مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور به کمک شبکه‌های بیزی

مجتبی الیاسی، حسین سیفی و محمودرضا حقی‌فام

چکیده: شبکه‌های بیزی به عنوان چارچوبی قدرتمند برای بررسی پدیده‌های احتمالاتی در بسیاری از مسایل دنیای واقعی کاربرد موفقیت‌آمیزی داشته اما در حوزه قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت ترکیبی به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. در مقایسه با روش‌های رایج، ارزیابی قابلیت اطمینان با شبکه‌های بیزی هم در مدل‌سازی و هم در تحلیل، قابلیت‌های افزوده‌ای فراهم می‌کند. از دیدگاه مدل‌سازی، بسیاری از فرضیات محدودکننده روش‌های رایج حذف می‌شود و از دیدگاه تحلیل، امکان انجام بسیاری از تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور فراهم می‌شود که در روش‌های رایج به ندرت در دسترس و به سختی قابل انجام است. در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر مجموعه‌های انقطاع حداقل برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان، ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور در سیستم‌های قدرت ترکیبی با شبکه‌های بیزی پیشنهاد شده است.

ابتدا روشی جدید برای تعیین مجموعه‌های انقطاع حداقل در سیستم قدرت ترکیبی ارائه شده است. بر مبنای مجموعه‌های انقطاع حداقل، داده‌های قابلیت اطمینان تجهیزات و ارتباط منطقی بین گره‌ها، ساختار و پارامترهای مدل بیزی برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی تعیین شده است. برای کاهش بار محاسباتی و کاربردپذیری روش برای سیستم‌های بزرگ، گره‌های واسط پیشنهاد و با مدل بیزی ترکیب شده است. با استفاده از مدل بیزی، تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور متعددی بر روی سیستم قدرت ترکیبی ارائه شده که برای مطالعات مختلف سیستم قدرت مفید بوده و در روش‌های رایج به سختی قابل انجام است. برای نمایش چگونگی استخراج مدل بیزی قابلیت اطمینان، روش پیشنهادی در شبکه RBTS به اجرا درآمده و برای اعتبارسنجی، نتایج آن با روش‌های دیگر مقایسه شده است. نتایج اجرای تحلیل‌های مختلف قابلیت اطمینان- محور در این شبکه بررسی شده و همچنین برای نمایش امکان‌پذیری در شبکه‌های بزرگ، روش پیشنهادی بر روی RTS اجرا شده است.

کلید واژه: **تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور، سیستم قدرت ترکیبی، شبکه‌های بیزی، مجموعه‌های انقطاع حداقل، مدل‌سازی قابلیت اطمینان.**

۱- مقدمه

"احتمال آن که یک سیستم، وظایف محوله‌اش را در یک دوره زمانی معلوم تحت شرایط محیطی مشخص، درست انجام دهد"، رایج‌ترین تعریف از قابلیت اطمینان است [۱] و [۲]. ارزیابی قابلیت اطمینان، در عمل به محاسبه شاخص‌های کمّی برای تشخیص عملکرد نسبی سیستم دلالت می‌کند و علاوه بر محاسبه شاخص‌ها، نیاز به انجام تحلیل‌های مختلفی از دیدگاه قابلیت اطمینان در سیستم است که در مطالعات مختلفی کاربرد دارند.

تاکنون روش‌های متعددی مانند روش مستقیم، جداسازی، کاهش شبکه، درخت خطا، درخت رویدادها، مجموعه‌های انقطاع/ اتصال حداقل، زنجیره مارکوف، شبیه‌سازی مونت کارلو و شبکه‌های عصبی برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت اطمینان در سیستم‌های مهندسی توسعه یافته [۳] و [۴] که بسیاری از این روش‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان در حوزه‌های مختلف سیستم‌های قدرت نیز کاربرد داشته‌اند [۵] تا [۱۱]. کاربرد روش‌های مختلف به مشخصات سیستم مورد مطالعه، قابلیت‌های روش و اهداف مطالعات بستگی دارد و روش واحدی که پاسخگوی همه نیازها باشد، وجود ندارد. از این رو تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان توسعه یافته و روش‌های جدیدی برای پوشش معایب روش‌های قبلی در حال توسعه است.

در دهه اخیر، شبکه‌های بیزی (BNs)[1] به ابزاری محبوب برای مدل‌سازی هر نوع مسأله آماری تبدیل شده است. همچنین به عنوان یک روش تحلیلی، استفاده از آن در ارزیابی قابلیت اطمینان نیز رشد چشم‌گیری داشته و در بسیاری از مسایل دنیای واقعی به کار رفته است [۱۲]. BN در مراجع مختلفی با روش‌های دیگر ارزیابی قابلیت اطمینان مقایسه شده و مزایای مهمی از آن نسبت به دیگر روش‌ها نشان داده شده که برخی از آنها عبارتند از: ترکیب منابع مختلف اطلاعات و نظریات کارشناسان، در نظر گرفتن محیط سیستم، توزیع‌های غیر نمایی، متغیرهای چندحالته و وابستگی اجزا، بررسی هم‌زمان متغیرهای گسسته و پیوسته، تقویت بازده محاسبات و ارزیابی دینامیکی قابلیت اطمینان [۱۳] تا [۱۹]. بنابراین بسیاری از فرضیات محدودکننده روش‌های رایج در شبکه بیزی حذف می‌شوند. به‌علاوه، شبکه بیزی، امکان انجام تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور مختلفی را فراهم می‌آورد که در مطالعات مختلف مفید بوده و در روش‌های دیگر ارزیابی قابلیت اطمینان، به ندرت دردسترس یا به سختی قابل انجام است.

با وجود استفاده گسترده از BN برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی در مراجع متعدد [۱۳] تا [۱۶] و [۱۹] و مزایای متعدد آن، در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت به ندرت مورد توجه بوده است. سیستم قدرت ترکیبی در تقسیم‌بندی سیستم‌های مهندسی در گروه شبکه‌های جریان قرار می‌گیرد، اما تفاوت‌هایی اساسی با شبکه‌های جریان دارد. اول این که در سیستم قدرت ترکیبی جریان خطوط از طریق روابط پخش بار تعیین می‌شود نه بر اساس ظرفیت خطوط. در ثانی، علاوه بر صفربودن جریان خالص در یک گره (قانون جریان کیرشهف)، قانون ولتاژ کیرشهف نیز در آن حاکم است و ثالثاً موفقیت یا خرابی در حالت مشخصی از سیستم، بعد از بارزدایی و بازچیدمان تولید و با استفاده از

این مقاله در تاریخ ۹ خرداد ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۲۶ شهریور ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

مجتبی الیاسی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: mojtaba.eliasi@gmail.com).

حسین سیفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

محمودرضا حقی‌فام، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: haghifam@modares.ac.ir).

1. Bayesian Networks, Belief Networks or Bayes Nets

Archive of SID
www.SID.ir

پخش بار بهینه تعیین می‌شود. این تفاوت‌ها، روش‌های موجود برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان در سیستم‌های مهندسی با BN را در سیستم قدرت ترکیبی بلااستفاده می‌نمایند.

اولین بار BN برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت چندناحیه‌ای مورد استفاده قرار گرفت که در آن، در هر ناحیه، تنها تولید و بار مدل شده و جریان خطوط بین‌ناحیه‌ای نه بر اساس روابط پخش بار، بلکه بر اساس قاعده‌ای سرانگشتی تعیین شده بود [۲۰]. روش مورد استفاده در [۲۰] برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان شبکه انتقال کاربرپذیر نیست زیرا به دلیل تأثیر متقابل متغیرهای شبکه انتقال بر یکدیگر، شاخه‌های BN دوجهته می‌شوند و این موضوع با اصول BN در تناقض است. در [۲۱] تا [۲۵] استفاده از BN برای ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه توزیع، یک پست یا یک تجهیز خاص پیشنهاد شده که به علت تفاوت‌های بنیادین شبکه توزیع و انتقال در ساختار و روابط فیزیکی حاکم، به هیچ وجه در سیستم قدرت ترکیبی قابل استفاده نیستند. در [۱۹] از BN نه برای ارزیابی قابلیت اطمینان، بلکه برای ارزیابی تأثیر یک پیشامد زنجیره‌ای خاص بر سیستم قدرت استفاده شده که در آن خطوط شبکه با یکدیگر سری یا موازی فرض شده است در حالی که این فرض معمولاً دور از واقعیت است. در [۲۶] و [۲۷] مدل بیزی شبکه قدرت با روش‌های آموزش با داده‌ها تعیین و اجزای سیستم قدرت بر اساس اهمیت آنها از دیدگاه قابلیت اطمینان رتبه‌بندی شده است. در روش پیشنهادی در این مراجع، اطلاعات آموزش با شبیه‌سازی مونت کارلو تولید شده که فرایندی زمان‌بر است و مدل دقیقی از ارتباط منطقی بین اجزا ارائه نمی‌دهد. به‌علاوه در این روش، مدل وابسته به احتمالات اجزای سیستم بوده و اجزای شبکه انتقال به علت احتمال خرابی کم از مدل حذف می‌شوند و در نظر گرفتن آنها در مدل، نیاز به الگوریتمی جداگانه دارد. همچنین قابلیت‌های مدل بیزی از دیدگاه تحلیل، کامل پوشش داده نشده است.

در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر مجموعه‌های انقطاع حداقل برای غلبه بر مشکلات مطرح شده است و عملی‌کردن شبکه‌های بیزی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان، ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور در سیستم‌های قدرت ترکیبی ارائه می‌شود. در مقایسه با روش‌های رایج، ارزیابی قابلیت اطمینان با روش ارائه‌شده موجب افزایش بازده محاسبات از دیدگاه سرعت و دقت انجام، حذف محدودیت‌های مدل‌سازی و فراهم‌شدن امکان انجام بسیاری از تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور می‌شود. نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

۱) توسعه روشی جدید برای تعیین مجموعه‌های انقطاع حداقل در سیستم قدرت ترکیبی.

۲) توسعه مدل بیزی برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی با تشکیل ساختار مدل بر اساس مجموعه‌های انقطاع حداقل و تعیین پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات قابلیت اطمینان تجهیزات و ارتباط منطقی بین اجزای ساختار مدل.

۳) تعریف گره‌های واسط و ترکیب آن با مدل بیزی برای کاهش بار محاسباتی و کاربردپذیری مدل در شبکه‌های بزرگ و واقعی.

۴) ارزیابی قابلیت اطمینان با مدل بیزی با سرعت و دقت مناسب (محاسبه LOLP سیستمی و گرهی) و ارائه تحلیل‌های مختلف قابلیت اطمینان- محور با آن، شامل ۱) انتشار عدم قطعیت/ خطای نرخ خرابی تجهیزات، ۲) تحلیل حساسیت قابلیت اطمینان، ۳) تعیین محل بهینه تجهیز افزونه/ جایگزین و ۴) استخراج جزئیاتی از نقش اجزا و زیرسیستم‌ها بر قابلیت اطمینان سیستم.

این مقاله به این صورت ادامه داده می‌شود: در بخش دوم، مبانی شبکه‌های بیزی به اختصار مرور می‌شود. در بخش سوم، نحوه استفاده از شبکه‌های بیزی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی شامل نحوه تعیین مجموعه‌های انقطاع حداقل سیستم قدرت ترکیبی، نحوه استخراج ساختار و پارامترهای مدل بیزی و چگونگی تعریف و استفاده از گره‌های واسط برای کاهش بار محاسباتی، ارائه می‌گردد. نحوه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور مختلفی که به واسطه مدل بیزی سیستم قدرت ممکن می‌شود در بخش چهارم ارائه می‌گردد. در بخش پنجم، روش پیشنهادی در شبکه RBTS، اجرا و نتایج شبیه‌سازی ارائه و با دیگر روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مقایسه می‌شود. همچنین برای نمایش امکان‌پذیری در شبکه‌های بزرگ، روش پیشنهادی بر روی شبکه RTS به اجرا درآمده است. در بخش ششم نتایج حاصل از این مقاله جمع‌بندی و ارائه می‌گردد.

۲- مقدمه‌ای بر شبکه‌های بیزی

شبکه بیزی که با عناوین دیگری مانند شبکه علی و گراف وابستگی احتمالاتی نیز از آن یاد می‌شود، در گروه گراف‌های غیر مدور جهت‌دار (DAG)[1] قرار می‌گیرد و کاربرد گسترده‌ای در بررسی عدم قطعیت‌ها در مسایل دنیای واقعی داشته است.

شبکه بیزی دارای دو بخش اصلی است: کیفی و کمی. بخش کیفی (ساختار) شامل دو بخش گره‌ها و شاخه‌های جهت‌دار است که به ترتیب متغیرهای سیستم و رابطه منطقی بین متغیرها را نشان می‌دهند. بخش کمی (پارامترها)، توزیع‌های احتمال شرطی یا حاشیه‌ای هستند که به هر گره تخصیص داده می‌شوند [۲۸]. اگر مقدار گره A مستقیماً مؤثر بر مقدار گره B باشد، گره A با یک شاخه جهت‌دار به گره B متصل می‌شود و گره A والد گره B و گره B فرزند گره A نامیده می‌شود. گره‌هایی که هیچ والدی (فرزندی) ندارند، گره‌های ریشه (برگ) نام دارند.

بخش کیفی با تعیین متغیرهای اصلی سیستم و کشف ارتباط علی- معمولی بین این متغیرها شکل می‌گیرد. برای تعیین بخش کمی به گره‌های ریشه، توزیع احتمال حاشیه‌ای و به سایر گره‌ها، بر اساس ویژگی مارکوفی و نوع رابطه منطقی بین گره‌های والدش، توزیع احتمال شرطی تخصیص می‌یابد [۲۹]. برای متغیرهای گسسته به جای توزیع احتمال شرطی، جدول احتمال شرطی (CPT)[2] تعیین می‌شود. ارتباط منطقی And و Or در شبکه بیزی در شکل ۱ آمده است.

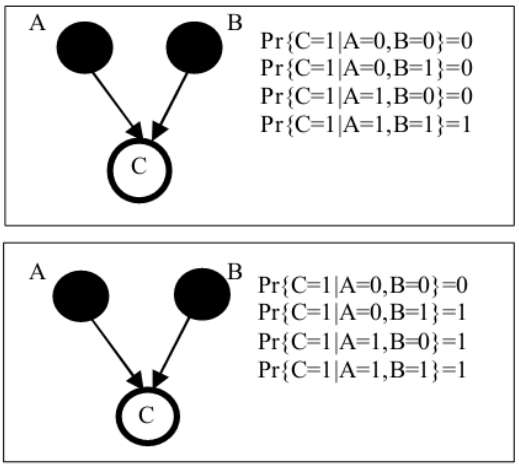
احتمال شرطی هر متغیر در صورت معلوم‌بودن مقادیر متغیرهای والدش از مقدار متغیرهایی که نوه‌اش نیستند، مستقل است (ویژگی مارکوف محلی) [۳۰]. با توجه به ویژگی مارکوف محلی و استقلال شرطی متغیرها، توزیع احتمال مشترک متغیر x بر اساس (۱) محاسبه می‌شود

$$P(x)=\prod_{x\in X}P(x|pa(x)) \qquad (۱)$$

که در آن $pa(x)$ والدین گره x هستند. فرایند استخراج در شبکه‌های بیزی به محاسبه توزیع احتمال پسین یک سری از متغیرهای مورد سؤال با معلوم‌بودن توزیع احتمال یک سری دیگر از متغیرها که شاهد نامیده می‌شود، اطلاق می‌شود.

1. Directed Acyclic Graph
2. Conditional Probability Table

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: ارتباط‌های منطقی And (بالا) و Or (پایین) در ساختار BN و CPT متناظرشان.

با توجه به توضیحات فوق با استفاده از شبکه بیزی و با داشتن توزیع احتمال مشترک هر سیستم پایه، توزیع احتمال شرطی و ساختار توپولوژیکی شبکه، می‌توان به مدل احتمالاتی کامل سیستم دست یافت. بنابراین استفاده از BN برای مدل‌سازی و ارزیابی احتمالاتی ارزیابی قابلیت اطمینان، ممکن و مفید خواهد بود [۲۰].

۳- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی با شبکه‌های بیزی

برای تشکیل مدل بیزی برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی دو بخش اصلی آن باید تعیین شود: ساختار و پارامترها. در مطالعات قابلیت اطمینان دو نوع دیاگرام تعریف می‌شود: فیزیکی و منطقی. دیاگرام فیزیکی همان ارتباط واقعی و دیاگرام منطقی، ارتباط منطقی بین اجزا است و بر اساس این ارتباط منطقی، موفقیت یا خرابی سیستم به صورت تابعی از حالات اجزا تعیین می‌شود. تعیین ساختار شبکه‌های بیزی، نیاز به دیاگرام منطقی سیستم دارد و برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی با شبکه‌های بیزی، ابتدا باید دیاگرام منطقی سیستم استخراج گردد. در این مقاله استفاده از مجموعه‌های انقطاع حداقل برای استخراج دیاگرام منطقی و تعیین ساختار شبکه بیزی برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی پیشنهاد شده است.

استفاده از مجموعه‌های انقطاع حداقل نسبت به تنها روش موجود (روش آموزش شبکه بیزی با داده‌های تولیدی توسط روش مونت کارلو در [۲۶] و [۲۷]) دارای ۳ مزیت است: استخراج دقیق دیاگرام منطقی قابلیت اطمینان سیستم، زمان‌بری کمتر به علت بررسی تعداد کمتری از حالات سیستم و بی‌تأثیری احتمال اجزای سیستم بر ساختار مدل بیزی. همچنین در محاسبه قابلیت اطمینان سیستم بر اساس مدل بیزی و مجموعه‌های انقطاع حداقل، به ازای هر مجموعه انقطاع حداقل، احتمال همه مجموعه‌های انقطاع مرتبط با آن نیز در محاسبات شاخص‌های احتمالاتی وارد می‌شود و دقت محاسبات در مقایسه با روش‌های رایج (مونت کارلو و شمارش حالات) به علت در نظر گرفته شدن تعداد حالات بیشتر، افزایش می‌یابد. هر یک از این مزایا در بخش‌های بعد تشریح خواهد شد.

برای تعیین پارامترهای مدل بیزی بر اساس ساختار تشکیل‌شده برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت، ابتدا باید توزیع حاشیه‌ای گره‌های ریشه تعریف شود و در ادامه بر اساس ترکیب‌های مختلف مقادیر گره‌های والد و رابطه علی- معلولی بین آنها، CPT برای هر یک از گره‌های شبکه تعیین گردد.

۳-۱ ساختار مدل بیزی قابلیت اطمینان

در این بخش ابتدا الگوریتمی برای تعیین مجموعه‌های انقطاع حداقل در سیستم قدرت ترکیبی ارائه می‌گردد و در ادامه، فرایند تشکیل ساختار شبکه بیزی برای قابلیت اطمینان این سیستم با استفاده از مجموعه‌های انقطاع حداقل تشریح می‌شود.

۳-۱-۱ شناسایی مجموعه‌های انقطاع حداقل

یافتن مجموعه‌های انقطاع حداقل (MCs)[1] در شبکه‌های کوچک با بررسی چشمی نیز امکان‌پذیر است اما در شبکه‌های بزرگ و پیچیده مانند سیستم قدرت ترکیبی، بسیار دشوار و گاهی غیر ممکن است. تاکنون روش‌های متعددی برای تعیین MC ها در سیستم‌های بزرگ و پیچیده معرفی شده که معمولاً بر مبنای اتصال هستند و قوانین حاکم بر سیستم قدرت را لحاظ نمی‌کنند. در برخی مراجع از روش‌های معمول سیستم‌های مهندسی برای تعیین MC ها در سیستم قدرت استفاده شده [۳۱] تا [۳۳] که این روش‌ها سیستم قدرت را مانند یک گراف معمولی در نظر می‌گیرند و کارایی لازم را ندارند. از این رو در این مقاله، روشی جدید برای تعیین MC های سیستم قدرت ترکیبی پیشنهاد شده است.

مجموعه انقطاع به مجموعه‌ای از اجزای سیستم اطلاق می‌گردد که حذف همه آنها از سیستم می‌تواند موجب از کار افتادن سیستم شود. مجموعه انقطاع حداقل، مجموعه انقطاعی است که هیچ زیرمجموعه‌ای از آن، یک مجموعه انقطاع نباشد. در سیستم قدرت ترکیبی، اجزای یک MC می‌تواند هر یک از تجهیزات شبکه تولید و انتقال یا عوامل درونی و بیرونی سیستم باشد که بتواند با نوع عملکرد خود، موجب از کار افتادن سیستم قدرت شود. از کار افتادگی در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی به شرایطی اطلاق می‌شود که قیود شبکه نقض شده و نیاز به بارزدایی در سیستم باشد.

فرض می‌شود که هر جزء سیستم قدرت ترکیبی دارای دو حالت بوده (خراب یا سالم) و خرابی آنها مستقل از یکدیگر است. حالت x_i برای i امین جزء سیستم که در اینجا واحد نیروگاهی یا خط انتقال است به این صورت تعریف می‌شود: $x_i = ۰$ (حالت نرمال) و $x_i = ۱$ (حالت خرابی). حالت سیستمی با N جزء با بردار $x = \{x_۱, x_۲, \ldots, x_N\}$ نمایش داده می‌شود که x_i می‌تواند ۰ یا ۱ باشد. برای تعیین این که حالت x دلالت بر موفقیت یا خرابی سیستم دارد، یک تابع ارزیابی (EF)[2] مناسب تعریف می‌گردد که در صورت از کار افتادگی سیستم، مقدار آن برابر با ۱ و در صورت موفقیت صفر می‌شود. با توجه به این که در سیستم قدرت ترکیبی، نیاز به بارزدایی، ملاک از کار افتادگی در حالت مشخصی از سیستم است، تابع ارزیابی به صورت یک بهینه‌سازی تعریف می‌شود. در این بهینه‌سازی، تولید نیروگاه‌ها و بار شین‌ها با هدف حداقل‌شدن قطع بار در شبکه و رعایت همه قیود شبکه تغییر می‌کند.

اولین گام برای تعیین MC انتخاب حداکثر مرتبه مورد نیاز است که مرتبه MC، تعداد اجزای آن است که باید از کار بیفتد تا موجب از کار افتادگی سیستم شوند. معمولاً خطوط شبکه انتقال دارای دسترس‌ناپذیری بسیار کوچکی هستند و از این رو تعیین MC تا مرتبه یک به علاوه کمترین مرتبه MC موجود، کافی است [۲] و [۳۴]. در شبکه انتقال قدرت معمولاً کمترین مرتبه MC ها، یک است و تعیین MC های خطوط انتقال تا مرتبه دو کافی است. برای در نظر گرفتن خروج هم‌زمان خطوط و

1. Minimal Cutsets
2. Evaluation Function

Archive of SID
www.SID.ir

نیروگاه‌های شبکه در سیستم قدرت ترکیبی و با توجه به بیشتربودن نرخ خروج اضطراری نیروگاه‌ها نسبت به دسترس‌ناپذیری خطوط انتقال، مجموعه‌های انقطاع حداقل برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان شبکه انتقال با BN تا مرتبه سه تعیین می‌گردد.

گام دوم، تشکیل تابع ساختار (SF)[1] سیستم است و برای تشکیل ماتریس SF از روش حالت‌شماری استفاده شده است. تابع ساختار یک سیستم با N جزء در حالتی که اجزای سیستم دوحالته باشد و MC ها تا مرتبه M مد نظر باشد، یک ماتریس دودویی با ابعاد $Q\times N$ است که Q از رابطه $Q=\sum_{i=1}^{M}\binom{N}{i}$ محاسبه می‌شود. ردیف j از ماتریس SF، برداری به صورت $x_j=\{x_{j1},x_{j2},\ldots,x_{jN}\}$ است که یک حالت از سیستم را نشان می‌دهد. ماتریس SF همه حالات خروج اجزای سیستم تا مرتبه M را در بر می‌گیرد. در ردیف ۱ تا $\binom{N}{1}$، همه ترکیب‌های خروج یک جزء و در ردیف $1+\sum_{i=1}^{k-1}\binom{N}{i}$ تا $\sum_{i=1}^{k}\binom{N}{i}$ (برای $1<k\le M$) همه ترکیب‌های خروج k جزء نشان داده شده است.

گام سوم، ارزیابی حالات ارائه‌شده از سیستم در هر ردیف از ماتریس SF برای مقداردهی به EF است. اگر در یک حالت از سیستم، مجموع تولید کمتر از بار باشد، سیستم نیاز به بارزدایی داشته و بدون انجام بهینه‌سازی، مقدار EF برابر با یک قرار داده می‌شود. در سطح HL-I MC ها همواره بر اساس اختلاف بار و تولید تعیین می‌شود که جزئیات آن در پیوست آمده و در غیر این صورت ارزیابی حالت با استفاده از پخش بار بهینه DC ارائه‌شده در (۲) انجام می‌شود. بهینه‌سازی به علت DC بودن معادلات در همه حالات سیستم همگرا خواهد بود

$$\begin{aligned}&\min \textstyle\sum_{i\in NC} W_i C_i\\ &\text{s.t.:}\\ &\sum_{i\in NG} PG_i+\sum_{i\in NC} C_i=\sum_{i\in NC} PD_i\\ &T=A(PG+C-PD)\\ &PG^{\min}\le PG\le PG^{\max}\\ &0\le C\le PD\\ &|T|\le T^{\max}\end{aligned} \qquad (۲)$$

که در بهینه‌سازی فوق T و A به ترتیب بردار توان جاری‌شده در خطوط و ماتریس نسبت بین این توان و توان تزریقی در حالت مورد مطالعه، PG و PD به ترتیب بردار توان خروجی نیروگاه‌ها و بار شین‌ها، $PG^{\min}$، $PG^{\max}$ و $T^{\max}$ به ترتیب بردار محدودیت‌های PG و T و در نهایت C، W_i، NC و NG به ترتیب بردار قطع بار، ضریب وزنی هر شین بار، مجموعه شین‌های نیروگاهی و مجموعه شین‌های بار هستند. اگر حالت بررسی‌شده موجب قطع بار در یک شین مشخص گردد، مقدار EF برای آن شین یک خواهد شد. در صورت نیاز به بارزدایی مقدار EF برای آن حالت برابر با یک و در غیر این صورت، صفر می‌شود.

در گام چهارم اگر مقدار EF برای حالت مورد بررسی برابر با یک شود، اجزای خراب در آن حالت به عنوان یکی از MC های سیستم معرفی می‌شود و دیگر ردیف‌های ماتریس SF که عناصر خراب در این MC در آنها نیز خراب فرض شده‌اند، از ماتریس SF حذف می‌گردد زیرا یک MC زیرمجموعه‌ای ندارد که خودش یک مجموعه انقطاع باشد. گام‌های سوم و چهارم برای همه حالات باقیمانده در ماتریس SF تکرار می‌شود تا همه MC های سیستم تا مرتبه انتخاب‌شده در گام اول تعیین شود.

برای تعیین شاخص‌های گرهی قابلیت اطمینان باید MC های مربوط به هر شین مشخص شود و بدین منظور با ارزیابی همه حالات موجود در SF، مجموعه‌های انقطاع کل سیستم و بار قطع‌شده شین‌ها در هر مجموعه انقطاع تعیین می‌شود. یک مجموعه انقطاع، در صورتی MC شین i خواهد بود که مقدار C_i (بار قطع‌شده در شین i) در آن بزرگ‌تر از صفر باشد و زیرمجموعه‌ای که در آن مقدار C_i بزرگ‌تر از صفر باشد، نداشته باشد. مقدار ضریب وزنی W_i در بهینه‌سازی، تأثیری بر MC های کل سیستم ندارد اما بر MC های شین‌ها اثرگذار است.

در این مقاله برای تعیین MC های سیستم قدرت ترکیبی، همه حالت‌های محتمل بررسی شده اما می‌توان از روش‌های دیگری مانند روش‌های ابتکاری، مونت کارلو یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین به عنوان موتور جستجوی حالات برای تعریف تابع ساختار بهره برد [۳۴] تا [۳۶]. این روش‌ها از لحاظ دقت و زمان محاسبات متفاوت هستند اما تأثیری در نتایج محاسبات ندارند.

۳-۱-۲ تشکیل ساختار BN با MC ها

با تعیین MC ها، دیاگرام منطقی سیستم قدرت ترکیبی تعیین می‌شود. متغیرها و ارتباطات علی- معلولی بین آنها برای مدل قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی در BN از دیاگرام منطقی استخراج می‌شود. متغیرهای اصلی سیستم، MC ها، اجزای تشکیل‌دهنده آنها، شین‌های شبکه و خرابی سیستم هستند. ارتباط علی- معلولی بین گره‌ها را دو قاعده کلی تعیین می‌کند: خراب یا سالم‌بودن اجزای موجود در یک MC، عملکرد یا خراب‌بودن آن MC را تعیین می‌کند و خراب یا سالم‌بودن MC، موفقیت یا از کار افتادگی سیستم و شین‌ها را مشخص می‌نماید.

بنابراین ساختار شبکه بیزی یک سیستم قدرت ترکیبی دارای سه سطح اصلی گره است که بر اساس نوع ارتباط علی- معلولی متغیرهای سیستم با شاخه‌ها به هم وصل می‌شوند: گره‌های مربوط به المان‌ها، گره‌های مربوط به MC ها و گره مربوط به کل سیستم. در صورت نیاز به محاسبه شاخص‌های گرهی، سطح گره‌های مربوط به شین‌ها نیز اضافه می‌شود.

سطح اول گره‌ها اجزای شبکه هستند که در MC های شناسایی‌شده وجود دارند و به هر جزء یک گره اختصاص می‌یابد. برای اجزایی که در چند MC حضور دارند نیز تنها یک گره در نظر گرفته می‌شود و همچنین ممکن است همه المان‌های سیستم قدرت ترکیبی در MC ها مشاهده نشود و در نتیجه نیازی به در نظر گرفتن گرهی برای آنها در ساختار بیزی وجود نباشد. این گره‌ها، گره‌های ریشه هستند.

سطح دوم، گره‌های مربوط به MC ها هستند که به هر MC یک گره در این سطح اختصاص داده می‌شود و گره‌های متناظر با المان‌های موجود در هر MC، والدین گره MC بوده و با شاخه به آن وصل می‌شود.

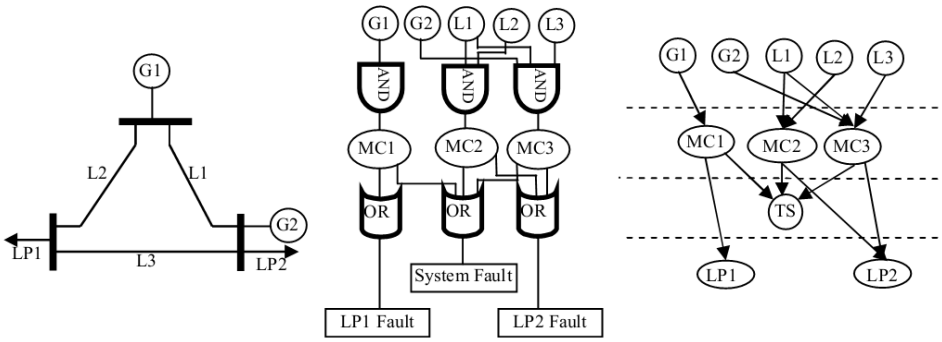
سطح سوم، گره سیستم است که همه گره‌های مربوط به MC ها با شاخه به این گره وصل می‌شود.

سطح چهارم در صورت نیاز به محاسبه شاخص‌های گرهی قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود و برای هر شین، یک گره در آن در نظر گرفته می‌شود. MC هایی که موجب قطع بار در یک شین می‌شوند، به گره متناظر با آن شین وصل می‌شوند. ممکن است برخی از MC های مربوط به شین‌ها در MC های سیستم وجود نداشته باشد. گره‌های مناسب برای این MC ها در سطوح اول و دوم در نظر گرفته می‌شود.

1. Structure Function

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲: دیاگرام فیزیکی، دیاگرام منطقی و ساختار شبکه بیزی سیستم نمونه (از چپ به راست).

	0	1
P(G1)	1-f1	f1
P(G2)	1-f2	f2
P(L1)	1-U1	U1
P(L2)	1-U2	U2
P(L3)	1-U3	U3

G1	P(MC1=0)	P(MC1=1)
0	1	0
1	0	1

MC1	P(LP1=0)	P(LP1=1)
0	1	0
1	0	1

L1	L2	P(MC2=0)	P(MC2=1)
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

MC2	MC3	P(LP2=0)	P(LP2=1)
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

G2	L1	L3	P(MC1=0)	P(MC1=1)
0	0	0	1	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1

MC1	MC2	MC3	P(MC1=0)	P(MC1=1)
0	0	0	1	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	0	1

شکل ۳: پارامترهای شبکه بیزی نمونه شکل ۲.

دیاگرام فیزیکی، دیاگرام منطقی و ساختار شبکه بیزی برای قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت نمونه ساده در شکل ۲ ترسیم شده است.

MC۱، MC۲ و MC۳ به ترتیب حاوی اجزای G۱، (L۱,L۲) و (L۱,L۳,G۲) هستند. MC۱ موجب قطع بار در شین LP۱ می‌شود. همچنین، MC و MC۳ موجب قطع بار در شین LP۲ می‌گردند.

۳-۲ پارامترهای مدل بیزی قابلیت اطمینان

در بخش کمی، توزیع احتمال شرطی گره‌ها بر اساس دو اصل زیر تعیین می‌شود:

۱) تنها وقتی همه المان‌های یک MC خارج از مدار باشند، آن MC می‌تواند موجب از کار افتادن سیستم شود (رابطه منطقی AND بین المان‌های یک MC).

۲) اگر تنها یکی از MC های سیستم از کار بیفتد، سیستم از کار می‌افتد (رابطه منطقی OR بین MC ها).

گره‌های ریشه‌ای که به واحدهای نیروگاهی مربوط هستند بر اساس نرخ خروج اجباری و گره‌های ریشه مربوط به خطوط شبکه انتقال بر اساس احتمال دسترس‌ناپذیری مقداردهی می‌شوند. توزیع احتمال شرطی گره‌های دیگر به شرح زیر تعیین می‌شود:

- توزیع احتمال شرطی گره‌های سطح دوم یعنی گره MC ها بر اساس رابطه AND بین گره‌های والد- یعنی گره‌های المان‌های موجود در هر MC- مقداردهی می‌شوند.
- توزیع احتمال شرطی یک گره شین بر اساس رابطه OR بین گره‌های والدش مقداردهی می‌شوند. گره‌های والد هر گره شین MC هایی هستند که منجر به قطع بار در آن شین می‌شوند.

اگر F۱، F۲، U۱، U۲ و U۳ به ترتیب نرخ خروج و دسترس‌ناپذیری اجزای G۱، G۲، L۱، L۲ و L۳ باشد، پارامترهای شبکه بیزی سیستم نمونه در شکل ۲ به صورت شکل ۳ در می‌آید.

۳-۳ کاهش بار محاسباتی با گره‌های واسط

در شبکه‌های بزرگ و واقعی به علت تعداد زیاد المان‌ها و MC ها، تشکیل شبکه بیزی معادل سیستم قدرت ترکیبی معمولاً غیر ممکن است. برای مثال در شبکه‌ای که ۵۰ مجموعه انقطاع حداقل داشته باشد، جدول احتمال شرطی گره سیستم، 2^{50} حالت خواهد داشت که باید بر اساس رابطه OR مقداردهی شود و انجام این امر از لحاظ عملیاتی و محاسباتی، حتی با نرم‌افزارهای قدرتمند ریاضی غیر ممکن است. برای حل این مشکل ایده گره‌های واسط پیشنهاد می‌شود.

در هر قسمت از ساختار شبکه که تعداد گره‌های والد بیش از حد باشد می‌توان از یک لایه میانی گره‌ها به عنوان گره‌های واسط بهره برد. لایه گره‌های واسط بین گره‌های والد و فرزند مذکور قرار می‌گیرند و به عنوان فرزند برای گره‌های والد و همچنین والد برای گره فرزند تعریف می‌شوند. تعداد این گره‌ها، دلخواه و کمتر از تعداد گره‌های والد اولیه است. رابطه منطقی گره‌های واسط کاملاً مشابه ارتباط منطقی گره‌های والد اولیه است و در صورت نیاز می‌توان از چند لایه گره واسط نیز بهره برد.

به عنوان مثال برای اتصال ۵۰ گره والد به یک گره فرزند می‌توان لایه‌ای از گره‌های واسط با ۱۰ گره بین آنها در نظر گرفت که ۵ گره از ۵۰ گره والد به هر یک از این گره‌ها وصل می‌شود و همه گره‌های واسط به گره فرزند متصل می‌شوند. الزامی برای تقسیم یکنواخت گره‌های والد اولیه بین گره‌های واسط وجود ندارد. حداکثر ابعاد توزیع احتمال شرطی گره‌ها از 2^{50} به 2^{10} کاهش می‌یابد. ساختار شبکه بیزی مثال فوق، قبل و بعد از افزودن لایه گره واسط در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجا که محدودیتی برای تعداد لایه‌های گره‌های واسط وجود ندارد، مدل BN برای شبکه‌های بزرگ با MC های بیشتر نیز به راحتی قابل تشکیل است.

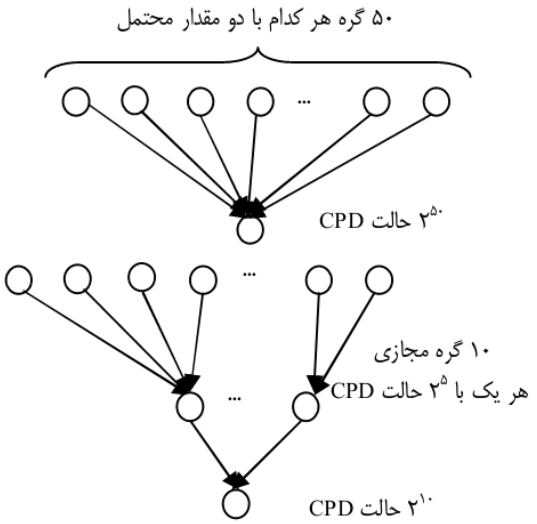
۴- ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور

هر چارچوب مدل‌سازی باید قادر به محاسبه کمیت‌های مفید برای تصمیم‌گیری باشد. در BN این کمیت‌ها همان توزیع‌های احتمال شرطی گره‌ها هستند که می‌توانند تحلیل‌های متنوعی از دیدگاه قابلیت اطمینان ارائه دهند. در این بخش، نحوه محاسبه شاخص احتمالاتی احتمال از دست رفتن بار (LOLP)[1] و چگونگی انجام تحلیل‌های مختلف قابلیت اطمینان- محور در مدل بیزی سیستم قدرت ترکیبی از دیدگاه احتمال از دست رفتن بار بیان می‌شود.

1. Loss of Load Probability

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴: ساختار شبکه بیزی نمونه قبل از افزودن لایه گره واسط (بالا) و بعد از افزودن لایه گره واسط (پایین).

برای استخراج کمیت‌های مختلف از BN از روش‌های استخراج استفاده می‌شود که امکان به روز رسانی احتمالات بر اساس مشاهدات مختلف از متغیرها را فراهم می‌کند. بررسی جزئی و دقیق این روش‌ها از اهداف این مقاله نیست. در [۱۲] تا [۱۵] و [۳۷] اطلاعات بیشتری پیرامون روش‌های مختلف استخراج ارائه گردیده و در این مقاله از روش درخت تقاطع استفاده شده که یکی از پرکاربردترین روش‌های استخراج بوده و برای انواع ساختارها و پارامترهای BN مناسب است.

۴-۱ ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل زمان و دقت محاسبات

شاخص LOLP سیستمی/ گرهی در طی فرایند انتشار رو به جلوی اطلاعات با محاسبه احتمال ۱ شدن (معادل با خرابی) گره سیستم/ شین، با فرض عدم وجود شاهد به دست می‌آید.

در روش پیشنهادی برای تعیین MC ها، در گام چهارم، حذف ردیف‌هایی از ماتریس SF که عناصر MC شناسایی‌شده در آنها خراب فرض شده موجب می‌شود تعداد حالات کمتری نسبت به روش‌های رایج برای شناسایی حالات خراب سیستم مورد ارزیابی با پخش بار بهینه قرار گیرد و سرعت محاسبات افزایش یابد. در تعیین MC های با مرتبه بالاتر نیز این قاعده حکم‌فرماست. برای قابل‌مقایسه بودن روش پیشنهادی با روش شمارش حالت، ماتریس SF باید با روش حالت‌شماری تشکیل گردد (مشابه روش پیشنهادی در این مقاله). هم‌چنین، برای قابل‌مقایسه بودن روش پیشنهادی با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ماتریس SF باید با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو تعیین شود.

نحوه محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از MC ها در (۳) ارائه شده که در آن P_f احتمال خرابی سیستم، $p(\bar{C}_i)$ احتمال خرابی مجموعه انقطاع حداقل i ام و m تعداد MC ها است

$$P_f = \sum_i p(\bar{C}_i) - \sum_{i<j} p(\bar{C}_i \cap \bar{C}_j) + \sum_{i<j<k} p(\bar{C}_i \cap \bar{C}_j \cap \bar{C}_k) - \ldots + (-1)^{m+1}. \sum_{i<j<k} p(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_2 \cap \ldots \cap \bar{C}_m) \quad (۳)$$

در روش‌های رایج برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت اطمینان، احتمال هر حالت خرابی سیستم به صورت حاصل‌ضرب احتمال حضور اجزای سالم و عدم حضور اجزای خراب محاسبه شده و در محاسبه شاخص‌ها وارد می‌شود [۳۸]. اما با تشکیل مدل بیزی بر اساس MC ها و با توجه به (۳) به ازای هر MC، احتمال همه مجموعه‌های انقطاع مرتبط با آن نیز به عنوان یک حالت خراب سیستم در محاسبات شاخص‌های احتمالاتی وارد می‌شود. در نتیجه دقت محاسبات در مقایسه با روش‌های رایج (مونت کارلو و شمارش حالات) به علت در نظر گرفته شدن تعداد حالات بسیار بیشتر افزایش می‌یابد. در شبکه‌های بزرگ به علت تعداد بیشتر اجزای سیستم و در نتیجه وجود تعداد بیشتری از مجموعه‌های انقطاع مرتبط با یک MC، این تأثیر بیشتر است.

در صورت افزایش تعداد اجزای شبکه یا مرتبه MC مورد نیاز، ابعاد ماتریس SF بسیار زیاد می‌شود و تشکیل آن از لحاظ زمان و حافظه مورد نیاز برای ذخیره مشکل می‌گردد که این مشکل در روش‌های رایج ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های بزرگ و با در نظر گرفتن سطوح بالای پیشامدها نیز وجود دارد. در این حالت برای حل مشکل حافظه مورد نیاز، ماتریس SF در گام دوم فرایند تعیین MC ها به طور کامل تشکیل نمی‌شود بلکه هر بار یکی از سطرهای ماتریس SF با این شرط که هیچ زیرمجموعه‌ای از عناصر از کار افتاده آن جزء MC های شناسایی‌شده نباشد، تولید شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شرط مذکور همانند قبل، زمان و دقت محاسبات را نسبت به روش‌های رایج بهبود می‌بخشد.

۴-۲ تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور

بعد از تشکیل مدل بیزی برای قابلیت اطمینان سیستم می‌توان از آن در کاربردها و تحلیل‌های مختلفی بهره جست. به دلیل زمان کوتاه فرایند استخراج، زمان مورد نیاز برای این تحلیل‌ها بسیار اندک است.

۱) انتشار عدم قطعیت/ خطای نرخ خرابی تجهیزات در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم: با استفاده از مدل بیزی به راحتی می‌توان تأثیر خطا و یا عدم قطعیت در پارامترهای مدل را بررسی نمود. در روش‌های رایج مانند روش‌های شمارش حالت یا مونت کارلو، این بررسی با تکرار محاسبات برای مقادیر مختلف پارامتر در محدوده خطا انجام می‌شود. در شبکه بیزی با قابلیت مدیریت هم‌زمان متغیرهای گسسته و پیوسته، نیازی به این روند تکرار نیست. در BN نرخ خرابی تجهیزات به صورت متغیر تصادفی با توزیع احتمال خطا یا عدم قطعیت متناظر مدل می‌شود و شاخص‌های قابلیت اطمینان نه به صورت یک مقدار معین، بلکه به صورت توزیع احتمال محاسبه شود.

۲) تحلیل حساسیت: هدف از تحلیل حساسیت، تعیین متغیرهای ورودی است که بیشترین سهم را در تغییرات احتمال خرابی سیستم دارند که عموماً با ایجاد اعوجاج در توزیع احتمال اصلی متغیرهای ورودی انجام می‌شود. با قابلیت BN در مدیریت هم‌زمان متغیرهای گسسته و پیوسته، حساسیت قابلیت اطمینان سیستم/ گره، با در نظر گرفتن اعوجاجی در احتمال خرابی تجهیزات به صورت توزیع یکنواخت و محاسبه توزیع احتمال LOLP سیستم/ گره به دست می‌آید. شایان ذکر است BN قابلیت در نظر گرفتن هر نوع از اعوجاج را داراست.

۳) تعیین محل بهینه تجهیز افزونه/ جایگزین: تأثیر هر گونه از افزونگی/ جایگزینی تجهیزات بر قابلیت اطمینان سیستم و شین، با به روز کردن توزیع احتمال گره مرتبط به آن تجهیز به آسانی قابل محاسبه است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱: MC های سیستم و MC های شین ۵ (خانه‌های خاکستری‌رنگ).

L۹	G۸G۱۱	G۲G۷G۹	G۵L۲L۶
G۲G۳	G۸L۱	G۲G۷G۱۰	G۵L۲L۸
G۲G۴	G۸L۲	G۲G۸G۹	G۶L۱L۶
G۲G۱۱	G۹G۱۱	G۲G۸G۱۰	G۶L۱L۸
G۳G۴	G۹L۱	G۲G۹G۱۰	G۶L۲L۶
G۳G۷	G۹L۲	G۲L۳L۴	G۶L۲L۸
G۳G۸	G۱۰G۱۱	G۲L۳L۵	G۷G۸G۹
G۳G۹	G۱۰L۱	G۲L۴L۵	G۷G۸G۱۰
G۳G۱۰	G۱۰L۲	G۳L۳L۴	G۷G۹G۱۰
G۳G۱۱	G۱۱L۱	G۳L۳L۵	G۸G۹G۱۰
G۴G۷	G۱۱L۲	G۳L۴L۵	L۱L۶L۸
G۴G۸	L۱L۲	G۴L۳L۴	L۲L۶L۸
G۴G۹	L۱L۳	G۴L۳L۵	L۳L۴L۵
G۴G۱۰	L۱L۴	G۴L۴L۵	L۳L۴L۶
G۴G۱۱	L۲L۳	G۵G۶L۱	L۳L۴L۷
G۷G۱۱	L۲L۴	G۵G۶L۲	L۳L۶L۷
G۷L۱	L۷L۸	G۵L۱L۶	L۴L۶L۷
G۷L۲	G۲G۷G۸	G۵L۱L۸	L۵L۶L۸

جدول ۲: توزیع احتمال حاشیه‌ای گره G۲ و L۹.

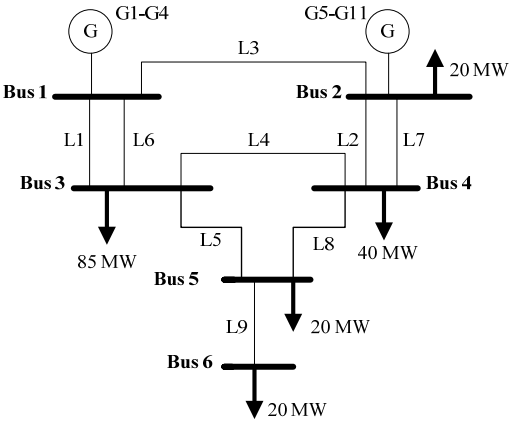
	۰	۱
P(G۲)	۰/۹۷۵	۰/۰۲۵
P(L۹)	۰/۹۹۸۸۶	۰/۰۰۱۱۴

۴) استخراج جزئیاتی از نقش اجزا و زیرسیستم‌ها بر قابلیت اطمینان سیستم:

- شناسایی نقاط ضعیف و بحرانی از دیدگاه سیستم/ شین (محاسبه احتمال ۱ شدن گره تجهیز با فرض ۱ بودن گره سیستم/ شین) و محاسبه شاخص‌های اهمیت [۲۶] و [۳۹].
- تعیین میزان تقویت قابلیت اطمینان سیستم/ شین با محاسبه شاخص LOLP سیستم/ شین با فرض قابل اعتماد بودن کامل یک تجهیز (محاسبه احتمال ۱ شدن گره سیستم/ شین با فرض ۰ بودن گره تجهیز).
- ارزیابی تأثیر خروج دائمی یک تجهیز بر قابلیت اطمینان سیستم/ شین که در مطالعات برنامه‌ریزی تعمیرات مفید است (محاسبه احتمال ۱ شدن گره سیستم/ شین با فرض ۱ بودن گره تجهیز).
- تعیین محتمل‌ترین آرایش خطای تجهیزات (محاسبه احتمال ۱ شدن گره چند تجهیز مختلف با فرض ۱ بودن گره سیستم/ شین).

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، روش پیشنهادی برای مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی با BN بر روی شبکه RBTS اجرا شده و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور روی آن انجام و دقت و سرعت محاسبات با روش شمارش حالات مقایسه می‌گردد. اطلاعات سیستم آزمون از [۳۸] دریافت شده و دیاگرام تک‌خطی شبکه RBTS در شکل ۵ آمده است. همچنین برای نمایش امکان‌پذیری در شبکه‌های بزرگ، روش پیشنهادی بر روی شبکه RTS به اجرا درآمده و برای انجام این مطالعات از جعبه‌ابزار Bayes Net نرم‌افزار Matlab استفاده شده است [۴۰].



شکل ۵: دیاگرام تک‌خطی شبکه RBTS.

جدول ۳: توزیع احتمال شرطی گره MC۸ با دو والد G۳ و G۹.

G۳	G۹	P(MC۸ = ۰)	P(MC۸ = ۱)
۰	۰	۱	۰
۰	۱	۱	۰
۱	۰	۱	۰
۱	۱	۰	۱

۵-۱ مدل‌سازی قابلیت اطمینان RBTS با BN

اولین مرحله از رسیدن به مدل بیزی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی در شبکه بیزی تعیین MC هاست. با توجه به توضیحات ارائه‌شده MC ها تا مرتبه ۳ در RBTS شناسایی می‌شود و این شبکه دارای ۲۰ تجهیز (۱۱ واحد نیروگاهی و ۹ خط انتقال) است.

ابعاد اولیه ماتریس ساختار این شبکه ۲۰×۱۳۵۰ است و با روش تشریح‌شده، ۷۲ MC تا مرتبه ۳ (۱ MC مرتبه ۱، ۳۴ MC مرتبه ۲ و ۳۷ MC مرتبه ۳) در این شبکه شناسایی می‌گردد که در جدول ۱ آورده شده است.

لایه اول گره‌های مدل بیزی شبکه RBTS، لایه اجزای سیستم بوده و ۱۹ گره دارد: ۱۰ گره برای واحدهای نیروگاهی G۲ تا G۱۱ و ۹ گره برای خطوط انتقال L۱ تا L۹. چون G۱ در هیچ یک از مجموعه‌های انقطاع حداقل دیده نمی‌شود، در این لایه گرهی برای آن لحاظ نمی‌گردد.

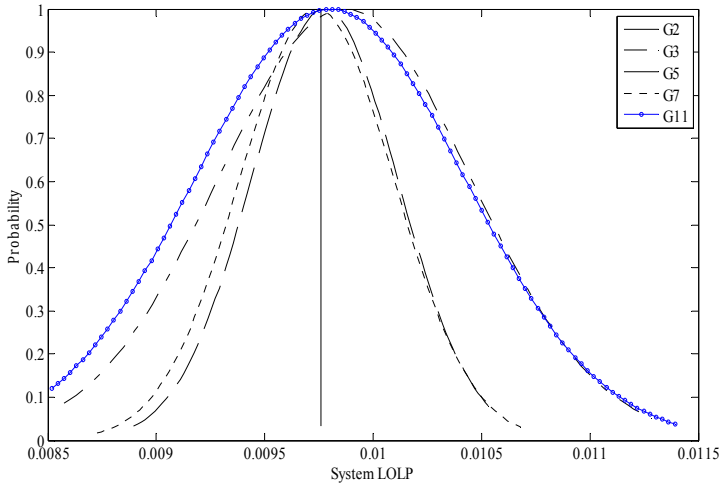
توزیع احتمال حاشیه‌ای در هر یک از این گره‌های ریشه بر اساس نرخ خروج اجباری/ دسترس‌ناپذیری تجهیز متناظر با آن گره تعریف می‌شوند. توزیع احتمال حاشیه‌ای گره‌های G۲ و L۹ به عنوان مثال در جدول ۲ آورده شده است.

لایه دوم شامل ۷۲ گره است که هر یک متناظر با یکی از MC های سیستم است (MC۱ تا MC۷۲). گره‌های لایه اول مطابق با جدول ۱ به عنوان والد به گره مربوط به خود در این لایه وصل می‌شوند. برای مثال گره L۹ به گره MC۱ و گره‌های G۲ و G۳ به گره MC۲ وصل می‌شود. توزیع احتمال شرطی هر یک از گره‌های این لایه بر اساس رابطه منطقی And بین اجزای تشکیل‌دهنده‌اش تعیین می‌شود، مثلاً توزیع احتمال شرطی MC۸ با دو والد G۳ و G۹ در جدول ۳ تعریف شده است.

با توجه به تعداد بسیار زیاد گره‌های MC، در لایه سوم ۸ گره واسط در نظر گرفته شده که به هر یک از گره‌های اول تا هفتم، ۱۰ گره MC و به گره هشتم، دو گره MC متصل شده و هر گره واسط بر اساس رابطه منطقی Or بین والدینش تعریف می‌شود. لایه چهارم یک گره سیستم است که ۸ گره واسط به عنوان والد به آن وصل می‌گردند و CPT برای

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶: تابع توزیع احتمال LOLP سیستم با در نظر گرفتن توزیع خطای نرمال در نرخ خروج اضطراری نیروگاه‌ها.

جدول ۴: نتایج محاسبه LOLP با دیگر روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان [۳۸].

روش	BN	GA sampling	Sequential sampling	State transition sampling
LOLP	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۵۳	۰/۰۰۹۸۹	۰/۰۰۹۸۵

این گره بر اساس رابطه منطقی Or بین والدینش تعریف می‌شود. با تعریف گره‌های مجازی، حداکثر حالات CPT از 2^{23} حالت که تشکیل آن غیر عملی است، به 2^{10} حالت کاهش یافته است.

با توجه به یکسان‌بودن روند محاسبه شاخص گرهی، شاخص LOLP به صورت نمونه در شین ۵ محاسبه می‌شود. تعداد MC ها برای شین ۵، ۵۸ عدد بوده که در جدول ۱ با رنگ خاکستری نشان داده شده است. در اینجا MC های شین ۵ زیرمجموعه‌ای از MC های کل سیستم است که این موضوع همواره برای MC های شین‌ها برقرار نیست.

۵-۲ ارزیابی قابلیت اطمینان RBTS با BN

با تعیین احتمال یک‌شدن گره سیستم، بدون وجود شاهد، شاخص LOLP سیستم محاسبه می‌شود که برابر با ۰/۰۰۹۷۶ است. این محاسبات (تعیین MC ها تا مرتبه ۳ و مدل‌سازی شبکه بیزی و استخراج نتایج از آن) ۱۶ ثانیه به طول می‌انجامد، در حالی که ارزیابی قابلیت اطمینان این سیستم با استفاده از روش شمارش حالت با در نظر گرفتن پیشامدهای تا درجه ۳ و با همان امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، ۲۹ ثانیه زمان می‌برد و LOLP خروجی آن ۰/۰۰۹۷۱ است. تعداد پخش بارهای بهینه مورد نیاز برای تعیین MC ها ۷۳۱ و با روش شمارش حالات ۱۳۵۱ است و به همین دلیل، ارزیابی قابلیت اطمینان با BN زمان کمتری می‌طلبد.

با توجه به این که در این مقاله برای تشکیل ماتریس SF در روند تعیین MC ها از روش حالت‌شماری استفاده گردیده، روش پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت اطمینان از لحاظ زمانی با روش شمارش حالت مقایسه شده است. در صورت استفاده از الگوریتم مونت کارلو برای تشکیل ماتریس SF، می‌توان روش پیشنهادی را با روش شبیه‌سازی مونت کارلو نیز مقایسه نمود. فارغ از نحوه تشکیل ماتریس SF با الگوریتم حالت‌شماری یا مونت کارلو، اجرای گام چهارم در فرایند تعیین MC ها، زمان محاسبات را نسبت به روش‌های شمارش حالت و مونت کارلو کاهش می‌دهد.

برای ارزیابی دقت شاخص محاسبه‌شده، نتایج محاسبات با BN با نتایج روش‌های دیگر که در [۳۸] ارائه و در جدول ۴ آورده شده، مقایسه گردیده و این مقایسه نشان می‌دهد که این روش از دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به مشخص‌نبودن فرضیات اولیه روش‌های مختلف در [۳۸] مقایسه جزئی امکان‌پذیر نیست اما روش پیشنهادی در این مقاله با فرض یکسان‌بودن فرضیات اولیه‌ای که در بخش ۴-۱ بیان شد، به علت در نظر گرفتن همه مجموعه‌های انقطاع مرتبط با یک MC در محاسبه شاخص احتمالاتی و در نتیجه با واردکردن تعداد حالات بیشتر نسبت به دیگر روش‌ها، دقت را افزایش می‌دهد.

مقدار محاسبه‌شده برای شاخص LOLP در شین ۵، ۰/۰۰۸۶ است. مقایسه این مقدار با مقدار محاسبه‌شده با روش GA sampling در [۳۸] (همان مقدار ۰/۰۰۸۶) دقت کاملاً قابل قبول روش پیشنهادی برای محاسبه شاخص‌های گرهی را نشان می‌دهد.

۵-۳ نتایج تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور در RBTS

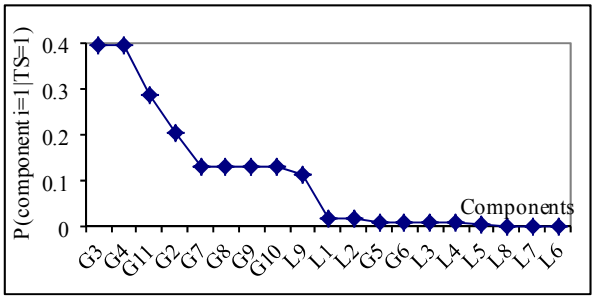
با توجه به شباهت تحلیل‌های مختلف از دیدگاه سیستم و شین، در این بخش تنها تحلیل‌ها از دیدگاه سیستم انجام شده است.

۱) انتشار عدم قطعیت/خطای نرخ خرابی تجهیزات: تأثیر وجود خطا در مقدار نرخ خرابی نیروگاه‌های G۲، G۳، G۵، G۷ و G۱۱ بر شاخص LOLP سیستم به آسانی محاسبه شده است. از لحاظ آماری، خطای اطلاعات معمولاً با توزیع نرمال مدل می‌شود. با فرض وجود خطایی با توزیع نرمال در مقدار نرخ خرابی نیروگاه‌های مذکور با مقدار متوسطی برابر با مقدار اصلی نرخ خروج اضطراری و انحراف استاندارد ۰/۰۰۵، توزیع احتمال شاخص LOLP سیستم محاسبه و در شکل ۶ آمده است.

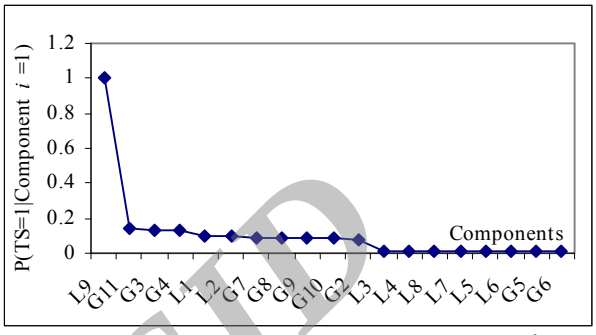
همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، انحراف معیار در G۳ و G۱۱ منجر به بیشترین انحراف معیار در مقدار LOLP شده‌اند و خطای در نظر گرفته شده در G۵ تأثیری بر مقدار LOLP نداشته است. مقدار میانگین برای همه توزیع‌های LOLP تقریباً با هم یکسان هستند زیرا مقدار میانگین برای هر توزیع خطای نرمال، مقدار اصلی نرخ خروج اضطراری فرض شده است. ارزیابی تأثیر عدم قطعیت‌های نرخ خرابی تجهیزات بر قابلیت اطمینان سیستم به نحو مشابهی و با در نظر گرفتن توزیع دلخواه برای عدم قطعیت‌ها قابل اجرا است.

۲) تحلیل حساسیت: برای تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن اعوجاجی به صورت توزیع احتمال یکنواخت برای احتمال خرابی نیروگاه‌های G۲، G۳، G۵، G۷ و G۱۱، توزیع احتمال شاخص LOLP سیستم محاسبه و پارامترهای آن در جدول ۵ نشان داده شده است. توزیع احتمال یکنواخت به صورت انحراف ٪۲۰± در مقدار احتمال خرابی نیروگاه‌ها فرض شده

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷: اجزای بحرانی و ضعیف RBTS شناسایی‌شده از دیدگاه سیستم.



شکل ۸: تأثیر خروج دائمی تجهیزات بر LOLP سیستم.

جدول ۵: پارامترهای توزیع یکنواخت LOLP سیستم.

نیروگاه‌ها	پارامترهای توزیع یکنواخت نرخ خروج اضطراری		پارامترهای توزیع یکنواخت LOLP سیستم	
	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا
G۳	۰/۰۲۴	۰/۰۳۶	۰/۰۰۹۰۳	۰/۰۱۰۴۸
G۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۲۴	۰/۰۰۹۲۳	۰/۰۱۰۲۸
G۲	۰/۰۲۰	۰/۰۳۰	۰/۰۰۹۴۰	۰/۰۱۰۱۱
G۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۹۵۴	۰/۰۰۹۹۸
G۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۶

است. با توجه به کران‌های بالا و پایین LOLP سیستم، قابلیت اطمینان سیستم دارای بیشترین حساسیت به تغییرات در احتمال خرابی G۳ است در حالی که به تغییرات در احتمال خرابی G۵ حساسیتی ندارد.

۳) محل بهینه تجهیز جایگزین/ افزونه: فرض شود قرار است خطی با دسترس‌ناپذیری ۰/۰۰۰۸ جایگزین یکی از خطوط شبکه شود به نحوی که بیشترین تقویت را در قابلیت اطمینان سیستم به وجود بیاورد.

با تغییر مقدار دسترس‌ناپذیری هر یک از خطوط در مدل BN به مقدار ۰/۰۰۰۸، LOLP سیستم در جدول ۶ ارائه شده است. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود، جایگزینی خط L۹ با خط جدید بیشترین بهبود را در مقدار LOLP به وجود می‌آورد و مقدار آن را به ۰/۰۰۹۴ کاهش می‌دهد. مقدار LOLP سیستم در صورت استفاده از خط جدید به عنوان تجهیز افزونه نیز در جدول ۶ به نمایش درآمده است. مجدداً خط L۹ بهترین محل برای تجهیز افزونه بوده و مقدار LOLP سیستم را به ۰/۰۰۸۹۷ کاهش می‌دهد.

۴) استخراج جزئیاتی از نقش اجزا و زیرسیستم‌ها: نقاط ضعیف و بحرانی سیستم RBTS با استفاده از مدل BN استخراج و در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود G۳ و G۴، بحرانی‌ترین اجزای سیستم از دیدگاه قابلیت اطمینان هستند. به جز نیروگاه‌های G۵ و G۶، همه نیروگاه‌ها از خطوط انتقال بحرانی‌تر هستند و همان طور که انتظار می‌رفت، خط L۹ بحرانی‌ترین خط انتقال است.

جدول ۶: نتایج محاسبه LOLP با جایگزینی/ افزونگی خط جدید در سیستم.

خط انتقال	LOLP در اثر جایگزینی	LOLP در اثر افزونگی
L۱	۰/۰۰۹۶۹	۰/۰۰۹۶۹
L۲	۰/۰۰۹۶۹	۰/۰۰۹۶۹
L۳	۰/۰۰۹۷۴	۰/۰۰۹۷۶
L۴	۰/۰۰۹۷۴	۰/۰۰۹۷۶
L۵	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۶
L۶	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۶
L۷	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۶
L۸	۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۰۹۷۶
L۹	۰/۰۰۹۴۶	۰/۰۰۸۹۷

جدول ۷: تقویت قابلیت اطمینان در صورت کاملاً قابل اطمینان بودن تجهیزات.

نیروگاه قابل اطمینان	LOLP سیستم	خط قابل اطمینان	LOLP سیستم
G۲	۰/۰۰۷۹	L۱	۰/۰۰۹۶
G۳	۰/۰۰۶۱	L۲	۰/۰۰۹۶
G۴	۰/۰۰۶۱	L۳	۰/۰۰۹۷
G۵	۰/۰۰۹۸	L۴	۰/۰۰۹۷
G۶	۰/۰۰۹۸	L۵	۰/۰۰۹۸
G۷	۰/۰۰۸۶	L۶	۰/۰۰۹۸
G۸	۰/۰۰۸۶	L۷	۰/۰۰۹۸
G۹	۰/۰۰۸۶	L۸	۰/۰۰۹۸
G۱۰	۰/۰۰۸۶	L۹	۰/۰۰۸۶
G۱۱	۰/۰۰۷۱		

میزان تقویت قابلیت اطمینان سیستم با فرض کاملاً قابل اطمینان بودن هر تجهیز محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است. در بین خطوط انتقال، خط L۹ به دلیل شعاعی‌بودن و در بین نیروگاه‌ها، G۳ و G۴ به دلیل داشتن بیشترین ظرفیت و بالاترین نرخ خروج اضطراری، بیشترین تأثیر را بر بهبود قابلیت اطمینان دارند.

تأثیر خروج دائمی یک تجهیز بر قابلیت اطمینان سیستم در شکل ۸ به نمایش درآمده است. خط L۹ یک MC مرتبه یک است و به همین دلیل خروج دائمی آن نمی‌تواند در برنامه تعمیرات لحاظ گردد زیرا موجب خرابی دائمی سیستم می‌گردد. بعد از L۹، خروج دائمی G۱۱ و G۳ بیشترین تأثیر را بر کاهش قابلیت اطمینان سیستم دارد.

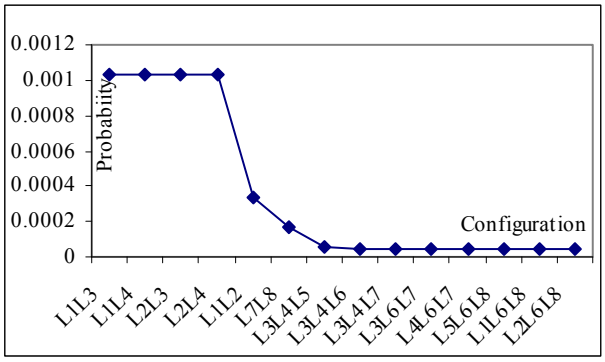
وقتی یک سیستم از کار می‌افتد حداقل یکی از MC هایش در تجهیزات از کار افتاده به چشم می‌خورد. در این مطالعه به صورت نمونه، محتمل‌ترین آرایش خروج خطوط در بین خطوطی که تشکیل یک MC را می‌دهند (به جز خط L۹ که محتمل‌ترین خروج در بین MC هاست) تعیین و در شکل ۹ نمایش داده شده است. خطوط L۱ تا L۴ در بین محتمل‌ترین آرایش‌ها به چشم می‌خورند که نشان از اهمیت این خطوط در پیشامدها دارد. البته BN قابلیت تعیین احتمال خروج هر آرایش دلخواهی از تجهیزات را داراست.

۵-۴ مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان RTS با BN

روش پیشنهادی در این مقاله به منظور بررسی امکان‌پذیری در شبکه‌های بزرگ، در شبکه انتقال RTS به اجرا درآمده و اطلاعات شبکه مذکور از [۴۱] دریافت شده است. برای سادگی، تنها حداکثر بار سالانه در مطالعات لحاظ شده اما روش ارائه‌شده محدودیتی برای اعمال تغییرات بار

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۹: محتمل‌ترین آرایش پیشامد در بین خطوط.

ندارد. همچنین به علت قابلیت اطمینان بالای شبکه RTS، بار شین‌های شبکه و ظرفیت نیروگاه‌ها ۱/۵ برابر شده است.

اولین گام، تعیین MC های شبکه RTS تا مرتبه ۳ است. شبکه RTS با ۷۰ تجهیز (۳۲ واحد نیروگاهی و ۳۸ خط و ترانسفورماتور انتقال) دارای ۸۵۰ مجموعه انقطاع حداقل تا مرتبه سوم است (مرتبه یک ۵، مرتبه دو ۱۱۳ و مرتبه سه ۷۳۲ عدد) که در جدول ۸ نشان داده شده است. برای ارائه MC ها، نیروگاه‌ها و خطوط به ترتیب ارائه‌شده در [۴۱] شماره‌گذاری شده‌اند (نیروگاه‌ها G۳۲ – G۱ و خطوط انتقال L۳۸ – L۱).

زمان صرف‌شده برای تشکیل مدل BN و اجرای فرایند استخراج بسیار کم است [۲۶] و زمان اصلی، صرف تعیین MC ها می‌شود و برای تعیین MC ها تا مرتبه سوم از مجموع ۵۷۲۲۵ حالت محتمل سیستم، ۳۹۵۶۷ حالت ارزیابی شده است. در روش شمارش حالت و با در نظر گرفتن پیشامدها تا درجه ۳، همه این ۵۷۲۲۵ حالت باید مورد ارزیابی قرار گیرد، بنابراین روش پیشنهادی در این مقاله زمان کمتری برای انجام محاسبات می‌طلبد. در حالت کلی برای کمترکردن تعداد حالات مورد ارزیابی در مطالعات قابلیت اطمینان، معمولاً قید حداقل احتمال وقوع حالت فرض می‌شود اما در این مطالعات برای بررسی و مقایسه دقیق روش‌ها، این قید لحاظ نشده است. با استفاده از MC های تعیین‌شده، مدل بیزی قابلیت اطمینان سیستم RTS بر اساس روند ارائه‌شده در مقاله تشکیل می‌شود.

با توجه به تعداد بسیار زیاد MC نیاز به تعریف دو سطح از گره‌های واسط بین لایه MC ها و گره سیستم است که برای اولین لایه ۸۵ گره و برای لایه دوم ۹ گره در نظر گرفته شده است. هیچ محدودیتی در تعداد لایه‌های گره واسط وجود ندارد و در نتیجه می‌توان مدل BN هر شبکه‌ای با هر ابعادی را با این روش تشکیل داد.

مقدار شاخص LOLP به دست آمده از مدل BN ساخته‌شده ۰/۱۳۵۵۸ است. با روش شمارش حالت و با در نظر گرفتن همه پیشامدها تا درجه ۳، مقدار این شاخص برابر با ۰/۰۹۷۴۲ به دست می‌آید که نشان از دقت کمتر این روش نسبت به روش پیشنهادی، به علت در نظر گرفتن تعداد حالات کمتر دارد.

با تشکیل مدل بیزی قابلیت اطمینان RTS به سادگی و به نحو مشابهی با آنچه برای RBTS ارائه شد، تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور قابل اجرا و بررسی است و بزرگی و کوچکی شبکه تأثیری بر نحوه انجام آن ندارد.

۶- جمع‌بندی

شبکه بیزی یکی از ابزارهای قدرتمند برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان است که دارای قابلیت‌های افزوده‌ای هم در سطح مدل‌سازی و هم در سطح تحلیل نسبت به روش‌های دیگر است. در این مقاله، روشی جامع مبتنی بر مجموعه‌های انقطاع حداقل برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی با شبکه بیزی پیشنهاد شده است. ابتدا روشی جدید برای تعیین مجموعه‌های انقطاع حداقل در این سیستم ارائه گردیده که این روش علاوه بر در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص سیستم قدرت نسبت به دیگر شبکه‌های جریان و ارائه مدل بهتری از دیاگرام منطقی سیستم، ساختار شبکه بیزی را از مقادیر احتمال خرابی اجزای سیستم مستقل می‌کند. برای کاهش بار محاسباتی و امکان‌پذیری استفاده از روش پیشنهادی در شبکه‌های بزرگ، گره‌های واسط پیشنهاد و با مدل بیزی ترکیب شده است. ارزیابی قابلیت اطمینان با این روش، به علت ارزیابی تعداد حالات کمتر سیستم در فرایند مدل‌سازی و در نظر گرفتن تعداد حالات خرابی بیشتر در فرایند ارزیابی، موجب بهبود سرعت و دقت محاسبات نسبت به روش‌های رایج می‌گردد. در شبکه‌های آزمون مختلف RTS و RBTS این موضوع بررسی و به اثبات رسیده است.

مدل بیزی پیشنهادی در این مقاله برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی علاوه بر ارزیابی قابلیت اطمینان با دقت و سرعت مناسب نسبت به روش‌های دیگر، قادر به انجام تحلیل‌های قابلیت اطمینان مختلفی است که در مطالعات مختلف سیستم قدرت کاربرد دارد و در روش‌های دیگر به ندرت در دسترس و به سختی قابل انجام است. این تحلیل‌ها عبارتند از: ۱) انتشار عدم قطعیت/ خطای نرخ خرابی تجهیزات، ۲) تحلیل حساسیت قابلیت اطمینان، ۳) تعیین محل بهینه تجهیز افزونه/ جایگزین و ۴) استخراج جزئیاتی از نقش اجزا و زیرسیستم‌ها بر قابلیت اطمینان سیستم. نحوه انجام هر یک از این تحلیل‌ها ارائه و در شبکه آزمون اجرا و نتایج بررسی شده است.

امکان‌پذیری اجرای روش پیشنهادی در شبکه‌های بزرگ، با استخراج مدل بیزی بر مبنای MC ها و ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه RTS بررسی شده و امکان‌پذیری روش، سرعت و دقت مناسب آن به اثبات رسیده است. عدم وجود محدودیت در تعریف تعداد لایه‌های گره واسط و امکان تجزیه و ترکیب مجدد شبکه بیزی بر اساس رابطه منطقی گره‌ها، استفاده از آن را برای هر شبکه‌ای هموار می‌سازد.

پیوست

برای استفاده از روش پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح تولید که در آن واحدهای نیروگاهی و بارها روی یک شین مدل می‌شود و شبکه انتقال در نظر گرفته نمی‌شود، تنها نیاز به اعمال یک تغییر است: در روند تعیین MC ها در سطح تولید نیازی به اجرای پخش بار بهینه برای ارزیابی حالت سیستم نیست و حالتی که بار از مجموع تولید نصب‌شده بیشتر باشد، حالت خراب سیستم به حساب می‌آید. بقیه مراحل تعیین MC ها، تشکیل ساختار و پارامترهای BN، ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل‌های قابلیت اطمینان- محور، مشابه سیستم قدرت ترکیبی است.

برای مثال، مدل پیشنهادی در شبکه تغییریافته تولید RTS به اجرا درآمده است. در این شبکه ۲۵۲ مجموعه انقطاع حداقل تا مرتبه ۳ (مرتبه دو ۲۰ و مرتبه سه ۲۳۲ عدد) شناسایی شده که تعداد کل حالات سیستم با در نظر گرفتن پیشامدها تا درجه سه، ۵۴۸۸ حالت است که برای یافتن MC ها، ۴۹۶۹ حالت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نیروگاه‌های G۱، G۲، G۵ و G۶ در هیچ یک از MC ها ظاهر نمی‌شوند که به دلیل ظرفیت اندک و قابل جبران آنها است. برای تشکیل مدل بیزی این سیستم، دو لایه گره واسط با ۲۶ و ۶ گره تعریف شده است. شاخص قابلیت اطمینان LOLP در سیستم مورد مطالعه برابر با ۰/۱۰۳۷۵ است. با بررسی تمام حالات سیستم تا پیشامدهای درجه ۳، مقدار LOLP ۰/۰۷۳۳۴ به دست

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۸: MCهای مرتبه اول و دوم در سیستم RTS.

L۵	G۴G۲۳	G۸L۱	G۱۳G۳۲	G۲۲G۳۰	G۳۲L۲۵	L۱۵L۱۶
L۷	G۴L۸	G۸L۸	G۱۳L۱۸	G۲۲G۳۱	G۳۲L۲۶	L۱۵L۱۷
L۱۰	G۴L۱۶	G۸L۱۶	G۱۳L۲۱	G۲۲G۳۲	G۳۲L۲۸	L۱۵L۱۸
L۱۱	G۴L۱۷	G۸L۱۷	G۱۳L۲۲	G۲۲L۲۳	G۳۲L۲۹	L۱۵L۲۳
L۲۷	G۴L۱۸	G۸L۱۸	G۱۴G۲۲	G۲۲L۳۶	L۱L۸	L۱۶L۱۷
G۳G۷	G۴L۲۳	G۸L۲۳	G۱۴G۲۳	G۲۲L۳۷	L۳L۹	L۱۷L۱۸
G۳G۸	G۷G۸	G۱۲G۱۳	G۱۴G۳۲	G۲۳G۳۰	L۳L۱۶	L۱۷L۲۳
G۳G۲۲	G۷G۲۲	G۱۲G۱۴	G۱۴L۱۸	G۲۳G۳۱	L۳L۱۷	L۱۸L۲۰
G۳G۲۳	G۷G۲۳	G۱۲G۲۲	G۱۴L۲۱	G۲۳G۳۲	L۴L۸	L۱۸L۲۱
G۳L۸	G۷L۱	G۱۲G۲۳	G۱۴L۲۲	G۲۳L۲۳	L۸L۱۶	L۱۸L۲۳
G۳L۱۶	G۷L۸	G۱۲G۳۲	G۲۰G۲۲	G۲۳L۳۶	L۸L۱۷	L۱۹L۲۳
G۳L۱۷	G۷L۱۶	G۱۲L۱۸	G۲۰G۲۳	G۲۳L۳۷	L۱۲L۱۳	L۲۰L۲۱
G۳L۱۸	G۷L۱۷	G۱۲L۲۱	G۲۰G۳۲	G۳۰G۳۲	L۱۲L۱۶	L۲۰L۲۳
G۳L۲۳	G۷L۱۸	G۱۲L۲۲	G۲۱G۲۲	G۳۱G۳۲	L۱۲L۱۷	L۲۱L۲۲
G۴G۷	G۷L۲۳	G۱۳G۱۴	G۲۱G۲۳	G۳۲L۱۸	L۱۴L۱۵	L۲۱L۲۳
G۴G۸	G۸G۲۲	G۱۳G۲۲	G۲۱G۳۲	G۳۲L۲۳	L۱۴L۱۶	L۲۲L۲۳
G۴G۲۲	G۸G۲۳	G۱۳G۲۳	G۲۲G۲۳	G۳۲L۲۴	L۱۴L۱۷	

می‌آید. در این حالت نیز بنا به دلایل تشریح‌شده در بخش ۴-۱، سرعت و دقت روش اعمالی نسبت به روش شمارش حالت مناسب‌تر است

مشابه با روش‌های دیگر ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح تولید، می‌توان با تجمیع واحدهای نیروگاهی یکسان در مدل BN از حجم محاسبات کاست.

مراجع

[1] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd Edition, Springer, 1992.

[2] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd Edition, Plenum Press, 1996.

[3] B. S. Dhillon, Reliability, Quality, and Safety for Engineers, CRC Press, 2005.

[4] H. Pham, Handbook of Reliability Engineering, Springer, 2003.

[5] R. Billinton, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation," *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. 91, no. 2, pp. 649-660, Mar./Apr. 1972.

[6] IEEE Subcommittee on the Application of Probability Methods Power System Engineering Committee, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1971-1977," *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. 97, no. 6, pp. 2235-2242, Nov./Dec. 1978.

[7] R. A. Allan, R. Billinton, and S. H. Lee, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1977-1982," *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. 103, no. 2, pp. 275-282, Feb. 1984.

[8] R. A. Allan, R. Billinton, S. M. Shahidehpour, and C. Cingh, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1982-1987," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 1555-1564, Nov. 1988.

[9] R. A. Allan, R. Billinton, A. M. Breipohl, and C. H. Grigg, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1987-1991," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 41-49, Feb. 1994.

[10] R. A. Allan, R. Billinton, A. M. Breipohl, and C. H. Grigg, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1992-1996," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 51-57, Feb. 1999.

[11] R. Billinton, M. Fotuhi - Firuzabad, and L. Bertling, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1996-1999," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 595-602, Nov. 2001.

[12] D. Heckerman, "A tutorial on learning with Bayesian networks," *Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research*, pp. 301-354, Mar. 1995.

[13] L. Portinale and A. Bobbio, "Bayesian networks for dependability analysis: an application to digital control reliability," in *Proc. 15th Uncertainty in Artificial Intelligence Conf.*, pp. 551-558, San Francisco, 1999.

[14] A. Bobbio *et al.*, "Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks," *Reliab. Eng. Syst. Safety*, vol. 71, no. 3, pp. 249-260, Mar. 2001.

[15] T. Koski and J. M. Noble, *Bayesian Networks: an Introduction*, Wiley Series in Probability and Statistics, 2009.

[16] J. G. Torres-Toledan and L. E. Sucar, "Bayesian networks for reliability analysis of complex systems," in *Proc. 6th Ibero-American Conf. on AI*, pp. 195-206, Berlin, 1998.

[17] C. Simon and P. Weber, "Evidential networks for reliability analysis and performance evaluation of systems with imprecise knowledge," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 58, no. 1, pp. 69-87, Mar. 2009.

[18] B. R. Cobb, R. Rumi, and A. Salmeron, *Bayesian Network Models with Discrete and Continuous Variables*, Advances in Probabilistic Graphical Models, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2007.

[19] D. Codetta - Raiteri *et al.*, "A dynamic Bayesian network based framework to evaluate cascading effects in a power grid," *Eng. Appl. Artif. Intel.*, vol. 25, no. 4, pp. 683-697, Jun. 2012.

[20] D. C. Yo, T. C. Nguyen, and P. Haddawy, "Bayesian network model for reliability assessment of power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 426-432, May 1999.

[21] H. Limin, Z. Yongli, and F. Gaofeng, "Reliability assessment of power systems by Bayesian networks," in *Proc. International Conf. Power System Technology*, vol. 2, pp. 876-879, Kunming, China, 13-17 Oct. 2002.

[22] J. Hu *et al.*, "Reliability assessment of power systems based on element time sequential by Bayesian networks," in *Proc. 3rd Int. Conf. Innovative Computing Information and Control*, vol. 2, p. 579, Dalian, China, 18-20 Jun. 2008.

[23] Z. Yongli, H. Limin, Z. Liguo, and W. Yan, "Bayesian network based time-sequence simulation for power system reliability assessment," in *Proc. Int. Conf. Artificial Intelligence*, pp. 271-277, Atizapan de Zaragoza, Spain, 27-31 Oct. 2008.

[24] H. Lihua, H. Chenwei, W. Hui, and H. Limin, "Assessment of distribution system reliability based on Bayesian network and time sequence simulation," in *Proc. 6th Int. Conf. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, vol. 2, pp. 481-486, Tianjin, China, 14-16 Aug. 2009.

[25] S. Zhao, H. Wang, and D. Cheng, "Power distribution system reliability evaluation by D-S evidence inference and Bayesian network method," in *Proc. 11th IEEE Int. Conf. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS'10*, vol. 2, pp. 654-658, Singapore, 14-17 Jun. 2010.

[26] T. Daemi, A. Ebrahimi, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Constructing the bayesian network for components reliability importance ranking

Archive of SID

www.SID.ir

in composite power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 474-480, Dec. 2012.
[27] T. Daemi and A. Ebrahimi, "Detailed reliability assessment of composite power systems considering load variation and weather conditions using Bayesian network," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 305-317, Oct. 2012.
[28] H. Langseth and L. Portinale, "Bayesian networks in reliability," *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, vol. 92, no. 1, pp. 92-108, Dec. 2007.
[29] R. E. Neapolitan, *Learning Bayesian Networks*, Pearson Prentice Hall, 2004.
[30] J. Pearl, Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, Morgan Haufmann Publishers, 1988.
[31] J. Abbasi, N. Moslemi, and A. Rabiee, "A new algorithm for enumeration of minimum cutsets of graph by branch addition," in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exhibition: Asia and Pacific*, 6 pp., Dalian, China, 2005.
[32] J. Cai *et al.*, "The application of the minimum cutsets in reliability evaluation of power transmission and transformation system," *Adv. Mater. Res.*, vol. 463-464, pp. 1175-1181, Feb. 2012.
[33] A. Gaun, H. Renner, and G. Rechberger, "Fast minimal cutset evaluation in cyclic undirected graphs for power transmission systems," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, 8 pp., Bucharest, Romania, 28 Jun.-2 Jul. 2009.
[34] C. M. Rocco and M. Muselli, *A Machine Learning Algorithm to Estimate Minimal Cut and Path Sets from a Monte Carlo Simulation*, Advances in Probabilistic Graphical Models, Probabilistic Safety Assessment and Management, Springer-Verlag, 2004.
[35] J. Y. Lin and C. E. Donaghey, "A Monte Carlo simulation to determine minimal cut sets and system reliability," in *Proc. Reliability and Maintainability Symp.*, pp. 246-249, Atlanta, GA, US, 26-28 Jan. 1993.
[36] I. Helal, "A heuristic-based approach for enumerating the minimal path sets in a distribution network," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 5 pp., Tampa, FL, US, 24-28 Jun. 2007.
[37] F. V. Jensen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer-verlog, 2001.
[38] N. A. Samaan, *Reliability Assessment of Electrical Power Systems Using Genetic Algorithms*, Doctor of Philosophy Dissertation, Dept. Elect. Eng., Texas A&M University, 2004.
[39] J. E. Ramirez-Marquez and D. W. Coit, "Composite importance measures for multi-state systems with multi-state components," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 54, no. 3, pp. 517-529, Sep. 2005.
[40] K. P. Murphy, "The Bayes net toolbox for Matlab," *Computing Science and Statistics Inference*, vol. 33, pp. 331-350, 2001.
[41] IEEE Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "The IEEE reliability test system 1996," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, Aug. 1992.

مجتبی الیاسی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش سیستم‌های قدرت، به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ از دانشگاه شاهد و دانشگاه تربیت مدرس و در مقطع دکتری در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است. ایشان در حال حاضر در دانشگاه آزاد واحد شرق (قیام‌دشت) مشغول تدریس است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، قابلیت اطمینان، و بازار برق.

حسین سیفی در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز و در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه یومیست منچستر در کشور انگلستان دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۶۸ تاکنون به‌عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول بوده و هم‌اکنون دارای جایگاه استاد تمام می‌باشد. ایشان در این سال‌ها علاوه بر انجام تحقیقات علمی دارای سوابق و مسئولیت‌هایی از جمله رئیس دانشکده مهندسی و معاون پژوهشی دانشگاه بوده‌اند و هم‌اکنون رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان موضوعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت، بازار برق و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

محمودرضا حقی‌فام تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری برق به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ از دانشگاه تبریز، تهران و تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قابلیت اطمینان، اتوماسیون توزیع برق و بازار برق.

Archive of SID

www.SID.ir