مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال نهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷؛ ص ۴۶۶-۴۶۱

پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر در شبکه انتقال برق ایران بر اساس تحلیل پیوند

علیرضا شاهپری[۱]، محمد خوانساری[۲*]، علی معینی[۳]
۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، ۳- استاد، دانشگاه تهران
(دریافت: ۹۶/۰۴/۲۸، پذیرش: ۹۶/۰۸/۱۲)

چکیده

اخیراً تحلیل نقاط آسیب‌پذیر شبکه انتقال برق به عنوان یکی از شبکه‌های زیرساختی مورد توجه ویژه قرارگرفته است. به خصوص پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر شبکه می‌تواند در مدیریت بحران در شبکه مؤثر باشد. در مطالعات قبلی پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر شبکه انتقال برق مبتنی بر نظریه علوم شبکه، اغلب شبکه را بدون جهت در نظر گرفته اند. در این مقاله شبکه انتقال برق، جهت دار بررسی شده و از الگوریتم تحلیل لینک وزن‌دار Pagerank برای شناسایی نقاط آسیب پذیر شبکه استفاده شده است. مزیت اصلی این روش کاهش زمان محاسبات و تطبیق نتایج با اطلاعات مراکز دیسپاچینگ است. با مدل سازی بخشی از شبکه انتقال برق ایران در سطح ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت، همبندی شبکه و نقاط آسیب‌پذیر آن با این روش پیش‌بینی شده است. نتایج و دستاوردهای می‌تواند توسط برنامه‌ریزان و مدیران شبکه انتقال برق در جهت بهبود مدیریت، امنیت و توسعه شبکه مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: علوم شبکه، شبکه انتقال برق، شبکه‌های وزن‌دار، نقاط آسیب‌پذیر، الگوریتم PageRank

Prediction of Vulnerability in Iran's Power Grid by Link Analysis

A. R. Shahpari, M. Khansari*, A. Moeini
University of Tehran
(Received: 19/07/2017; Accepted: 03/11/2017)

Abstract

Recently, analysis of the vulnerable points of power grid as a vital national infrastructure network has received particular attention. Specifically, correction or prediction of vulnerable points can be effective in power grid crisis management. In most previous studies, prediction of the vulnerable points was based on the theory of network science and dealt with the power grid of no direction. In this paper, the power grid of a certain direction has been investigated and PageRank Weighted link analysis has been adopted to detect related vulnerable points. The major advantage of this method lays in shortening the calculation time and in yielding results that are in conformity with the Dispatching- Center's own computations. By modeling a fragment of the Iranian power grid at 400 and 230 KV, connectivity and vulnerable points are predicted. The obtained results following this innovative approach could be used by the power grid decision makers and managers to ameliorate the network management, security and development.

Keywords: Network Science, Power Grid, Directed Network, Vulnerability, Pagerank Algorithm

*Corresponding Author E-mail: m.khansari@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

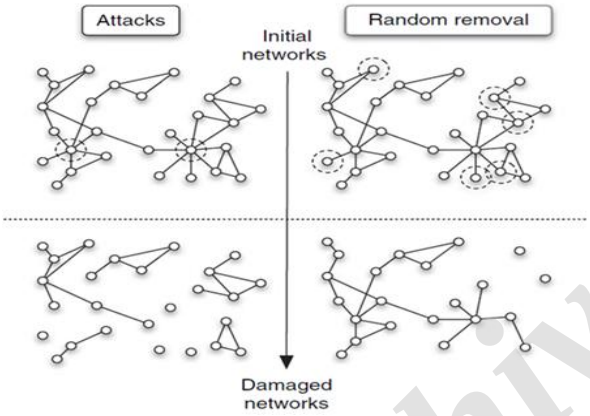
عملکرد صحیح و پیوسته شبکه‌های زیرساخت مانند شبکه‌های انتقال برق، مخابرات و حمل‌ونقل تأثیر مستقیم در فعالیت‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و صنعتی دارد. با پیشرفت و افزایش پیچیدگی این شبکه‌ها، احتمال آسیب‌پذیری آن‌ها نیز افزایش می‌یابد و مسئله حفاظت و بهبود استحکام شبکه در مقابل خرابی‌های تصادفی و حملات هدفمند اهمیت پیدا می‌کند. به دلیل وابستگی مراکز و زیرساخت‌های حیاتی به شبکه برق هر عاملی که باعث ایجاد اختلال در این شبکه شود می‌تواند منجر به خسارت‌های عمده در سایر زیرساخت‌های کشور شود [۱]. شبکه انتقال برق، دارای شبکه‌ای از خطوط انتقال با ولتاژ بالاست که انتقال برق در مسافت‌های طولانی در داخل و در بین کشورها را انجام می‌دهد. در مدل‌سازی با رویکرد علوم شبکه‌ای، گره همان ایستگاه‌های تولید و پست‌ها و یال‌ها خطوط ولتاژ بالا هستند. اگرچه کلیه پست‌های انتقال از اجزای مهم شبکه می‌باشند، برخی از پست‌ها نسبت به سایر پست‌ها از حساسیت بالاتری نسبت به سایر پست‌ها برخوردار بوده به‌نحوی که در صورت آسیب، بیش‌ترین مشکل را از دید پیوستگی ارائه خدمات ایجاد خواهند کرد. در حملات هدفمند، بعضی از مهم‌ترین گره‌ها و یال‌های شبکه حذف و صدمات و آسیب‌های شدیدی به شبکه وارد می‌شود. در این حالت امکان فروپاشی شبکه افزایش خواهد یافت.

نظر به اهمیت موضوع مدیریت شبکه برق در کشورها نظام‌نامه‌ای برای شناسایی پست‌های آسیب‌پذیر با توجه به معیارهای تعریف‌شده و تصویب‌شده خوددارند. ازجمله ضعف‌های این نظام‌نامه‌ها یا ضوابط در نظر گرفتن وضعیت یک گره یا پست به صورت منحصربه‌فرد و بدون در نظر گرفتن اهمیت این پست در ارتباط با سایر پست‌های شبکه قدرت است.

در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص شناسایی پست‌های آسیب‌پذیر مبتنی بر نظریه شبکه‌های پیچیده انجام‌شده است که نتایج قابل قبولی داشته است[۵-۲]. درعین‌حال این مطالعات اغلب، شبکه انتقال برق را بدون جهت در نظر گرفته‌اند درحالی‌که این‌گونه شبکه‌ها جهت‌دارند. در این مقاله پس از ارائه یک روش جدید برای پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر در شبکه انتقال برق، با مدل‌سازی بخشی از شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت، ساختار شبکه و نقاط آسیب‌پذیر آن با این روش مشخص و پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر شبکه در زمان‌های مختلف انجام خواهد شد. در این مقاله پس از مقدمه در بخش دوم به بررسی کارهای انجام‌شده در حوزه شبکه‌های انتقال برق مبتنی بر علوم شبکه می‌پردازیم سپس در بخش سوم روشی در خصوص پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر در شبکه انتقال برق ارائه شده است. در بخش چهارم روش ارائه‌شده بر روی بخشی از شبکه انتقال برق ایران پیاده‌سازی و نتایج آن با نتایج حاصل از ارزیابی شرکت مدیریت شبکه برق ایران مقایسه شده است و نهایتاً در فصل پنجم نتیجه‌گیری آمده است.

۲. بررسی شبکه قدرت مبتنی بر نظریه شبکه‌های پیچیده

اگر شبکه‌ای در مقابل خرابی‌ها و حملات، عملکرد و قابلیت‌های خود را حفظ نماید از ویژگی استحکام[1] برخوردار است. شبکه‌ها ممکن است به عمد تحت حمله قرار گیرند و یا برخی گره‌های آن‌ها به طور تصادفی از مدار خارج شوند. در شکل (۱)، تفاوت میان حمله و حذف تصادفی گره و در شبکه مشخص‌شده است.



شکل ۱. نمایش حذف تصادفی گره‌ها (سمت راست) و حمله به گره‌ها (سمت چپ) [۲]

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود پس از حذف تصادفی شش گره، همچنان میان اکثر گره‌های شبکه مسیر وجود دارد ولی پس از حمله به شبکه و حذف دو گره با بیشترین درجه، تعداد زیادی مؤلفه مجزا و کوچک به وجود آمده و کارایی شبکه اصلی کاهش‌یافته است. آسیب ناشی از حمله که هدفمند صورت می‌گیرد و نقاط کلیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد بسیار بیشتر از حذف تصادفی گره‌هاست.

در شبکه‌های انتقال برق سه نوع پست[2] (ایستگاه) وجود دارد: ۱- پست‌های تولید یا ژنراتورها[3] یا نیروگاه‌ها که تولیدکننده و منشأ توان‌اند. ۲- پست‌های انتقال که توان را دریافت کرده و به دیگر پست‌ها منتقل می‌کنند و ۳- پست‌های توزیع که توان را در شبکه‌های توزیع محلی توزیع می‌کنند. در نمایش شبکه انتقال برق از شینه‌ها و خطوط انتقال استفاده می‌شود. شینه‌ها در واقع

[1] Robustness
[2] Post
[3] Generators

Archive of SID

www.SID.ir

همان پست‌ها هستند که نقش گره در گراف را ایفا نموده و خطوط انتقال نیز که پست‌های مختلف در سطوح ولتاژی مختلف (فشارقوی، فشار متوسط و فشار ضعیف) را به هم متصل می‌نمایند متناظر با یال‌ها می‌باشند. برای مدل‌سازی و ترسیم شبکه قدرت، مشخصات و مکان قرارگیری شینه‌های نیروگاهی در نقشه‌های تک‌خطی از داده‌های شبکه به طور مستقیم قابل‌استخراج هستند ولی سایر شین‌ها مثل پست‌های توزیع به طور غیرمستقیم قابل‌تشخیص‌اند. یک سر پست‌های توزیع، خط انتقال ولتاژ قوی قرار دارد و در سر دیگر جریان خروجی با ولتاژهای کمتر به سمت مصرف‌کننده‌ها هدایت می‌شود. بر اساس مطالب فوق، یال‌ها یا از نوع انتقال و یا از نوع شعاعی می‌باشند. یال‌های شعاعی نشان‌دهنده آسیب‌پذیری شبکه هستند زیرا وقتی یک سر آن‌ها از بین برود بخش‌های جزیره‌ای و ایزوله ایجاد می‌گردد.

تحلیل و بررسی شبکه قدرت با استفاده از علوم شبکه‌ای توسط برخی از محققان در حوزه علوم شبکه در سال‌های اخیر انجام‌شده است. به عنوان نمونه شبکه برق آمریکا توسط آلبرت [۳]، چسین [۴]، وانگ [۵]، هاینس [۶] و زو [۷] همچنین شبکه برق اروپا توسط کاسالز [۸-۱۱] مورد بررسی واقع شد. شبکه برق ایتالیا توسط کروسیتی [۱۲]، بامپارد [۱۳] و فنوا [۱۴]، شبکه برق چین توسط می [۱۵]، دینگ [۱۶] و گوهوا [۱۷] و شبکه برق ایران توسط صنیعی منفرد [۱۸] مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این سان و همکاران [۱۹] و چودری و همکاران [۲۰] معیارهای مرکزیت را در شبکه‌های استاندارد ۵۷ و ۱۱۸ شینه IEEE اعمال کرده‌اند.

در این مطالعات شبکه قدرت شبکه‌ای است که به صورت G(N, K) که گرافی با N گره و K یال است تعریف می‌شود؛ به عبارت دیگر گراف G یک ماتریس که عناصر eij به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$e_{ij}=\begin{cases}1 \; i \; to \; j\\ 0 \; else\end{cases}$$

بر روی این گراف معیارهای مرکزیت را اعمال می‌کنیم. مرکزیت معیاری است که درجه اهمیت گره یا یال را در شبکه مشخص می‌کند، مرکزیت درجه[1]، میانی[2] و نزدیکی[3] معیارهای اصلی محاسبه‌شده در این مطالعات بوده‌اند. مرکزیت درجه را به عنوان مثال چسین [۴] برای تحلیل شبکه قدرت امریکای شمالی بکار برده است. مرکزیت درجه یک مرکزیت ساده محلی است که بر پایه مفهوم همسایگی به وجود آمده است. این مرکزیت برای گراف‌های ایستا و شرایطی که در آن علاقه‌مندیم گره‌های با بیش‌ترین ارتباط مستقیم با سایر گره‌ها را بیابیم، پرکاربرد است.

مرکزیت درجه هر گره d(v) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$d(v) = \sum_u m_{vu} \qquad (۱)$$

که در آن، $m_{vu} = ۰$ اگر بین گره v و گره u یالی نباشد و $m_{vu} = ۱$ اگر یالی بین گره‌های u و v وجود داشته باشد.

مرکزیت میانی b(x) را زو [۷] در تحلیل شبکه قدرت ایالت فلوریدا به‌کار برده است. مرکزیت میانی به معنی میزان قرار گرفتن رأس یا یالی بر سر راه کوتاه‌ترین مسیرهای بین زوج رأس‌ها است. مرکزیت میانی برای رأس x برابر است با تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای بین زوج رأس‌ها که از آن می‌گذرند:

$$b(x) = \sum_{s,t\in V \wedge s\neq x\neq t} \frac{\sigma_{st}(x)}{\sigma_{st}} \qquad (۲)$$

که در آن، σ_{st} تعداد کوتاه‌ترین مسیرها از رأس s به رأس t و $\sigma_{st}(x)$ تعداد همان مسیرها است که از x می‌گذرد. همچنین مرکزیت نزدیکی g_i معیاری از فاصله‌های یک گره از بقیه گره‌های شبکه است که به این شکل محاسبه می‌شود:

$$g_i = \frac{1}{\sum_{j\neq i} l_{ij}}$$

که در آن، l_{ij} اندازه کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره i و j است. این معیار تنها در شبکه‌هایی که دارای یک مؤلفه همبند[4] هستند مناسب است [۲۱].

۳. شبکه برق و تحلیل پیوند

در این مقاله شبکه جهت‌دار به صورت G(N, K) که گرافی با N گره و K یال است تعریف می‌شود:

$$e_{ij} = \begin{cases}+1 \; i \; to \; j\\ -1 \; j \; to \; i\\ 0 \; else\end{cases}$$

به منظور امکان انجام محاسبات معیار همبندی شبکه، یک تصویر لحظه‌ای[5] از شبکه قدرت در اوج مصرف بار را در نظر می‌گیریم. این کار به ما اطمینان می‌دهد که رفتار شبکه در بدترین حالت چگونه است و نقاط آسیب‌پذیر آن کدام‌اند. با توجه به جهت‌دار بودن شبکه انتقال برق برای محاسبات همبندی شبکه از الگوریتم Weighted PageRank (WPR) استفاده می‌شود، لازم به ذکر است برخی مطالعات در حوزه شبکه‌های واقعی وزن‌دار عملکرد قابل‌قبول‌تری را برای استفاده از معیار مرکزیت WPR بیان می‌کنند [۲۲].

الگوریتم WPR برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط ونپو زینگ[6] پیشنهاد شد. این الگوریتم در واقع یک نسخه توسعه‌یافته

[1] Degree Centrality
[2] Betweenness Centrality
[3] Closeness Centrality
[4] Connected Component
[5] Snapshot
[6] Wenpu Xing

Archive of SID

www.SID.ir

از الگوریتم PR است. با استفاده از این الگوریتم در شبکه قدرت اهمیت یک پست علاوه بر خطوط خروجی به خطوط ورودی نیز وابسته است. مقدار WPR(i) از فرمول زیر محاسبه می‌شود[۲۳]:

$$WPR(i) = (1-d) + d\sum_{j\in B(i)} WPR(j) W^{in}_{(j,i)} W^{out}_{(j,i)} \qquad (۴)$$

که در آن، WPR(i)مقدار آسیب‌پذیری یک پست i را بر مبنای ارجاعات سایر گره‌ها محاسبه می‌کند. d یک ضریب تعدیل‌کننده بین ۰ و ۱ است و اغلب ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود.

مقدار $W^{in}_{(j,i)}$ در فرمول بر اساس تعداد خطوط ورودی به پست i (I_i)، نسبت به تعداد خطوط ورودی از تمام پست‌های مرجع مربوط به پست j (I_p)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

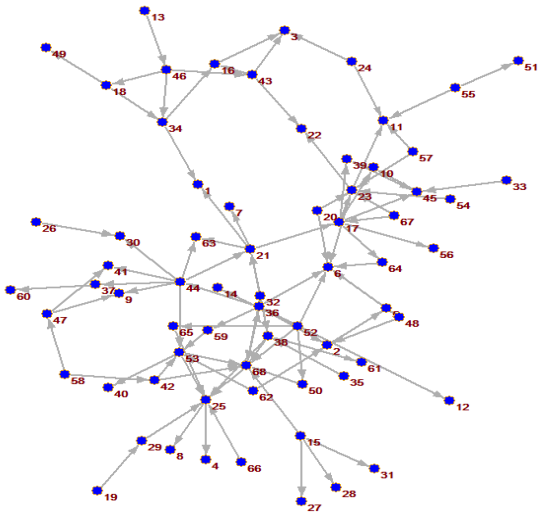
$$W^{in}_{(j,i)} = \frac{I_i}{\sum_{p\in R(j)} I_p} \qquad (۵)$$

مقدار $W^{out}_{(j,i)}$ بر اساس تعداد خطوط خروجی از پست i (I_o)، نسبت به تعداد خطوط خروجی از تمام پست‌های مرجع مربوط به پست j (o_p)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$W^{out}_{(j,i)} = \frac{I_o}{\sum_{p\in R(j)} o_p} \qquad (۶)$$

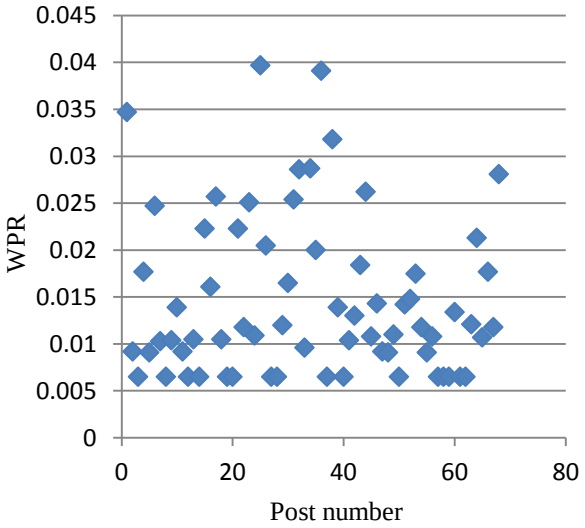
۴. پیاده‌سازی روش بر روی شبکه برق ایران

بر روی مجموعه دادگان واقعی بخشی از شبکه برق ایران یکی از استان‌ها با ۶۸ پست به عنوان گره‌ها و ۹۸ خط انتقال یا یال پیاده‌سازی شد [۲۴]. شکل (۲) پس از ورود اطلاعات توسط نرم‌افزار pajek شبکه جهت‌دار مذکور را در اوج مصرف بار نمایش می‌دهد:



شکل ۲. نمایش بخشی از شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت در اوج بار به کمک نرم‌افزار pajek

با استفاده از نرم‌افزار Matlab محاسبات الگوریتم WPR که در قسمت قبل شرح داده شد را بر روی‌داده‌های شبکه انجام داده‌ایم.



شکل ۳. احتمال آسیب‌پذیری پست‌های شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت

از بین ۶۸ پست، پست شماره ۲۵ با توجه به این روش در صورت خرابی یا حمله احتمالی بیشترین آسیب‌پذیری را به شبکه انتقال برق وارد می‌کند و لذا دارای بیشترین اهمیت و حساسیت است. ۲۰ پست دارای بیش‌ترین احتمال آسیب‌پذیری به ترتیب در جدول (۱) آمده است:

جدول ۱. رتبه‌بندی پست‌های آسیب‌پذیر در شبکه برق ایران

مقدار خروجی از روش پیشنهادی	شماره پست	رتبه یا اهمیت پست در شبکه
۰/۰۳۹۷	۲۵	۱
۰/۰۳۹۱	۳۶	۲
۰/۰۳۴۷	۱	۳
۰/۰۳۱۸	۳۸	۴
۰/۰۲۸۷	۳۴	۵
۰/۰۲۸۶	۳۲	۶
۰/۰۲۸۱	۶۸	۷
۰/۰۲۶۲	۴۴	۸
۰/۰۲۵۷	۱۷	۹
۰/۰۲۵۴	۳۱	۱۰
۰/۰۲۵۱	۲۳	۱۱
۰/۰۲۴۷	۶	۱۲
۰/۰۲۲۳	۱۵	۱۳
۰/۰۲۲۳	۲۱	۱۴
۰/۰۲۱۳	۶۴	۱۵
۰/۰۲۰۵	۲۶	۱۶
۰/۰۲	۳۵	۱۷
۰/۰۱۸۴	۴۳	۱۸
۰/۰۱۷۷	۴	۱۹
۰/۰۱۷۷	۶۶	۲۰

Archive of SID

www.SID.ir

همان‌گونه که گفته شد با توجه به اهمیت موضوع، مدیریت شبکه برق در کشورها برای شناسایی پست‌های آسیب‌پذیر نظام‌نامه‌ای با توجه به معیارهای تعریف‌شده دارند تا بتوانند پست‌ها را بر اساس آن طبقه‌بندی کرده و راه‌کارهایی برای کاهش آسیب‌پذیری پست‌ها ارائه نمایند. از جمله با احتساب پارامترهای خط، نرخ خرابی خط انتقال، طول خط انتقال و ... محاسبات انجام می‌شود که به عنوان نمونه محاسبه قابلیت اطمینان برای برخی خطوط شکل (۲) در جدول (۲) آمده است.

این تنها یکی از محاسبات برای یافتن پست‌های حساس است و عوامل متعدد دیگر نیز باید محاسبه شوند. نتایج حاصل از این مقاله در شناسایی پست‌های آسیب‌پذیر با نتایج به دست آمده توسط مهندسین برق در مدیریت شبکه برق انطباق قابل قبولی دارد، با این مزیت که این روش دارای سرعت بیشتری در اجراست و در هرلحظه و با توجه به شرایط جدید قابلیت اجرا دارد.

جدول ۲. محاسبه قابلیت اطمینان برای برخی خطوط شکل (۲)

از پست	به پست	طول خط (KM)	نرخ خرابی خط در سال (λ)	قابلیت اطمینان $p_{ij} = e^{-\lambda_{ij}T}$
۳۶	۴۴	۲۸	۲	۰/۱۳۵۳۳۵۳
۳۵	۳۸	۱۶۲	۱۳	۰/۰۰۰۰۰۲۳
۱	۲۱	۱۹۳	۱۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱
۳۶	۲	۵۵	۶	۰/۰۰۲۴۷۸۸
۱۷	۶۷	۲۱	۳	۰/۰۴۹۷۸۷۱
۳۶	۵۹	۴۳/۵	۵	۰/۰۰۶۷۳۷۹
۶۷	۲۳	۲۵	۲	۰/۱۳۵۳۳۵۳

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به همبندی شبکه و نقش کاربردی هر پست، میزان اثرگذاری آن بر پایایی شبکه، نسبت به سایر پست‌ها متفاوت خواهد بود. به این نحو که خروج یک پست نسبت به پست دیگر، تأثیر یکسانی بر استحکام شبکه نخواهد داشت؛ بنابراین پست‌هایی در شبکه وجود دارند که نسبت به سایر پست‌ها از حساسیت بالاتری برخوردار هستند. اغلب مطالعات صورت گرفته در تحلیل شبکه قدرت مبتنی بر علوم شبکه، شبکه قدرت را بدون جهت و زیبایی‌شناختی در نظر گرفته‌اند درحالی‌که شبکه قدرت یک شبکه جهت‌دار است که جهت آن نیز با توجه به مصرف مناطق مختلف و در زمان‌های گوناگون تغییر می‌کند لذا شبکه قدرت را در اوج مصرف بار در نظر گرفته و برای یافتن نقاط آسیب‌پذیر شبکه از الگوریتم تحلیل لینک Weighted PageRank استفاده شده است. نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهد که با روش محاسباتی که مهندسین برق ویژگی‌های خاص شبکه برق را در محاسبات در نظر می‌گیرند انطباق قابل قبولی دارد ضمن آنکه در این روش سرعت انجام محاسبات سریع‌تر و امکان محاسبه برخط در هرلحظه نیز وجود دارد.

۶. مرجع‌ها

[1] Ghaffarpour, R.; Pourmousa, A. A.; Ranjbar A. "Presenting an Index for Evaluation of Power Network Security Using Fuzzy Set Theory"; J. Advanced Sci. & Technol. 2016, 10, 289-304 (In Persian).

[2] Barrat, A.; Barthelemy, M.; Vespignani, A. "Dynamical Processes on Complex Networks"; Cambridge University Press, 2008.

[3] Albert, R.; Albert, I.; Nakarado, G. L. "Structural Vulnerability of the North American Power Grid"; Phys. Rev. 2004, 69, 025103.

[4] Chassin, D. P.; Posse, C. "Evaluating North American Electric Grid Reliability Using the Barabási–Albert Network Model"; Physica A. 2005, 355, 667-677.

[5] Wang, J. W.; Rong, L. L. "Cascade-based Attack Vulnerability on the US Power Grid"; Safety Sci. 2009, 47, 1332-1336.

[6] Hines, P.; Cotilla-Sanchez, E.; Blumsack, S. "Do Topological Models Provide Good Information about Electricity Infrastructure Vulnerability?"; Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science 2010, 20, 033122.

[7] Xu, Y.; Gurfinkel, A. J.; Rikvold, P. A. "Architecture of the Florida Power Grid as a Complex Network"; Physica A. 2014, 401, 130-140.

[8] Rosas-Casals, M.; Valverde, S.; Solé, R. V. "Topological Vulnerability of the European Power Grid under Errors and Attacks"; Int. J. Bifurcat. Chaos 2007, 17, 2465-2475.

[9] Solé, R. V.; Rosas-Casals, M.; Corominas-Murtra, B.; Valverde, S. "Robustness of the European Power Grids under Intentional Attack"; Phys. Rev. 2008, 77, 026102.

[10] Rosas Casals, M.; Corominas Murtra, B. "Assessing European Power Grid Reliability by Means of Topological Measures"; WIT Transactions on Ecology and the Environment 2009, 121, 527-537.

[11] Rosas-Casals, M. "Power Grids as Complex Networks: Topology and Fragility"; Complexity in Engineering 2010, 21-26.

[12] Crucitti, P.; Latora, V.; Marchiori, M.; Rapisarda, A. "Error and Attack Tolerance of Complex Networks"; Physica A. 2004, 340, 388-394.

[13] Bompard, E.; Wu, D.; Xue, F. "The Concept of Betweenness in the Analysis of Power Grid Vulnerability"; Complexity in Engineering 2010, 52-54.

[14] Fenu, G.; Pau, P. L. "A Model of Assessment of Collateral Damage on Power Grids Based on Complex Network Theory"; Procedia Comput. Sci. 2014, 32, 437-444.

[15] Mei, S.; Zhang, X.; Cao, M. "Power Grid Complexity"; Springer, 2011.

[16] Ding, J.; Bai, X.; Zhao, W.; Fang, Z.; Li, Z.; Liu, M. "The Improvement of the Small-World Network Model and its Application Research in Bulk Power System"; IEEE International Conf. on. Power System Technology 2006, 1-5.

Archive of SID

www.SID.ir

[17] Guohua, Z.; Ce, W.; Jianhua, Z.; Jingyan, Y.; Yin, Z.; Manyin, D. "Vulnerability Assessment of Bulk Power Grid Based on Complex Network Theory"; IEEE International Conf. on Electric Utility DRPT 2008, 1554-1558.

[18] Monfared, M. A. S.; Jalili, M.; Alipour, Z. "Topology and Vulnerability of the Iranian Power Grid"; Physica A. 2014, 406, 24-33.

[19] Sun, X.; Zhang, T.; Zhang, B. "Identification of Critical lines in Power Grid Based on Active Power Flow Betweenness"; IEEE International Conf. on Electric Utility DRPT 2015, 1283-1287.

[20] Chowdhury, T.; Rout, G. K.; Chanda, C. K. "Netability Analysis of Critical Lines of Power Grid Based on Betweenness Approach"; International Conf. on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth 2015, 1-6.

[21] Otte, E.; Rousseau, R. "Social Network Analysis: A Powerful Strategy, also for the Information Sciences"; Inform. Sciences 2002, 28, 441-453.

[22] Khansari, M.; Shams, B. "Centrality Measures for Immunization of Weighted Networks"; Network Biology 2016, 6, 12.

[23] Xing, W.; Ghorbani, A. "Weighted Pagerank Algorithm"; IEEE Second Annual Conf. Communication Networks and Services Research, 2004.

[24] Tavanir Organization "Detailed Statistics of Iran's Power Industry, Power Transmission"; http://amar.tavanir.org.ir/pages/report/stat94/tafsili/enteghal/index.htm, 2016

Archive of SID

www.SID.ir