

تدوین رویه انتخاب نقاط نمونه مناسب جهت ارزیابی کیفیت توان در شبکه‌های انتقال و فوق توزیع و محاسبه شاخص‌های سیستمی

مرجان شفیعی راد، هادی خطیب‌زاده آزاد، نیکی مسلمی، داود جلالی

گروه مطالعات سیستم

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

djalali@nri.ac.ir و nmoslemi@nri.ac.ir .hkhatibzadeh@nri.ac.ir .marjan_shafiee@ee.sharif.edu

افزایش داده‌اند. همین عوامل باعث گردیده‌اند تا دو امر مهم پایش و تلاش در راستای بهبود دائمی کیفیت برق، از الزامات اساسی در شبکه‌های قدرت از جمله شبکه‌های انتقال و فوق توزیع باشند.

به منظور ارزیابی کیفیت توان یک شبکه باید نقاط و بخش‌های مختلف شبکه را پایش نمود. انجام این کار مستلزم اندازه‌گیری کیفیت توان در نقاط مختلف شبکه می‌باشد. ولی از آنجا که انجام این اندازه‌گیری در کلیه نقاط شبکه بدلیل وسعت و گستردگی و هزینه بالای آن غیرعملی می‌باشد، از روش‌های آماری جهت انتخاب جامعه نمونه و انجام اندازه‌گیری در نقاط آن جامعه و سپس تعمیم این نتایج به کل شبکه، استفاده می‌گردد. تاکنون نیز کارهایی در این زمینه انجام شده است، از جمله تخمین شاخص سیستمی THD برای شبکه توزیع بوسیله اندازه‌گیری‌های محدود انجام شده در

مراجع [۱-۴]، هم‌چنین تدوین رویه انتخاب نقاط نمونه مناسب برای ارزیابی کیفیت توان در شبکه توزیع برق تهران [۵]. مراجع [۱-۲]

شاخص‌های هارمونیکی را با استفاده از روش‌های احتمالاتی برای شبکه توزیع بدست آورده‌اند. مرجع [۶] یک روش جدید بر مبنای الگوریتم ژنتیک جهت جایابی بهینه دستگاه‌ها به منظور به دست آوردن شاخص‌های سیستمی ارائه کرده است. مرجع [۷] نیز تاثیر خطوط انتقال ترکیبی (خطوط هوایی و کابل) را بر شاخص‌های سیستمی آن بررسی کرده است. شاخص سیستمی سقوط ولتاژ نیز بوسیله روش‌های احتمالاتی در مرجع [۸] محاسبه شده‌اند.

در این مقاله، روش مناسب انتخاب نقاط نمونه برای ارزیابی کیفیت توان شبکه‌های انتقال و فوق توزیع برق پیشنهاد گردیده است. در این روش

چکیده — تلاش در جهت بهبود کیفیت برق، نیازمند ارزیابی میزان آن در شبکه می‌باشد. از طرفی با توجه به هزینه نسبتاً بالای اندازه‌گیری، امکان اندازه‌گیری در تمام شینه‌های شبکه وجود ندارد و نیاز به انجام اندازه‌گیری به تعداد محدود و در نقاط مناسب می‌باشد. در این مقاله روش انتخاب نقاط نمونه مناسب جهت اندازه‌گیری شاخص‌های کیفیت توان ارائه گردیده و همچنین روابط شاخص‌های سیستمی برای تمام شبکه انتقال و فوق توزیع مورد مطالعه، بررسی و شرح داده شده‌اند. این روش برای اولین بار در سطح شبکه‌های انتقال توسعه یافته است.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های سیستمی، شبکه انتقال و فوق توزیع،

کیفیت توان، نقاط نمونه اندازه‌گیری

۱. مقدمه

امروزه کیفیت برق یکی از مباحث مهم و اساسی در صنعت برق اکثر کشورهای جهان می‌باشد. زیرا از یک طرف، گسترش روزافزون مصرف‌کنندگان مولد اغتشاش از قبیل عناصر الکترونیک قدرت، انواع بارهای غیرخطی، کوره‌های قوس الکتریکی و ... باعث گردیده تا میزان انتشار آلودگی الکتریکی در شبکه‌های برق افزایش یافته و از طرف دیگر، افزایش سریع مصرف‌کنندگان حساس به اغتشاش از قبیل کامپیوترها، دستگاه‌های حساس الکترونیکی، سیستم‌های حساس کنترلی همچون PLCها و ... نیاز به ارزیابی و کنترل آلودگی در این شبکه‌ها را شدیداً

بیشتر از شینه می‌باشد و بنابراین در شینه‌هایی با ظرفیت مختلف کیفیت تون می‌تواند متفاوت باشد. پست‌هایی با ضریب بارگذاری متفاوت، می‌توانند سطح کیفیت تون متفاوتی داشته و در نتیجه این فاکتور نیز باید در طبقه‌بندی شینه‌ها مورد توجه قرار گیرد. نوع سیم‌بندی ترانسفورماتورهای یک شینه نیز بر میزان THD تاثیر دارد، به عنوان مثال اتصال مثلث هارمونیک مرتبه سوم را حذف می‌کند و انتقال نمی‌دهد و این به معنای THD جریان کمتر و به دنبال آن THD ولتاژ کمتر است.

با توجه به این نکته که تعداد حالات طبقه‌بندی با در نظر گرفتن تمامی معیارهای ذکر شده در جدول ۱ بسیار زیاد شده و ممکن است از کل تعداد شینه‌های شبکه‌ی مورد مطالعه بیشتر شود، با توجه به دو عامل دسترس‌پذیری اطلاعات مربوط به هر یک از پارامترهای موثر و همچنین تاثیرگذاری بیشتر و موثرتر آن‌ها بر شاخص‌های کیفیت تون شبکه، پارامترهای مهم و نحوه دسته‌بندی آن‌ها به شرح جدول ۲ انتخاب شده و پیشنهاد می‌گردند. مقادیر x و y معمولاً به صورت میانگین تعداد خطوط خروجی از شینه و میانگین سطح اتصال کوتاه شینه‌های شبکه مورد مطالعه انتخاب می‌گردند.

جدول ۱: پارامترهای شبکه انتقال و فوق‌توزیع موثر بر کیفیت تون

۱ - نوع شینه (انتقال یا فوق‌توزیع)
۲ - اتصال بار اختصاصی یا SVC به شینه
۳ - تعداد خط‌های خروجی از شینه
۴ - سطح اتصال کوتاه شینه
۵ - ظرفیت پست
۶ - ضریب بارگذاری ترانسفورماتورهای پست
۷ - نوع سیم‌بندی ترانسفورماتورهای موجود در هر پست

جدول ۲: معیارهای طبقه‌بندی شینه‌های انتقال و فوق‌توزیع

نوع شینه	
حالت ۱	انتقال
حالت ۲	فوق‌توزیع
تعداد خطوط خروجی از آن شینه	
حالت ۱	$\leq x$
حالت ۲	$> x$
سطح اتصال کوتاه شینه	
حالت ۱	$\leq y KA$
حالت ۲	$> y KA$
ضریب بارگذاری ترانسفورماتورهای موجود در پست	
حالت ۱	بیش از ۵۰٪ مواقع زیر ۷۰٪ بار نامی باشد
حالت ۲	بیش از ۵۰٪ مواقع بالای ۷۰٪ بار نامی باشد

با انتخاب معیارهای اساسی، نقاط مختلف شبکه طبقه‌بندی می‌شوند و سپس با انتخاب نمونه‌هایی از هر یک از طبقات، جامعه نمونه آماری تشکیل می‌شود. این جامعه آماری به نحوی انتخاب می‌گردد تا رفتار آن از نظر شاخص‌های کیفیت تون موید رفتار کل جامعه باشد. از آنجا که نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها می‌بایست مبنای عمل جهت ارزیابی کیفیت تون شبکه‌های انتقال و فوق‌توزیع قرار داده شوند، روش تعمیم شاخص‌های مرتبط با کیفیت تون نقاط نمونه به کل شبکه نیز در این مقاله ارائه گردیده است.

۲. عوامل و پارامترهای تاثیرگذار شبکه‌های انتقال

و فوق‌توزیع بر شاخص‌های کیفیت تون

در این مقاله هدف محاسبه سه شاخص سیستمی هارمونیک، فلیکر و نامتعادلی ولتاژ برای ارزیابی کیفیت تون شبکه‌های انتقال و فوق‌توزیع می‌باشد. بدین منظور لازم است که در ابتدا کلیه عوامل و پارامترهای مربوط به شبکه‌های انتقال و فوق‌توزیع که بر این شاخص‌های کیفیت تون تاثیرگذار می‌باشند، شناسایی شده و سپس با توجه به اطلاعات در دسترس در شبکه‌های قدرت، پارامترهای مناسب انتخاب شوند. در این راستا، پارامترهایی از شبکه‌های انتقال و فوق‌توزیع که بر شاخص‌های کیفیت تون تاثیرگذار می‌باشند، در جدول ۱ آورده شده‌اند.

وجود بارهای اختصاصی در یک پست (مانند کارخانه‌های صنعتی، مجتمع‌های فولاد، صنایع ذوب‌آهن، مجتمع‌های پتروشیمی، SVC و ...) می‌تواند کیفیت برق کل شبکه را از نظر تولید جریان با میزان هارمونیک بیشتر و یا ایجاد فلیکر بر اثر سویچ کردن این بارها و همچنین ایجاد نامتعادلی ولتاژ، بیشتر تحت تاثیر قرار دهد و در نتیجه کیفیت تون در این شینه‌ها متفاوت با شینه‌هایی است که بار اختصاصی ندارند، بنابراین به دلیل اهمیت این بارها بایستی در تمامی این شینه‌های اختصاصی، اندازه‌گیری انجام شود. همچنین هر چه تعداد خطوط خروجی از یک شینه بیشتر باشد، معمولاً آن شینه دارای ظرفیت پست بالاتری بوده و نیز با سطح وسیع‌تری از شبکه ارتباط دارد و بنابراین شاخص‌های کیفیت تون در این شینه‌ها می‌تواند متفاوت با شاخص‌های کیفیت تون در شینه‌هایی با تعداد خطوط خروجی کمتر باشد. هر چه سطح اتصال کوتاه (SCR) در یک شینه بیشتر باشد، امپدانس اتصال کوتاه کمتر و در نتیجه تاثیر هارمونیک‌های جریان بر ولتاژ آن شینه کمتر شده و کیفیت تون بهتر خواهد بود. بالا بودن ظرفیت پست به معنای تامین بار بیشتر (ظرفیت بالاتر) در آن پست و تعداد خطوط خروجی

شبکه که در طرح ارزیابی کیفیت توان شرکت دارند به انضمام اطلاعات مورد نیاز برای طبقه‌بندی شینه‌ها، مشخص می‌گردند. به منظور طبقه‌بندی این شینه‌ها، پارامترها و یا معیارهایی که انتخاب می‌گردند، بایستی طوری باشند که مهم‌ترین عوامل دخیل در میزان کیفیت توان باشند، مستقل از هم بوده و اطلاعات مربوط به آنها در دسترس باشد. این پارامترها و یا معیارهای دسته‌بندی برای شینه‌ها به همراه سطوح دسته‌بندی برای هر معیار در جداول ۱ و ۲ داده شده‌اند.

در هنگام طبقه‌بندی باید دقت گردد تا تعداد حالات ممکن در طبقه‌بندی شینه‌های فوق توزیع و انتقال به مراتب کوچک‌تر از تعداد کل شینه‌ها باشد. در صورت بروز چنین حالتی می‌بایست اقدام به کاهش تعداد حالات طبقه‌بندی نمود. این کاهش تعداد حالات در راستایی صورت می‌پذیرد که پارامترهای مهم‌تر و تاثیرگذارتر در کیفیت توان حفظ شده و البته همه نقاط اندازه‌گیری در تعداد کم دسته‌ها قرار نگیرند.

تعداد دسته‌ها برابر با تعداد حالات کدهای مختلف طبقه‌بندی (تعداد طبقات) است. به عنوان مثال در این روش، حداکثر تعداد حالات ممکن برای طبقه‌بندی برابر با ۱۶ (حالت $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$) می‌باشد. البته لزوماً کلیه این ۱۶ حالت در بردارنده شینه‌های شبکه نبوده و در نهایت حالت‌هایی که فاقد شینه هستند، از دسته‌بندی‌ها حذف خواهند شد.

در ادامه، نمونه‌گیری از هر طبقه آن هم به صورت تصادفی صورت می‌پذیرد. در این بررسی تعداد نمونه‌های هر دسته تابعی مستقیم از تعداد اعضای آن دسته بوده و طبق (۱) محاسبه می‌گردد.

$$M_s = 0.5 \left(\frac{n}{L} + \frac{n^* N_s}{N} \right) \quad (1)$$

M_s : تعداد شینه (نمونه) منتخب از دسته sام

L : تعداد دسته‌ها (طبقات)

n : تعداد کل نمونه‌گیری‌ها که معمولاً حدود ۱/۵ الی ۲ برابر تعداد طبقات (L) در نظر گرفته می‌شود.

N_s : تعداد شینه‌های موجود در دسته sام

N : تعداد کل شینه‌های شبکه مورد مطالعه

در محاسبه تعداد نمونه‌های هر دسته اگر M_s عدد اعشاری بزرگتر از

واحد شود، برای حفظ دقت به عدد صحیح بالاتر از خود تقریب زده می‌شود. بنابراین از هر دسته که دارای حداقل یک نمونه باشد، حداقل یک شینه منتخب برای اندازه‌گیری انتخاب می‌شود.

شاخص ظرفیت پست به دلیل وابستگی آن به تعداد خطوط خروجی از شینه حذف گردیده است. از آنجا که در تمام شینه‌های متصل به بار اختصاصی، اندازه‌گیری انجام می‌شود، این شاخص نیز از معیارها کنار گذاشته می‌شود و طبقه‌بندی بر روی سایر شینه‌های شبکه مورد مطالعه انجام می‌شود. مبنای معیار ضریب بارگذاری، مدت زمانی است که این ترانسفورماتورها بالاتر یا پایین‌تر از ۷۰٪ بار نامی آن کار می‌کنند. رنج حالت‌بندی معیارها نیز با توجه به مشخصات واقعی شبکه انتقال و فوق توزیع ایران و متناسب با شبکه مورد مطالعه انتخاب می‌شود. از معیار نوع سیم‌بندی به دلیل تنوع کم آن در کل شبکه انتقال و فوق توزیع ایران و هم‌چنین تاثیر کمتر آن بر کیفیت توان شبکه صرف نظر می‌شود.

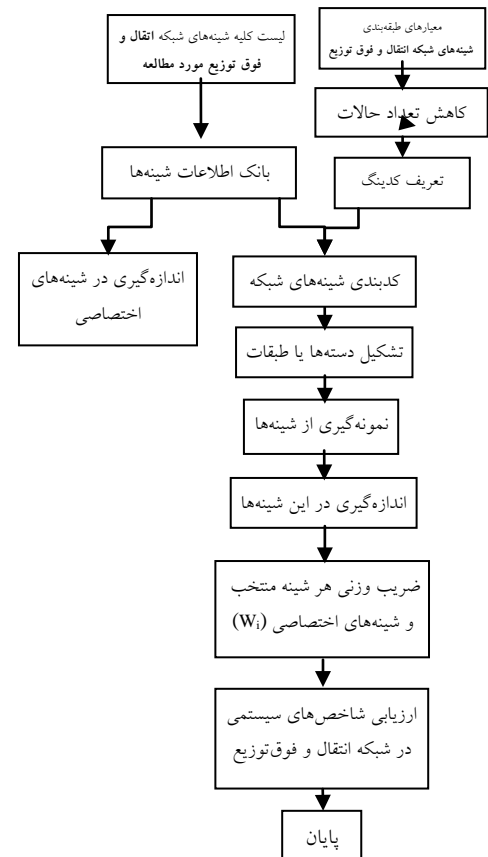
۳. الگوریتم تعیین نقاط نمونه جهت ارزیابی کیفیت توان در شبکه‌های انتقال و فوق توزیع

روش کلی برای انتخاب جامعه نمونه آماری بر اساس تشکیل طبقات یا دسته‌ها استوار می‌باشد. هر یک از دسته‌ها اختصاص به یکی از حالات مجزای دسته‌بندی مربوط به شبکه انتقال و فوق توزیع مشتمل بر شینه‌های انتقال و شینه‌های فوق توزیع دارد. تعداد این دسته‌ها برابر با تعداد حالات تعیین شده برای دسته‌بندی شبکه خواهد بود. در تشکیل طبقات، نکته اساسی در این است که تمام عناصر موجود در بخش منتخب می‌بایست در دسته‌بندی شرکت داشته و بتوانند در داخل یکی از دسته‌ها قرار داده شوند. لازم به ذکر است که در این مقاله، معیارهای یکسانی برای دسته‌بندی شینه‌های انتقال یعنی شینه‌های ۴۰۰KV و ۲۳۰KV و شینه‌های فوق توزیع یعنی شینه‌های ۱۳۲ KV و ۶۶/۶۳ KV، انتخاب شده و از هر دسته نمونه‌های مناسب بر اساس الگوریتمی که توضیح داده خواهد شد، انتخاب می‌شوند. پس از انجام دسته‌بندی و تشکیل طبقات، تعداد نمونه‌های مناسب و تعداد نمونه‌هایی که بایستی از هر دسته انتخاب شود، تعیین گردیده و از هر دسته نمونه‌های لازم آن هم از طریق نمونه‌گیری ساده تصادفی انتخاب می‌گردد [۵].

۳.۱. مراحل الگوریتم تعیین نقاط نمونه برای ارزیابی

کیفیت توان شبکه‌های انتقال و فوق توزیع

الگوریتم ارائه شده، بر اساس تشکیل طبقات برای کلیه شبکه تحت پوشش و مطابق با روندنمای شکل ۱ می‌باشد. ابتدا لیست کلیه شینه‌های



شکل ۱: روندنمای الگوریتم تعیین نقاط نمونه برای ارزیابی کیفیت توان

شبکه‌های انتقال و فوق توزیع

جدول ۳: معیارهای منتخب جهت طبقه‌بندی و کدبندی شبکه‌ها

کد	محدوده انتخاب	معیار طبقه‌بندی	رقم کد حالت از چپ
1	انتقال	نوع شینه	1
	فوق توزیع		
2	$\leq y$ KA	سطح اتصال کوتاه شینه	2
	$> y$ KA		
3	$\leq x$	تعداد خطوط خروجی از شینه	3
	$> x$		
4	بیش از ۵۰٪ زمان‌ها زیر ۷۰٪ ظرفیت نامی	متوسط ضریب بارگذاری ترانسفورماتورهای متصل به شینه	4
	بیش از ۵۰٪ زمان‌ها بالای ۷۰٪ ظرفیت نامی		

۴. تعمیم شاخص‌های کیفیت توان به کل شبکه

پس از اندازه‌گیری در نقاط نمونه، می‌بایست شاخص‌های سیستمی کیفیت توان محاسبه شوند و به کمک نتایج حاصل، ارزیابی کیفیت توان در

کل شبکه صورت پذیرد. از آنجا که اندازه‌گیری‌ها فقط در نقاط نمونه صورت پذیرفته و سپس نتایج حاصل به کل شبکه تعمیم داده می‌شود، لازم است که در هنگام محاسبه شاخص‌های سیستمی از ضرایب وزنی مناسبی استفاده گردد، به‌طوری‌که نقاط اندازه‌گیری مهم‌تر با وزن بالاتری در نظر گرفته شوند. در این مقاله با توجه به اینکه در استاندارد کیفیت برق کشور، هارمونیک، نامتعادلی ولتاژ و فلیکر سه اغتشاش اصلی شبکه تلقی شده و رعایت حدود مجاز آن‌ها اجباری گردیده است، لذا شاخص‌های سیستمی برای آن‌ها تعریف شده است. ضرایب وزنی مورد استفاده نیز علاوه بر فراوانی نوع شینه منتخب در کل شبکه و تعداد نمونه‌های گرفته شده از دسته شامل شینه منتخب که از الگوریتم تعیین نقاط بدست می‌آید، برای بعضی شاخص‌ها مجموع ظرفیت ترانسفورماتورها و خطوط متصل به آن شینه منتخب می‌باشد [۱-۵].

۴.۱. شاخص‌های سیستمی برای هارمونیک ولتاژ

شاخص‌های سیستمی برای سنجش هارمونیک ولتاژ، THD متوسط سیستم یا SATHD^۲ نامیده شده که با استفاده از مقادیر متوسط THDهای اندازه‌گیری شده در نقاط منتخب در طول بازه اندازه‌گیری و با اعمال ضرایب وزنی به شرح (۲) و (۳) محاسبه می‌گردد. همان‌طور که در (۲) مشاهده می‌شود، ضریب وزنی برای هر شینه نمونه، تابعی از تعداد اعضای دسته شامل آن شینه، تعداد نمونه‌های انتخابی از آن دسته و مجموع ظرفیت ترانسفورماتورها و خطوط متصل به آن شینه می‌باشد. برای شینه‌های متصل به بار اختصاصی نیز ضریب وزنی تنها مجموع ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورهای متصل به شینه می‌باشد.

$$SATHD = \frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s \cdot MEANTHD_s}{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s}, \quad W_s = \frac{n_s}{M_s}, \quad s=1, \dots, k \quad (2)$$

$$MEANTHD_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{MW}} THD_i}{N_{MW}} \quad s=1, \dots, k \quad (3)$$

S: شماره شینه منتخب برای اندازه‌گیری

k: تعداد کل شینه‌های منتخب برای اندازه‌گیری

W_s : ضریب وزنی به‌دست آمده برای شینه Sام منتخب برای اندازه‌گیری

L_s : مجموع ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورهای متصل به شینه Sام

n_s : تعداد اعضای دسته شامل نمونه‌ی Sام

M_s : تعداد نمونه‌های انتخابی از دسته مربوط به شینه Sام

N_{US} : تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول دوره اندازه‌گیری در شینه S ام که در آن‌ها مقدار U از حدود مجاز تجاوز کرده باشد.

۴.۳. شاخص سیستمی برای فلیکر ولتاژ

مجموعه عواملی از قبیل تغییرات مقدار موثر ولتاژ، فرکانس و وقوع این تغییرات، میزان تاثیرپذیری یا حساسیت شخصی و نوع لامپ‌های روشنایی، در قابل احساس بودن یا آزاردهنده بودن پدیده فلیکر تاثیر می‌گذارند [۹]. برای سنجش فلیکر، این شاخص سیستمی بر اساس الگوی محاسبه مرتبه m P_{st} (یا P_{It}) و با اعمال فقط ضریب وزنی فراوانی نوع نقطه منتخب و تعداد نمونه‌های گرفته شده از هر دسته تعریف می‌گردد. برای شینه‌های اختصاصی نیز ضریب وزنی ۱ می‌باشد. در (۷) برای سنجش فلیکر، m عدد ثابتی را نشان می‌دهد که وابسته به مشخصه منبع اصلی نوسانات ولتاژ بوده و در حالت کلی به پنج رده به شرح زیر تقسیم می‌شود [۱۰ - ۱۲]:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i (P_{sti})^m} \quad (7)$$

- $m=4$: برای جمع نوسانات ولتاژ مربوط به کوره‌های القایی
- $m=3$: معتبر برای اکثر نوسانات ولتاژ (به خصوص اگر احتمال وقوع همزمان دو نوسان ولتاژ کم باشد).
- $m=3/5$: با شیب خط راست منحنی $P_{st}=1$ مطابقت دارد.
- $m=2$: احتمال وقوع همزمان دو نوسان ولتاژ مانند احتمال وقوع همزمان مرحله ذوب کوره‌های القایی
- $m=1$: بسیار بالا بودن احتمال وقوع همزمان نوسان ولتاژ

با توجه به این که شاخص سیستمی فلیکر برای نقاط منتخب اندازه‌گیری محاسبه می‌گردد که مربوط به بار خاصی نبوده و احتمال وقوع همزمان دو نوسان ولتاژ نیز در آن‌ها کم می‌باشد، $m=3$ انتخاب مناسبی برای محاسبه آن می‌باشد. بر این اساس، شاخص سیستمی فلیکر (SAP_{st})^۵ و P_{st} (SAEPstRI)^۶ مطابق با (۸) و (۹) تعریف می‌گردند.

$$SAP_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot (MEANP_{st_s})^3}{\sum_{s=1}^k W_s}}, \quad MEANP_{st_s} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{MW}} P_{sti}}{N_{MW}} \quad (8)$$

$$SAEPstRI_{Pst} = \frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot \left(\frac{N_{Pst_s}}{N_{MW}} \right)}{\sum_{s=1}^k W_s} \quad (9)$$

i : شماره اندازه‌گیری انجام شده در شینه S ام در طول دوره اندازه‌گیری
 THD_i : میزان THD اندازه‌گیری شده در شینه S ام در بازه i ام
 N_{MW} : تعداد کل اندازه‌گیری‌ها در طول دوره اندازه‌گیری در شینه S ام
 $MEANTHD_s$: متوسط آماری از مقادیر THD اندازه‌گیری شده در بازه‌ها در طول دوره اندازه‌گیری در سایت S ام

علاوه بر شاخص $SATHD$ ، شاخص دیگری تحت عنوان $SAETHDRI_{THD}$ ^۴ برای سنجش تعداد دفعات اندازه‌گیری در بازه‌های اندازه‌گیری که در آن‌ها THD های اندازه‌گیری شده از حدود مجاز استاندارد (حد طراحی) تجاوز کرده باشند، تعریف می‌گردد. این شاخص مطابق با (۴) محاسبه می‌گردد.

$$SAETHDRI_{THD} = \frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s \cdot \left(\frac{N_{THD_s}}{N_{MW}} \right)}{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s} \quad (4)$$

N_{THD_s} : تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول دوره اندازه‌گیری در سایت S ام که در آن‌ها مقدار THD اندازه‌گیری شده از حدود مجاز تعریف شده در استاندارد تحت عنوان حدود طراحی تجاوز کرده باشد.

۴.۴. شاخص‌های سیستمی برای نامتعادلی ولتاژ

شاخص‌های سیستمی (SAU ^۵ و $SAEURI_U$ ^۶) و ضرایب وزنی برای سنجش نامتعادلی ولتاژ به شرح (۵) و (۶) تعریف می‌گردند:

$$SAU = \frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s \cdot MEANU_s}{\sum_{s=1}^k W_s \cdot L_s}, \quad MEANU_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{MW}} U_i}{N_{MW}} \quad (5)$$

$$SAEURI_U = \frac{\sum_{s=1}^k W_s \cdot \left(\frac{N_{U_s}}{N_{MW}} \right)}{\sum_{s=1}^k W_s} \quad (6)$$

U_i : میزان نامتعادلی U (نسبت بین مولفه منفی به مثبت ولتاژ به درصد) اندازه‌گیری شده در شینه S ام در بازه اندازه‌گیری i ام
 $MEANU_s$: متوسط آماری از مقادیر U اندازه‌گیری شده در طول دوره اندازه‌گیری در شینه S ام

2- System Average Excessive Total Harmonic Distortion
 3- System Average Unbalance
 4- System Average Excessive Unbalance Ratio Index U Level

5- System Average Pst
 6- System Average Excessive Pst Ratio Index Pst Level

جدول ۶: تعداد نمونه‌های هر دسته و شینه‌های منتخب از هر دسته

کد دسته	تعداد نمونه‌های منتخب از هر دسته	شینه‌های منتخب
11	3	2، 13 و 19
12	2	7 و 20
21	2	6 و 12
22	3	5، 11 و 21

P_{st} : میزان P_{st} اندازه‌گیری شده در شینه S در بازه Δt

$MEANP_{st}$: متوسط آماری مقادیر P_{st} اندازه‌گیری شده در شینه S

$N_{P_{st}}$: تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول دوره اندازه‌گیری در

شینه S که در آن‌ها مقدار P_{st} از حدود مجاز تجاوز کرده باشد.

برای محاسبه ضرایب وزنی از (۲) استفاده می‌شود. ضریب وزنی مربوط

به محاسبه شاخص سیستمی هارمونیک ولتاژ و عدم تعادل یکسان

می‌باشند و ضریب وزنی شاخص سیستمی فلیکر برابر با (W_s)

است.

جدول ۷: ضرایب وزنی شینه‌های منتخب از هر دسته

شماره شینه منتخب	W_s	$W_s \times L_s$	شماره شینه منتخب	W_s	$W_s \times L_s$
۲	۲/۶۷	۲۰۸۰	۱۲	۲	۱۸۰۰
۱۳	۲/۶۷	۲۵۳۶/۵	۶	۲	۶۱۷۲
۱۹	۲/۶۷	۱۹۴۹/۱	۵	۲	۴۲۸۰
۷	۱/۵	۱۲۳۰	۱۱	۲	۵۴۴۰
۲۰	۱/۵	۱۹۳۵	۲۱	۲	۳۳۰۰
مجموع	۲۱	۳۰۷۲۲/۶			

برای محاسبه شاخص‌های سیستمی $SATHD$ ، SAU و SAP_{st} از ۲،

(۵) و (۸) استفاده می‌شود. جدول ۸ مقادیر فرضی کمیت‌های U ، THD و

P_{st} را در هر یک از شینه‌های منتخب و همچنین شاخص‌های سیستمی

محاسبه شده برای کل شبکه انتقال را نشان می‌دهد.

جدول ۸: میزان کمیت‌های کیفیت توان در شینه‌های نمونه و شاخص‌های

سیستمی کل شبکه انتقال برق غرب

شینه منتخب	$MEANP_{st}$	$MEANU$	$MEANTHD$
۲	۰/۶	۰/۸	۱/۲
۱۳	۰/۵۹	۰/۷	۱/۱
۱۹	۰/۶۱	۰/۹	۱/۳
۷	۰/۵	۰/۷۵	۱/۱
۲۰	۰/۷	۱/۵	۱/۸
۱۲	۰/۵۳	۰/۷۴	۱/۴
۶	۰/۵۴	۰/۷۶	۰/۷
۵	۰/۸۲	۱/۳	۲
۱۱	۰/۷۱	۱/۱	۱
۲۱	۰/۶۹	۱	۰/۹
شاخص‌های سیستمی	SAP_{st}	SAU	$SATHD$
	۰/۶۵۹۳	۰/۹۲۷	۱/۱۶۷۹

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویه‌ای پیشنهاد گردیده که بر مبنای آن جامعه آماری

مناسب از نقاط مختلف شبکه انتقال و فوق توزیع انتخاب شده و سپس با

۵. شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش الگوریتم ارائه شده بر روی شبکه انتقال تحت پوشش

شرکت برق منطقه‌ای غرب اجرا و نتایج حاصل ارائه شده است. پیوست ۱

اطلاعات لازم جهت دسته‌بندی و محاسبه شاخص‌های سیستمی برای کل

شبکه انتقال برق غرب را نشان می‌دهد [۱۳].

با توجه به اینکه در این مثال تنها شبکه انتقال بررسی می‌شود تمامی

شینه‌ها از نوع انتقال بوده و بنابراین معیار ۱ از لیست معیارها حذف

می‌گردد. با توجه به داشتن سه معیار دسته‌بندی معادل ۸ دسته و رعایت

قانون حداقل نقاط نمونه دو برابر تعداد دسته‌ها، تعداد نقاط نمونه اندکی

کمتر از کل نقاط است، بنابراین ضریب بارگذاری ترانسفورماتورها نیز از

معیارها حذف می‌گردد و تعداد دسته‌ها به ۴ دسته کاهش می‌یابد.

جدول ۴ معیارهای منتخب جهت طبقه‌بندی شینه‌ها را نشان می‌دهد.

مقادیر X و Y به صورت میانگین با استفاده از اطلاعات پیوست ۱ بدست

آمده‌اند. جدول ۵ دسته‌های تعیین‌شده را بر اساس کد آن‌ها و تعداد

شینه‌هایی که در هر دسته قرار می‌گیرند، نشان می‌دهد.

جدول ۴: معیارهای منتخب جهت طبقه‌بندی و کدبندی شینه‌های انتقال

کد منتخب	محدوده انتخاب	معیار طبقه بندی	شماره رقم کد حالت از سمت چپ
1	$\leq 10 \text{ KA}$	سطح اتصال کوتاه شینه	1
2	$> 10 \text{ KA}$		
2	≤ 2	تعداد خطوط خروجی از شینه	2
1	> 2		

جدول ۵: تعداد شینه‌های موجود در هر دسته

کد دسته	تعداد شینه‌های موجود در هر دسته
11	۸
12	۳
21	۴
22	۶

تعداد نمونه‌های هر دسته از (۱) بدست می‌آید. جدول ۶ تعداد

نمونه‌های هر دسته و همچنین شینه‌های منتخب را نشان می‌دهد.

- [2] D. Sabin, L. Brooks, A. Sundaram, "Indices for Assessing Harmonic Distortion from Power Quality Measurements: Definitions and Benchmark Data", IEEE Transactions on Power Delivery, 1998.
- [3] G. Carpinelli, P. Caramia, "Some Considerations on Single Site and system Probabilistic Harmonic Indices for Distribution Networks", IEEE Conference, 2003.
- [4] G. Carpinelli, P. Caramia, A. Russo, P. Verde, "New System Harmonic Indices for Power Quality Assessment of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, 1998.
- [5] گروه مطالعات سیستم، تدوین رویه انتخاب نقاط نمونه مناسب برای ارزیابی کیفیت توان در شبکه توزیع برق تهران، پژوهشگاه نیرو، آذر ۱۳۸۵.
- [6] Mazlumi, Abyaneh, Gerivani and Pordanjani, "A New Optimal Meter Placement Method for Obtaining a Transmission System Indices", Power Tech, IEEE Lausanne, 2007.
- [7] Damchi, Sadeh, "Effect of combined transmission line (overhead line/cable) on power system reliability indices", Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), IEEE, 2010.
- [8] C. D. Perna, G. Olguin, P. Verde, M.H.J. Bollen, "On probabilistic system indices for voltage dips", International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, IEEE Conferences, 2004.
- [9] میرآقا و جلالی، "ارزیابی فلیکر ناشی از کارخانه فولاد آلیازی ایران واقع در استان یزد"، نشریه علمی و پژوهشی برق، شماره ۲۶، ۲۷، ۱۳۷۸.
- [10] Angelo Baggini, "Hand Book of Power Quality", Wiley Publication, 2008.
- [11] P. Caramia, G. Carpinelli and P. Verde, "Power Quality Indices in Liberalized Markets", Wiley Publication, 2009.
- [12] Taylor and Francis Group, "Distribution Reliability and Power Quality", CRC Press, 2006.

اجرای عملیات اندازه‌گیری پارامترها در این نقاط منتخب، نتایج حاصل به کل شبکه تعمیم داده شود و بدین وسیله امکان ارزیابی کیفیت برق در کل شبکه فراهم می‌گردد. در این الگوریتم در ابتدا شینه‌های انتقال و فوق توزیع بر اساس معیارهای مناسبی دسته‌بندی گردیده و نسبت به نمونه‌گیری تصادفی از طبقات منتخب اقدام می‌گردد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها، برای سه اغتشاش هارمونیک، نامتعادلی ولتاژ و فلیکر با استفاده از شاخص‌های سیستمی ارائه‌شده به کل شبکه مورد مطالعه، تعمیم داده می‌شود. از نتایج حاصل، می‌توان یک منطقه را از نقطه‌نظر کیفیت توان و چگونگی تغییرات آن در طول سال‌های متمادی ارزیابی نموده و یا اینکه مناطق مختلف را از نقطه‌نظر کیفیت برق با یکدیگر مقایسه نمود. در این بررسی، این روش بر روی یک شبکه اجرا گردیده است که نتایج آن نیز نشان دهنده صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی است. لازم به ذکر است با اندازه‌گیری در نقاط دسته‌های مختلف و مشابه بودن نتایج اندازه‌گیری در نقاط یک دسته، می‌توان درستی روش را به صورت عملی اثبات نمود.

منابع

- [1] D. Sabin, "Analysis of Harmonic Measurement Data", IEEE Conference, 2002.

[۱۳] "امار تفصیلی صنعت برق ایران"، ۱۳۸۹.

جدول پ ۱: لیست و اطلاعات شینه‌های انتقال شبکه تحت پوشش شرکت برق منطقه‌ای غرب

شماره شینه	نام شینه	سطح ولتاژ شینه (KV)	سطح اتصال کوتاه شینه (A)	تعداد خطوط خروجی از شینه	متوسط ضریب بارگذاری در طول یک دوره زمانی	L_s
۱	کرمانشاه ۲	۲۳۰	۱۳۹۲۴/۳	۷	۰/۶۷	۲۶۶۰
۲	وحدت (دهلران)	۲۳۰	۳۲۲۲/۱	۲	۰/۲۵	۷۸۰
۳	سیار دره شهر	۲۳۰	۱۷۲۳۴/۴	۲	۰/۹۴	۷۴۰
۴	اورامانت	۲۳۰	۴۹۰۶/۷	۲	۰/۳۹	۸۶۰
۵	نیروگاه بیستون	۲۳۰	۱۷۸۲۱/۶	۶	۱	۲۱۴۰
۶	نیروگاه زاگرس	۴۰۰	۱۲۶۳۵/۱	۲	۰/۷۸	۳۰۸۶
۷	دیواندره	۲۳۰	۷۳۴۱/۴	۳	۰/۴۵	۸۲۰
۸	بیستون (شرق کرمانشاه)	۲۳۰	۱۷۴۵۵/۱	۲	۰/۵۱	۱۶۷۵
۹	مرصاد	۴۰۰	۷۱۱۰/۴	۴	۰/۹۳	۵۴۰۰
۱۰	بیستون (شرق کرمانشاه)	۴۰۰	۱۲۷۶۶/۶	۳	۰/۵۷۶	۴۵۰۰
۱۱	اسلام آباد	۲۳۰	۱۱۵۷۳/۴	۷	۰/۳۱	۲۷۲۰
۱۲	مرصاد	۲۳۰	۱۱۲۸۱/۷	۲	۰/۹۳	۹۰۰
۱۳	مانشت	۲۳۰	۶۵۶۲/۹	۲	۰/۱۸۲	۹۵۰
۱۴	ایلام	۲۳۰	۵۹۰۴/۳	۲	۰/۳۲	۱۰۲۰
۱۵	کنگاور	۲۳۰	۶۲۴۱/۸	۲	۰/۶۸	۵۷۰
۱۶	چمران	۲۳۰	۹۶۳۳/۴	۲	۰/۴۵	۷۳۰
۱۷	سقز	۲۳۰	۳۹۹۲	۲	۰/۵	۹۵۰
۱۸	سنندج	۲۳۰	۱۲۰۴۷/۸	۴	۰/۵۷	۱۵۴۵
۱۹	بدر (گنجه)	۲۳۰	۶۴۷۱/۱	۲	۰/۲۶	۷۳۰
۲۰	سرپل‌ذهاب	۲۳۰	۴۹۷۲/۹	۴	۰/۶۱۸	۱۲۹۰
۲۱	نیروگاه سنندج	۲۳۰	۱۳۳۵۷/۲	۶	۰/۷۹	۱۶۵۰