

ارزیابی احتمالی تلفات و پروفیل ولتاژ شبکه توزیع در حضور توربین‌های بادی با استفاده از روش تاگوچی

مجید نجارپور^{۱*}، علیرضا عبادی زاهدان^۲، حمید رضا صمدخواه تمر^۳، بهروز طوسی^۴

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه

st_m.najjarpour@urmia.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

ebadialireza386@yahoo.com

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه

st_h.samadkhah@urmia.ac.ir

دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه ارومیه

b.tousi@urmia.ac.ir

چکیده

شبکه‌ی توزیع همواره با عدم قطعیت‌هایی نظیر تغییر بار و نوسان در توان خروجی توربین‌های بادی مواجه است. این عدم قطعیت‌ها منجر به افزایش اهمیت روش‌های ارزیابی احتمالی در شبکه‌های توزیع می‌گردد. از شاخص‌های بسیار مهمی که می‌تواند وضعیت شبکه توزیع را به خوبی نشان دهد می‌توان به شاخص‌های تلفات توان اکتیو و پروفیل ولتاژ شبکه اشاره کرد. در این مقاله برای ارزیابی احتمالی این شاخص‌ها از یکی از روش‌های شبیه‌سازی احتمالی بسیار دقیق و کارآمد به نام تاگوچی استفاده شده‌است. روش تاگوچی علاوه بر حجم محاسباتی کم از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. شاخص‌های معرفی شده برای شبکه ۳۳ باسه IEEE در حضور نیروگاه بادی محاسبه شده‌اند و نتایج نشان می‌دهد که حضور نیروگاه بادی پروفیل ولتاژ و تلفات توان اکتیو شبکه را بهبود می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت مقاله: شهریور ماه ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش مقاله: شهریور ماه ۱۴۰۰

واژگان کلیدی

ارزیابی احتمالی

تاگوچی

توربین بادی

شبکه توزیع

نحوه ارجاع به این مقاله:

م. نجارپور و همکاران، ارزیابی احتمالی تلفات و پروفیل ولتاژ شبکه توزیع در حضور توربین‌های بادی با استفاده از روش تاگوچی، ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز، دوره ۲، شماره ۶، ص. ۱-۷، ۱۴۰۰.

۱. مقدمه

حضور منابع تولید پراکنده در شبکه قدرت بسته به ظرفیت و مکان نصبشان، شبکه توزیع را از مزایای زیادی مانند کاهش تلفات (۲۰۱۳) Hng, بهبود قابلیت اطمینان (Zhu, ۲۰۰۶)، بهبود پروفیل ولتاژ (Kotamarty, ۲۰۰۸)، به تعویق انداختن زمان ارتقاء سیستم (۲۰۱۱) Shaaban, کاهش سطح اتصال کوتاه (El-Zonkoly, ۲۰۱۱)، بهبود پایداری ولتاژ (Ali Abri, ۲۰۱۳)، کاهش هزینه‌های بهره برداری (Haghifain, ۲۰۰۸) برخوردار می‌کند. وجود این مزایا و مشکلاتی از قبیل آلودگی زیست محیطی و کم شدن منابع سوخت فسیلی تمایل به استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر (مانند سیستم فتوولتائیک، توربین بادی، زیست توده و...) را افزایش داده‌است. در میان منابع تولید پراکنده تجدید پذیر، توربین بادی به دلیل بازده اقتصادی بالاتر و عدم نیاز به فضای زیاد جهت نصب تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو در سال‌های اخیر تعداد مزارع بادی رشد چشم‌گیری داشته است.

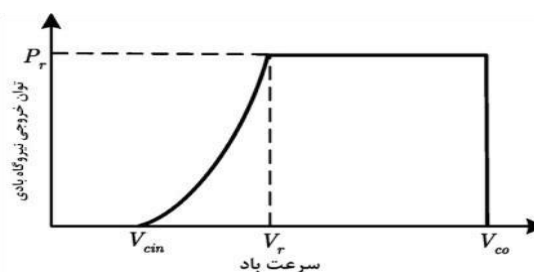
دو شاخص مهم شبکه توزیع، شاخص پروفیل ولتاژ و تلفات توان اکتیو شبکه هستند که از گذشته مورد توجه طراحان شبکه توزیع بوده‌است. به دلیل وجود فاکتورهای عدم قطعیت در شبکه توزیع، مانند تغییر بار و نوسان در خروجی توربین‌های بادی در نظر گرفتن عدم قطعیت در ارزیابی این شاخص‌ها امری ضروری است که با وجود اهمیت زیاد، کمتر به آن پرداخته شده‌است.

یکی دیگر از موضوعات مهم در ارزیابی شبکه قدرت، لحاظ همبستگی بین متغیرهای تصادفی ورودی است و نادیده گرفتن این همبستگی در ارزیابی احتمالی شاخص‌های شبکه، باعث دور شدن نتایج از واقعیت می‌شود. شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte Carlo Saintpling-) (MICS) ترکیب شده با نمونه برداری ساده به طور گسترده در آنالیزهای احتمالی سیستم قدرت به کار میرود (Yu, ۲۰۰۹). شاخص‌های تلفات توان و پروفیل ولتاژ را نیز می‌توان با این روش با دقت بالا محاسبه کرد. اما این روش به دلیل زمان بر بودن در شبکه‌های توزیع با ابعاد بزرگ ناکارآمد خواهد بود. روش‌هایی چون خوشه بندی (Gilani, ۲۰۱۲) و تخمین دونقطه‌ای (Evangelopoulos, ۲۰۱۳) نیز که دارای حجم محاسباتی کمتری هستند قادر به مدل کردن همبستگی بین متغیرهای ورودی مسأله نیستند.

در این مقاله به منظور ارزیابی احتمالی شاخص‌های مورد نظر از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی علاوه بر حجم محاسباتی کم از دقت بالایی برخوردار بوده است. این مطالعه بر روی شبکه ۳۳ باسه IEEE انجام شده‌است. به منظور نشان دادن کارآمدی روش تاگوچی، نتایج حاصل با روش خوشه بندی مقایسه شده‌است. همچنین نتایج از بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه در حضور توربین‌های بادی خبر می‌دهد.

۲. مدل‌سازی توربین بادی و بار شبکه

رفتار تصادفی باد سبب شده است نیروگاه‌های بادی دارای مشخصه پیوسته باشند. نیروگاه بادی یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در سیستم قدرت است. در مطالعات سیستم قدرت در حضور نیروگاه‌های بادی ابتدا می‌بایست توان خروجی آن مشخص شود. توان تولیدی نیروگاه بادی به سرعت باد و مشخصه توربین‌های بادی وابسته است. بنابراین ابتدا باید سرعت باد در منطقه مورد مطالعه و مدل توربین بادی مشخص شود. در یک توربین بادی توان اکتیو خروجی متأثر از سرعت باد بوده و یک رابطه غیرخطی بین این دو پارامتر وجود نام دارد ، این مشخصه در شکل (۱) قابل مشاهده است. V_{co}, V_r, V_{ci} به ترتیب سرعت وصل، سرعت نامی و سرعت قطع بالا هستند.



شکل ۱: منحنی توان (مگاوات) - سرعت (متر بر ثانیه)

۳. آرایه های متعامد

آرایه های متعامد نقش اصلی در روش تاگوچی ایفا می کنند، در ۱۹۴۰ معرفی گردید. این آرایه ها در طراحی آزمایش ها مورد استفاده قرار می گیرند و مقادیر بهینه متغیرهای سیستم با استفاده از تعداد کمی آزمایش، می یابند. مجموعه S را مجموعه ای از اعداد متفاوت در نظر بگیرید. ماتریس A دارای N ردیف و K ستون حاوی عناصر مجموعه S است یک آرایه متعامد با S سطح و t نامیده می شود (۲۰۱۲، Aien).

۴. ویژگی آرایه های متعامد

جدول ۱ نشان می دهد فقط ۸ آزمایش برای به دست آوردن سطوح بهینه متغیرها نیاز است، بر خلاف دقیق ترین روش بهینه سازی که بررسی کامل $۲^۸=۲۵۶$ ترکیب ممکن بوده و عملی نیست، در علم آمار اثبات می شود اگرچه تعداد آزمایش ها، در روش تاگوچی به شدت کاهش می یابد ولی مقادیر بهینه به دست آمده از این روش، به مقادیر بهینه به دست آمده از آزمایش تمام ترکیب های ممکن بسیار نزدیک است.

جدول ۱: آرایه متعامد

شماره آزمایش	ستون						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۴	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱
۵	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲
۶	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۷	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۸	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲

۵. استراتژی روش تاگوچی

روش تاگوچی یک روش آماری است که بر اساس آرایه های متعامد برای بهینه سازی سیستم ها بکار می رود. در این مقاله برای مدل سازی عدم قطعیت های بار و باد از روش تاگوچی استفاده می کنیم، در مسأله پخش بار بهینه احتمالاتی، هدف از فاکتورها همان متغیرهای تصادفی است، در این روش تعداد فاکتورها را با m و تعداد سطح از فاکتورها را با n نشان می دهند، و بعد از آن، به تعداد آزمایش انجام می شود. البته انجام همه آزمایش ها، اغلب دشوار و بسیار هزینه بر است. به کمک آرایه های متعامد، امکان انجام حداقل آزمایش ها وجود دارد. واژه (سطح) بیانگر مقداری از توزیع احتمالاتی است. گام اول در استفاده از روش تاگوچی، تعیین تعداد سطوح هر فاکتور است. روش تاگوچی با فاکتورهای دوسطحی به کمترین میزان محاسبات پخش بار نیاز دارد بنابراین تنها دو سطح از هر فاکتور در نظر می گیریم. همواره امکان تنظیم ۲ سطح از یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال وجود دارد، زیرا این توزیع یک توزیع متقارن است. که این سطوح باید به صورت $\mu - \sigma$ و $\mu + \sigma$ بیان شود μ و σ به ترتیب نشان دهنده ی میانگین و انحراف از معیار است. مدل بار ارائه شده در این مقاله توزیع نرمال است. برای یک متغیر تصادفی با توزیع و بیول مانند نیروگاه بادی، نیز می توان سطوح را به صورت $\mu - \sigma$ و $\mu + \sigma$ در نظر گرفت. که $\mu - \sigma$ به عنوان سطح ۱ و $\mu + \sigma$ به عنوان سطح ۲ معرفی می شوند.

طراحی یک آزمایش بهینه: می‌توان به کمک مراحل زیر، با انجام یک آزمایش برای پخش بار احتمالاتی با بهترین شاخص عملکرد بدست آورد و از انجام بقیه آزمایش‌ها خودداری کرد. در گام نخست باید یک شاخص عملکرد تعریف شود (۷).

$$Y_j = \sum_{\psi}^{NL} |f_{j\psi} - f^*_{\psi}| \quad , \quad (7)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots$$

که در آن NL تعداد شاخه‌ها می‌باشد و $f_{j\psi}$ توان عبوری از خط ψ ام حاصل از پخش بار آزمایش j ام است و f^*_{ψ} توان عبوری نامی از خط ψ ام است. گام دوم محاسبه‌ی میانگین تاثیر سطوح فاکتورها است. میانگین اثرات سطوح فاکتورها به صورت معادلات (۱۳-۸) تعریف می‌شود.

$$\bar{A}_1 = (Y_1 - Y_2)/2 \quad (8)$$

$$\bar{A}_2 = (Y_3 - Y_4)/2 \quad (9)$$

$$\bar{B}_1 = (Y_1 - Y_3)/2 \quad (10)$$

$$\bar{B}_2 = (Y_2 - Y_4)/2 \quad (11)$$

$$\bar{C}_1 = (Y_1 - Y_4)/2 \quad (12)$$

$$\bar{C}_2 = (Y_2 - Y_3)/2 \quad (13)$$

گام سوم تعریف اثر عمده‌ی هر فاکتور روی Y_j است طبق روابط (۱۶-۱۴):

$$\Delta A = \bar{A}_2 - \bar{A}_1 \quad (14)$$

$$\Delta B = \bar{B}_2 - \bar{B}_1 \quad (15)$$

$$\Delta C = \bar{C}_2 - \bar{C}_1 \quad (16)$$

اگر تاثیر عمده‌ی فاکتوری مثبت باشد، سطح دوم این فاکتور در آزمایش بهینه لحاظ می‌شود و اگر تاثیر عمده فاکتوری منفی باشد، سطح اول این فاکتور در آزمایش بهینه لحاظ می‌شود. میانگین و انحراف از معیار استاندارد طبق روابط (۱۷, ۱۸) است. تعداد آزمایش‌ها است.

$$\bar{x}_i = \left(\sum_{j=1}^{Nexp} x_{ij} \right) / Nexp, i = 1, 2, 3, \dots, Nexp \quad (17)$$

$$s_i = \left[\sum_{j=1}^{Nexp} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / Nexp \right]^{0.5} \quad (18)$$

۶. ارزیابی احتمالی شاخص‌های پروفیل ولتاژ و تلفات توان شبکه با استفاده از روش تاگوچی

یکی از راه کارهای مناسب بهبود پروفیل ولتاژ و تلفات توان شبکه توزیع استفاده از منابع تولید پراکنده در مکان‌های مناسب شبکه است. معادله (۱۹) می‌تواند معیار مناسبی برای نشان دادن وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه باشد. همانطور که معادله (۱۹) نشان می‌دهد هرچه ΔV به صفر نزدیک‌تر باشد شبکه از وضعیت پروفیل ولتاژ بهتری برخوردار خواهد بود. معادله (۲۰) نیز تلفات توان اکتیو شبکه را نشان می‌دهد.

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{N_b} |1 - V_i| \quad (19)$$

که در آن V_i ولتاژ باسی نام است.

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_b} R_i \times |I_i|^2 \quad (20)$$

I_i و R_i به ترتیب مقاومت و اندازه جریان شاخه‌ی آم است.

به دلیل وجود فاکتورهای عدم قطعیت در شبکه توزیع، مانند تغییر بار و نوسان در خروجی توربین بادی شاخص‌های قطعی ارائه شده در معادلات (۱۹) و (۲۰) نمی‌توانند وضعیت شبکه توزیع را به خوبی نشان دهد. بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت در ارزیابی این شاخص‌ها امری ضروری است. به دلایلی که قبلاً ذکر شد در این مقاله از تاگوچی برای محاسبه شاخص‌های احتمالی استفاده شده است. در این روش متغیرهای ورودی مسأله بار شبکه و توان خروجی توربین بادی در نظر گرفته شده و تبدیل غیرخطی مورد نظر نیز معادلات پخش بار می‌باشد $\Delta\bar{V}_U$ (مقدار متوسط پروقیل ولتاژ) و \bar{P}_{LU} (مقدار متوسط تلفات توان اکتیو شبکه در بازه‌ی مورد مطالعه) می‌باشند. در ادامه گام‌های مورد نیاز برای ارزیابی شاخص‌های احتمالی پروقیل ولتاژ و تلفات توان شبکه با استفاده از روش تاگوچی آمده است.

(۱) ابتدا متغیرهای ورودی تصادفی مسأله باید مشخص شود. در این مقاله متغیرهای تصادفی، بار شبکه و توان خروجی توربین بادی است.

(۲) نقاط نمونه با استفاده از روش تاگوچی محاسبه می‌شود (چون تعداد متغیرها ۲ تا است تعداد نقاط نمونه $2 \times 2 = 4$ است).

(۳) برای هر نقطه نمونه و با استفاده از معادلات پخش بار شاخص‌های تلفات توان و انحراف پروقیل ولتاژ محاسبه می‌شود.

(۴) شاخص‌های $\Delta\bar{V}_U$ و \bar{P}_{LU} محاسبه می‌شود.

۷. حوادث گاز به چند دسته عمده تقسیم می‌شوند؟

شبیه‌سازی بر روی سیستم ۳۳ شینه IEEE انجام شده است. این سیستم دارای ولتاژ نامی ۱۳۶۶ کیلوولت است. بار اکتیو و راکتیو سیستم به ترتیب ۳۱۷۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. پارامترهای توربین بادی مورد استفاده V_{ci} ، V_r و V_{co} به ترتیب برابر ۴، ۱۰ و ۲۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در مقدمه بیان شد تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی احتمالی سیستم قدرت به کار گرفته شده است. یکی از روش‌های موثر در ارزیابی احتمالی روش خوشه‌بندی است که بسته به تعداد دسته انتخاب شده برای متغیرهای ورودی مسأله، می‌تواند ضمن برخورداری از دقت مناسب از سرعت محاسبات مطلوبی برخوردار باشد. در این قسمت به منظور نشان دادن کارآمدی روش تاگوچی یک توربین بادی با درصد نفوذ ۱۰ درصد در باس ۱۸ نصب شده و شاخص‌های مورد نظر با دوروش مختلف خوشه‌بندی و تاگوچی محاسبه شده است. در روش اول برای بار شبکه و توان خروجی توربین بادی از روش خوشه‌بندی K_means استفاده شده و برای ارزیابی شاخص‌ها، تمام ترکیب‌های احتمالی تولید-بار مربوط به روش خوشه‌بندی در نظر گرفته شده است. در روش دوم شاخص‌ها با استفاده از روش بی‌بو محاسبه شده است (به قسمت ۴ مراجعه شود). در جدول (۲) نتایج مربوط به این دو روش آورده شده است. لازم به ذکر است درصد نفوذ منبع طبق رابطه (۱۱) محاسبه شده است.

$$\text{درصد نفوذ منبع} = \frac{P_{WT}}{P_{Load}} \times 100 \quad (21)$$

که در آن P_{WT} توان تولیدی توربین بادی و P_{Load} توان اکتیو بار شبکه مورد مطالعه است. همان‌طور که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد شاخص‌های محاسبه شده با روش بی‌بو نسبت به روش خوشه‌بندی از دقت بیشتری برخوردار بوده که این امر کارآمدی روش بی‌بو را نسبت به روش خوشه‌بندی نشان می‌دهد. علاوه بر این در روش خوشه‌بندی تعداد ترکیب‌های احتمالی ۱۰۰ تا هستند که برای محاسبه شاخص‌ها نیاز به ۱۰۰ پخش بار بوده در حالی که در روش تاگوچی تعداد پخش بارها ۴ تا بوده (از آنجا که تعداد متغیرهای ورودی برابر ۲ است در نتیجه تعداد نقاط سیگما $2 \times 2 = 4$ است) و در نتیجه حجم محاسباتی بسیار کمتری دارد.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از روش‌های خوشه‌بندی و تاگوچی در ارزیابی احتمالی تلفات اکتیو و پروفیل ولتاژ شبکه

روش بکار رفته	متوسط تلفات اکتیو شبکه (MW)	متوسط شاخص پروفیل ولتاژ شبکه
مقایسه شاخص‌ها با روش خوشه‌بندی	۶۹/۳۱۶	۰/۲۶۵
مقایسه شاخص‌ها با روش تاگوچی	۶۷/۸۹۷	۰/۲۶۳

۶. نتیجه‌گیری

به دلیل وجود فاکتورهای عدم قطعیت در شبکه توزیع مانند تغییر بار و نوسان در خروجی توربین‌های بادی در نظر گرفتن عدم قطعیت در ارزیابی احتمالی شاخص‌های پروفیل ولتاژ و تلفات شبکه امری ضروری است. در این مقاله برای ارزیابی احتمالی این شاخص‌ها از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی علاوه بر حجم محاسباتی کم از دقت بالایی برخوردار بوده و. نتایج مقایسه روش بی‌بو با روش خوشه‌بندی کارآمدی روش بی‌بو را نشان می‌دهد از شبکه ۳۳ باسه IEEE با روش تحلیلی سلسله‌مراتبی انتخاب شده و شاخص‌های تلفات و پروفیل ولتاژ شبکه برای درصد نفوذهای مختلف توربین بادی محاسبه شده است. نتایج، بهبود این شاخص‌ها را در اثر افزایش درصد نفوذ توربین بادی نشان می‌دهد.

منابع و مراجع

- [۱] نجفی، ارسلان، رضایی، مریم. (۱۳۹۲) "اولویت‌بندی باس‌های شبکه توزیع برای مکانیابی منابع تولید پراکنده با استفاده از روش تحلیلی سلسله‌مراتبی." کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق. کرمانشاه.
- [2]: Aien, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Aminifar, F. (2012). Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2233-2241.
- [3]: Al Abri, R., El-Saadany, E. F., & Atwa, Y. M. (2013). Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1), 326-334.
- [4]: Aman, M., Jasmon, G., Bakar, A., & Mokhlis, H. (2014). A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation Units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm. *Energy*, 66, 202-215.
- [5]: El-Zonkoly, A. (2011). Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 50-59.
- [6]: Evangelopoulos, V. A., & Georgilakis, P. S. (2013). Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm. *IET generation, transmission & distribution*, 8(3), 389-400.
- [7]: Gilani, S. H., Afrakhte, H., & Ghadi, M. J. (2012). Probabilistic method for optimal placement of wind-based distributed generation with considering reliability improvement and power loss reduction. Paper presented at the Thermal Power Plants (CTPP), 2012 4th Conference on Tehran.
- [8]: Haghifam, M.-R., Falaghi, H., & Malik, O. (2003). Risk-based distributed generation placement. *IET generation, transmission & distribution*, 2(2), 252-260.
- [9]: Hung, D. Q., & Mithulananthan, N. (2013). Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1700-1708.
- [10]: Kotamarty, S., Khushalani, S., & Schulz, N. (2003). Impact of distributed generation on distribution contingency analysis. *Electric Power Systems Research*, 78(9), 1537-1545.
- [11]: Shaaban, M., Anva, Y., & El-Saadany, E. (2011). A multi-objective approach for optimal DG allocation. Paper presented at the Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2nd International Conference on Sharjah.

[12]: Subcommittee, P. (1979). IEEE reliability test system. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2047-2054.

[13]: Yu, H., Chung, C., Wong, K., Lee, H., & Zhang, J. (2009). Probabilistic load flow evaluation with hybrid Latin hypercube sampling and cholesky decomposition. Power Systems, IEEE Transactions on, 24(2), 661-667.

[14]: Zhu, D., Broadwater, R. P., Tam, K.-S., Seguin, R., & Asgeirsson, H. (2006). Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads. IEEE Transactions on Power Systems, 21(1), 419-427.