‌تواند نمونه ساده‌ای از یک توپولوژی عمومی برای خطوط توزیع شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین باشد (شکل ۳-۳) [۵۳]. در این شبکه هر ساختمان با یک مدار RLC موازی مدل شده است.



شکل ۳-۲: شماتیک مدار مورد آزمایش در بخش ۳-۲.

جدول ۳-۱: پارامترهای شبکه نشان داده شده در شکل ۳-۲.

مقدار	عنصر
15Ω	R_A, R_B, R_C
$1mH$	L_A, L_B, L_C
$1\mu F$	C_A, C_B, C_C
$0.5\Omega, 100\mu H, 10nF, 100\mu H, 0.5\Omega$	خط انتقال $RLCLR$ (چپ)
$0.1\Omega, 10\mu H, 10nF, 10\mu H, 0.1\Omega$	خط انتقال $RLCLR$ (وسط)
$1\Omega, 1mH$	خط انتقال RL (راست)
$220V, 50Hz$	منبع تغذیه شبکه



شکل ۳-۳: یک توپولوژی عمومی برای یک سیستم قدرت.

در این شبیه‌سازی فرض شده است سیستم اندازه‌گیری سیگنال ولتاژ و جریان حاوی نویز اندازه‌گیری جمع‌شونده گوسی با $SNR = 30 \text{ dB}$ است. همچنین منبع ولتاژ شبکه حاوی نویز هارمونیکی با پارامترهای موجود در جدول ۳-۲ است. همچنین فرکانس نمونه‌برداری سیگنال‌ها 1 MHz انتخاب شده است.

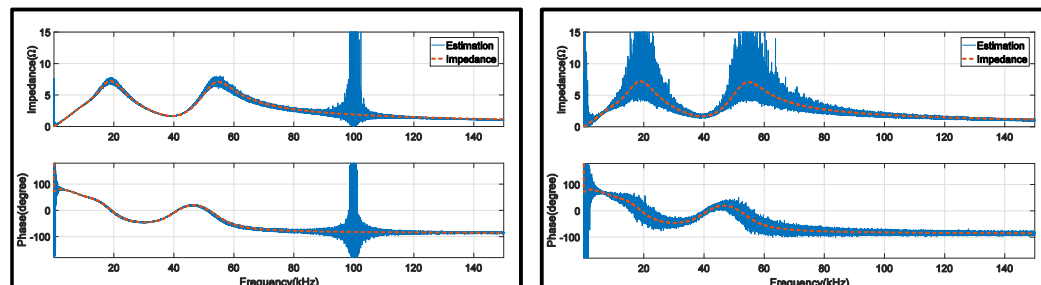
جدول ۳-۲: پارامترهای نویز هارمونیکی.

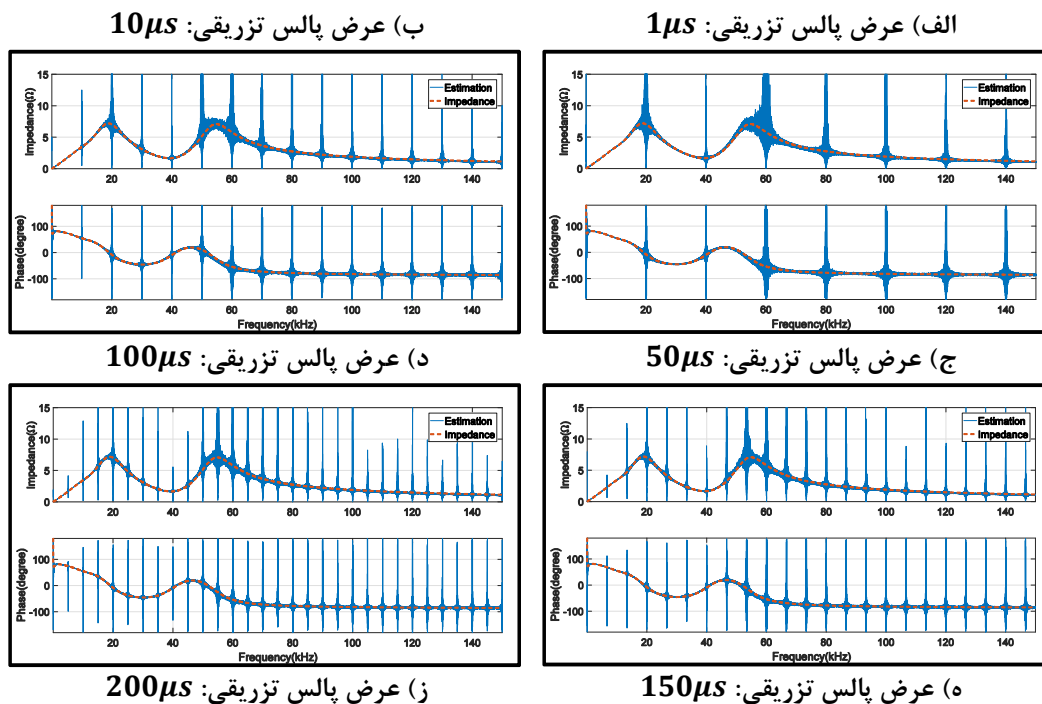
مقدار	شماره هارمونیک
۱,۵	هارمونیک پنجم
۱,۲۵	هارمونیک سوم و هفتم
۰,۷	هارمونیک یازدهم
۰,۶	هارمونیک نهم و سیزدهم
۰,۴	هارمونیک‌های زوج بین دوم تا دوازدهم

در این آزمایش امپدانس شبکه به کمک شش پالس مربعی (مجزا از هم) با دامنه بیشینه 1 kV و عرض‌های $1 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $150 \mu\text{s}$ و $200 \mu\text{s}$ تخمین زده شده است. نتایج تخمین امپدانس در شکل ۳-۴ آورده شده است. در هر بخش از این دو منحنی وجود دارد. منحنی بالا اندازه امپدانس و منحنی پایین فاز امپدانس را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هر پالسی توانایی محدودی در تخمین امپدانس دارد زیرا در برخی فرکانس‌ها انرژی پالس کم است.

۳-۲-۲- انتخاب پالس‌های مناسب برای تزریق و تخمین امپدانس

در این بخش از یک روش تکاملی برای پیدا کردن چندین پالس با عرض‌های مختلف برای تخمین درست امپدانس پیشنهاد شده است. در نهایت می‌توان به کمک آن‌ها امپدانس شبکه را تخمین زد.





شکل ۳-۴: تخمین امپدانس شبکه نشان داده شده در شکل ۳-۲ با پالس مربعی با عرض الف) $1\mu s$ ، ب) $10\mu s$ ، ج) $50\mu s$ ، د) $100\mu s$ ، ه) $150\mu s$ ، ز) $200\mu s$.

همانطور که بیان شد هر سیگنال تزریقی توانایی تخمین درست امپدانس در بعضی فرکانس‌ها را ندارد. در این بخش $\mathcal{K}$ سیگنال تزریقی به نحوی انتخاب می‌شود که اجتماع محدوده فرکانسی توانایی سیگنال‌های تزریقی، $2 - 150kHz$ باشد. در این رساله از الگوریتم ژنتیک [۵۶-۵۸] برای انتخاب سیگنال‌های مناسب استفاده شده است. شایان ذکر است از سایر الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ نیز می‌توان برای اینکار استفاده کرد. اگرچه در الگوریتم ژنتیک تضمینی وجود ندارد که نتایج بدست آمده بهترین جواب ممکن باشد، ولی قطعاً جواب بدست آمده جزء جواب‌های قابل قبول است. از این رو از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب سیگنال‌های تزریقی استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول ۳-۳ آورده شده است. هر کروموزوم الگوریتم ژنتیک شامل $\mathcal{K}$

^۱ Particle swarm optimization

ژن است که هر ژن عرض یک سیگنال تزریقی را مشخص می‌کند. مقادیر ژن‌ها بین $1\mu s$ تا $600\mu s$ است.

جدول ۳-۳: پارامترهای الگوریتم ژنتیک.

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت اولیه	۱۰۰
طول کروموزوم	$\mathcal{K}$
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

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

$$\mathcal{F} = \sum_{f \in \Phi} \hat{f}(f) \quad (۳ - ۴)$$

$$\hat{f}(f) = \begin{cases} T - \max_{1 \leq g \leq \mathcal{K}} (|Sig_g(f)|^2), & \max_{1 \leq g \leq \mathcal{K}} (|Sig_g(f)|^2) < T \\ 0, & o.w. \end{cases} \quad (۳ - ۵)$$

که در آن $\hat{f}(f)$ تابع برازندگی جزئی است. همچنین در رابطه بالا $Sig_g(f)$ ، گامین سیگنال تزریقی با عرض مشخص شده در ژن g ام است. در رابطه بالا Φ و T به ترتیب محدوده تخمین امیدانس (در این رساله $150kHz - 2$) 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 $\mathcal{T}$ در فرکانس f باشد، تابع برازندگی جزئی برای آن فرکانس صفر در نظر گرفته می‌شود. زیرا حدآستانه 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 تا حد آستانه به تابع برازندگی جزئی مقدار اختصاص داده می‌شود. این مقدار در واقع جریمه کروموزوم در فرکانس f است. پس از انتخاب سیگنال‌های مناسب، امپدانس شبکه از طریق قانون اهم محاسبه می‌شود. به عبارت ریاضی:

$$Z_k(f) = \frac{V_{PCC}^{(k)}(f)}{I_{PCC}^{(k)}(f)}, \quad k = 1, 2, \dots, \mathcal{K} \quad (۳ - ۶)$$

در رابطه بالا، $V_{PCC}^{(k)}(f)$ و $I_{PCC}^{(k)}$ به ترتیب ولتاژ و جریان عبوری از آن در تزریق k ام است. همچنین $Z_k(f)$ امپدانس تخمین زده شده به کمک تزریق k ام است.

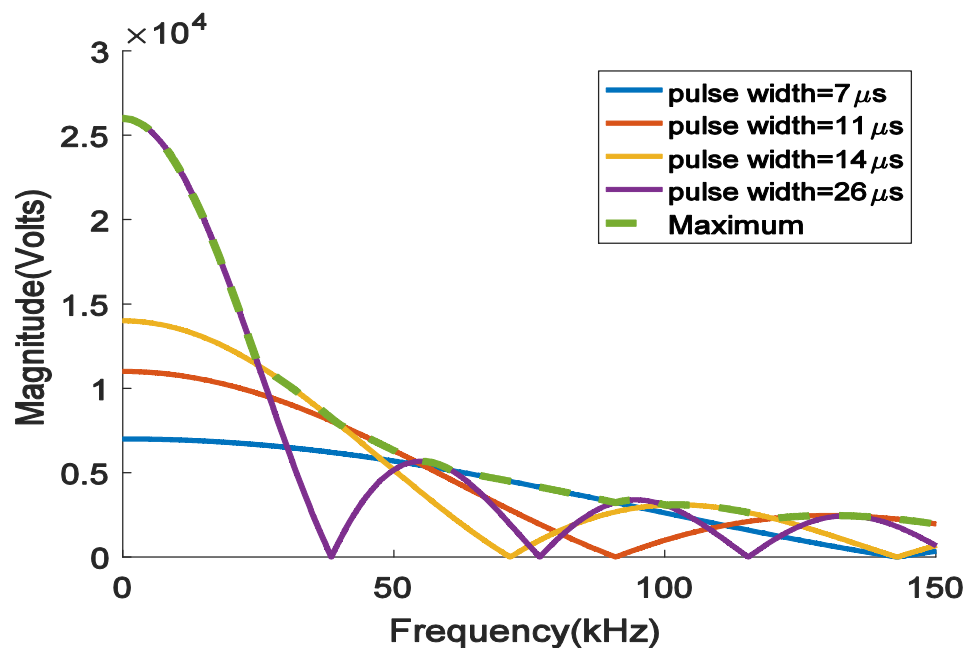
در مرحله بعد باید، به ازای هر فرکانس، یکی از امپدانس‌های تخمین زده شده به عنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شود. همانطور که بیان شد هرچه انرژی سیگنال در یک فرکانس بالاتر باشد، امپدانس تخمینی به کمک آن دقیق‌تر خواهد بود؛ بنابراین امپدانس تخمینی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\forall f \in [2kHz - 150kHz]: Z(f) = Z_k(f), k = \arg \max_{1 \leq g \leq \mathcal{K}} (V_{PCC}^{(g)}(f)) \quad (۳ - ۷)$$

۳-۲-۳ - آزمایش‌ها و نتایج

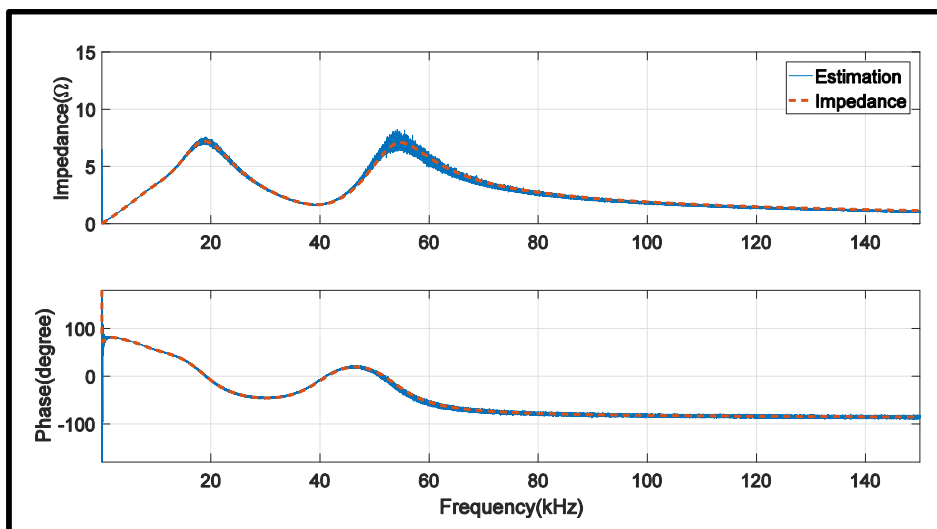
به منظور ارزیابی سیگنال‌های پیشنهادی، امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۲ با شرایط مشابه آزمایش انجام شده در بخش ۳-۲-۱ به کمک این سیگنال‌ها تخمین زده شده است.

در این بخش به کمک الگوریتم ژنتیک و پارامترهای مطرح شده آن در جدول ۳-۳ و همچنین تابع برازندگی موجود در $(3-4)$ و $(3-5)$ ، $\mathcal{K} = 4$ سیگنال انتخاب شده است. برای انتخاب سیگنال‌ها حد آستانه به صورت $T = 10^8$ انتخاب گردیده است. بهترین کروموزوم پیدا شده به صورت $7\mu s$ ، $11\mu s$ ، $14\mu s$ ، $26\mu s$ است. بیشینه همه پالس‌های تزریقی مانند قبل 1 kV انتخاب شده است. طیف دامنه سیگنال‌های انتخاب شده به کمک الگوریتم ژنتیک در شکل ۳-۵ آورده شده است.



شکل ۳-۵: طیف دامنه سیگنال‌های انتخاب شده به کمک الگوریتم ژنتیک

در مرحله بعدی هر یک از سیگنال‌ها به صورت مجزا به شبکه تزریق شده، و سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از آن اندازه‌گیری گردیده است. پس از محاسبه امپدانس به ازای هر تزریق به کمک رابطه $(3-7)$ تخمین امپدانس نهایی محاسبه گردیده است. نتایج تخمین در شکل ۳-۶ و جدول ۳-۴ آورده شده است. در شکل ۳-۶ منحنی بالا طیف دامنه امپدانس و منحنی پایین طیف فاز امپدانس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی به خوبی توانسته است امپدانس را تخمین بزند.



شکل ۳-۶: امپدانس تخمین زده شده با سیگنال‌های منتخب به کمک الگوریتم ژنتیک در بخش ۳-۲-۲.

جدول ۳-۴: خطای امپدانس تخمین زده شده با سیگنال‌های منتخب به کمک الگوریتم ژنتیک در بخش ۳-۲-۲.

روش تخمین	MAPE(%)	SNR(dB)
روش پیشنهادی در بخش ۳-۲-۲	۱۰,۲۷۷۵	۱۳,۳۲۹۲
پالس مربعی با عرض $7\mu s$	۱۵,۰۰۰۸	۱۱,۲۸۰۶
پالس مربعی با عرض $11\mu s$	۱۲,۶۴۵۲	۱۱,۰۴۹۹
پالس مربعی با عرض $14\mu s$	۱۴,۴۸۴۵	۹,۸۴۰۳
پالس مربعی با عرض $26\mu s$	۱۲,۲۱۰۴	۱۱,۰۵۸۲

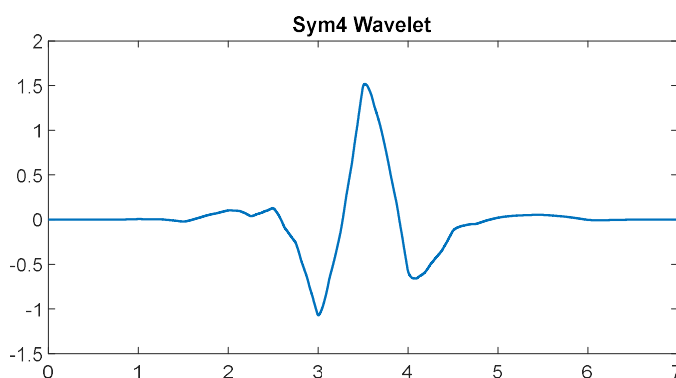
۳-۳- عامل دوم: حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

همانطور که مطرح شد، درستی تخمین امپدانس در شرایط وجود نویز به انرژی سیگنال تزریقی مستقیماً وابسته است. هر چه انرژی سیگنال تزریقی در یک فرکانس بالاتر باشد، درستی تخمین در آن فرکانس نیز دقیق‌تر می‌باشد. از آنجایی که هدف این رساله تخمین امپدانس در محدوده وسیع فرکانسی است، از سیگنال پالس مربعی برای تخمین استفاده شده است. انرژی پالس مربعی مستقیماً با بیشینه دامنه پالس در ارتباط است. از نظر تئوری افزایش بیشینه دامنه پالس باعث افزایش دقت تخمین می‌شود ولی اینکار باعث تاثیرگذاری مخرب بر روی شبکه می‌شود. به جای افزایش بیشینه دامنه پالس، می‌توان سیگنال‌های ولتاژ و جریان را حذف نویز کرد.

۳-۳-۱ استفاده از تبدیل موجک برای حذف نویز

هنگامی که سطح انرژی سیگنال و نویز نزدیک هم باشند، دقت تخمین امپدانس پایین خواهد بود. در این بخش به کمک حذف نویز موجک ایستا^۱ (SWD) [۵۹] نویز در سیگنال‌های ولتاژ و جریان کاهش می‌یابد. اینکار باعث می‌شود تا دقت تخمین امپدانس بالا برود. الگوریتم حذف نویز شامل چهار گام اساسی است. این الگوریتم باید بر روی سیگنال ولتاژ و جریان به صورت مجزا انجام شود.

۱- انتخاب موجک مادر^۲: نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که موجک $sym4$ یک موجک مادر مناسب مناسب برای حذف نویز از سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از آن است. این موجک در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: موجک $sym4$.

۲- تجزیه هر سیگنال به N سطح: هر سیگنال باید به پنج سطح تجزیه شود. تعداد سطوح در اینجا بر اساس آزمایش‌های انجام شده انتخاب شده است.

¹ Stationary Wavelet Denoising

² Mother Wavelet

۳- آستانه‌گذاری: در این بخش یک حد آستانه برای فیلتر کردن انتخاب می‌شود و سپس به روش آستانه‌گذاری نرم^۱ هر سطح حذف نویز می‌شود.

۴- بازسازی سیگنال: در این بخش از روی سطوح حذف نویز شده باید سیگنال حذف نویز شده بازسازی شود.

کیفیت حذف نویز سیگنال‌ها وابسته به انتخاب درست پارامترهای وابسته (تعداد سطوح تجزیه، موجک مادر و قاعده آستانه‌گذاری [۶۰]) است. از این‌رو فرایند حذف نویز می‌تواند با بهینه کردن این پارامترها بهبود پیدا کند.

امپدانس شبکه به کمک هر تزریق از طریق قانون اهم محاسبه می‌شود. به عبارت ریاضی:

$$Z_k(f) = \frac{\text{denoised} \left(V_{PCC}^{(k)}(f) - V_{PCC}^{GND}(f) \right)}{\text{denoised} \left(I_{PCC}^{(k)}(f) - I_{PCC}^{GND}(f) \right)}, \quad k = 1, 2, \dots, \mathcal{K} \quad (۸ - ۳)$$

در رابطه بالا، $V_{PCC}^{(k)}(f)$ و $I_{PCC}^{(k)}(f)$ به ترتیب ولتاژ و جریان عبوری از آن در تزریق k ام است. همچنین $V_{PCC}^{GND}(f)$ و $I_{PCC}^{GND}(f)$ به ترتیب ولتاژ و جریان عبوری از آن در شرایطی است که PCC به کمک یک خازن سری به زمین متصل شده باشد. در نهایت $Z_k(f)$ امپدانس تخمین زده شده به کمک تزریق k ام است.

به ازای هر فرکانس، یکی از امپدانس‌های تخمین زده شده به عنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شود. همانطور که بیان شد هرچه انرژی سیگنال در یک فرکانس بالاتر باشد، امپدانس تخمینی به کمک آن دقیق‌تر خواهد بود؛ بنابراین امپدانس تخمینی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

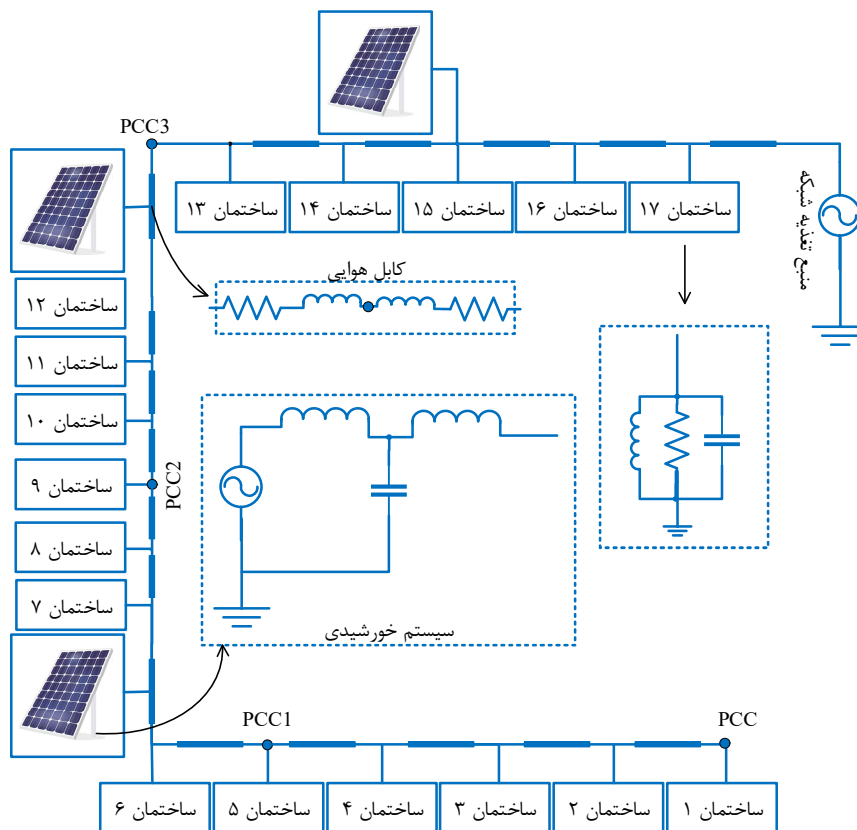
$$\forall f \in [2kHz - 150kHz]: \quad (۹ - ۳)$$

^۱ Soft Thresholding

$$Z(f) = Z_k(f), k = \arg \max_{1 \leq g \leq \mathcal{K}} \left(v_{PCC}^{(g)}(f) - v_{PCC}^{GND}(f) \right)$$

۳-۳-۲ - آزمایش‌ها و نتایج

در این بخش برای نشان دادن تاثیر روش حذف نویز شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه موجود در شکل ۳-۸ انجام شده است. پارامترهای هر آزمایش با سایر آزمایش‌ها متفاوت است. در هر صورت، هر پارامتری که در آزمایش به صورت خاص قید نشده باشد، به معنای آن است که این پارامتر با پارامترهای موجود در جدول ۳-۵ یکسان است. شبیه‌سازی‌ها در چهار حالت زیر انجام شده است. این حالت‌ها شامل تخمین در الف) شرایط بار متفاوت، ب) شرایط خطوط انتقال مختلف، ج) شرایط تغییر نقاط دید تخمین، و د) شرایط شب و روز انجام شده است. در همه آزمایش‌های انجام شده، نویز گوسی جمع شونده با $SNR = 30dB$ به عنوان خطای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. همچنین منابع ولتاژ شبکه حاوی نویز هارمونیک با پارامترهای موجود در جدول ۳-۳ است. نتایج آزمایش‌ها در دو حالت بدون حذف نویز و با حذف نویز گزارش شده است. در همه آزمایش‌ها سیگنال‌های تزریقی به کمک روش مطرح شده در بخش ۳-۲-۲ انتخاب شده است.



شکل ۳-۸: شماتیک شبکه مورد آزمایش در بخش ۳-۳.

جدول ۳-۵: پارامترهای عمومی مدار نشان داده شده در شکل ۳-۸.

عناصر	مقدار
هر ساختمان	$50\Omega, 100\mu H, 1\mu F$
هر کابل انتقال هوایی	$25m\Omega, 30\mu H, 30\mu H, 25m\Omega$
منبع تغذیه شبکه	$220v, 50Hz, phase 0'$
سیستم خورشیدی	$system\ voltage: 220v, 50Hz, phase 0'$
	$LCL\ filter: 70\mu H, 10\mu F, 200\mu H$

حالت اول: تخمین امپدانس شبکه در حالت بدون بار، بار جزئی و بار کامل

در این بخش، امپدانس شبکه در سه حالت بدون بار، بار جزئی و بار کامل تخمین زده شده است. پارامترهای شبکه در این سه حالت در جدول ۳-۶ آورده شده است. همچنین سایر پارامترها در جدول ۳-۵ قرار دارد. نتایج تخمین در جدول ۳-۷ و همچنین شکل ۳-۹ تا شکل ۳-۱۱ آورده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود روش حذف نویز به خوبی توانسته است دقت تخمین امپدانس شبکه را افزایش بدهد.

جدول ۳-۶: پارامترهای شبکه موجود در شکل ۳-۸ برای تخمین امپدانس در حالت اول.

هر RLC موازی

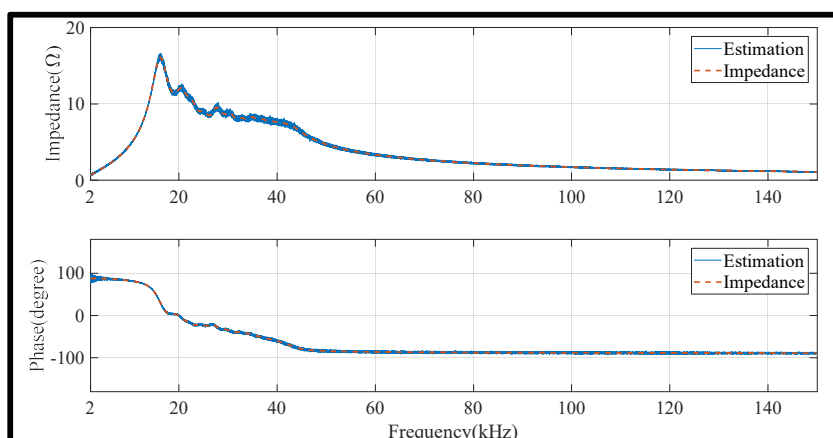
بدون بار $100\mu H, 1\mu F$ مدار باز

بار جزئی $100\Omega, 100\mu H, 1\mu F$

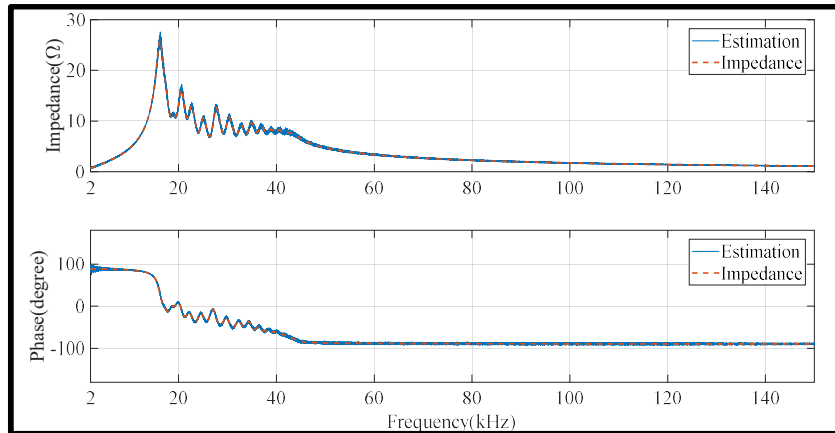
بار کامل $50\Omega, 100\mu H, 1\mu F$

جدول ۳-۷: نتایج تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت اول.

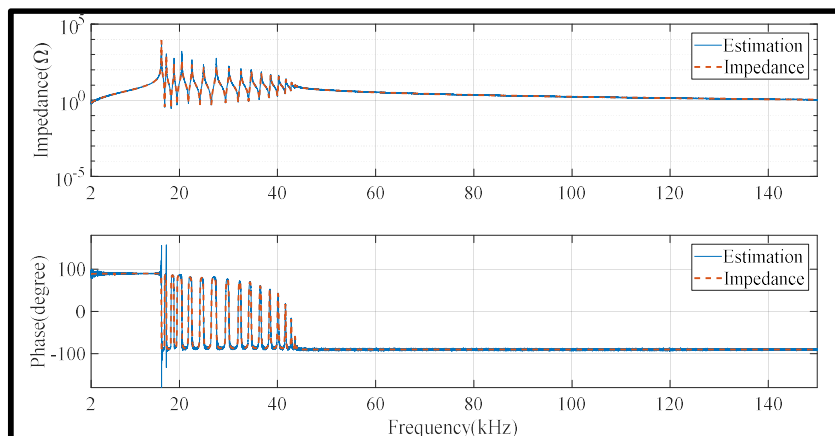
با یک سیگنال تزریقی				با چند سیگنال تزریقی				
بدون حذف نویز		با حذف نویز		بدون حذف نویز		با حذف نویز		
MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	
۸,۷۲	۶,۴۷	۷,۶۶	۶,۵۱	۲,۶۹	۷,۱۸	۲,۴۰	۷,۲۳	بدون بار
۸,۳۶	۱۳,۰۳	۷,۱۴	۱۳,۳۵	۲,۳۳	۱۶,۷۰	۲,۰۴	۱۶,۹۹	بار جزئی
۸,۱۱	۱۳,۰۶	۷,۱۳	۱۳,۳۳	۲,۳۰	۱۶,۸۴۷	۲,۰۲	۱۷,۱۳	بار کامل



شکل ۳-۹: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بار کامل با کمک چهار سیگنال تزریقی.



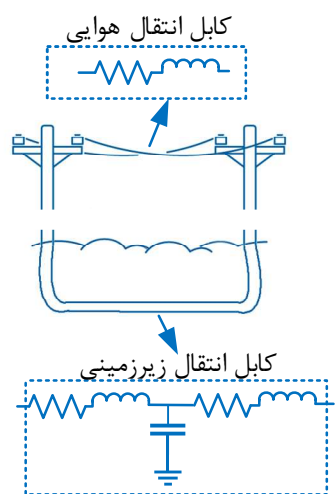
شکل ۳-۱۰: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بار جزئی با کمک چهار سیگنال تزریقی.



شکل ۳-۱۱: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت بدون بار با کمک چهار سیگنال تزریقی.

حالت دوم: تخمین امپدانس شبکه با خطوط انتقال مختلف

در این بخش، امپدانس شبکه با خطوط انتقال مختلف محاسبه شده است. خطوط انتقال هوایی و زیرزمینی [۶۱] را می‌توان با یک مدار RL و RLCLR مدل کرد [۶۲]. این مدل‌ها در شکل ۳-۱۲ آورده شده است. این مدل‌ها با پارامترهای موجود در جدول ۳-۸ در مدار اعمال شده است.



شکل ۳-۱۲: انواع مختلف خطوط انتقال (همزمان فقط یکی از دو خط انتقال وجود دارد).

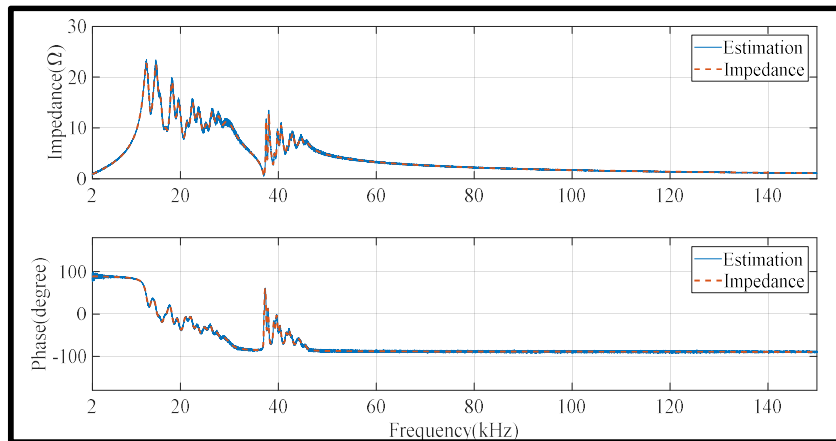
جدول ۳-۸: پارامترهای خطوط انتقال موجود در شکل ۳-۱۲.

پارامترها	
خط انتقال زیر زمینی	$25\text{ m}\Omega, 75\text{ }\mu\text{H}, 500\text{ nF}, 75\text{ }\mu\text{H}, 25\text{ m}\Omega$
خط انتقال هوایی	$50\text{ m}\Omega, 150\text{ }\mu\text{H}$

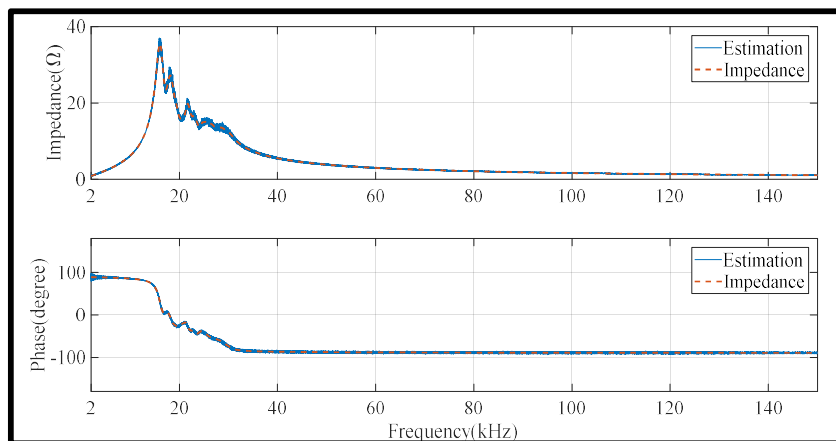
نتایج تخمین امپدانس در جدول ۳-۹، شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد حذف نویز می‌تواند دقت تخمین امپدانس را افزایش بدهد.

جدول ۳-۹: نتایج تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت دوم.

با یک سیگنال تزریقی		با حذف نویز		بدون حذف نویز		با حذف نویز		
MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	
۸,۱۳	۱۳,۰۹	۷,۰۴	۱۳,۳۸	۲,۳۰	۱۶,۷۱	۲,۰۳	۱۶,۹۷	خط انتقال زیر زمینی
۸,۰۳	۱۳,۱۸	۷,۱۴	۱۳,۳۸	۲,۳۶	۱۶,۱۹	۲,۰۷	۱۶,۴۳	خط انتقال هوایی



شکل ۳-۱۳: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت خط انتقال زیرزمینی با کمک چهار سیگنال تزریقی.



شکل ۳-۱۴: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در خط انتقال هوایی با کمک چهار سیگنال تزریقی.

حالت سوم: تخمین امپدانس شبکه از دید نقاط مختلف

در این بخش امپدانس شبکه از دید نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است. نقاط مختلف با برچسب‌های PCC1 تا PCC3 در شکل ۳-۸ مشخص شده است. نتایج تخمین در جدول ۳-۱۰ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد حذف نویز می‌تواند دقت تخمین امپدانس را افزایش دهد.

جدول ۳-۱۰: نتایج تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت سوم.

با چند سیگنال تزریقی				با یک سیگنال تزریقی			
بدون حذف نویز		با حذف نویز		بدون حذف نویز		با حذف نویز	
MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)
۸,۳۱	۱۲,۴۵	۷,۲۹	۱۲,۷۲	۲,۴۱	۱۶,۴۴	۲,۰۶۷	۱۶,۷۱
۸,۳۳	۱۲,۴۶	۷,۱۶	۱۲,۸۰	۲,۳۴	۱۶,۵۲	۲,۰۴۷	۱۶,۷۷
۸,۲۹	۱۲,۴۹	۷,۲۹	۱۲,۷۶	۲,۴۴	۱۶,۴۵	۲,۰۶۲	۱۶,۷۴
PCC1				PCC2			
PCC3				PCC3			

حالت چهارم: تخمین امپدانس شبکه در زمان شب و روز

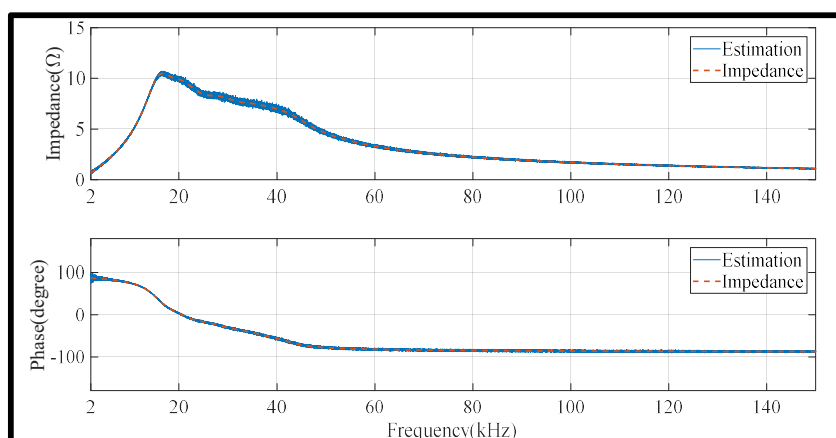
امپدانس یک شبکه در طول شبانه‌روز در گام‌های تنک تغییر می‌کند. به طور مثال در شب بخاطر روشن شدن لامپ‌های LED هر ساختمان خاصیت خازنی زیادی پیدا می‌کند. از این‌رو امپدانس شبکه در دو حالت شب و روز با پارامترهای موجود در جدول ۳-۱۱ تخمین زده شده است. نتایج تخمین در جدول ۳-۱۲، شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ آورده شده است. حذف نویز توانسته است دقت تخمین امپدانس شبکه را بهبود دهد.

جدول ۳-۱۱: پارامترهای هر ساختمان در شبکه موجود در شکل ۳-۱۲.

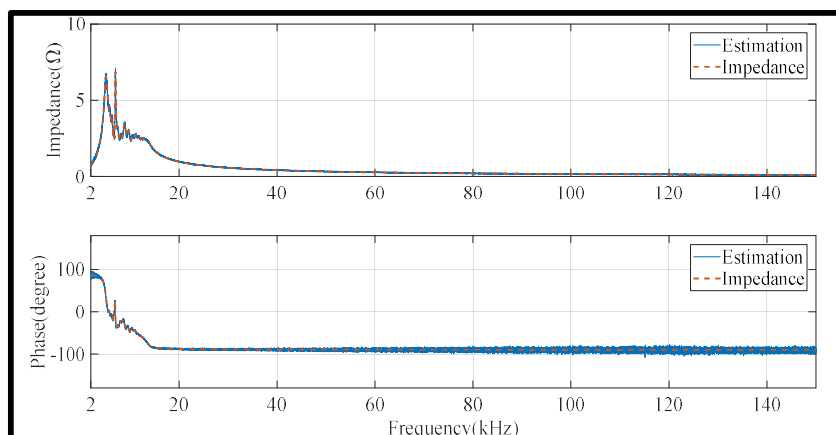
پارامترها	
روز	$25 \Omega, 100 \mu H, 1 \mu F$
شب	$25 \Omega, 100 \mu H, 10 \mu F$

جدول ۳-۱۲: نتایج تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در حالت چهارم.

با حذف نویز		با حذف نویز		بدون حذف نویز		با حذف نویز		
MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	MAPE (%)	SNR (dB)	
۸,۰۷	۱۲,۹۳	۶,۹۷	۱۳,۲۵	۲,۲۴	۱۷,۰۰	۱,۹۶	۱۷,۳۲	روز
۲۴,۹۴	۱۰,۲۵	۲۲,۰۴	۱۰,۵۲	۵,۳۲	۱۵,۳۷	۴,۵۸	۱۵,۶۷	شب



شکل ۳-۱۵: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در زمان روز با کمک چهار تزریق.



شکل ۳-۱۶: تخمین امپدانس شبکه موجود در شکل ۳-۸ در زمان شب با کمک چهار تزریق.

۳-۴ - عامل سوم: تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری سیگنال‌ها

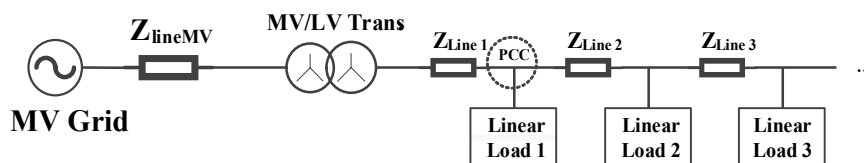
روش‌های فعال در تخمین امپدانس شبکه با تزریق یک سیگنال و سپس نمونه‌برداری از حالت گذرای شبکه، امپدانس را تخمین می‌زنند. در گام اول باید سیگنال تزریقی به نحوی انتخاب شود که حاوی مؤلفه‌های فرکانسی با انرژی کافی در محدوده تخمین امپدانس باشد. در گام دوم، باید سیگنال‌های ولتاژ و جریان شبکه اندازه‌گیری شود. در اندازه‌گیری این سیگنال‌ها دو پارامتر فرکانس نمونه‌برداری و زمان نمونه‌برداری اهمیت زیادی دارد. همانطور که قبلاً مطرح شد، بر اساس تئوری نایکوئیست فرکانس نمونه‌برداری باید حداقل دو برابر حداکثر فرکانس مورد نظر برای اندازه‌گیری امپدانس باشد. همانطور که قبلاً مطرح شد از این جهت با توجه تجهیزات موجود، چالشی وجود ندارد.

تحقیقات ما نشان می‌دهد در منابع، مدت زمان نمونه‌برداری بررسی نشده است. اگر بازه زمان نمونه‌برداری از سیگنال‌ها کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود و تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین اگر بازه زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌های ما این اثر را تایید می‌کند.

۳-۴-۱ - بررسی اثر زمان اندازه‌گیری بر روی درستی تخمین امپدانس

مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان یکی از پارامترهای مهم در تخمین درست امپدانس است. در این بخش تأثیر زمان اندازه‌گیری بر روی درستی تخمین امپدانس نشان داده است. شبیه‌سازی بر روی شبکه موجود در شکل ۳-۱۷ با خطای اندازه‌گیری سیگنال به نویز $SNR = 30dB$ انجام شده است. خطای اندازه‌گیری به صورت نویز گوسین با میانگین صفر به سیگنال‌های اخذ شده افزوده شده است. این شبکه می‌تواند نمونه‌ای از شبکه قدرت ولتاژ پایین باشد [۵۳]. هر مصرف کننده به صورت یک RLC موازی ($15\Omega, 1mH, 1\mu F$) مدل شده است. همچنین Z_{line2} ، ... با یک مدار RLCLR

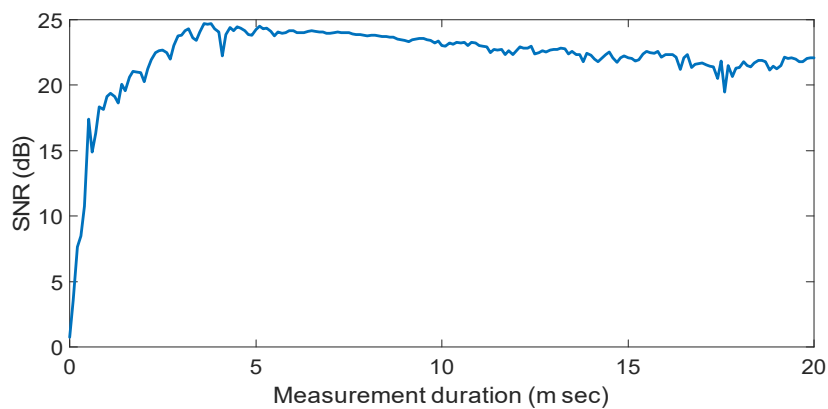
به عنوان یک خط زیرزمینی مدل گردیده است. برای شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که شبکه فقط دارای سه مصرف کننده است. همچنین مقدار Z_{line2} و Z_{line3} ، به ترتیب 0.1Ω , $10\mu H$, $10nF$ و 0.5Ω , $100\mu H$, $10nF$, $100\mu H$, 0.5Ω و $10\mu H$, 0.1Ω می‌باشد. در نهایت بخش MV Grid، Z_{lineMV} مبدل MV/LV و Z_{line1} با یک منبع ولتاژ 220 V با فرکانس 50 Hz و یک عنصر RL (1Ω , $1mH$) مدل شده است.



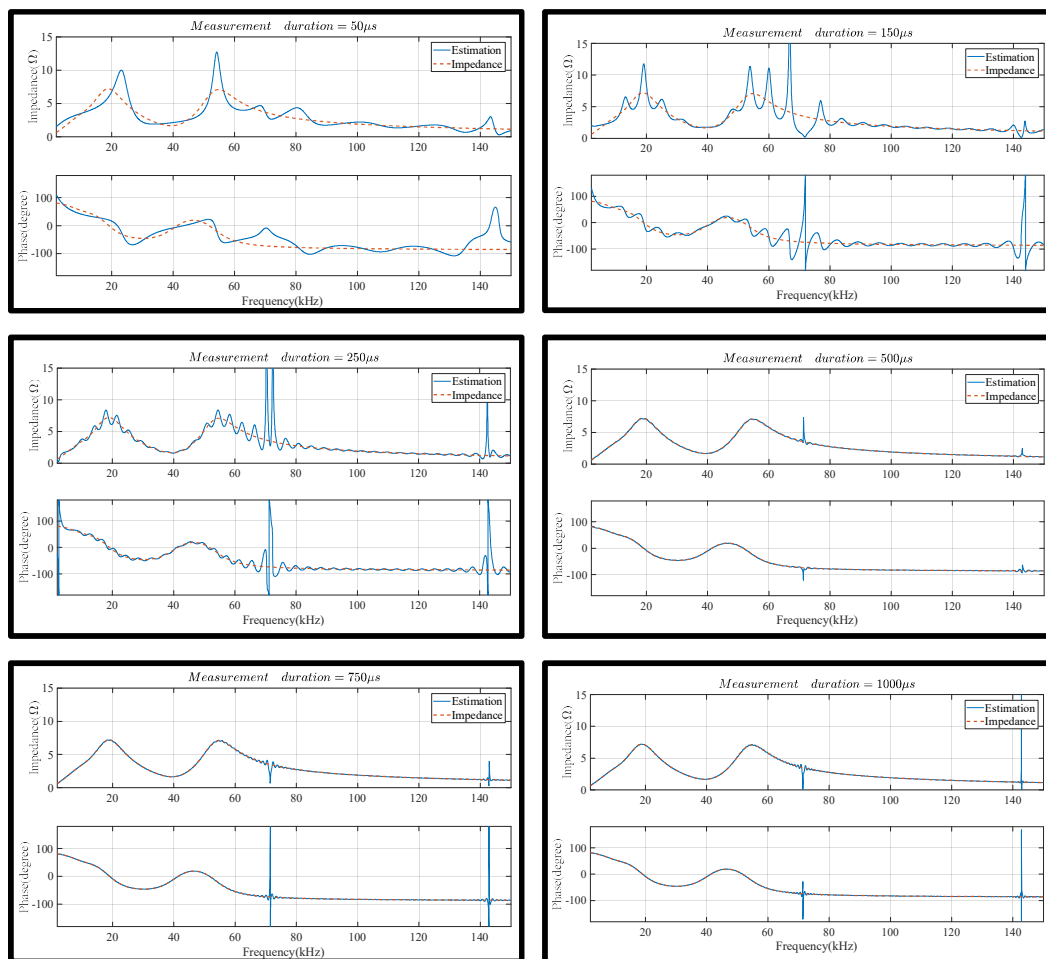
شکل ۳-۱۷: شبکه مورد آزمایش در بخش ۳-۴.

برای تخمین امپدانس یک پالس مربعی با عرض $14\mu s$ و دامنه بیشینه $1kV$ به شبکه تزریق شده است و سپس سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از PCC اندازه‌گیری شده است. فرکانس نمونه‌برداری در اندازه‌گیری $10MHz$ انتخاب شده است.

به منظور نشان دادن اثر مدت زمان اندازه‌گیری بر روی درستی تخمین امپدانس، امپدانس شبکه با مدت زمان‌های اندازه‌گیری مختلف محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۳-۱۹ مشخص است اگر زمان نمونه‌برداری $500\mu s$ انتخاب شود، بهترین تخمین (در میان این شش تخمین) انجام خواهد شد. در شکل ۳-۱۸ نمودار خطای تخمین امپدانس بر حسب زمان‌های اندازه‌گیری مختلف آمده است.



شکل ۳- ۱۸: خطای امپدانس تخمین زده شده برای شبکه موجود در شکل ۳- ۱۷ با مدت زمان‌های اندازه‌گیری مختلف.



شکل ۳- ۱۹: امپدانس تخمین زده شده برای شبکه موجود در شکل ۳- ۱۷ با مدت زمان اندازه‌گیری ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکروثانیه.

۳-۴-۲- روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان اندازه‌گیری سیگنال‌ها

اگر زمان نمونه‌برداری از سیگنال‌ها کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود و تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین اگر زمان نمونه‌برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می‌یابد. روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری سیگنال‌ها در سه گام اصلی انجام می‌شود.

گام اول: تخمین امپدانس شبکه در حوزه زمان-فرکانس

پس از تزریق و اندازه‌گیری سیگنال‌ها، به منظور تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری، امپدانس شبکه در حوزه زمان-فرکانس محاسبه می‌شود. هدف از بازنمایی زمان-فرکانس امپدانس، محاسبه امپدانس شبکه در هر فرکانس با مدت زمان اندازه‌گیری دلخواه است. بازنمایی زمان-فرکانس [۶۳] یک سیگنال $x(t)$ به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود. در ضمیمه این رساله، مختصری در مورد روش‌های تحلیل و پردازش زمان-فرکانس سیگنال‌ها آورده شده است.

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w(\tau, t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (۳-۱۰)$$

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

$$w(\tau, t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tau \leq t \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (۳-۱۱)$$

از آنجایی که سیگنال‌های جریان و ولتاژ در نقاط زمانی گسسته اندازه‌گیری می‌شوند، توزیع زمان-فرکانس نیز باید گسسته‌سازی [۶۴] شود. توزیع زمان-فرکانس زمان گسسته با کمک DFT [۶۵] را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$X(n, f) = \mathcal{F}\{x[k]w[k, n]\}, \quad (۳-۱۲)$$

$$w[k, n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq n \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (۳ - ۱۳)$$

در رابطه بالا $\{ \cdot \}$ عملگر DFT است. توزیع زمان-فرکانس بالا را می‌توان به عنوان یک نسخه تغییر یافته از STFT در نظر گرفت. در STFT، یک پنجره با عرض ثابت بر روی سیگنال در حوزه زمان حرکت می‌کند. در حالیکه 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 امپدانس به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Z(n, f) = \frac{V(n, f)}{I(n, f)}, \quad (۳ - ۱۴)$$

که در آن $V(n, f)$ و $I(n, f)$ باز نمایی سیگنال‌های ولتاژ و جریان در حوزه زمان-فرکانس است. همچنین $Z(n, f)$ امپدانس تخمینی در فرکانس f با n نمونه اول سیگنال‌های ولتاژ و جریان است.

گام دوم: حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحه زمان-فرکانس

هنگامی که زمان اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان کم باشد، تخمین امپدانس نادرست است زیرا همه حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود. از اینرو، نواحی با تخمین نادرست باید از صفحات زمان-فرکانس حذف شود. انرژی یک پالس مربعی با عرض α ثانیه در نقاط فرکانسی زیر دارای مینیمم‌های محلی است:

$$f = \left\{ \frac{1}{\alpha}, \frac{2}{\alpha}, \frac{3}{\alpha}, \dots \right\} \quad (۳ - ۱۵)$$

همانطور که قبلاً بیان شد تخمین امپدانس در فرکانس‌هایی که انرژی سیگنال تزریقی در آن کم است، درست نخواهد بود؛ بنابراین تخمین امپدانس در فرکانس‌های موجود در $(۳ - ۱۵)$ نادرست خواهد بود. در این بخش یک ماسک باینری $(Mask(f))$ براساس همین نقاط فرکانسی محاسبه می‌شود. مقادیر ماسک برای فرکانس‌های با انرژی کم برابر صفر و برای سایر فرکانس‌ها برابر یک است؛ به عبارت ریاضی می‌توان نوشت:

$$Mask(f) = \begin{cases} 0, & |V_{inject}(f)|^2 < Threshold \\ 1, & |V_{inject}(f)|^2 \geq Threshold \end{cases} \quad (۳ - ۱۶)$$

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 ولتاژ اندازه گیری شده) محاسبه می شود.

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

$$Z_M(n, f) = Z(n, f) \cdot Mask(f) \quad (۳ - ۱۷)$$

هنگامی که همه حالت گذرای شبکه اندازه گیری نشود، امیدانس تخمینی ماسک شده با زمان های اندازه گیری مختلف تغییرات زیادی دارد. به هر حال، امیدانس تخمینی ماسک شده در شرایطی که همه حالت گذرای شبکه اندازه گیری شود، تقریباً ثابت است. به منظور پیدا کردن یک زمان مسطح (مدت زمانی که امیدانس ماسک شده تغییرات زیادی نداشته باشد)، از امیدانس ماسک شده در راستای زمان گرایان گرفته می شود. به عبارت ریاضی:

$$\nabla_{time}(n, f) = Z_M(n + 1, f) - Z_M(n, f) \quad (۳ - ۱۸)$$

میانگین گرایان در راستای فرکانس از رابطه زیر استفاده می شود.

$$Mean_{\nabla_{time}}(n) = \frac{1}{\|\mathcal{F}\|_0} \sum_{f \in \mathcal{F}} |\nabla_{time}(n, f)|, \quad (۳ - ۱۹)$$

در رابطه بالا $\|\mathcal{F}\|_0$ تعداد نقاط فرکانسی محاسبه شده در تبدیل فوریه گسسته است. میانگین گرایان سیگنال در راستای فرکانس برای ناحیه های مسطح نزدیک صفر است؛ بنابراین می توان بر اساس $Mean_{\nabla_{time}}$ یک محدوده زمانی مسطح را انتخاب کرد. پس از انتخاب این محدوده زمانی، امیدانس های تخمینی کاندیدا برای تخمین نهایی می تواند انتخاب شود.

گام سوم: انتخاب بهترین تخمین

منحنی امیدانس نباید دارای تغییرات سریع و ضربه باشد؛ بنابراین هر تخمین که دارای ضربه است، نادرست است. ضربه‌ها تداخل‌های ناخواسته‌ای هستند که در فرکانس‌هایی به وجود می‌آیند که انرژی سیگنال تزریقی در آن کم است.

آنتروپی وینر^۱ [۶۶] میزان وجود ضربه‌ها را در یک سیگنال مشخص می‌کند. آنتروپی وینر مقداری حقیقی بین صفر (برای سیگنال حاوی ضربه) و یک (برای سیگنال بدون ضربه) دارد. بنابراین به کمک آنتروپی وینر می‌توان بهترین امیدانس تخمین زده شده از میان بقیه صفحه زمان-فرکانس را انتخاب کرد. در این گام آنتروپی وینر برای امیدانس کاندیدا (صفحه محاسبه شده در گام قبل) محاسبه می‌شود و هر امیدانس کاندیدا که بیشترین آنتروپی را داشت به عنوان تخمین امیدانس نهایی انتخاب می‌شود. آنتروپی وینر به صورت نسبت میانگین هندسی به میانگین حسابی نقاط یک سیگنال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$WE(Z_c(n, :)) = \frac{\frac{\|\mathcal{F}\|_0}{\sqrt{\prod_{f \in \mathcal{F}} Z_c(n, f)}}}{\frac{1}{\|\mathcal{F}\|_0} \sum_{f \in \mathcal{F}} Z_c(n, f)} \quad (۳ - ۲۰)$$

در رابطه بالا $Z_c(n, f)$ ناحیه کاندید از صفحه زمان-فرکانس است. از آنجایی که ما به دنبال پیدا کردن امیدانس با بیشترین آنتروپی هستیم، آنتروپی وینر را می‌توان به صورت زیر ساده کرد.

$$SWE(Z_c(k, :)) = \frac{\exp(\sum_{f \in \mathcal{F}} \ln(Z_c(n, f)))}{\sum_{f \in \mathcal{F}} Z_c(n, f)}, \quad (۳ - ۲۱)$$

که در آن $\exp(\zeta) = e^\zeta$. لازم به ذکر است این ساده‌سازی زمانی درست است که $Z_c(n, f) \neq 0$

^۱ Wiener Entropy

۳-۴-۳ - آزمایش‌ها و نتایج

در این بخش روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری بر روی شبکه موجود در شکل ۳-۱۷ با شرایط مشابه بخش ۳-۴-۱ پیاده‌سازی شده است. برای بهتر روشن شدن روش پیشنهادی، گام به گام مراحل روش بر روی شبکه اعمال و نتایج در زیر آورده شده است.

به منظور تخمین امپدانس شبکه، یک پالس مربعی با عرض $14\mu s$ و بیشینه دامنه پالس $1kV$ به شبکه تزریق شده است. سپس سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از آن تا $5ms$ اندازه‌گیری گردید.

گام اول: تخمین امپدانس شبکه در حوزه زمان-فرکانس

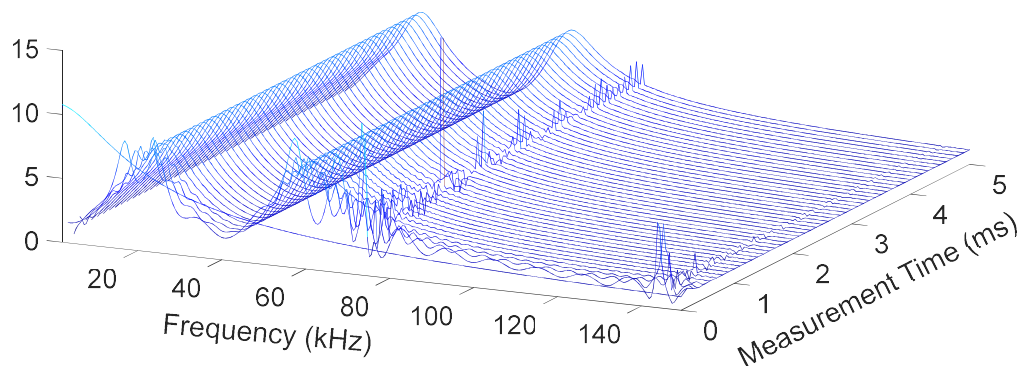
در این گام امپدانس شبکه با مدت زمان‌های اندازه‌گیری مختلف تا مدت زمان $5ms$ در حوزه زمان-فرکانس محاسبه گردید. همانطور که در شکل ۳-۲۰ مشاهده می‌شود امپدانس تخمینی با مدت زمان اندازه‌گیری کم نادرست است.

گام دوم: حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحه زمان-فرکانس

در گام دوم، ابتدا یک ماسک طراحی می‌شود. پالس مربعی با عرض $14\mu s$ دارای مینی‌م‌های محلی در فرکانس‌های زیر است.

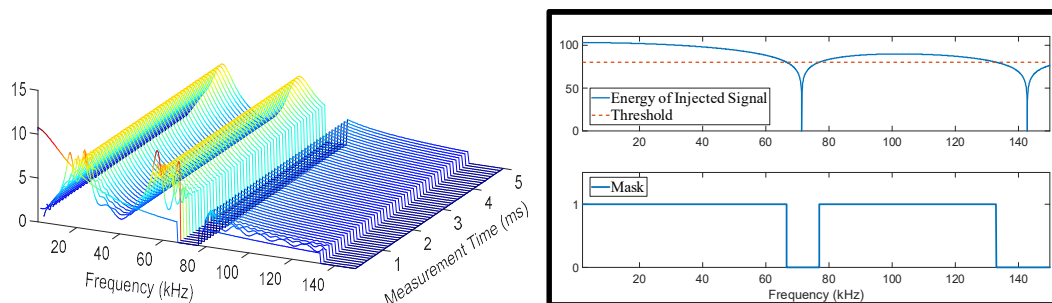
$$f = \{71.4, 142.9, 214.3, 285.7, \dots\} \text{ kHz}$$

(۳ - ۲۲)



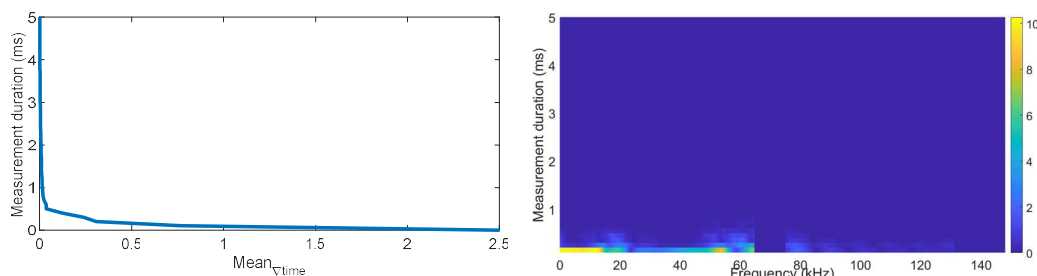
شکل ۳-۲۰: امپدانس تخمینی با مدت زمان‌های مختلف (گام اول)

تنها نقاط فرکانسی که به شکل برجسته مشخص شده است، در بازه فرکانسی تخمین امپدانس - 2
 150 kHz قرار دارد. اگر حد آستانه 80dB انتخاب شود، ماسک به صورت نمایش داده شده در شکل
 ۳- ۲۱(الف) خواهد بود. سپس امپدانس تخمینی ماسک شده ($Z_M(n, f)$) محاسبه شده است. (شکل
 ۳- ۲۱(ب)). در مرحله بعد، گرادیان امپدانس ماسک شده در راستای زمان به منظور پیدا کردن نواحی
 با تغییرات کم محاسبه می‌شود. این گرادیان در شکل ۳- ۲۱(ج) آورده شده است. در شکل ۳- ۲۱(د)
 میانگین گرادیان امپدانس ماسک شده در راستای فرکانس نشان داده شده است. همانطور که مشخص
 است محدوده زمانی اندازه‌گیری 1ms تا 5ms یک محدوده زمانی مسطح است؛ بنابراین تخمین
 امپدانس با این زمان‌های اندازه‌گیری نتایج بهتری نسبت به بقیه زمان‌های اندازه‌گیری دارد. بر اساس
 همین زمان اندازه‌گیری، تخمین‌های کاندیدا انتخاب شده‌اند (شکل ۳- ۲۲).



(ب) امپدانس تخمینی ماسک شده.

(الف) ماسک طراحی شده برای پالس مربعی با
 عرض 14μs و بیشینه دامنه 1kV.



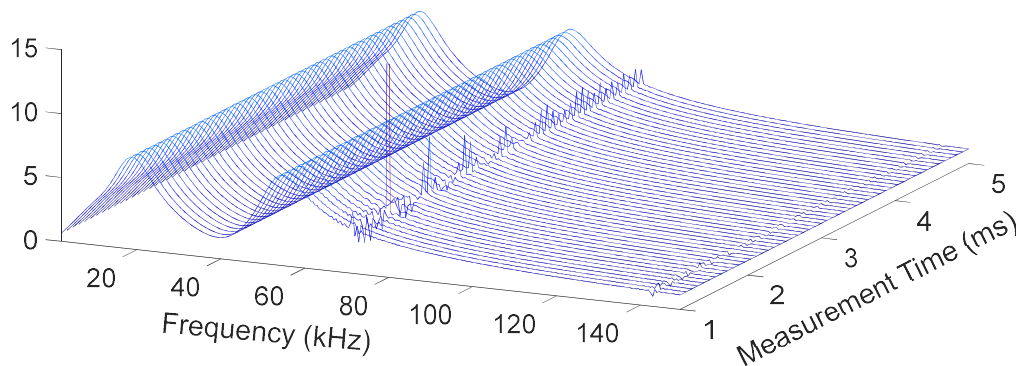
(د) میانگین گرادیان امپدانس‌های تخمین زده
 شده.

(ج) گرادیان امپدانس تخمین زده شده در راستای
 زمان.

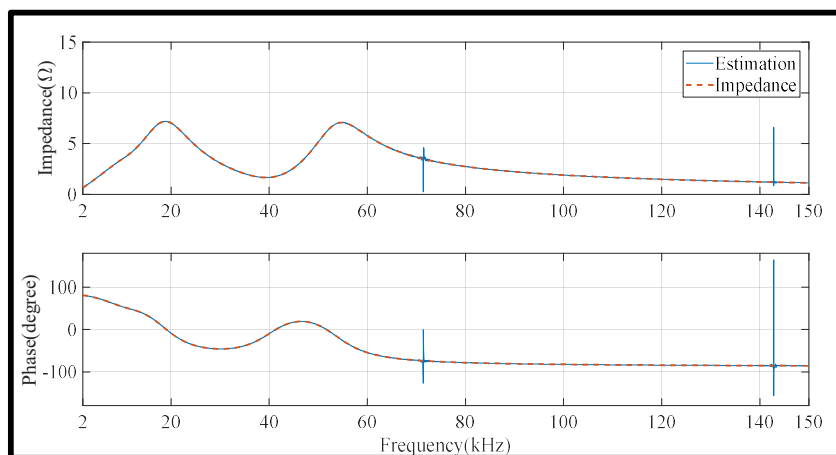
شکل ۳- ۲۱: مراحل مربوط به حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحه زمان-فرکانس.

گام سوم: انتخاب بهترین تخمین

در گام آخر معیار WE برای هر تخمین محاسبه گردید. سپس تخمینی که WE برای آن بیشتر بود، به عنوان تخمین نهایی انتخاب گردید. میزان دقت امپدانس تخمین زده شده در جدول ۳-۱۳ آورده شده است. دقت امپدانس تخمین زده شده با روش پیشنهادی $SNR = 24.90$ dB است. حد بالای تخمین (نهایت دقت ممکن با این سیگنال‌ها) $SNR = 24.97$ dB است. دقت روش پیشنهادی به مقدار زیادی به حد بالای تخمین نزدیک است.



شکل ۳-۲۲: امپدانس‌های تخمینی کاندیدا.



شکل ۳-۲۳: امپدانس تخمینی شبکه موجود در شکل ۳-۱۷ با کمک روش پیشنهادی جهت تعیین مدت زمان اندازه‌گیری.

جدول ۳- ۱۳: خطای امیدانس تخمین زده شده.

SNR (dB)	
حد بالای تخمین	۲۴,۹۷
روش پیشنهادی	۲۴,۹۰

۳-۵ - روش پیشنهادی برای تخمین امیدانس شبکه‌های قدرت

در این بخش روشی جهت تخمین امیدانس شبکه‌های قدرت پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از شش مرحله اصلی تشکیل می‌شود که فلوچارت آن در شکل ۳- ۲۴ آمده است.



شکل ۳- ۲۴: الگوریتم پیشنهادی برای تخمین امیدانس

مرحله اول: تعیین یک یا چند سیگنال برای تزریق

هر پالس مربعی توانایی تخمین درست امپدانس را در بعضی فرکانس‌ها با توجه به عرض خود دارد. در این مرحله K سیگنال تزریقی به نحوی انتخاب می‌شود که اجتماع محدوده فرکانسی توانایی سیگنال‌های تزریقی، $2 - 150 \text{ kHz}$ باشد. در این مرحله از نتایج بخش ۳-۲ استفاده شده است. بهترین کروموزوم پیدا شده در بخش ۳-۲ به صورت $[7\mu\text{s}, 11\mu\text{s}, 26\mu\text{s}, 14\mu\text{s}]$ با بیشینه دامنه پالس 1 kV بود که ما از آن‌ها برای تخمین امپدانس استفاده خواهیم کرد.

مرحله دوم: تزریق سیگنال‌ها به صورت مجزا به شبکه

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 میلی ثانیه انجام می‌شود. از آنجایی که اندازه‌گیری خللی در کار شبکه ایجاد نمی‌کند انتخاب این پارامتر اهمیت زیادی ندارد.

مرحله سوم: حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

هنگامی که سطح انرژی سیگنال و سطح انرژی نویز نزدیک هم باشند، دقت تخمین امپدانس پایین خواهد بود. در این مرحله با بهره‌گیری از حذف نویز به کمک موجک ایستا سیگنال‌های ولتاژ و جریان حذف نویز می‌شوند. این کار باعث می‌شود تا دقت تخمین امپدانس بالا برود. الگوریتم حذف نویز باید بر روی هر سیگنال ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده به صورت مجزا انجام شود. الگوریتم حذف نویز شامل چهار گام اساسی است: گام اول) انتخاب موجک مادر که بر اساس آزمایش‌های انجام شده، موجک sym4 انتخاب شده است. گام دوم) تجزیه هر سیگنال به پنج سطح. گام سوم) آستانه‌گذاری نرم بر روی سیگنال. گام چهارم) بازسازی سیگنال. این گام‌ها با گام‌های مطرح شده در مرحله سوم از بخش ۳-۳-۱ یکسان است.

مرحله چهارم: تعیین زمان اندازه‌گیری لازم برای تخمین

اگر زمان نمونه‌برداری از سیگنال‌ها کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه‌گیری نمی‌شود و تخمین امپدانس 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 امپدانس کاهش می‌یابد. از این‌رو در این بخش ابتدا امپدانس 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 انجام می‌شود: گام اول) تخمین امپدانس شبکه به کمک هر سیگنال تزریقی در حوزه زمان-فرکانس و گام دوم) حذف نواحی با تخمین نادرست از صفحات زمان-فرکانس. این دو گام همان گام‌های دوم و سوم مطرح شده در بخش ۳-۴-۲ است. لازم به ذکر است که در این مرحله به ازای هر سیگنال تزریقی یک صفحه زمان-فرکانس خواهیم داشت. این موضوع در حالی است که در بخش ۳-۴-۲ فقط یک صفحه-زمان-فرکانس وجود داشت.

مرحله پنجم: تخمین امپدانس‌ها 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 مرحله برای هر صفحه میانگین صفحه در راستای زمان به عنوان تخمین نهایی محاسبه شده به کمک سیگنال تزریقی متناظر محاسبه می‌شود. در این مرحله، برخلاف روش موجود در گام چهارم از بخش ۳-۴-۲ نیازی به استفاده از معیار آنتروپی وینر برای انتخاب بهترین تخمین نیست. زیرا این معیار به این خاطر استفاده شده بود که در صفحه زمان-فرکانس تداخل‌های (ضربه‌های) ناخواسته‌ای وجود داشت که در نقاط فرکانسی با انرژی کم ایجاد می‌شد. امپدانس در این نقاط فرکانسی در تخمین نهایی ما تاثیری ندارد.

مرحله ششم: ارائه یک تخمین نهایی

در مرحله قبل، به ازای هر سیگنال تزریقی یک تخمین امپدانس بهتر انتخاب گردید. فرض کنید که این تخمین‌های بهتر با $Z^{(i)}(f)$ مشخص شود که در $Z^{(i)}(f)$ بهترین 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. همانطور که بیان شد هرچه انرژی سیگنال در یک فرکانس بالاتر باشد، امپدانس تخمینی به کمک آن دقیق‌تر خواهد بود؛ بنابراین می‌توان امپدانس تخمینی را به کمک رابطه (۳ - ۷) محاسبه کرد.

۳-۶ - جمع بندی

در این فصل عوامل موثر در تخمین امپدانس به دقت بررسی گردید. از آنجایی که هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه در محدوده وسیع فرکانسی است، از پالس مربعی جهت تزریق استفاده شده است زیرا پالس مربعی شامل طیف فرکانسی وسیعی است. انرژی پالس مربعی وابسته به دو پارامتر عرض پالس و بیشینه دامنه پالس می‌باشد.

با افزایش عرض پالس تزریقی، انرژی سیگنال تزریقی افزایش می‌یابد. این موضوع در حالی است که با این افزایش، پهنای باند آن کاهش می‌یابد. هر پالس مربعی توانایی تخمین امپدانس در بعضی فرکانس‌ها را دارد. از این جهت می‌توان از چندین پالس مربعی استفاده کرد. در صورتی که این سیگنال‌ها به درستی انتخاب شود، می‌توان امپدانس را در محدوده فرکانسی $2 - 150kHz$ به درستی تخمین زد. در این فصل روشی بدین منظور مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شد.

اگرچه به لحاظ تئوری افزایش بیشینه پالس باعث افزایش انرژی سیگنال تزریقی و دقت تخمین می‌شود ولی این عامل تا حد آستانه $1 kV$ کنترل شده است. در این فصل روشی برای حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به جای افزایش انرژی سیگنال تزریقی پیشنهاد شده است.

برای تخمین امپدانس شبکه به کمک تزریق سیگنال، اول باید سیگنال مناسب انتخاب و به شبکه تزریق شود، سپس باید سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از PCC باید اندازه‌گیری شود. در اندازه‌گیری دو عامل اهمیت دارد. ۱) فرکانس نمونه‌برداری که بر اساس تئوری نایکوئیست باید انتخاب شود. ۲) زمان نمونه‌برداری که تحقیقات ما نشان می‌دهد در کارهای گذشته به آن پرداخته نشده است. اگر زمان نمونه‌برداری کم باشد، همه حالت گذرای مدار اندازه‌گیری نمی‌شود و در نتیجه تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین با افزایش زمان نمونه‌برداری تأثیر نویز در تخمین امپدانس بیشتر می‌شود و در دقت تخمین امپدانس کاهش می‌باشد. در این فصل روشی مبتنی بر توزیع زمان-فرکانس به منظور تعیین مدت زمان اندازه‌گیری مناسب برای تخمین امپدانس شبکه پیشنهاد شده است.

در این فصل اثر هر سه عامل موثر در تخمین امپدانس با انجام آزمایش‌هایی مشخص گردید. در نهایت با جمع‌بندی این عوامل، روشی به منظور تخمین امپدانس شبکه پیشنهاد گردید.

۴ - ارزیابی و نتایج

۴-۱- مقدمه

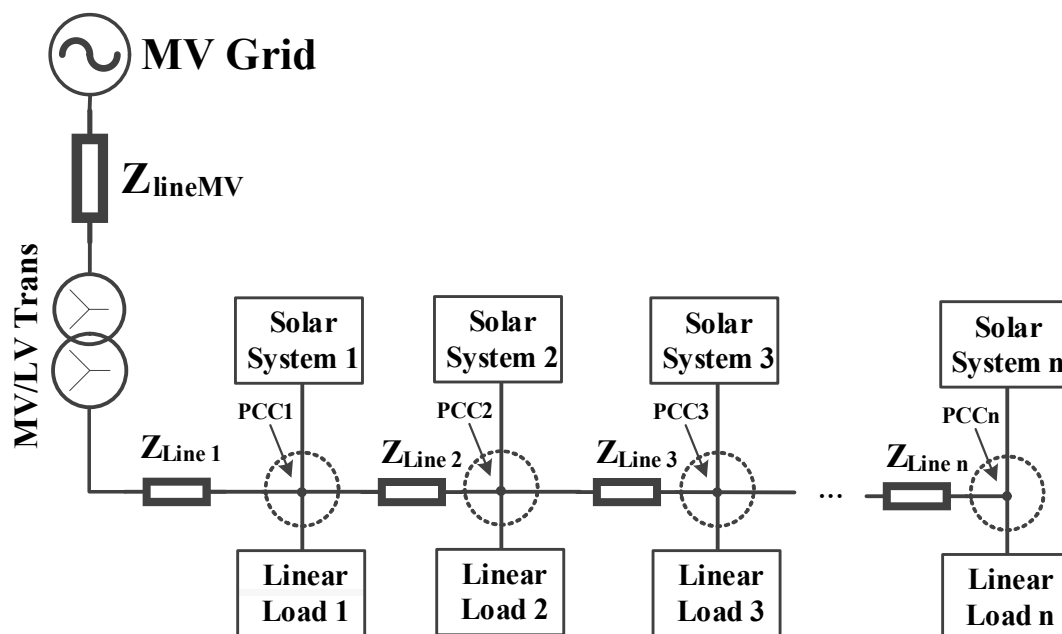
هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه به کمک روش‌های پردازش سیگنال در محدوده وسیع فرکانسی است. در این فصل نتایج آزمایش روش پیشنهادی بر روی یک شبکه به عنوان نمونه آورده شده است. نتایج گزارش شده نشان دهنده توانایی روش در تخمین امپدانس در بازه فرکانسی $150\text{ kHz} - 2$ است. در این فصل ایده اصلی رساله با کمک یک آزمایش عملی اعتبارسنجی شد.

۴-۲- آزمایش‌های شبیه‌سازی

در این بخش به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، آزمایش‌هایی بر روی شبکه قدرت نمایش داده شده در شکل ۴-۱ انجام شده است. فرض شده است در شبکه، 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 $(25\ \Omega, 100\ \mu H)$ مدل شده است. همچنین سیستم‌های خورشیدی نیز با یک منبع جریان موازی با RL با پارامترهای $(2\ \Omega, 50\ \mu H) \parallel (10\ A, 50\ Hz)$ مدل شده است. خطوط انتقال Z_{lin} تا Z_{line10} نیز با RL سری با پارامترهای $25\ m\Omega, 30\ \mu H$ مدل گردیده است. در نهایت بخش ولتاژ بالای شبکه نیز با یک منبع تغذیه $220\ V, 50\ Hz$ سری شده با یک RL سری $25\ m\Omega, 30\ \mu H$ مدل شد. در آزمایش‌های انجام شده در این بخش، فرکانس نمونه برداری $10\ MHz$ در نظر گرفته شده است.

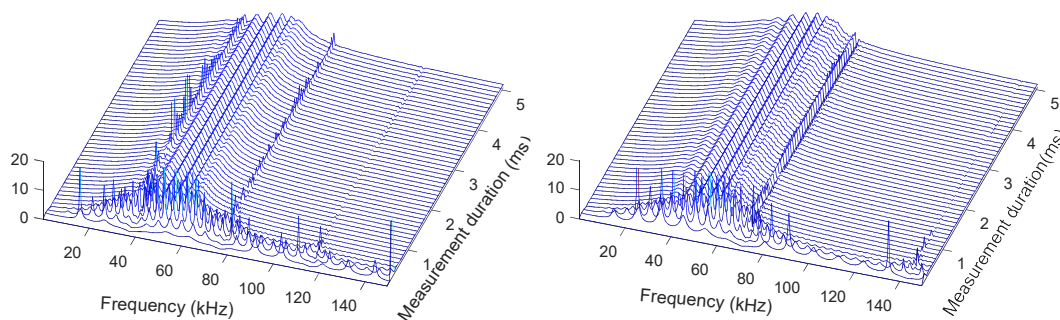
۴-۲-۱- آزمایش اول

در این آزمایش، امپدانس شبکه از دید نقطه $PCC1$ با نویز اندازه‌گیری $SNR = 10\ dB$ اندازه‌گیری شده است. همچنین منابع ولتاژ شبکه حاوی نویز هارمونیک با پارامترهای موجود در جدول ۳-۲ است. در مرحله اول چهار پالس مربعی با بیشینه دامنه $1\ kV$ و عرض پالس‌های $7\ \mu s, 11\ \mu s, 14\ \mu s$ و $26\ \mu s$ 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.



شکل ۴-۱: شبکه مورد آزمایش در بخش ۴-۲.

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 ۴-۲ آمده است. همانطور که در صفحات مشخص است تخمین امپدانس با زمان‌های اندازه‌گیری کم نادرست است.

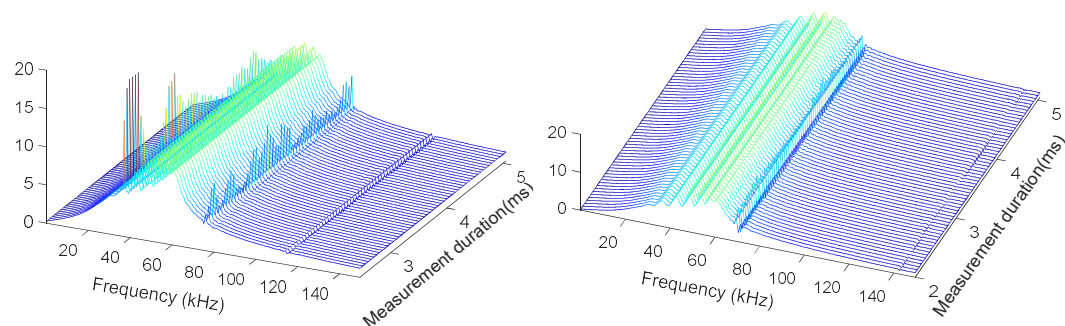


الف) مربوط به پالس با عرض $14 \mu s$ ب) مربوط به پالس با عرض $26 \mu s$

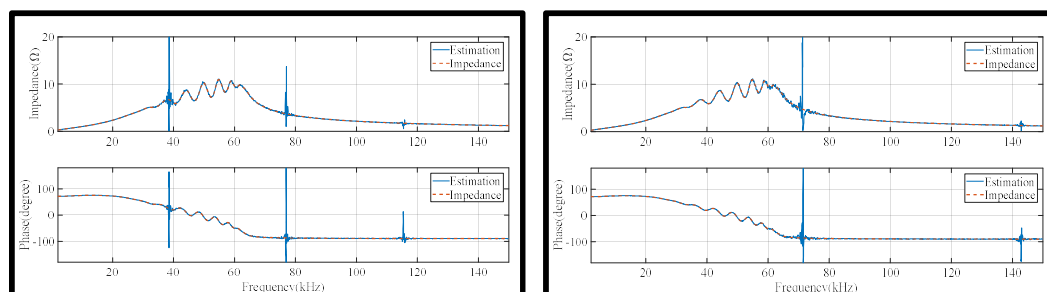
شکل ۴-۲: صفحات زمان-فرکانس امپدانس تخمینی.

در مرحله بعد نواحی با مدت زمان اندازه‌گیری کم از صفحات زمان-فرکانس حذف گردید (شکل ۴-۳). پس از حذف نواحی با تخمین نادرست، با محاسبه میانگین صفحه در راستای فرکانس، یک تخمین به ازای هر صفحه محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، در شکل ۴-۴ دو مورد از این تخمین‌ها آورده شده

است. در نهایت با ترکیب نتایج بدست آمده، امپدانس نهایی محاسبه می‌شود. این تخمین در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. خطای تخمین امپدانس نیز در جدول ۴-۱ آورده شده است. همانطور که در جدول ۴-۱ مشخص است هر پارامتر در درستی تخمین امپدانس موثر است.

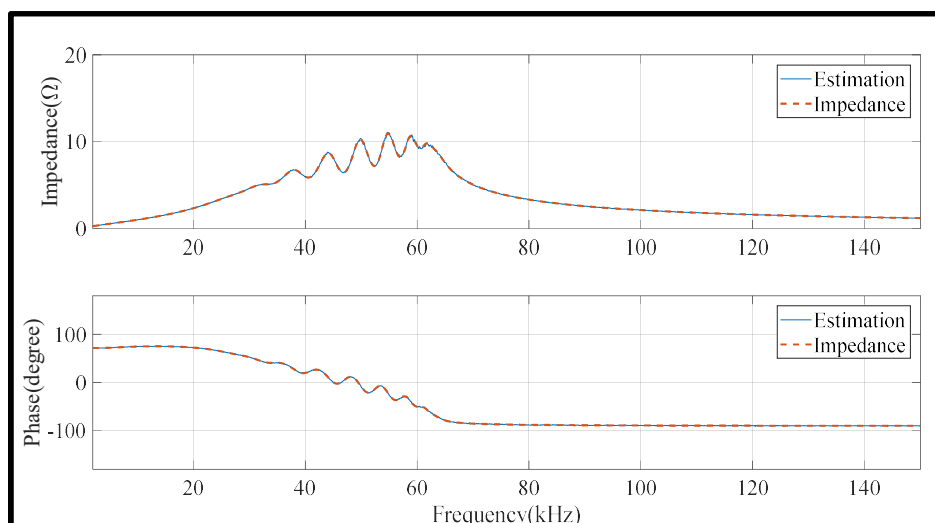


الف) مربوط به پالس با عرض $14 \mu s$.
ب) مربوط به پالس با عرض $26 \mu s$.
شکل ۴-۳: صفحات زمان-فرکانس که از آن‌ها نواحی با تخمین نادرست حذف شده است.



الف) مربوط به پالس با عرض $14 \mu s$.
ب) مربوط به پالس با عرض $26 \mu s$.

شکل ۴-۴: امپدانس تخمین زده شده به کمک هر تخمین.



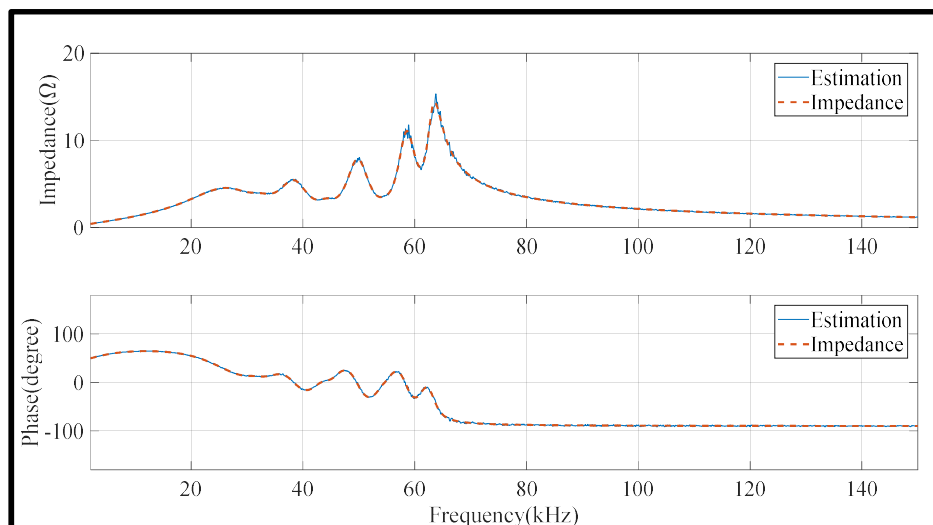
شکل ۴-۵: امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش اول.

جدول ۴-۱: خطای تخمین امپدانس برای آزمایش اول.

روش	SNR (dB)	MAPE (%)
روش پیشنهادی	۲۱,۶۲	۰,۵۱
تخمین با چهار سیگنال تزریقی با حذف نویز	۲۰,۳۴	۰,۶۶
تخمین با چهار سیگنال تزریقی بدون حذف نویز	۲۰,۲۳	۰,۷۲
تخمین با یک سیگنال تزریقی با حذف نویز	۱۴,۸۲	۳,۰۸

۴-۲-۲- آزمایش دوم

در این آزمایش، امپدانس شبکه از دید نقطه PCC5 با نویز اندازه‌گیری $SNR = 0\text{ dB}$ اندازه‌گیری شده است. همچنین منابع ولتاژ شبکه حاوی نویز هارمونیک با پارامترهای موجود در جدول ۳-۲ است. سایر شرایط آزمایش و نحوه تخمین امپدانس دقیقاً مشابه آزمایش اول است. امپدانس تخمینی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. همچنین خطای تخمین امپدانس در جدول ۴-۲ آمده است.



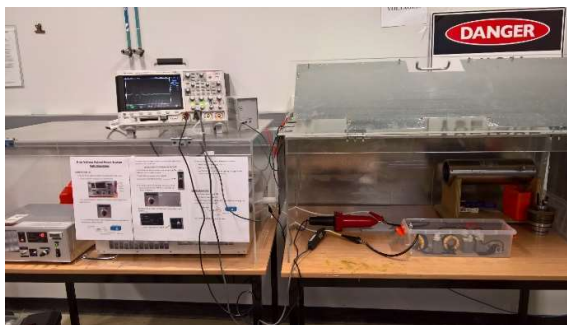
شکل ۴-۶: امپدانس تخمین زده شده نهایی برای آزمایش دوم.

جدول ۴-۲: خطای تخمین امپدانس برای آزمایش دوم.

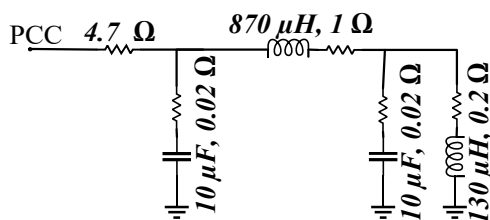
روش	SNR (dB)	MAPE (%)
روش پیشنهادی	۱۷,۱۴	۱,۴۱
تخمین با چهار سیگنال تزریقی با حذف نویز	۱۵,۸۲	۱,۹۲
تخمین با چهار سیگنال تزریقی بدون حذف نویز	۱۵,۳۵	۲,۱۶
تخمین با یک سیگنال تزریقی با حذف نویز	۹,۶۴	۸,۷۲

۴-۳- اعتبار سنجی ایده رساله

در این بخش نتیجه اعمال روش پیشنهادی بر روی یک شبکه واقعی آورده شده است. آزمایش بر روی شبکه موجود در شکل ۴-۷ انجام شده است. مقادیر خازن‌ها، مقاومت‌ها و سلف‌ها با دستگاه اندازه‌گیری LCR (LCR meter - BK Precision 891) اندازه‌گیری شده است.



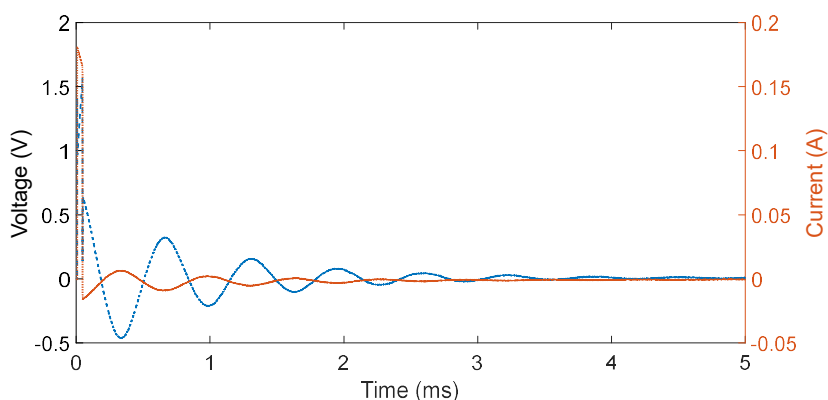
(ب)



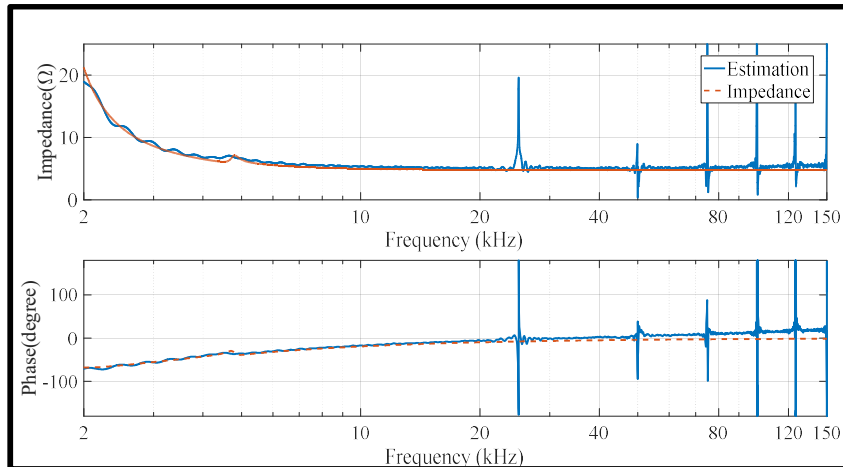
(الف)

شکل ۴-۷: شماتیک شبکه، (ب) مجموعه آزمایش.

به منظور تخمین امپدانس، ابتدا یک پالس مربعی با عرض $40 \mu s$ به نقطه PCC تزریق شده است. سپس سیگنال‌های ولتاژ PCC و جریان عبوری از آن تا $5 ms$ اندازه‌گیری گردید. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۴-۸ آمده است. سپس سیگنال‌ها حذف نویز گردید. در مرحله بعد، امپدانس شبکه در حوزه زمان-فرکانس تخمین زده شده است. همانطور که مطرح شده، اگر مدت زمان اندازه‌گیری کم باشد، تخمین نادرست خواهد بود. بنابراین نواحی با مدت زمان اندازه‌گیری کم از صفحه زمان-فرکانس حذف گردید. در گام آخر به کمک آنتروپی وینر تخمین نهایی از میان باقی مانده صفحه انتخاب شد. تخمین نهایی در شکل ۴-۹ آمده است. امپدانس مرجع در این شکل با نرم‌افزار Matlab/Simulink و مقادیر پارامترهای محاسبه شده (توسط LCR meter) با کمک روابط تئوری محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش به خوبی توانسته است امپدانس شبکه را تخمین بزند.



شکل ۴-۸: سیگنال‌های ولتاژ و جریان عبوری از PCC پس از تزریق سیگنال.



شکل ۴-۹: امپدانس تخمینی برای آزمایش عملی.

۴-۴ - جمع بندی

در این فصل روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس شبکه به کمک شبیه‌سازی ارزیابی گردید. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به خوبی می‌تواند امپدانس شبکه را در محدوده 2 – 150 kHz تخمین بزند. در منابع، روشی جهت تخمین امپدانس در این محدوده فرکانسی وجود ندارد تا بتوان نتایج را به کمک آن مقایسه کرد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد هر سه عامل عرض پالس‌های تزریقی، حذف نویز و مدت زمان اندازه‌گیری در بهبود دقت تخمین امپدانس موثر است.

در این فصل به منظور اعتبارسنجی رساله، ایده رساله بر روی یک شبکه واقعی مورد آزمایش قرار گرفت. امپدانس تخمین زده شده به کمک روش پیشنهادی به قدر خوبی به امپدانس واقعی نزدیک است.

۵ – جمع‌بندی و کارهای آینده

۵-۱- جمع‌بندی

هدف این رساله، ارائه روشی مبتنی بر تزریق سیگنال برای تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت ولتاژ پایین در محدوده فرکانسی $2 - 150\text{kHz}$ با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال است. در منابع گذشته تحقیقات کمی در این بازه فرکانسی انجام شده است. پیش‌بینی زمانی برای کار روی این محدوده فرکانسی توسط IEC برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است. از آنجایی که محدوده فرکانسی برای تخمین امپدانس در این رساله وسیع است، چگونگی پردازش سیگنال‌ها اهمیت فراوانی دارد.

در روش‌های فعال برای تخمین امپدانس، سیگنالی با فرکانس‌های مختلف به شبکه تزریق شده و با توجه به پاسخ شبکه، امپدانس شبکه در آن فرکانس تخمین زده می‌شود. در شرایط نویزی میزان درستی تخمین امپدانس با انرژی سیگنال تزریقی رابطه مستقیم دارد، در حالیکه در شرایط بدون نویز اینگونه نیست. از آنجایی که هدف این رساله تخمین امپدانس شبکه در محدوده وسیع فرکانسی است، از پالس مربعی جهت تزریق استفاده شده است زیرا پالس مربعی شامل طیف فرکانسی وسیعی است. در استفاده از پالس مربعی دو پارامتر بیشینه دامنه پالس و عرض پالس نقش اساسی دارد.

انرژی پالس مربعی با بیشینه دامنه آن رابطه مستقیم دارد؛ از این رو با افزایش بیشینه دامنه پالس مربعی درستی تخمین امپدانس افزایش می‌یابد. اگر چه از نظر تئوری این موضوع درست است ولی به لحاظ عملی این کار ممکن نیست؛ زیرا با افزایش بیشینه دامنه پالس یک انرژی لحظه‌ای و در فرکانس‌های پایین به شبکه اعمال می‌شود که باعث آسیب به شبکه می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در این رساله بیشینه دامنه پالس تا 1 kV کنترل شده است. همچنین، با حذف نویز از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به جای افزایش انرژی سیگنال تزریقی می‌توان دقت تخمین امپدانس را افزایش داد. در این رساله روشی برای حذف نویز از این سیگنال‌ها بر پایه تبدیل موجک پیشنهاد شده است.

انرژی پالس مربعی با عرض پالس رابطه مستقیم دارد. هر چه عرض پالس بیشتر باشد، انرژی سیگنال نیز بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر، عرض پالس مربعی با پهنای باند فرکانسی آن رابطه عکس دارد.

همچنین هر پالسی توانایی تخمین درست امپدانس در بعضی فرکانس ها را دارد. در این رساله روشی برای انتخاب چندین پالس مربعی با عرض پالس های مختلف برای تخمین درست امپدانس در محدوده وسیع فرکانسی پیشنهاد شده است.

پس از انتخاب سیگنال مناسب (پالس با عرض کم و انرژی کافی) برای تزریق به شبکه، جریان عبوری از PCC و ولتاژ آن باید اندازه گیری شود. در این اندازه گیری دو پارامتر فرکانس نمونه برداری و مدت زمان نمونه برداری اهمیت ویژه ای دارد.

بر اساس تئوری نایکوئیست، فرکانس نمونه برداری باید حداقل دو برابر حداکثر فرکانس مورد نظر برای اندازه گیری امپدانس باشد. با توجه به آن محدوده تخمین امپدانس شبکه فرکانس های $2kHz$ تا $150kHz$ شود، بنابراین فرکانس نمونه برداری باید حداقل $300kHz$ باشد. وسایل اندازه گیری موجود، فرکانس های نمونه برداری بالا مانند $10MHz$ را پشتیبانی می کند؛ بنابراین از این جهت، مشکلی وجود ندارد.

مطالعات ما نشان می دهد در تحقیقات گذشته پارامتر مدت زمان نمونه برداری بررسی نشده است. اگر زمان نمونه برداری از سیگنال های ولتاژ و جریان کم باشد، تمام حالت گذرای شبکه اندازه گیری نمی شود. در این حالت، تخمین امپدانس به کلی نادرست خواهد بود. همچنین، اگر زمان نمونه برداری بیش از حد لازم باشد، اثر نویز در تخمین بیشتر نمایان شده و دقت تخمین امپدانس کاهش می یابد. بر اساس همین نتایج روشی برای تخمین امپدانس مبتنی بر تعیین مدت زمان لازم برای نمونه برداری پیشنهاد شده است.

در نهایت با جمع بندی روش های پیشنهادی، یک روش جامع به منظور تخمین امپدانس پیشنهاد شد. در این روش، ابتدا سیگنال های مناسب برای تزریق انتخاب و سپس به شبکه تزریق می شوند. در مرحله بعد به کمک حذف نویز مویک ایستا از سیگنال های اندازه گیری شده، سطح سیگنال به نویز افزایش می یابد که باعث افزایش دقت تخمین امپدانس می شود. در مرحله بعد، به کمک توزیع زمان-فرکانس

مدت زمان لازم برای تخمین امپدانس تعیین می‌گردد و با ترکیب نتایج تخمین به کمک سیگنال‌های تزریقی مختلف، تخمین نهایی محاسبه می‌شود. نتایج آزمایش روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های مختلف، نشان دهنده توانایی آن در تخمین درست امپدانس است.

۵-۲- کارهای آینده

در این پژوهش تخمین امپدانس شبکه‌های قدرت در محدوده فرکانسی وسیع 2kHz تا 150kHz است. در این بخش، پیشنهادهایی برای کارهای آینده آورده شده است.

۱- در این رساله فرض شده است که شبکه تنها شامل عناصر خطی است. برای گسترش کار می‌توان تخمین امپدانس را بر روی عناصر غیرخطی انجام داد. امپدانس شبکه‌ای با عناصر خطی فقط تابعی از فرکانس است. این موضوع در حالی است که امپدانس عناصر غیرخطی وابسته به پارامترهای دیگری نیز می‌باشند. به طور مثال اگر اختلاف پتانسیل دو سر یک دیود دو ولت باشد، امپدانس آن تقریباً صفر است. از طرف دیگر، اگر اختلاف پتانسیل دو سر همین دیود نزدیک صفر باشد، امپدانس آن بینهایت خواهد بود.

۲- علاوه بر پالس مربعی می‌توان از پالس‌های دیگری نیز برای تخمین امپدانس استفاده کرد. به عنوان کارهای آینده احتمالاً می‌توان پالسی طراحی کرد که هم شامل طیف وسیعی از فرکانس‌ها باشد و هم از نظر عملی قابل پیاده‌سازی باشد. بهتر است انرژی این پالس در محدوده فرکانسی $150\text{ kHz} - 2$ به طور یکنواخت توزیع شده باشد.

۳- در این رساله فرض شده است که شبکه دارای دو مدل نویز الف: نویز هارمونیک منبع تغذیه شبکه و ب: خطای اندازه‌گیری است. برای ادامه کار می‌توان بررسی سایر نویزها مانند نویزهای با ماهیت ضربه‌ای را نیز در نظر گرفت.

۴- در این پژوهش فرض شده است که امیدانس شبکه تغییرناپذیر با زمان باشد. این فرض برای زمان‌های کوتاهی که برای تخمین امیدانس در نظر گرفته شده است، مناسب است. در صورتی که بخواهیم امیدانس شبکه را در یک بازه طولانی (مانند یک روز تمام) به صورت پیوسته با دوره تناوب تخمین زدن کوتاه (حدود ۱۰ میلی‌ثانیه) تخمین بزنیم، در این صورت حداقل لازم است تا هر ۱۰ میلی‌ثانیه یکبار به شبکه یک سیگنال تزریق شود. تعداد تزریق‌های زیاد می‌تواند به شبکه آسیب بزند یا آنکه کیفیت توان آن را کاهش دهد. به عنوان کار آینده می‌توان به دنبال روشی برای تعیین تغییرات در امیدانس شبکه بود. در این حالت هر لحظه که تغییراتی مؤثر در امیدانس شبکه رخ داد، می‌توان به کمک روش پیشنهادی در این مقاله امیدانس را تخمین زد.

۵- یکی از گام‌های روش پیشنهادی برای تخمین امیدانس شبکه حذف نویز است. کیفیت حذف نویز سیگنال‌ها وابسته به انتخاب درست پارامترها (تعداد سطوح تجزیه، موجک مادر و قاعده آستانه‌گذاری) است. از این‌رو فرایند حذف نویز می‌تواند با بهینه کردن این پارامترها بهبود پیدا کند.

۶- در این رساله، روشی به منظور تخمین امیدانس شبکه‌های تک فاز پیشنهاد شده است. در کارهای آینده می‌توان روشی به منظور تخمین امیدانس شبکه‌های سه فاز پیشنهاد نمود.

ضمیمه

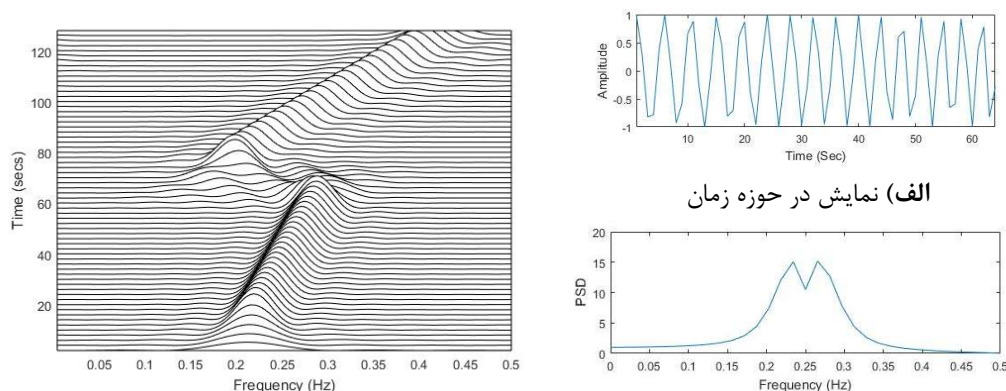
تحلیل و پردازش سیگنال در حوزه زمان-فرکانس

بازنمایی در حوزه زمان و بازنمایی در حوزه فرکانس، دو روش کلاسیک برای بازنمایی سیگنال می‌باشند. در هر یک از این دو روش، متغیرهای زمان و فرکانس به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند [۵۲، ۶۷]. در حوزه زمان، میانگینی از مقادیر بازنمایی در حوزه فرکانس (رابطه ۱)؛ و در حوزه فرکانس، میانگینی از مقادیر بازنمایی در حوزه زمان محاسبه می‌شود (رابطه ۲). به همین دلیل تغییرات فرکانس سیگنال در طول زمان در حوزه فرکانس مشهود نیست. در روش‌های زمان-فرکانس امکان بازنمایی و تحلیل سیگنال به طور همزمان در حوزه زمان و فرکانس وجود دارد.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (۱)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (۲)$$

در شکل ۱ یک سیگنال دو مؤلفه‌ای را در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس نشان می‌دهد. هر دو مؤلفه این سیگنال خطی بوده و به ترتیب دارای فرکانس‌های شروع ۰٫۲ و ۰٫۱۵ هرتز و فرکانس‌های پایان ۰٫۳ و ۰٫۳۵ هرتز می‌باشد. همانطور که در این شکل مشخص است، طیف چگالی توان تغییرات فرکانسی سیگنال را در طول زمان، و دو مؤلفه موجود در آن را نشان نمی‌دهد. توزیع‌های زمان-فرکانس به خوبی این دو مشکل حوزه فرکانس را مرتفع ساخته‌اند.



ج) نمایش در حوزه زمان-فرکانس

ب) نمایش در حوزه فرکانس

شکل ۱: یک سیگنال دو مؤلفه‌ای غیرایستا؛ در بازنمایی حوزه زمان-فرکانس به خوبی وجود دو مؤلفه مشخص است.

تحلیل زمان – فرکانس با نمایش همزمان فرکانس و زمان اطلاعات مفیدی را از رفتار سیگنال نمایش می‌دهد. [۶۸, ۶۹]. از اینرو، از تحلیل زمان-فرکانس سیگنال در موضوعات و مسائل مختلفی مانند تفکیک کور منابع^۱ [۷۰]، شناسایی تشنج از روی سیگنال‌های مغزی [۷۱, ۷۲] و حذف نویز [۷۳] استفاده می‌شود.

توزیع‌های زمان-فرکانس

روش‌های موجود برای تحلیل سیگنال‌ها در حوزه زمان-فرکانس را می‌توان در سه گروه فرکانس آنی، توزیع‌های خطی و درجه دوم تقسیم‌بندی نمود.

گروه اول، فرکانس آنی

چنانچه سیگنال غیرایستا تک مؤلفه‌ای باشد (تنها دارای یک مؤلفه فرکانسی باشد) و انرژی سیگنال بیشتر از نویز موجود در آن باشد، محاسبه فرکانس آنی روش خوبی برای تحلیل سیگنال خواهد بود. فرکانس آنی یک سیگنال تک مؤلفه‌ای به صورت مشتق فاز سیگنال تعریف می‌شود [۵۲]:

$$IF(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} Q(t) \quad (۳)$$

در رابطه فوق، $Q(t)$ فاز سیگنال در لحظه t است. این رابطه فقط برای سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای کارآمد است.

برای محاسبه فرکانس آنی سیگنال چند مؤلفه‌ای می‌توان سیگنال را به مؤلفه‌های سازنده آن تجزیه نمود و سپس از روش موجود برای محاسبه فرکانس آنی سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای استفاده نمود [۷۴]. این روش در مورد سیگنال‌های چند مؤلفه‌ای که مؤلفه‌ها با یکدیگر تداخل دارند، کارا نیست [۷۵].

^۱ Blind Source Separation(BSS)

به طور کلی، روش‌های تخمین فرکانس آنی سیگنال‌های چند مؤلفه‌ای به سه گروه تقسیم می‌شوند [۷۶].

[۷۷]. گروه اول، روش‌هایی هستند که از مشتق فاز سیگنال استفاده می‌کنند [۷۴]. این گروه از روش‌ها به وجود نویز حساس هستند. گروه دوم، روش‌هایی هستند که تعداد نقاط صفر سیگنال را محاسبه می‌کنند و فرکانس سیگنال را برابر نصف فرکانس نقاط صفر در نظر می‌گیرند [۷۷]. روش‌های گروه دوم، فقط برای سیگنال‌هایی مناسب هستند که بتوان آن‌ها را به صورت تکه‌ای ایستا تصور کرد. روش‌های گروه سوم، مبتنی بر توزیع‌های زمان-فرکانس هستند. روش‌های این گروه از توزیع‌هایی مانند توزیع ویگنر-وایل برای محاسبه فرکانس آنی استفاده می‌کنند. از آنجایی که این روش‌ها برای محاسبه فرکانس آنی سیگنال‌های غیر ایستای نویزی مناسب‌تر هستند، بیشتر مطالعات فرکانس آنی مربوط به این گروه می‌باشد [۷۵، ۷۶، ۷۸، ۷۹].

گروه دوم، توزیع‌های خطی

توزیع‌های زمان-فرکانس خطی، سیگنال را از حوزه زمان به صفحه دو بعدی زمان-فرکانس نگاشت می‌دهند. خطی بودن، یکی از ویژگی‌های مطلوب در سیستم‌هایی است که با سیگنال‌های چند مؤلفه‌ای کار می‌کنند. توزیع زمان فرکانس $TF_s(t, \omega)$ خطی است اگر و تنها اگر، توزیع زمان-فرکانس سیگنال $s(t)$ که از دو مؤلفه تشکیل شده است، برابر مجموع توزیع‌های زمان-فرکانس مؤلفه‌های سازنده آن باشد؛ به عبارت دیگر

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (۴)$$

$$TF_s(t, \omega) = TF_{s_1(t)}(t, \omega) + TF_{s_2(t)}(t, \omega) \quad (۵)$$

دو توزیع زمان-فرکانس خطی پرکاربرد، تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل گابور می‌باشد. توزیع‌های خطی در موارد زیادی مانند استخراج رفتار کلی سیگنال، تشخیص اثر انگشت و تفکیک کور منابع استفاده می‌شود [۵۲].

سیگنال $s(\tau)$ با پنجره حقیقی و زوج $w(\tau)$ را در نظر بگیرید. $s_w(t, \tau)$ طیف محلی سیگنال $s(\tau)$ در لحظه $(t = \tau)$ بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$s_w(t, \tau) = s(\tau)w(\tau - t) \quad (6)$$

تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال، همان تبدیل فوریه طیف محلی سیگنال است؛ به عبارت دیگر [۵۲]:

$$F_s^w(t, \omega) = \mathcal{F}_{\tau \rightarrow \omega}\{s(\tau)w(\tau - t)\} \quad (7)$$

که در آن $F_s^w(t, \omega)$ تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال $s(\tau)$ است. تبدیل گابور یک سیگنال همان تبدیل فوریه زمان کوتاه با یک پنجره گوسین است:

$$GT_s(t, \omega) = \int h(\tau - t)s(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (8)$$

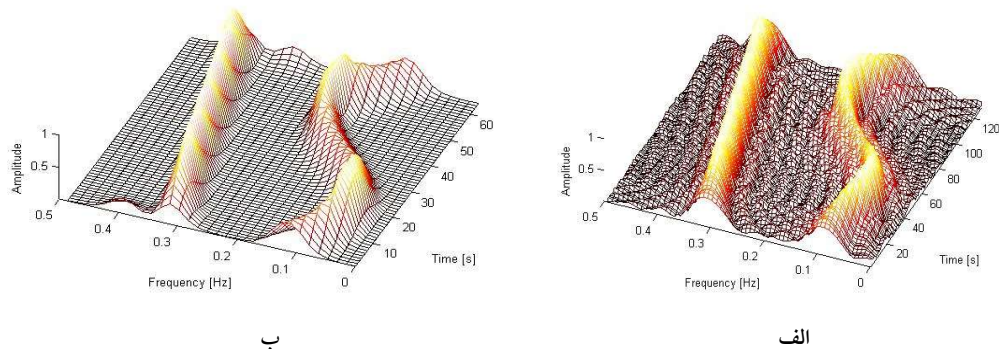
در رابطه فوق $GT_s(t, \omega)$ تبدیل گابور سیگنال $s(t)$ با پنجره گوسین $h(\tau)$ است. صفحه زمان-فرکانس حاصل از تبدیل گابور ساختار کلی مؤلفه‌های سیگنال را در صفحه زمان-فرکانس مشخص می‌کند. اگر سیگنال $s(t)$ از N مؤلفه s_i تشکیل شده باشد، آنگاه تبدیل گابور کل سیگنال برابر مجموع تبدیل گابور مؤلفه‌های سیگنال است:

$$GT_s(t, \omega) = \sum_{i=1}^N GT_{s_i}(t, \omega) \quad (9)$$

شکل ۲ دو توزیع زمان-فرکانس خطی گابور و STFT با پنجره مستطیلی را از یک سیگنال دو مؤلفه‌ای نشان می‌دهد. شکل ۲ نقش پنجره را در توزیع STFT نشان می‌دهد. شایان ذکر است توزیع گابور همان توزیع STFT با پنجره گوسین است. پنجره مستطیلی باعث ایجاد اعوجاج در صفحه زمان-فرکانس می‌شود.

رزولوشن فرکانسی و زمانی در تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل گابور رابطه عکس دارند؛ به عبارت دیگر هر چه رزولوشن فرکانسی توزیع افزایش یابد، رزولوشن زمانی آن کاهش می‌یابد و برعکس. بر اساس

اصل عدم قطعیت، رسیدن به رزولوشن فرکانسی و زمانی کامل در تبدیل فوریه زمان کوتاه امکان پذیر نیست. به طور کلی توزیع های زمان-فرکانس خطی نمی توانند همزمان رزولوشن فرکانسی و زمانی بالایی داشته باشند. توزیع های درجه دوم، توزیع هایی با رزولوشن فرکانسی و زمانی بالا هستند.



شکل ۲: دو نوع توزیع زمان-فرکانس خطی از یک سیگنال دو مؤلفه ای؛ الف: توزیع *STFT* با پنجره

مستطیلی، ب: توزیع گابور

گروه سوم، توزیع های درجه دوم

توزیع های درجه دوم، توزیع هایی هستند که یک سیگنال را از حوزه زمان به صفحه چگالی انرژی نگاشت می دهند. اگرچه روش های درجه دوم خطی نیستند ولی همزمان رزولوشن فرکانسی و زمانی بالایی دارند. از آنجایی که توزیع های زمان-فرکانس درجه دوم، صفحه چگالی انرژی سیگنال را تولید می کنند، سه ویژگی زیر برای آن ها مطلوب است: (۱) مجموع تمام صفحه زمان-فرکانس سیگنال برابر با انرژی سیگنال باشد (رابطه ۱۰؛ ۲) انتگرال در راستای فرکانس از صفحه زمان-فرکانس سیگنال برابر توان سیگنال باشد (رابطه ۱۱؛ ۳) انتگرال در راستای زمان در صفحه زمان-فرکانس سیگنال برابر چگالی انرژی طیف سیگنال باشد (رابطه ۱۲) [۵۲، ۸۰]. شایان ذکر است که ویژگی های دوم و سوم (که به

عنوان ویژگی‌های حاشیه‌ای^۱ مطرح می‌شوند) حاوی اطلاعاتی در مورد انرژی سیگنال در نقطه (t, ω) نیستند [۸۰].

$$E = \iint WD(t, \omega) dt d\omega \quad (۱۰)$$

$$|s(t)|^2 = \int TF_{s(t)}(t, \omega) d\omega \quad (۱۱)$$

$$|s(\omega)|^2 = \int TF_{s(t)}(t, \omega) dt \quad (۱۲)$$

^۱ Marginal Property

1. Cuffe, P. and Milano, F., "Validating two novel equivalent impedance estimators", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 1, (2018), 1151-1152.
2. Wiszniewski, A., "New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, (2007), 1367-1371.
3. *Appliance design, "smart appliances to reach \$26.1b globally by 2019"*, 2011, <https://www.Appliancedesign.Com/articles/92500-smart-appliances-to-reach-26-1b-globally-by-2019>. [Last visited August 2018]].
4. Davari, P., Zare, F. and Blaabjerg, F., "Pulse pattern-modulated strategy for harmonic current components reduction in three-phase ac–dc converters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 4, (2016), 3182-3192.
5. Frey, D., Schanen, J. and Dia, I., "Harmonics propagation in industrial networks in the range of 2 to 150kHz", in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Eighth Annual*, IEEE, (2013), 2649-2654.
6. Davari, P., Blaabjerg, F., Hoene, E. and Zare, F., "Improving 9-150 kHz EMI performance of single-phase pfc rectifier", in *10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, VDE, (2018).
7. Zare, F., Soltani, H., Kumar, D., Davari, P., Delpino, H.A.M. and Blaabjerg, F., "Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks", *IEEE Access*, Vol. 5, No., (2017), 2819-2833.
8. Rönnerberg, S.K., Bollen, M.H.J., Amaris, H., Chang, G.W., Gu, I.Y.H., Kocewiak, Ł.H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P.F. and Desmet, J., "On waveform distortion in the frequency range of 2kHz–150kHz—review and research challenges", *Electric Power Systems Research*, Vol. 150, (2017), 1-10.
9. Schöttke, S., Rademacher, S., Meyer, J. and Schegner, P., "Transfer characteristic of a mv/lv transformer in the frequency range between 2 kHz and 150 kHz", in *Electromagnetic Compatibility (EMC), International Symposium on*, IEEE, (2015), 114-119.
10. Heirman, D., "Emc standards activity", *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Vol. 3, No. 2, (2014), 100-103.
11. Commission, I.E., *Tc 77 - electromagnetic compatibility*. (2017).
12. Langkowski, H., Do Thanh, T., Dettmann, K.-D. and Schulz, D., "Grid impedance determination—relevancy for grid integration of renewable energy systems", in *Industrial Electronics, 35th Annual Conference of*, IEEE, (2009), 516-521.
13. Ciobotaru, M., Teodorescu, R. and Blaabjerg, F., "On-line grid impedance estimation based on harmonic injection for grid-connected pv inverter", in *International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, (2007), 2437-2442.
14. Cespedes, M. and Sun, J., "Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 2, (2014), 516-523.
15. Tarkianen, A., Pollanen, R., Niemela, M. and Pyrhonen, J., "Identification of grid impedance for purposes of voltage feedback active filtering", *IEEE Power Electronics Letters*, Vol. 2, No. 1, (2004), 6-10.

16. Asiminoaei, L., Teodorescu, R., Blaabjerg, F. and Borup, U., "A digital controlled pv-inverter with grid impedance estimation for ens detection", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, Vol. 20, No. 6, (2005), 1480-1490.
17. Ciobotaru, M., Agelidis, V.G., Teodorescu, R. and Blaabjerg, F., "Accurate and less-disturbing active antiislanding method based on pll for grid-connected converters", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, Vol. 25, No. 6, (2010), 1576-1584.
18. Han, S., Kodaira, D., Han, S. and Baek, J., "Practical impedance estimation in low-voltage distribution network", ***IFAC-PapersOnLine***, Vol. 48, No. 30, (2015), 312-315.
19. Monteiro, H.L.M., de Oliveira, M.M., Aleixo, R.R., Duque, C.A. and Ribeiro, P.F., "A real time implementation of an harmonic impedance estimator", in ***Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on***, IEEE, (2016), 333-337.
20. Zadehbagheri, M., Ildarabadi, R. and Bnejad, M., "A novel method for modeling and simulation of asymmetrical impedance-source converters", ***International Journal of Engineering (IJE), Transaction B: Applications***, Vol. 31, No. 5, (2018), 596-605.
21. Sudiarto, B., Widyanto, A.N. and Hirsch, H., "Voltage and current distortion correlation characteristics of compact fluorescent lamp in frequency range of 2–150 kHz", in ***QiR (Quality in Research), 2013 International Conference on***, IEEE, (2013), 171-174.
22. M, C. and Sun, J., "Online grid impedance identification for adaptive control of grid-connected inverters", in ***2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)***, (2012), 914-921.
23. Familant, Y., Corzine, K.A., Huang, J. and Belkhat, M., "Ac impedance measurement techniques", in ***Electric Machines and Drives, International Conference on***, IEEE, (2005), 1850-1857.
24. Czarnecki, L.S. and Staroszczyk, Z., "Dynamic on-line measurement of equivalent parameters of three-phase systems for harmonic frequencies", ***European Transactions on Electrical Power***, Vol. 6, No. 5, (1996), 329-336.
25. Roinila, T., Vilkkio, M. and Sun, J., "Online grid impedance measurement using discrete-interval binary sequence injection", ***IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics***, Vol. 2, No. 4, (2014), 985-993.
26. Shen, Z., Jaksic, M., Mattavelli, P., Boroyevich, D., Verhulst, J. and Belkhat, M., "Three-phase ac system impedance measurement unit using chirp signal injection", in ***Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Eighth Annual IEEE***, (2013), 2666-2673.
27. Ciobotaru, M., Agelidis, V. and Teodorescu, R., "Line impedance estimation using model based identification technique", in ***Power Electronics and Applications, Proceedings of the 14th European Conference on***, (2011), 1-9.
28. Ghanem, A., Rashed, M., Sumner, M., Elsayes, M.A. and Mansy, I.I., "Grid impedance estimation for islanding detection and adaptive control of converters", ***IET Power Electronics***, Vol. 10, No. 11, (2017), 1279-1288.
29. AlyanNezhadi, M.M., Zare, F. and Hassanpour, H., "Passive grid impedance estimation using several short-term low power signal injections", in ***2nd conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS), International Conference of***, IEEE, (2016 of Conference), 1-5.

30. Newland, D.E., *"An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis"*, Courier Corporation, (2012).
31. م. علیان‌نژادی، ح. حسن‌پور، "تحلیل و پردازش سیگنال به کمک روشهای زمان فرکانس"، مجله علوم رایانشی، جلد ۲، شماره ۱، (۱۳۹۵)، ۷۲-۸۹.
32. Anis, A., Gadde, A. and Ortega, A., "Towards a sampling theorem for signals on arbitrary graphs", in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, (2014), 3864-3868.
33. AlyanNezhadi, M.M., Hassanpour, H. and Zare, F., "Grid impedance estimation using low power signal injection in noisy measurement condition based on wavelet denoising", in *Intelligent Systems and Signal Processing, 3rd Iranian Conference on*, IEEE, (2017), 81-86.
34. AlyanNezhadi, M.M., Zare, F. and Hassanpour, H., "Grid impedance estimation using several short-term low power signal injections", *AUT Journal of Electrical Engineering*, (2017), (In press).
35. Ye, J., Zhang, Z., Shen, A., Xu, J. and Wu, F., "Kalman filter based grid impedance estimating for harmonic order scheduling method of active power filter with output lcl filter", in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), International Symposium on*, IEEE, (2016), 359-364.
36. Herong, G., Guo, X., Deyu, W. and Wu, W., "Real-time grid impedance estimation technique for grid-connected power converters", in *Industrial Electronics (ISIE), International Symposium on*, IEEE, (2012), 1621-1626.
37. Eidson, B.L., Geiger, D.L. and Halpin, M., "Equivalent power system impedance estimation using voltage and current measurements", in *Power Systems Conference (PSC), Clemson University*, IEEE, (2014), 1-6.
38. Cobreces, S., Bueno, E.J., Pizarro, D., Rodriguez, F.J. and Huerta, F., "Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 9, (2009), 3112-3121.
39. Modarresi, J., Gholipour, E. and Khodabakhshian, A., "A comprehensive review of the voltage stability indices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, No., (2016), 1-12.
40. Cortes, J.A., Diez, L., Canete, F.J. and Sanchez-Martinez, J.J., "Analysis of the indoor broadband power-line noise scenario", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52, No. 4, (2010), 849-858.
41. Alessandro, S.D., Piante, M.D. and Tonello, A.M., "On modeling the sporadic impulsive noise rate within in-home power line networks", in *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, (2015), 154-159.
42. Cano, C., Pittolo, A., Malone, D., Lampe, L., Tonello, A.M. and Dabak, A.G., "State of the art in power line communications: From the applications to the medium", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 7, (2016), 1935-1952.
43. Hashmat, R., Pagani, P., Zeddami, A. and Chonavel, T., "Mimo communications for inhome plc networks: Measurements and results up to 100 mhz", in *ISPLC2010*, (2010), 120-124.
44. Esmailian, T., Kschischang, F.R. and Glenn Gulak, P., "In-building power lines as high-speed communication channels: Channel characterization and a test

- channel ensemble", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 16, No. 5, (2003), 381-400.
45. Roinila, T., Vilkkio, M. and Sun, J., "Broadband methods for online grid impedance measurement", in *Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, (2013), 3003-3010.
 46. Barkley, A. and Santi, E., "Improved online identification of a dc-dc converter and its control loop gain using cross-correlation methods", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 8, (2009), 2021-2031.
 47. Staroszczyk, Z., "A method for real-time, wide-band identification of the source impedance in power systems", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 1, (2005), 377-385.
 48. Neshvad, S., Chatzinotas, S. and Sachau, J., "Wideband identification of power network parameters using pseudo-random binary sequences on power inverters", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 5, (2015), 2293-2301.
 49. Davari, P., Ghasemi, N., Zare, F., O'shea, P. and Ghosh, A., "Improving the efficiency of high power piezoelectric transducers for industrial applications", *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 6, No. 4, (2012), 213-221.
 50. Messo, T., Luhtala, R., Roinila, T., Yang, D., Wang, X. and Blaabjerg, F., "Real-time impedance-based stability assessment of grid converter interactions", in *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 18th Workshop on*, IEEE, (2017), 1-8.
 51. Roinila, T. and Messo, T., "Online grid-impedance measurement using ternary-sequence injection", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol., No., (2018).
 52. Boashash, B., *"Time-frequency signal analysis and processing: A comprehensive reference"*: Academic Press, (2015).
 53. Han, S., Kodaira, D., Han, S., Kwon, B., Hasegawa, Y. and Aki, H., "An automated impedance estimation method in low-voltage distribution network for coordinated voltage regulation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, (2016), 1012-1020.
 54. Fridholm, B., Wik, T. and Nilsson, M., "Robust recursive impedance estimation for automotive lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 304, No., (2016), 33-41.
 55. Sumner, M., Thomas, D., Abusorrah, A. and Zanchetta, P., "Power system impedance estimation for improved active filter control, using continuous wavelet transforms", in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission Distribution Conf. Exhibit*, (2006), 653-658.
 56. Reeves, C.R., Genetic algorithms, in *Handbook of metaheuristics*. 2010, Springer.109-139.
 57. Li, T., Shao, G., Zuo, W. and Huang, S., "Genetic algorithm for building optimization: State-of-the-art survey", in *Proceedings of the 9th International Conference on Machine Learning and Computing*, ACM, (2017), 205-210.
 58. Genlin, J., "Survey on genetic algorithm", *Computer Applications and Software*, Vol. 2, No. 1, (2004), 69-73.
 59. Khoshnood, A., Khaksari, H., Roshanian, J. and Hasani, S., "Active noise cancellation using online wavelet based control system: Numerical and experimental study", *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, Vol. 30, No. 1, (2017), 120.

60. Srivastava, M., Anderson, C.L. and Freed, J.H., "A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds", *IEEE Access*, Vol. 4, No., (2016), 3862-3877.
61. Ghoujehbaklou, H. and DanaeiI, B., "A new algorithm for optimum voltage and reactive power control for minimizing transmission lines losses", *International Journal of Engineering*, Vol. 14, No. 2, (2001), 91-98.
62. Allehyani, A.K. and Beshir, M.J., "Overhead and underground distribution systems impact on electric vehicles charging", *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 4, No. 2, (2016).
63. Stankovic, L., Dakovic, M. and Thayaparan, T., "*Time-frequency signal analysis with applications*", Artech house, (2014).
64. Tan, L., "*Fundamentals of analog and digital signal processing*", AuthorHouse, (2008).
65. Roberts, M.J., "*Signals and systems: Analysis using transform methods & matlab*", McGraw-Hill Education, (2017).
66. Ziyae, T., "Unsupervised denoising via wiener entropy masking in the stft domain", in *Military Communications Conference (MILCOM)*, IEEE, (2014), 467-472.
67. Gröchenig, K., "*Foundations of time-frequency analysis*", Springer Science & Business Media, (2013).
68. Boashash, B., Khan, N.A. and Ben-Jabeur, T., "Time–frequency features for pattern recognition using high-resolution tfds: A tutorial review", *Digital Signal Processing*, Vol. 40, No., (2015), 1-30.
69. Abed, M., Belouchrani, A., Cheriet, M. and Boashash, B., "Time-frequency distributions based on compact support kernels: Properties and performance evaluation", *Signal Processing, IEEE Transactions on*, Vol. 60, No. 6, (2012), 2814-2827.
70. Shengli, X., Liu, Y., Jun-Mei, Y., Guoxu, Z. and Yong, X., "Time-frequency approach to underdetermined blind source separation", *Neural Networks and Learning Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 23, No. 2, (2012), 306-316.
71. Hassanpour, H., Mesbah, M. and Boashash, B., "Time–frequency based newborn eeg seizure detection using low and high frequency signatures", *Physiological Measurement*, Vol. 25, No. 4, (2004), 935.
72. Hassanpour, H., Mesbah, M. and Boashash, B., "Time-frequency feature extraction of newborn eeg seizure using svd-based techniques", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2004, No., (2004), 2544-2554.
73. Hassanpour, H., "A time–frequency approach for noise reduction", *Digital Signal Processing*, Vol. 18, No. 5, (2008), 728-738.
74. Zhou, Y., Li, S., Luo, P. and Zhou, Q., "Instantaneous frequency measurement based on emd and tvar", in *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on*, (2011), 303-306.
75. Khan, N.A. and Boashash, B., "Instantaneous frequency estimation of multicomponent nonstationary signals using multiview time-frequency distributions based on the adaptive fractional spectrogram", *Signal Processing Letters, IEEE*, Vol. 20, No. 2, (2013), 157-160.
76. Haijian, Z., Guoan, B., Wen, Y., Razul, S.G. and See, C.M.S., "If estimation of fm signals based on time-frequency image", *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 51, No. 1, (2015), 326-343.

77. Boashash, B., "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. Ii. Algorithms and applications", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, No. 4, (1992), 540-568.
78. Peng-Lang, S., Zheng, B. and Hong-Tao, S., "Nonparametric detection of fm signals using time-frequency ridge energy", *Signal Processing, IEEE Transactions on*, Vol. 56, No. 5, (2008), 1749-1760.
79. Lerga, J., Sucic, V. and Boashash, B., "An efficient algorithm for instantaneous frequency estimation of nonstationary multicomponent signals in low snr", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2011, No. 1, (2011), 725189.
80. Stankovic, L., Daković, M. and Thayaparan, T., *"Time-frequency signal analysis with applications"*: Artech House, (2013).

Abstract:

Grid impedance estimation is useful in many power system applications such as power quality analysis of smart grids and grid security against natural disasters such as thunderbolt. In this thesis, the impedance of the grid in frequency range of 2-150 kHz based on signal processing methods and signal injection is estimated.

In grid impedance estimation based on signal injection, for impedance estimation at frequency f , the voltage or current signal must have a component at this frequency. In addition, in noisy conditions, the accuracy of impedance estimation is directly dependent on energy of injected signal. In this thesis, the grid impedance estimation in a wide frequency range is done using rectangular injection pulse that it has a wide frequency band. Energy of rectangular injection pulse is dependent on two parameters, maximum peak amplitude and pulse width. Increasing the pulse width leads to increasing the energy of injection signal. However, it reduces the bandwidth of the pulse and therefore estimation cannot be done accurately in the frequencies with low energy. Although increasing the maximum peak amplitude of the rectangular injection pulse leads to increasing the accuracy of impedance estimation, but it reduces the grid power quality. In addition, the accuracy of impedance estimation can be increased using denoising the measured voltage and current signals instead of increasing the energy of injection signal. In this thesis, the stationary wavelet denoising algorithm is employed for denoising of measured signals.

The bandwidth and pulse width of a rectangular injection pulse have inversely relation. In addition, each pulse is unable to impedance estimation in some frequencies. Therefore, in this thesis, a method for selecting several short-term injection signals in frequency range of 2-150 kHz is proposed.

When the measurement duration is low, the whole transient state of the grid is not considered; hence the impedance estimation is not accurate. In addition, when the measurement duration is high, the effect of noise is increased, hence the estimation may not be correct. In this thesis, a method for determining the suitable measurement duration based on time-frequency representation of impedance is proposed.

In this thesis, a comprehensive method for impedance estimation using injection of several short term signals and denoising of measured signals and determining the suitable measurement duration is proposed. The proposed method is applied on several grids and the simulation results show the ability of the proposed method. Our researches show that, there is no method in the literature review in frequency range 2-150 kHz for result comparison. Finally for validation of the proposed method, the idea of the proposed method is tested on a real grid.

Keywords: Signal processing, Impedance estimation, Frequency response, Time-frequency distribution.



Shahrood University of Technology

Kharazmi International Campus

PhD Dissertation in Artificial Intelligence Engineering

**grid impedance estimation of low voltage grids using signal
processing techniques**

Mohammad M. AlyanNezhadi

Supervisor:

Prof. Hamid Hassanpour

Advisor:

Prof. Firuz Zare

September 2018