روشی نوین برای یافتن ژنراتورهای همپا با استفاده از نظریه گراف و خوشه‌بندی

حامد شه‌مرادی[۱] عارف درودی[۲] محمدصالح فرخی[۳]

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شاهد- تهران- ایران
hamed.shahmoradi@yahoo.com
۲- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شاهد- تهران- ایران
doroudi@shahed.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شاهد- تهران- ایران
msaleh.farrokhi@shahed.ac.ir

چکیده: مطالعات پایداری، کنترل و طراحی شبکه‌های قدرت با توجه به وسعت زیاد و درهم تنیدگی بیش از حد این شبکه‌ها، امری دشوار و زمان‌بر بوده و لذا برای انجام این مطالعات، معادل‌سازی دینامیکی بسیار مفید و اجتناب‌پذیر است. معادل‌سازی دینامیکی با تبدیل شبکه‌های وسیع و پیچیده به شبکه‌های کوچک‌تر انجام می‌گیرد. یکی از روش‌های معادل‌سازی، یافتن ژنراتورهای همپا است. در روش همپایی، ابتدا بر اساس مشخصات و نوسانات شبکه، هر گروه ژنراتورهای همپا با یک ژنراتور معادل جایگزین می‌شوند و سپس معادل دینامیکی گروهها در مطالعات شبکه‌های قدرت استفاده می‌شوند. در همین راستا، در این مقاله با استفاده از نظریه گراف و شاخص کیفیت خوشه‌بندی، روشی جدید برای یافتن ژنراتورهای همپا در یک شبکه قدرت ارائه می‌شود. روش پیشنهادی بر پایه مدل شبکه قدرت بوده و تنها اطلاعات مورد نیاز آن، ادمیتانس خطوط ارتباطی بین باس‌های ژنراتوری شبکه است. شبکه ۳۹ باس IEEE جهت نشان دادن کارایی روش، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج ارائه شده و مقایسه نتایج با دیگر مقالات، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در عین سادگی با تقریب قابل قبولی، ماشین‌های همپا را به خوبی شناسایی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: همپایی کند، معادل‌سازی دینامیکی، خوشه‌بندی، نظریه گراف

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.113

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش مشروط مقاله:۱۴۰۳/۲/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عارف درودی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران، بزرگراه خلیج فارس (ابتدای آزادراه تهران - قم)، روبروی حرم مطهر امام خمینی (ره)، دانشگاه شاهد – دانشکده فنی و مهندسی

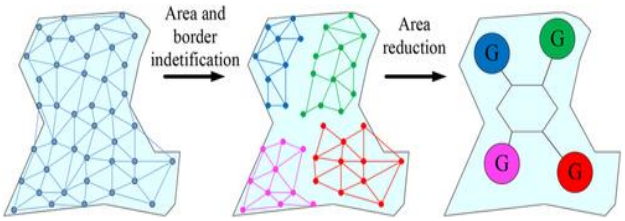
۱- مقدمه

به منظور تأمین برق اقتصادی و مطمئن برای مشترکین، شبکه‌های قدرت روز به روز پیچیده‌تر شده و اتصالات و ارتباطات بین آن‌ها افزایش می یابد؛ بنابراین دیگر نمی‌توان بخش‌های مختلف سیستم‌های قدرت را به صورت مجزا و ایزوله مورد مطالعه قرار داد. در مطالعات دینامیکی، با توجه به ابعاد این شبکه‌های به هم پیوسته، نمایش کل سیستم همراه با جزئیات کامل غیرممکن یا حداقل مقرون به صرفه نیست. تکنیک معادل‌سازی دینامیکی می‌تواند مقیاس شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت را به طور چشمگیری کاهش داده و مدل‌سازی دینامیکی یک سیستم قدرت بزرگ را به شکل کامل امکان‌پذیر نماید. در مطالعات دینامیکی، شبکه قدرت معمولا به دو بخش مجزا شامل بخش تحت مطالعه (داخلی) و بخش خارجی تفکیک می‌شود. روش معادل‌سازی دینامیکی، سیستم داخلی را حفظ کرده و سیستم خارجی را به چند زیرسیستم (با مدل‌های با ابعاد کوچک‌تر) جایگزین نموده که به طور مؤثری زمان و حافظه مصرفی برای محاسبات حالت دینامیکی را کاهش می‌دهد.

۱-۱- بحث

یکی از روش‌های مؤثر برای معادل‌سازی دینامیکی، مفهوم گروه‌بندی مبتنی بر همپایی است که در بسیاری از کاربردهای سیستم‌های قدرت، نظیر سرعت بخشیدن به شبیه‌سازی گذرای شبکه‌ی قدرت [۱]، ارزیابی امنیت شبکه به صورت برخط [۲]، طراحی سیستم‌های حفاظت ویژه و سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ سطح گسترده [۳]، [۴]مورد استفاده قرارگرفته است.

همپایی روشی است که معادل دینامیکی ژنراتورها (هر گروه ژنراتورهای همپا با یک ژنراتور معادل جایگزین می‌شود) را بر مبنای نوسانات آن‌ها نسبت به یکدیگر مدل کرده و از این گروهها در مطالعات شبکه‌های قدرت بهره می‌برد. در این راستا، ژنراتورهایی که پس از وقوع اغتشاش نوسانات یکسانی دارند، در یک گروه قرار گرفته و همپا نامیده می‌شوند (شکل ۱).



شکل (۱): تقسیم شبکه به گروه‌های ژنراتوری همپا

در یک گروه ژنراتوری همپا، نوسانات ژنراتورها با فرکانس مشابه و در زوایایی بسیار نزدیک به هم رخ می‌دهند [۵]. روش‌های شناسایی ژنراتورهای همپا را می‌توان به شکل کلی به تکنیک‌های مبتنی بر اندازه‌گیری و مبتنی بر مدل تقسیم نمود. هدف تکنیک‌های مبتنی بر اندازه‌گیری، تخمین ژنراتورهای همپا با تحلیل سیگنال‌هایی است که از نقاط مختلف شبکه و توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری مدرن مانند PMUها اندازه‌گیری شده و با سیستم‌های مانیتورینگ سطح گسترده به نقطه مورد نظر رسیده‌اند. مزیت این روش‌ها به عدم وابستگی به اطلاعات سیستم باز می‌گردد ولی به هر حال سیگنال‌های حاصل از اندازه‌گیری حاوی اغتشاشات و نویز بوده و پردازش آنها چالش‌های متعددی از جمله نتایج غیرقابل اعتماد را در بر دارد [۶].

۱-۲- مرور مقالات مرتبط

مهم‌ترین چالش روش‌های مبتنی بر مدل، تشخیص ژنراتورهای همپا بدون اجرای شبیه‌سازی دینامیکی شبکه با بروز اغتشاش است [۷]. تاکنون روش‌های مبتنی بر مدل فراوانی برای شناسایی ژنراتورهای همپا ارائه شده است که برخی از آن ها عبارتند از: روش تفکیک اپسیلون ماتریس ژاکوبین [۸]، روش کوپلینگ ضعیف [۹]، روش فاصله الکترومکانیکی [۱۰]، روش همپایی کند [۱۱]، [۱۲] و روش خوشه بندی طیفی مقید[۱۳] . تئوری همپایی کُند پرکاربردترین روش در این زمینه بوده که معمولا به صورت آفلاین انجام می‌گیرد. در این روش فرض می‌شود که در طول یک اغتشاش، گروه‌هایی از ماشین‌های به‌شدت متصل، دینامیک مشابهی را در مدهای بین‌ناحیه‌ای با فرکانس پایین ارائه می‌دهند. در واقع، پس از بروز اغتشاش، نوسان زوایای روتور ژنراتورها درون یک ناحیه، بسیار سریع‌تر از نوسان بین نواحی است. لذا پس از میرایی نوسانات درون ناحیه‌ای، تنها نوسانات بین‌ناحیه‌ای وجود داشته و ژنراتورهای درون یک ناحیه رفتار مشابهی را بازتاب می‌دهند. در چنین حالتی، این ماشین‌ها در حال چرخش با یکدیگر نسبت به مدهای آهسته بوده و همپای کند نامیده می‌شوند. از آنجایی که وجود اتصالات قوی در یک ناحیه کاری، ویژگی ذاتی شبکه‌های قدرت است، لذا نواحی‌ای که بر اساس روش همپایی کند به عنوان نواحی همپا انتخاب می‌شوند، معمولا ثابت بوده و با تغییر پارامترهای سیستم و شرایط کاری، تغییر چندانی نخواهند داشت.

مبنای تئوری روش همپایی کند، در طول دهه‌های هشتاد و نود میلادی توسعه یافت و از آن زمان، برخی از ایده‌ها و الگوریتم‌های بهبودیافته و روش‌های نوین مانند نظریه گراف برای تشخیص و مدل سازی بهتر آن نیز ارایه شده است [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. نظریه گراف ابزار قدرتمندی برای نمایش ریاضی‌وار سیستم‌های پیچیده از جمله شبکه‌های قدرت است که امکان استفاده از برخی تکنیک‌های تثبیت شده و قدرتمند را فراهم می‌سازد [۱۷]. روش‌های مبتنی بر گراف، به اطلاعات کمتری از شبکه قدرت برای یافتن ژنراتورهای همپا نیاز دارد. این امر در شبکه‌های مدرن و تجدید ساختار یافته و رقابتی امروزی از درجه اهمیت بالایی برخوردار است چرا که بسیاری از اطلاعات شبکه در دسترس همگان نیست. در واقع، اپراتورهای هر شبکه به دلیل امنیتی و محرمانه بودن اطلاعات، تمایلی به اشتراک‌گذاری مدل‌های

کامل سیستم تحت نظر خود به دیگر رقیبان ندارند. در مرجع[۱۸]، ابتدا گراف دینامیکی شبکه تنها با استفاده از گره‌های ژنراتوری ساخته می‌شود. وزن یال‌های بین گره‌ها همان ضرایب همگام‌سازی هستند که میزان کوپلینگ بین گره‌ها را مشخص می‌کنند. در ادامه برای یافتن ژنراتورهای همپا از مقادیر ویژه ماتریس لاپلاسین گراف و الگوریتمی مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه شده استفاده می‌شود. در مرجع [۱۹]، روشی مبتنی بر نظریه گراف برای یافتن ژنراتورهای همپای کند پیشنهاد شده است. این روش برای تشخیص دقیق ژنراتورهای همپا از تکنیک خوشه‌بندی طیفی و مینیمم‌سازی شاخص برش نرمالیزه شده (N-Cut) گراف شبکه استفاده می‌کند. وزن یال‌های بین گره‌های ژنراتوری از معادله الکترودینامیکی مرتبه دو شبکه با صرفنظر کردن از میرایی ژنراتورها محاسبه می‌شود. یافته‌های مقاله نشان می‌دهد که همپایی کند و برش‌های نرمالیزه شده گراف شبکه، ارتباط بسیار نزدیکی با هم داشته و مقدار N-Cut نزدیک به مینیمم کلی (گلوبال)، برای نشان دادن شدت اتصال بین گروه‌های همپای کند بسیار مناسب است. در مرجع [۲۰]، از یک الگوریتم کارآمدِ شناسایی کات‌ست استفاده شده که بتوان از آن جهت یافتن ژنراتورهای همپا در سیستمهای قدرت بسیار بزرگ بهره برد. پیچیدگی و محاسبات سنگین از معایب روش‌هایی است که تا کنون بر مبنای نظریه گراف برای مبحث همپایی ارائه شده‌اند.

۱-۳- روش پیشنهادی مقاله

در این مقاله روشی جدید و ساده اما دقیق برای یافتن ژنراتورهای همپا ارائه می‌شود. این روش مبتنی بر نظریه گراف و روش فاصله الکتریکی بوده و سبب کاهش و حذف اطلاعات غیرضروری از شبکه می‌شود. روش پیشنهادی نیازی به محاسبات مقادیر ویژه و تکنیک‌های بهینه‌سازی نداشته و تنها اطلاعات مورد نیاز آن، ادمیتانس خطوط ارتباطی بین باس‌های ژنراتوری شبکه است. الگوریتم ارائه شده با استفاده از گراف معادل شبکه قدرت و دو شاخص مشهور نظریه گراف به نام‌های شاخص کیفیت خوشه (clustering quality) و ارتباط نرمالیزه شده (Normalized association) گروه‌بندی ژنراتورهای همپا را به شکل مناسبی به انجام می‌رساند. شبکه ۳۹ باس IEEE، جهت آزمون کارایی الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ پیشینه نظری مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی معرفی می‌شود. در بخش ۴، شبیه‌سازی روی شبکه ۳۹ باس IEEE انجام گرفته و نتایج به همراه مقایسه با سایر روش‌ها ارایه شده در پایان و در بخش ۵، نتیجه‌گیری مقاله آورده می‌شود.

۲- پیشینه نظری

۲-۱- مدل گراف شبکه قدرت

نظریه گراف شامل نمایش ریاضی یک شبکه پیچیده به صورت یک نمودار است. یک گراف می‌تواند ساختار توپولوژیکی شبکه و ویژگی‌های ذاتی آن را با استفاده از گره‌ها و وزن یال‌ها و در نهایت ماتریس مجاورت نشان دهد. یک شبکه قدرت متشکل از n گره (باس) را می‌توان به صورت یک گراف غیرجهت‌دار $G=(V,E)$ نشان داد که v گره‌ها و e خطوط ارتباط دهنده (یال‌ها) این گره‌ها را نمایش می‌دهند. در این حالت گره‌ها و یال‌های وزن‌دار با ماتریس مجاورت یعنی $A=[w_{ij}]$ مدل‌سازی می‌شوند. با توجه به ماهیت شبکه‌های قدرت، گراف می‌تواند ساده فرض شود بدین معنی که هیچ یال جداگانه و هیچ حلقه خودی در آن وجود ندارد. وزن یال باید با کمیتی مطابقت داشته باشد که نشان‌دهنده نزدیکی یا شباهت بین دو گره است. در شبکه‌های قدرت و بسته به کاربرد مورد نظر، اوزان یال‌ها می‌توانند مطابق با دو کمیت توان عبوری از یال‌ها و یا ادمیتانس خطوط ارتباطی در نظر گرفته شوند. در این مقاله این اوزان برابر ادمیتانس خطوط فرض شده‌اند.

$$w_{ij}=w_{ji}=Y_{ij}=\frac{1}{x_{ij}} \qquad (۱)$$

که در آن x_{ij} امپدانس خطی است که بین گره i و j قرار دارد. وزن هر گره نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$d_{ii}=d_i=\sum w_{ij} \qquad (۲)$$

یعنی مجموع وزن تمامی یال‌هایی که یک انتهای آن به گره i ام متصل است. در نمایش گرافی یک سیستم قدرت، فقط امپدانس خطوط و توان عبوری آن‌ها مورد نیاز است. کلیه اطلاعات دیگر، مانند اطلاعات مربوط به ژنراتورها، بارها، ترانسفورماتورها، تجهیزات FACTS و سطوح مختلف ولتاژ و غیره، ضروری نیستند. بنابراین، تجزیه و تحلیل بر مبنای گراف یک شبکه قدرت، بسیار ساده‌تر از تحلیل مستقیم خود آن سیستم خواهد بود. امکان حذف اطلاعات غیر مرتبط از نمایش گراف یکی از ویژگی‌های جذاب به کارگیری این نظریه در کاربردهای مختلف شبکه‌های قدرت است.

۲-۲- شاخص Nassoc در نظریه گراف

یک گراف را می‌توان به دو زیر گراف A و B مستقل از هم تقسیم کرد. در نظریه گراف، به عمل تقسیم گراف به دو زیرگراف، برش می‌گویند. این کار با حذف یال‌های اتصال‌دهنده آنها به سادگی امکان‌پذیر است. درجه عدم شباهت این دو زیرگراف (هزینه برش) با مجموع اوزان کلیه یال‌های حذف شده محاسبه می‌شود. به زبان ریاضی داریم:

$$cut(A,B)=\sum_{u\in A, v\in B} w_{uv} \qquad (۳)$$

تقسیم بهینه یک گراف با کمینه‌کردن شاخص فوق رخ می‌دهد. تقسیم‌بندی‌ای که این شاخص را مینیمم می‌سازد Min-cut نامیده می‌شود. در واقع Min-cut ، معادل یافتن دو زیرگرافی است که گره‌های هر یک بالاترین شدت اتصال را به هم دارند. الگوریتم‌های بسیاری برای حل این مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است [۲۱]. به دلیل بروز برخی مشکلات در مبحث تقسیم گراف‌ها توسط رابطه (۳) (مثلا اختیار گره‌های تنها به عنوان یک زیرگراف)، مرجع [۲۲]، شاخص بهبود یافته و نرمالیزه‌ای به نام Nassoc را به جای آن معرفی کرده است:

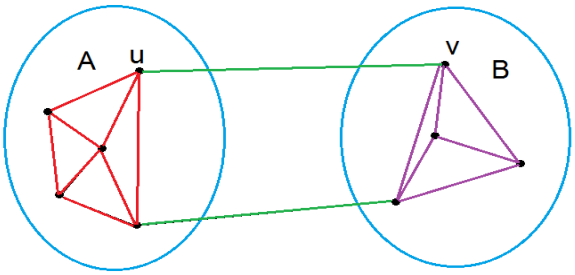
$$Nassoc(A,B)=\frac{Assoc(A,A)}{Assoc(A,V)}+\frac{Assoc(B,B)}{Assoc(B,V)} \quad (۴)$$

که در آن $Assoc(A,A)$ و $Assoc(B,B)$ به ترتیب مجموع اوزان کل یال‌های اتصال‌دهنده در زیر گراف‌های A و B بوده و $Assoc(A,V)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Assoc(A,V)=\sum_{u\in A,t\in V} w_{ut} \quad (۵)$$

یعنی مجموع اوزان کل یال‌های ارتباط‌دهنده زیر گراف A به بقیه گراف. برای $Assoc(B,V)$، نیز می‌توان رابطه‌ای مشابه رابطه (۵) نوشت. به عنوان مثال در شکل ۲، شاخص $Nassoc$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nassoc(A,B)=\frac{red}{red+green}+\frac{purple}{purple+green} \quad (۶)$$



شکل (۲): مثالی از یک گراف شامل دو زیرگراف مستقل A و B

برای رسیدن به یک تقسیم‌بندی بهینه، شاخص Nassoc باید ماکزیمم شود. یادآور می‌شود مینیمم کردن عدم ارتباط (Disassociation) بین گروه‌ها معادل ماکزیمم نمودن ارتباط (Association) بین آن‌ها بوده و می‌توان به صورت هم‌زمان به آن‌ها دست یافت.

۲-۳- خوشه‌بندی

خوشه‌بندی به مفهوم دسته‌بندی اجزای تشکیل دهنده یک سیستم بر اساس تشابهات بین آن‌ها است. این مفهوم به مدیریت بهینه و طبقه‌بندی اعضای یک مجموعه که رفتار و ویژگی‌های آن بر مبنی معیاری خاص است کمک شایانی می‌کند [۲۳]. از نظریه گراف می‌توان در خوشه‌بندی یک سیستم به زیرسیستم‌های مجزا استفاده نمود [۲۴]. در این حالت، خوشه‌بندی به تقسیم یک گراف به زیرگراف‌های مجزا اشاره دارد که در آن گره‌های هر زیرگراف (خوشه) به سایر گره‌ها در همان خوشه به شدت مرتبط هستند (با در نظر گرفتن وزن یال‌ها). شاخص‌های خوشه‌بندی به شرح زیر است:

برش یک خوشه [25]

برش یک خوشه با مجموعه گره V_k که با $Cutp(V_k,\bar{V}_k)$ نشان داده می‌شود، مجموع اوزان یال‌های بین گره‌های V_k و گره‌هایی است که در V_k نیستند یعنی مکمل V_k ($\bar{V}_k$).

$$cutp(V_k,\bar{V}_k)=\sum_{e_i\in V_k,e_i\in\bar{V}_k} w_{ij} \quad (۷)$$

در واقع، مقدار برش یک خوشه نشان‌دهنده کل فاصله بین خوشه و بقیه سیستم، یعنی فاصله بین خوشه‌ای است.

حجم یک خوشه [۲۵]

حجم یک خوشه با مجموعه گره V_k که با $Volp(V_k)$ نشان داده می‌شود، مجموع درجه وزنی گره‌های آن خوشه است:

$$Volp(V_k)=\sum_{e_i\in V_k} d_i \quad (۸)$$

در واقع، حجم یک خوشه یا زیرگراف نشان‌دهنده فاصله بین کل گره‌های آن خوشه یعنی فاصله درون خوشه‌ای است.

کیفیت یک خوشه [۲۵]

این شاخص به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Q(V_k)=1-\frac{Cutp(V_k,\bar{V}_k)}{Volp(V_k)},0\le Q(V_k)\le 1 \quad (۹)$$

هر چه $Q(V_k)$ بزرگ‌تر باشد، خوشه کیفیت بالاتری دارد و گره‌های آن خوشه ارتباط قوی‌تری با یکدیگر دارند. برای بحث همپایی، خوشه باید کیفیت بالایی داشته باشد و این بدین معنی است گره‌های آن خوشه به شدت به یکدیگر متصلند ولی با گره‌های خوشه‌های دیگر ارتباط ضعیفی دارند. اگر شاخص کیفیت برابر یک شود، در خوشه‌بندی تنها یک گروه خواهیم داشت و گره‌های این خوشه کاملا با یکدیگر در ارتباطند (حجم و برش خوشه با هم برابرند). کیفیت کلی خوشه‌بندی (Overall Quality) برابر با مینیمم کیفیت مربوط به خوشه‌های مختلف تعریف می‌شود یعنی عدد کیفیت مربوط به خوشه‌ای که دارای پایین‌ترین کیفیت است.

$$OQ=\min_{V_1,V_2,\dots,V_k}\{V_l\} \quad (۱۰)$$

رابطه (۱۰) برای مسائل خوشه‌بندی به کار می‌رود. در واقع، ماکزیمم کردن (۱۰) نشان می‌دهد که همه خوشه‌ها از نقطه نظر شباهت به خوبی از یکدیگر جدا شده‌اند.

۲-۴- روش Ward برای حذف باس‌های بار

برای یافتن ژنراتورهای همپا، ابتدا باید شبکه قدرت را با حذف باس‌های بار کاهش و معادل‌سازی نمود. با این کار، شبکه نهایی تنها شامل باس‌های ژنراتوری و یک سری خطوط معادل است. روش‌های متعددی برای این معادل‌سازی ارائه شده است. در این مقاله از روش ward برای این منظور استفاده خواهد شد. یک سیستم قدرت با معادلات گره که به صورت کلی زیر است را در نظر بگیرید:

$$Y_{bus}V = I \qquad (۱۱)$$

که در آن Y_{bus} ماتریس ادمیتانس شبکه با ابعاد n×n، V بردار ولتاژ تمام باس‌ها با ابعاد n × ۱ و I بردار جریان‌های تزریقی با ابعاد n × ۱ است. با حذف k امین باس، ماتریس Y_{bus} به‌صورت زیر اصلاح می شود:

$$Y'_{ij} = Y_{ij} - \frac{Y_{ik}Y_{kj}}{Y_{kk}}; i, j = 1,2,...,n; i, j \neq k \qquad (۱۲)$$

همچنین بردارهای جریان به صورت زیر تغییر می‌یابند:

$$I'_{ij} = I_i - \frac{Y_{ik}}{Y_{kk}} I_k; i = 1,2,...,n; i \neq k \qquad (۱۳)$$

اگر شبکه به r باس کاهش پیدا کند، ماتریس ادمیتانس شبکه جدید دارای ابعاد r×r و بردار جریان تزریقی جدید دارای ابعاد r × ۱ است. لازم به ذکر است که شبکه کاهش‌یافته تمام مشخصات شبکه اصلی را دارا خواهد بود. جزئیات این روش در مرجع [۲۶] آمده است.

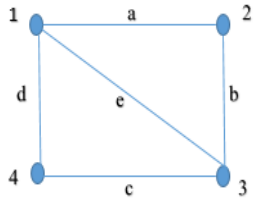
۳- الگوریتم پیشنهادی شناسایی ژنراتورهای همپا

در این قسمت الگوریتم پیشنهادی بر مبنای پیشینه نظری ارائه شده معرفی می‌گردد.

- **گام اول کاهش باس‌های شبکه**: در این گام با استفاده از روش ward، شبکه اصلی به شبکه‌ای کاهش یافته تنها شامل باس‌های ژنراتوری تبدیل می‌شود. این مرحله به ساختار شبکه و ماتریس ادمیتانس آن نیاز دارد.

- **گام دوم ایجاد گراف شبکه:** در این گام، گراف شبکه کاهش‌یافته ترسیم می‌شود. باس‌های ژنراتوری نقش گره‌ها و خطوط ارتباطی بین آنها نقش یال‌ها را به عهده دارند. وزن یال‌ها از رابطه (۱) به دست می‌آید.

- **گام سوم تقسیم‌بندی شبکه به دو زیر گراف و حذف حالات غیر قابل قبول:** در گام سوم، گراف شبکه به دو زیرگراف تقسیم می‌شود. توجه داشته باشید که در این حالت، ابتدا باید تمامی حالات ممکن شناسایی و حالات غیرممکن حذف شوند. به عنوان مثال، گراف شکل ۳ را در نظر بگیرید که شامل ۴ گره و پنج یال است.



شکل (۳): گراف نمونه شامل ۴ گره و پنج یال

تمامی حالات ممکن را می‌توان به دو فرم تقسیم نمود. فرم اول به صورت ۱+۳ است. یعنی یک گره در یک زیر گراف و ۳ گره در زیر گراف دیگر که خود به چهار حالت زیر تقسیم می‌شود:

{1},{2,3,4} {2},{1,3,4} {3},{1,2,4}
{4},{1,2,3}

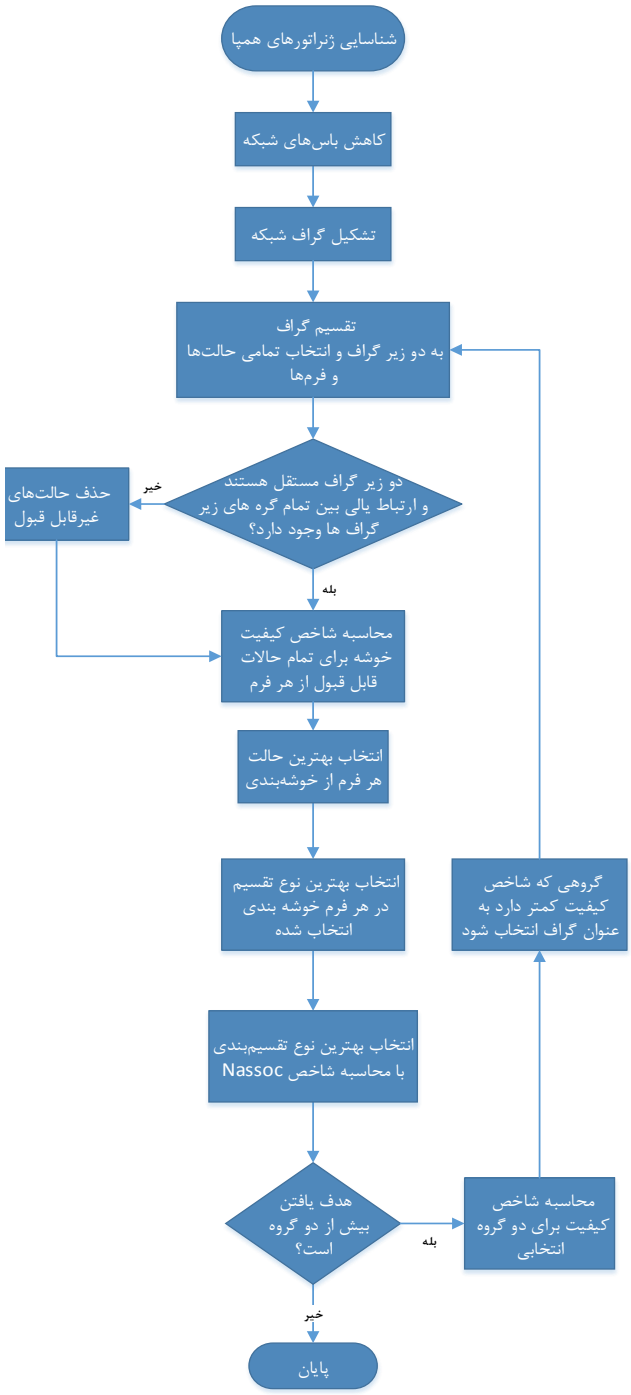
فرم دوم ۲+۲ است، یعنی ۲ گره در یک زیرگراف و ۲ گره باقی مانده در زیرگراف دیگر. این دسته نیز به حالتهای زیر تقسیم می‌شود:

{1,2}, {3,4} {1,3},{2,4} {1,4},{2,3}

نکته قابل ملاحظه این است که در هر فرم و از دیدگاه شبکه قدرت، همه‌ی حالات نمی‌توانند اتفاق افتاده و اصطلاحا غیرممکن است. بدین معنی که اولا فقط برشی قابل قبول است که گراف را به دو زیرگراف مستقل تقسیم نماید و ثانیا ارتباط یالی بین همه گره‌های درون هر زیرگراف نیز برقرار باشد. به عنوان مثال در فرم ۱+۳، هر چهار حالت انتخابی قابل قبول بوده ولی در فرم ۲+۲ ، حالت دوم یعنی حالت {2,4} , {1,3} قابل قبول نیست. لذا این نوع حالات باید حذف شوند.

- **گام چهارم محاسبه شاخص کیفیت خوشه برای همه حالات ممکن هر فرم خوشه و انتخاب بهترین حالت هر فرم خوشه‌بندی:** در این مرحله، در هر فرم خوشه‌بندی، با استفاده از روابط (۷) الی (۹)، کیفیت خوشه محاسبه و حالت متناظر با ماکزیمم مقدار به عنوان بهترین نوع خوشه‌بندی انتخاب می‌شود. در واقع این حالت، بهترین نوع تقسیم شبکه به دو زیر خوشه مجزای مستقل است.
- **گام پنجم محاسبه شاخص Nassoc و انتخاب بهترین نوع تقسیم ژنراتورهای همپا**: پس از اجرای گام چهارم، در هر فرم خوشه‌بندی بهترین نوع تقسیم‌بندی مشخص می‌شود. حال باید میان بهترین تقسیم‌بندی در هر فرم، بهترین حالت انتخاب گردد. در این گام از شاخص Nassoc برای یافتن بهترین بهترین‌ها استفاده می‌شود. در انتها و در بین بهترین خوشه‌بندی هر فرم، هر کدام که دارای Nassoc بالاتری باشد به عنوان پاسخ مسئله انتخاب می‌شود.

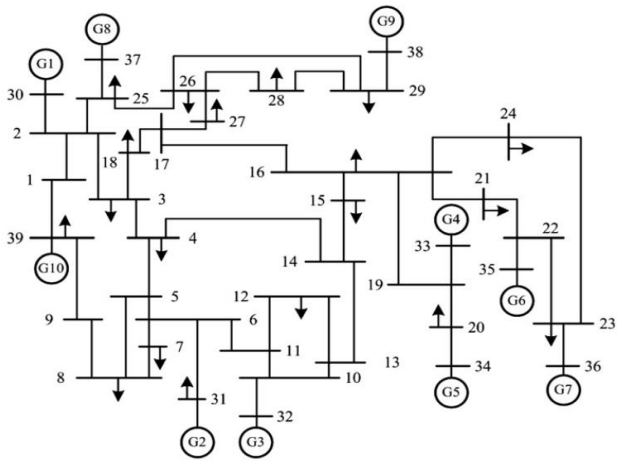
- **گام ششم: تعداد گروه‌های بیشتر:** اگر هدف یافتن دو گروه همپا باشد، مسئله در گام پنجم به پایان رسیده است. در صورتی که هدف یافتن تعداد گروه‌های بالاتر باشد، شاخص کیفیت برای دو گروه انتخابی در گام پنجم، محاسبه و گروه با شاخص کیفیت کمتر با استفاده از گام های سوم تا پنجم مجددا به زیرخوشه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ آمده است.



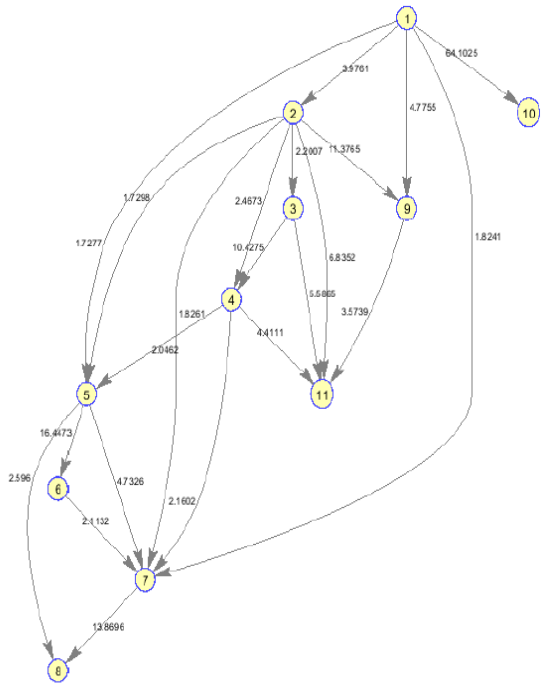
شکل (۴): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۴- شبیه‌سازی

در این بخش، از شبکه ۳۹ باس IEEE برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی تعیین گروههای همپا استفاده می‌شود (شکل ۵). این شبکه دارای ۱۰ باس ژنراتوری و ۲۹ باس متصل به بار است. در گام اول و با استفاده از افزونه Matpower در نرم‌افزار Matlab ، شبکه با حذف باس‌های بار، کاهش داده می‌شود. توضیح آنکه به دلیل ساختار شبکه انتخابی، امکان حذف یکی از باس‌های متصل به بار (باس ۲۹) وجود ندارد. شبکه کاهش یافته شامل ۱۰ باس ژنراتوری، ۱ باس متصل به بار و ۲۲ یال است که امپدانس معادل آن‌ها با روابط بخش ۲-۴ محاسبه شده‌اند. در گام دوم، گراف شبکه کاهش‌یافته ترسیم می‌شود. این گراف در شکل ۶ نمایش داده شده است. یاد آور می‌شود که در این شکل، به جهت سادگی، باس‌های ۲۹ تا ۳۹ از ۱ تا ۱۱ مجددا شماره‌گذاری شده‌اند.



شکل (۵): شبکه ۳۹ باس IEEE



شکل (۶): گراف شبکه ۳۹ باس *IEEE* با حذف باس‌های متصل به بار

در گام سوم، گراف شبکه باید به دو زیرگراف تقسیم شود. تعداد فرم‌های ممکن در ستون دوم جدول (۱) آمده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است، ۱۱ باس را می‌توان در ۵ فرم به ۲ گروه تقسیم نمود. تعداد کل خوشه‌هایی که می‌توان در هر حالت ایجاد نمود از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$No\left(C_1+C_2\right)=\frac{N!}{C_1!C_2!K!} \qquad (۱۴)$$

در این رابطه N تعداد کل گره‌ها، C_1 تعداد گره‌ها در خوشه اول و C_2 تعداد گره‌ها در خوشه دوم است. اگر C_1 و C_2 با هم برابر باشند ضریب K در مخرج کسر برابر دو و در غیر این صورت برابر یک در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۴)، تعداد حالات در هر فرم، در ستون سوم جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): تعداد کل حالت و حالات قابل قبول در گراف شکل ۴

Item	Group form (C_1+C_2)	No. of cases	No. of feasible cases
۱	۱+۱۰	۱۱	۱۰
۲	۲+۹	۵۵	۱۷
۳	۳+۸	۱۶۵	۳۲
۴	۴+۷	۳۳۰	۵۳
۵	۵+۶	۴۶۲	۷۳

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، این تعداد حالات از دیدگاه شبکه همگی قابل قبول نبوده و برخی از آنها نمی‌توانند رخ دهند. چرا که اولا برشی قابل قبول است که گراف را به دو گروه مجزا تقسیم کند و ثانیا ارتباط یالی بین همه گره‌ها در هر خوشه نیز برقرار باشد. برای مثال در فرم ۱۰+۱ دو خوشه موجود است که خوشه اول شامل یک گره و خوشه دوم شامل ۱۰ گره است. اگر برش در گره ۱ اتفاق بیفتد هر پنج یال متصل به آن باید حذف شوند و زیرگراف باقیمانده به سه خوشه تقسیم می‌شود. نتیجه اینکه این برش قابل قبول نیست. در این فرم، همه ۱۰ حالت باقیمانده قابل قبول است. یافتن برش‌های غیرقابل قبول به راحتی با استفاده از ماتریس مجاورت گراف امکان‌پذیر است که در اینجا به دلیل طولانی‌شدن مقاله از ذکر آن اجتناب می‌شود و نتایج آن در ستون چهارم جدول (۱) آمده است.

در گام چهارم، با استفاده از شاخص کیفیت خوشه یعنی $Q(V_k)$، بهترین خوشه‌بندی هر فرم به دست می‌آید. در این حالت، این شاخص برای تمامی حالات ممکن هر فرم، محاسبه و ماکزیمم این شاخص، به هر نوع خوشه‌بندی‌ای تعلق داشت، آن حالت به عنوان بهترین حالت آن فرم انتخاب می‌شود. جدول (۲)، بهترین حالت هر فرم را نشان می‌دهد.

در گام پنجم، باید میان بهترین تقسیم‌بندی در هر فرم (ستون سوم جدول ۲)، بهترین حالت را انتخاب نمود. در واقع در این گام باید بهترین بهترین‌ها انتخاب شود. همانطور که در فلوچارت الگوریتم پیشنهادی ذکر شد در بین بهترین خوشه‌بندی هر فرم، هر کدام که دارای شاخص Nassoc بالاتری باشد به عنوان پاسخ مسئله انتخاب می‌شود. ستون چهارم جدول (۲)، مقادیر این شاخص را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خوشه‌بندی (1,10)+(2,3,4,5,6,7,8,9,11) دارای ماکزیمم شاخص بوده و لذا بهترین حالت از دیدگاه همپایی ژنراتورها خواهد بود.

جدول (۲): بهترین حالت (خوشه‌بندی) هر فرم

Item	Group form (C_1+C_2)	The best case	Nassoc
۱	۱+۱۰	(۸)+(۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۹,۱۰,۱۱)	0.9036
۲	۲+۹	(۱,۱۰)+(۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۹,۱۱)	1.7237 *
۳	۳+۸	(۱,۹,۱۰)+(۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱)	0.5335
۴	۴+۷	(۵,۶,۷,۸)+(۱,۲,۳,۹,۱۰,۹,۱۰,۱۱)	1.6921
۵	۵+۶	(۲,۳,۴,۹,۱۱)+(۱,۲,۵,۶,۷,۸,۱۰)	1.6062

در صورتی که از ابتدا هدف، تشکیل سه گروه ژنراتورهای همپا باشد باید شاخص کیفیت خوشه برای دو گروه انتخابی قبلی محاسبه و گروه با شاخص کیفیت کوچک‌تر، مجددا برای خوشه‌بندی و اجرای گام‌های سوم تا پنجم الگوریتم پیشنهادی انتخاب شود. برای مثال ذکر شده، خوشه اول شامل باس‌های (۱ و۱۰) دارای ارتباط قوی‌تری بوده (با محاسبه کیفیت آن) و لذا گروه دوم، خوشه مناسب‌تری برای تقسیم آن به زیرخوشه‌های جدیدتر است. برای تقسیم این خوشه، گراف شامل ۹ باس، باید توسط گام‌های سوم تا پنجم الگوریتم پیشنهادی مجددا خوشه‌بندی شود. نتایج در جدول (۳) آمده است.

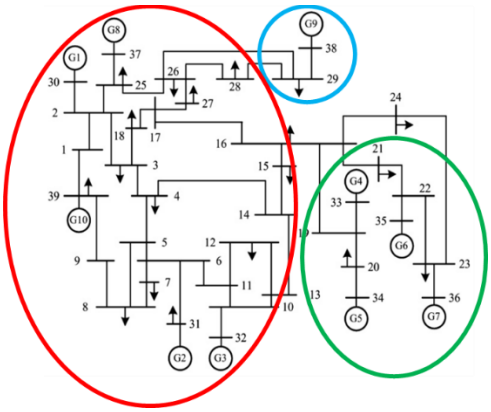
جدول (۳): نتایج خوشه‌بندی مجدد

Item	Group form (C_1+C_2)	The best case	Nassoc
۱	۱+۸	(۹)+(۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱)	0.8417
۲	۲+۷	(۵,۶)+(۲,۳,۴,۷,۸,۹,۱۱)	1.3849
۳	۳+۶	(۲,۹,۱۱)+(۳,۴,۵,۶,۷,۸)	1.2935
۴	۴+۵	(۵,۶,۷,۸)+(۲,۳,۴,۹,۱۱)	1.6946 *

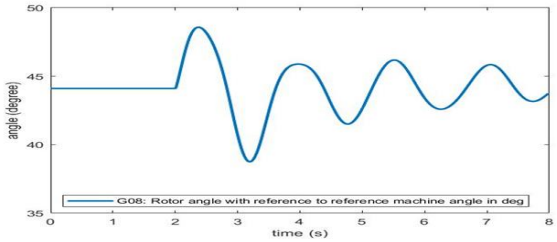
همان طور که مشاهده می‌شود فرم چهارم دارای ماکزیمم شاخص است. لذا در صورتی که هدف تقسیم شبکه به سه گروه ژنراتور همپا باشد، نتیجه نهایی به فرم ۵+۴+۲ بوده که در گروه اول ژنراتور G10، در گروه دوم ژنراتورهای G4، G5، G6 و G7 و در گروه سوم ژنراتورهای G1، G2، G3، G8 و G10 قرار دارند. نتیجه نهایی خوشه‌بندی شبکه در شکل ۷ آمده است. یادآور می‌شود که باس ۱، باس متصل به بار است.

برای آزمون همپایی ژنراتورهای انتخابی، ابتدا شبکه IEEE در نرم افزار DIgSILENT پیاده‌سازی شده و سپس نوسان زاویه ژنراتورها در اثر بروز یک اتصال کوتاه در خط ۱۷-۲۷ و در ثانیه ۲ شبیه سازی شد. مدت زمان اتصال کوتاه برابر ۵۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده و خط مذکور پس از اتصال کوتاه، از مدار خارج می‌شود. در شبیه‌سازی، ژنراتور G1 به عنوان ژنراتور اسلک در نظر گرفته شده و

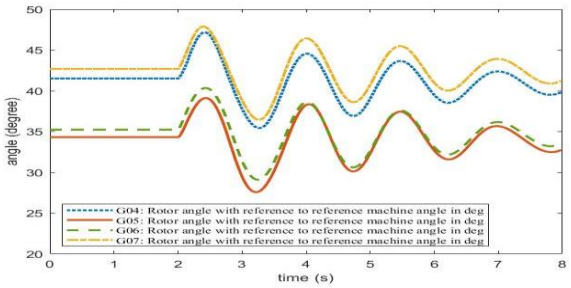
زوایای سایر ژنراتورها بر مبنای آن محاسبه شده‌اند. شکل‌های ۸ الف، ب و ج به ترتیب نوسانات گروه‌های اول تا سوم را برای این واقعه نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود گروه دوم یعنی ژنراتورهای G4, G5,G6, G7 دارای همپایی بسیار قوی‌ای بوده و نوسانات آنها کاملا شبیه یکدیگر است. در گروه سوم، نوسان ژنراتورها تا حدودی اختلاف داشته که در صورت صلاحدید طراح، این گروه می‌تواند مجددا به دو زیرگروه دیگر تقسیم‌بندی شود. یادآور می‌شود که با افزایش گروه‌ها حجم محاسبات افزایش خواهد یافت.



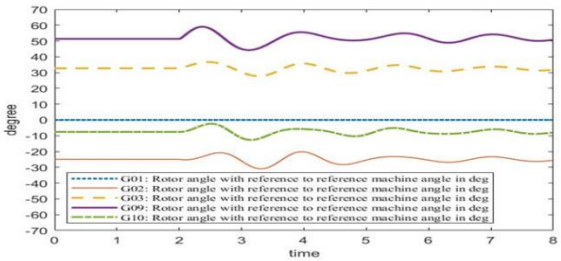
شکل (۷): تقسیم شبکه ۳۹ باس *IEEE* به سه زیرگروه همپا



الف) گروه اول



ب) گروه دوم



ج) گروه سوم

شکل (۸): نوسانات ژنراتورها در اثر بروز اتصال کوتاه در خط ۱۷-۲۷ و خروج آن، الف: گروه اول، ب: گروه دوم، ج: گروه سوم

جدول (۴)، مقایسه نتایج بین روش پیشنهادی و چند مرجع دیگر را نشان می‌دهد. یادآور می‌شود که در روشهای برپایه مدلِ یافتن ژنراتورهای همپا محل وقوع اتصال کوتاه در شبکه در تعیین ژنراتورهای همپا موثر است و لذا برای این مراجع، رخدادی که بر مبنای آن، مسئله همپایی حل شده است در زیر آمده است:

- مقاله حاضر: اتصال کوتاه ۵۰ میلی‌ثانیه‌ای روی خط ۱۷-۲۷ و خروج خط پس از آن
- مرجع [۲۷]: خروج خطوط ۳-۴ و ۱۶-۱۷ به ترتیب در لحظات ۳ و ۱۰ ثانیه
- مرجع [۲۸]: اتصال کوتاه ۱ ثانیه‌ای روی خط ۵-۸ و خروج خط پس از آن
- مرجع [۲۹]: خروج خط ۱۷-۲۷
- مرجع [۳۰]: تغییر پله‌ای بار روی شینه ۳۰ به اندازه ۰/۱۳۵ پریونیت

جدول (۴): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با مراجع دیگر

Reference	Group 1	Group 2	Group 3
proposed	38(G9)	30(G1),31(G2),32(G3),37(G8),39(G10)	33(G4),34(G5),35(G6),36(G7)
[27]	G1,G8,G9	G2,G3,G10	G4,G5,G6,G7
[28]	G1	G2,G3	G4,G5,G6,G7,G8,G9,G10
[29]	G1,G8,G9,G10	G2,G3	G4,G5,G6,G7
[30]	G1	G2,G3,G10	G4,G5,G6,G7,G8,G9

خاطر نشان می‌سازد که روش پیشنهادی نسبت به سایر روشهای ذکر شده به اطلاعات کمتری (تنها ماتریس ادمیتانس شبکه) نیاز داشته و با توجه به حجم کم محاسبات، زمانبری کمتری داشته و پیاده‌سازی آن نیز بسیار ساده‌تراست.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بر پایه نظریه گراف و مبحث خوشه‌بندی، روشی جدید و مبتنی بر مدل برای یافتن ژنراتورهای همپای کند در یک شبکه قدرت ارائه شد. در این راستا، ابتدا با حذف همه باس‌ها به استثنای باس‌های ژنراتوری، شبکه قدرت مورد نظر کاهش یافته و به شبکه‌ای متشکل از باسهای ژنراتوری و خطوط معادل متصل بین آنها تبدیل می‌شود. سپس گراف این شبکه ترسیم شده و بر اساس الگوریتمی مبتنی بر شاخص‌های کیفیت خوشه و Nassoc، شبکه مورد نظر به دو گروه ژنراتور همپا تقسیم می‌گردد. در صورت نیاز به گروه‌های همپای بیشتر، می‌توان الگوریتم پیشنهادی را روی زیر شبکه‌ای که توسط روش پیشنهادی شناسایی می‌شود (شبکه با ارتباطات ضعیف‌تر) مجددا اجرا نمود و زیرشبکه مذکور را به زیرگروه‌های کوچک‌تر تقسیم نمود. روش پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باس IEEE اجرا و نتایج آن با دیگر مراجع مقایسه گردید. روش ارائه شده در عین سادگی و عدم نیاز به محاسبات پیچیده (روش پیشنهادی تنها به ماتریس ادمیتانس شبکه نیاز دارد)، دارای دقت خوبی در شناسایی ژنراتورهای همپا است. روش

پیشنهادی این مقاله برای یافتن تعداد گروههای همپا نیاز به یک فرد خبره دارد و این تعداد از قبل مشخص نیست. برای ادامه کار می‌توان موضوع یافتن تعداد بهینه تعداد گروههای همپا را با توجه به مشخصات شبکه مورد نظر پیشنهاد نمود.

مراجع

[1] L. Mariotto, H. Pinheiro, G. Cardoso, A.P. Morais, and A.R. Muraro, "Power system transient stability indices: An Algorithm Based on Equivalent Clusters of Coherent Generators", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol 4, No. 11, p.p. 1223-1235, 2010.

[2] [2] J. H. Chow, Ed., Power System Coherency and Model Reduction. New York: Springer-Verlag, 2013.

[3] [3] J. Quiros-Tortos, R. Sanchez-Garc, J. Brodzki, J. Bialek, and V. Terzija, "Constrained spectral clustering-based methodology for intentional controlled islanding of large-scale power systems", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 9, No. 1, pp. 31–42, 2015.

[4] [4] N. Xue and A. Chakrabortty, "Control inversion: A clustering-based method for distributed wide-area control of power systems", IEEE Control Network Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 937 – 949, 2019.

[5] [5] D. Efimov, and S. Stashkevich, "Coherence indicators of generators for express assessment of electric power system transient stability", Rudenko International Conference of Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems", Vol. 384, 2023.

[6] [6] M. Naglic, M. Popov, M. van der Meijden, and V. Terzija, "Synchronized measurement technology supported online generator slow coherency identification and adaptive tracking", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 11, No. 4, pp.3405-3417, 2020.

[7] J. Machowski, J. W. Białek, and J. R. Bumby, "Power system dynamics and stability", Chichester, U.K., Wiley, 1997.

[8] N. Gacic, A.I. Zecvic, and D.D. Siljak, "Coherency recognition using epsilon decomposition", IEEE Trans. on Power System, Vol. 13, No.2, 1998, p.p.314-319

[9] S.S. Lamba, and R. Nath, "Coherency identification by the method of weak coupling", International Journal of Electrical power & Energy Systems, Vol. 7, No.4, pp.233-242, 1985.

[10] M. A. Pai and R. P. Adgaonkar, "Electromechanical distance measure for decomposition of power systems", Elect. Power Energy Syst., Vol. 6, pp. 249–254, Oct. 1984

[11] J. H. Chow, "New algorithms for slow coherency aggregation of large power systems", in Proc. Institute for Mathematics and Its Applications, pp. 95–115, 1993.

[12] D. Romeres, F. D¨orfler, and F. Bullo, "Novel results on slow coherency in consensus and power networks", in Proc. European Control Conf. (ECC), pp. 1–6., 2013.

[۱۳] نادری، ک. حسامی نقشبندی، ع. "الگوریتمی جدید برای جزیره بندی کنترل‌شده سیستمهای قدرت مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۴، شماره ۳، صفحات ۴۱-۵۴، ۱۳۹۶

[14] G. Bruno, E.M. Carlini, and C. Pisani,: "Signal processing techniques for sensing based generator coherency analysis", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 104, pp. 215–221, 2019.

[15] M. Sadeghi, H. Akbari , T. Daemi, and S. Mousavi, "An innovative mode-based coherency evaluation method for data-driven controlled islanding in power systems", Electric Power Systems Research, Vol. 214, Part A, 2023.

[16] S. Yu and J. Shi, "Multiclass spectral clustering," in Proc. 9th International Conference on Computer Vision (ICCV 2003), 2003, pp. 313–319.

[17] J. Zhu, "Power system applications of graph theory", New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009.

[18] L. Ding, F. M. Gonzalez-Longatt, P. Wall, and V. Terzija, "Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm", IEEE Trans. on Power System, Vol. 28, No.1, 2013, p.p.75-83.

[19] I. Tyuryukanov; M. Popov; M. Meijden, and V.l Terzija, "Slow Coherency Identification and Power System Dynamic Model Reduction by using Orthogonal Structure of Electromechanical Eigenvectors", IEEE Trans. on Power System, Vol. 36, No.2, p.p.1482-1492, 2021

[20] G. Xu, and V. Vittal, "Slow coherency based cutset determination algorithm for large power systems", IEEE Trans. on Power System, Vol. 25, No.2, p.p.877-884., 2010.

[21] Z. Wu and R. Leahy, "An optimal graph theoretic approach to data clustering: Theory and its application to image segmentation", IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol. 15, No. 11, pp. 101-113., 1993.

[22] J. Shi, J. Malic, "Normalized cuts and image segmentation", IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol. 22, No. 8, p.p. 888-905., 2000.

[۲۳] حسین‌پور م. پروین، ح. "انتخاب خوشه‌های اولیه به کمک الگوریتمهای هوشمند برای مشارکت در خوشه‌بندی ترکیب"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳، شماره ۲، صفحات ۱۶۳-۱۸۴، ۱۳۹۵.

[24] Z. Liu, and M. Barahona, "Graph-based data clustering via multi-scale community detection", Applied Network Science, Vol. 5, No. 3, 2020.

[25] J. Quiros-Tortos1, P. Wall, L. Ding and V. Terzija, "Determination of sectionalizing strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology", Electric Power System Research, Vol. 116, p.p. 381-390, 2014.

[26] T. L. Baldwin, L. Mili, and A. G. Phadke, "Ward-type Equivalents for Transient Stability Analysis", IFAC Proc. Vol. 25, No. 1, pp. 439–443, 1992.

[27] F. Znidi, H. Davarikiaa nd K. Iqbal, "Modularity clustering based detection of coherent groups of generators with generator integrity indices", IEEE Power & Energy Society, General Meeting , July 2017.

[28] J. Asumadu, E.A. Frimpong and P. Y. Okyere, "Real time prediction of coherent generator groups", Journal of Electrical Engineering, Vol. 16, No.3, 2016.

[29] P. Demetriou, L. Hadjidemetriou, A. Kyriacou, E. Kyriakides, and C. Panayiotou, "Real-Time Identification of Coherent Generator Groups", IEEE Eindhoven PwerTech Conference, July 2015..

[30] C. Jin, W. Li, L. Liu, P. Liu and X. Wu, "A Coherency Identification Method of Active Frequency Response Control Based on Support Vector Clustering for Bulk Power System", Energies, Vol. 12, No. 16, 2019.