

# ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌ی توزیع با توجه به مدل دینامیکی - حرارتی ترانسفورماتور در حضور منابع مختلف تولید پراکنده

محسن حمزه، حامد هاشمی دزکی، حسین عسکریان انبانه، حسن رستگار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران، ایران

Mohsen.hamzeh90@gmail.com, hamed.hashemi@gmail.com, askarian@aut.ac.ir, rastegar@aut.ac.ir

چکیده — در این مقاله، روشی نوین برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌ی میکروگرید با در نظر گرفتن مدل دینامیکی-حرارتی خطای ترانسفورمرها ارائه گردیده است. با حضور گسترده‌ی منابع تولید پراکنده در شبکه، می‌توان با کاهش فشار بار از روی ترانسفورمرها، خطای دینامیکی-حرارتی آن‌ها را بهبود بخشید. با در نظر گیری تکنولوژی‌های مختلف منابع تولید پراکنده و همچنین ضریب نفوذهای مختلف آن‌ها، شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه، مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. روش پیشنهادی، بر روی شبکه‌ی واقعی سهند بندرعباس پیاده شده است. فیدر سهند یکی از شبکه‌های دچار پرباری و شرایط بحرانی شرکت توزیع نیروی برق بندرعباس است که در مناطق گرمسیر واقع شده و عدم امکان بازیابی آن در هنگام بروز حوادث باعث شده است خاموشی‌های طولانی مدتی به مشترکین تحمیل گردد. بررسی شاخص‌های قابلیت اطمینان و پیاده‌سازی روش پیشنهادی می‌تواند از خاموشی‌های زیان‌بار آن جلوگیری نماید. آنالیز حساسیت مبتنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان، چون انرژی مورد انتظار تامین نشده بر پایه نفوذ منابع تولید پراکنده بیان گردیده است. با استفاده از روش پیشنهاد شده، می‌توان تاثیر تکنولوژی‌های مختلف منابع تولید پراکنده با درصد نفوذهای متفاوت را بر روی قابلیت اطمینان سیستم سنجید. نتایج شبیه سازی با استفاده از روش شبیه‌سازی احتمالاتی منت کارلو نشان می‌دهد که، استفاده از دیزل ژنراتورها و یا ترکیب دیزل ژنراتور با سلول خورشیدی نسبت به استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به تنهایی، نقش پررنگتری در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی — بالاترین نقطه‌ی دمایی (HST)؛ خطای دینامیکی-حرارتی ترانسفورمر؛ قابلیت اطمینان؛ منابع تولید پراکنده؛ سلول خورشیدی؛ دیزل ژنراتور؛ توربین بادی؛ عدم قطعیت؛ روش مونت کارلو

متغیرها، علائم و اختصارات

$\sigma$ : انحراف معیار داده‌های عملی سرعت باد

$v^m$ : میانگین داده‌های عملی سرعت باد

$k$ : پارامتر شکل تابع چگالی احتمال وایبل

$c$ : پارامتر مقیاس تابع چگالی احتمال وایبل

$v$ : سرعت باد بر حسب  $m/s$

$V$ : سرعت باد بر حسب  $m/s$

$u$ : عدد تصادفی در بازه  $[0-1]$

$f(v)$ : تابع چگالی احتمال وایبل

$F(V)$ : تابع چگالی تجمعی وایبل

$P_{rated}$ : توان نامی

$v_{ci}$ : سرعت قطع ابتدایی

$v_r$ : سرعت نامی

$v_{ct}$ : سرعت قطع نهایی

$P_v(v)$ : توان خروجی توربین بادی

$G$ : تابش خورشید  $kW/m^2$

$G_0$ : تابش فرازمینی خورشید  $kW/m^2$

$k_t$ : شاخص روشنایی

$\bar{k}_t$ : میانگین شاخص روشنایی

$\sigma_{k_t}$ : انحراف معیار شاخص روشنایی

$\beta$ : ثابت تابع چگالی احتمال توزیع بتا

$\alpha$ : ثابت تابع چگالی احتمال توزیع بتا

$f(k_t)$ : تابع چگالی احتمال بتای شاخص وضوح

$T_c$ : دمای سلول خورشیدی

$T_a$ : دمای محیط

$N_{OT}$ : دمای عملکرد نامی سلول خورشیدی

$I_{sc}$ : جریان اتصال کوتاه (A) سلول خورشیدی

$V_{oc}$ : ولتاژ اتصال کوتاه (V) سلول خورشیدی

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به دنبال تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، افزایش تقاضا و مصرف انرژی الکتریکی، گرایش به استفاده از منابع تولید پراکنده (DGs) در کنار روش‌های متمرکز تولید انرژی الکتریکی، افزایش یافته است. همچنین در میان منابع تولید پراکنده، انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و ... با در نظرگیری ملاحظات زیست محیطی، سازگاری مناسب با طبیعت و تجاری شدن روش‌های تولید تجدیدپذیر، از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و توجه بیشتری را می‌طلبد [۱-۳]. کارهای فراوانی در مورد مزایا و تاثیرات منابع تولید پراکنده بر روی شبکه میکروگرید صورت پذیرفته است همچون کاهش اثرات زیست محیطی، آزاد کردن ظرفیت خط، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات خطوط، و افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های هوشمند از دیگر کارهای انجام شده در این زمینه می‌باشد [۱-۱۰].

علاوه بر موارد ذکر شده کاهش عمر از دست رفته (LOL) ترانسفورماتورها با استفاده از اثرات منابع تولید پراکنده در [۱۷، ۱۸] آورده شده است. از طرف دیگر، مدل خروجی ترانسفورماتور و مدل خطای وابسته به عمر آن در [۱۹-۲۱] بیان گردیده است. در مقاله‌های بالا، با وجود بیان بعضی مزایای استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌ی میکرو گرید، به دیگر اثرات مثبت استفاده از این منابع پرداخته نشده است. این مقاله به بررسی اثرات استفاده از منابع تولید پراکنده بر کاهش احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمرها در شبکه‌ی توزیع می‌پردازد. ورود ژنراتورها به مدار موجب کاهش جریان و ولتاژ ترانسفورمرها شده و با کاهش بالاترین نقطه‌ی دمایی ترانسفورماتور موجب کاهش عمر معادل سپری شده می‌گردد. اگرچه در [۱۷، ۱۸] به کاهش عمر از دست رفته ترانسفورماتورها با استفاده از حضور منابع تولید پراکنده پرداخته شده است، اما تاکنون اثر انواع منابع تولید پراکنده با درصد نفوذهای مختلف بر

روی قابلیت اطمینان سیستم با در نظرگیری مدل دینامیکی - حرارتی خطا در ترانسفورماتورها مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

$I$ : جریان خروجی (A) سلول خورشیدی  
 $K_I$ : ضریب دمایی جریان  $I/C$  خورشیدی  
 $k_V$ : ضریب دمایی ولتاژ  $V/C$   
 $N_{PV}$ : تعداد سلول خورشیدی  
 $\eta$ : بازده ماژول خورشیدی  
 $PPV$ : توان خروجی سلول خورشیدی  
 $S_{m,t}^i, S_{rated}^i, K_{m,t}^i$ : پار ترانسفورمر و مقدار نامی آن و نسبت آنها  
 $R^i$ : نسبت تلفات نامی به تلفات بی‌باری  
 $\theta_u, \theta_{fl}$ : اختلاف دمای روغن با محیط در حالت نامی و بار کامل در شرایط پایدار

$\theta_g^i, \theta_{g(fl)}^i$ : اختلاف دمایی HST با روغن در حالت نامی و بار کامل  
 $\theta_a^i, \theta_{hst}^i$ : بالاترین نقطه‌ی دمایی سیم پیچ ترانس و دمای محیط  
 $L_i, LOL_T^i, LOL_t^i$ : عمر از دست رفته در ساعت t شبیه سازی، عمر از دست رفته در دوره زمانی T و عمر از دست رفته مورد انتظار

$a, b$ : ضرایب محاسبه  $\theta_u, \theta_g^i$   
 $A, B$ : ثابت‌های آزمایشی بر حسب داده‌های آزمایشی  
 $Pr_t^i$ : احتمال خطای ترانسفورمر در لحظه‌ی t  
 $N$ : تعداد حالات محتمل بهره‌برداری سیستم  
 $MTTF$ : میانگین زمان تا بروز خطا هر جزء  
 $MTTR$ : میانگین زمان تا تعمیر هر جزء

این مقاله سعی می‌کند اثر منابع تولید پراکنده با تکنولوژی‌های مختلف را بر کاهش احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورماتورها و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان سیستم بررسی کند. شاخص‌های احتمالاتی برای مدل کردن عمر سپری شده و بار قرار گرفته بر روی ترانسفورماتورها با استفاده از مدل عمر آرینوس - ویبول (Arrhenius-Weibull life) بیان گردیده است. علاوه بر این، مدل انواع مختلف منابع تولید پراکنده چون توربین بادی، سلول خورشیدی و دیزل ژنراتور بررسی شده است. درصد نفوذهای متفاوتی برای تکنولوژی‌های مختلف منابع تولید پراکنده در آنالیز حساسیت آورده شده است. روش ارائه شده بر روی شبکه واقعی سهند بندر عباس با استفاده از شبیه‌ساز احتمالاتی منت کارلو پیاده شده است.

در قسمت دوم، بیان مسئله ارائه می‌گردد. در قسمت‌های سوم، چهارم و پنجم به بررسی مدل بار و منابع تولید پراکنده با تکنولوژی‌های متفاوت و مدل خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمرها می‌پردازد. محاسبه قابلیت اطمینان شبکه با در نظر گیری خطای متغیر دینامیکی ترانسفورمرها که مهمترین نوآوری این مقاله می‌باشد در قسمت‌های ششم و هفتم بیان می‌گردد. پیاده سازی بر روی فیدر سهند ونتیجه گیری در قسمت‌های هشتم و نهم آورده شده است.

## ۲. بیان مسئله

هدف اصلی این مقاله، ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه با در نظرگیری خطای ناشی از عمر و بار بر روی ترانسفورماتورها، در حضور منابع تولید پراکنده می‌باشد. برای تحقق این هدف، الگوی بار موجود در شبکه و توان خروجی منابع تولید پراکنده به صورت احتمالاتی بیان گردیده است. با تعریف الگوی بار و تولید، می‌توان نسبت بار به بار نامی هر ترانسفورماتور را که بر روی مدل دینامیکی - حرارتی ترانسفورمرها اثر می‌گذارد، حساب نمود. با در نظر گیری مدل دقیق خطای ترانسفورمرها، مدل احتمالاتی خروجی منابع تولید پراکنده و دیگر پارامترهای عدم قطعیت در شبکه، می‌توان به ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه پرداخت.

در این مقاله، با استفاده از شبیه ساز احتمالاتی منت کارلو، شبکه میکروگرید مدل گردیده است. با استفاده از داده‌ها و اجزای احتمالاتی سیستم همچون الگوی احتمالاتی بار، دمای محیط، سرعت باد، تابش خورشید، زمان منجر به خطا و زمان تعمیر اجزای مختلف سیستم، توابع چگالی تجمعی احتمال محاسبه می‌گردند. سپس با معکوس گرفتن از این توابع پارامترهای احتمالاتی شبکه محاسبه می‌شود. با استفاده از این روش، متغیرهای بدست آمده، رفتاری شبیه به مقادیر واقعیشان در طبیعت خواهند داشت.

## ۳. مدل سازی منابع تولید پراکنده

### تجدید پذیر

. برای شبیه سازی احتمالاتی ریزش‌ها در حضور منابع تولید پراکنده نیاز است رفتار اجزای مختلف سیستم را که دارای عدم قطعیت و ماهیت تصادفی است، مدل‌سازی نمود. توان تولیدی منابع تولید پراکنده بادی و خورشیدی دارای عدم قطعیت بالا بوده و تابع پدیده‌های احتمالاتی مانند سرعت باد و تابش خورشید می‌باشند. در ادامه، مدل‌سازی توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر بادی و خورشیدی شرح داده خواهد شد.

### ۳.۱ مدل‌سازی توان تولیدی واحدهای تولید انرژی باد

استفاده از تابع چگالی احتمال وایبل (Weibull pdf) برای مدل کردن سرعت ساعتی باد یکی از روش‌های مرسوم در مراجع می‌باشد [۲۶-۲۷]. در رابطه‌های زیر، نحوه محاسبه پارامترهای شکل و مقیاس توزیع چگالی احتمال وایبل آورده شده است. همانگونه که در روابط زیر قابل مشاهده است، بر اساس مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های مربوط به سرعت باد می‌توان پارامترهای شکل و مقیاس توزیع چگالی احتمال وایبل را محاسبه نمود. پس از محاسبه پارامترهای شکل و مقیاس توزیع چگالی احتمال وایبل، محاسبه احتمال وزش سرعت باد مشخص مطابق رابطه (۳) امکان‌پذیر است.

$$k = \left( \frac{\sigma}{v_m} \right)^{-1.068} \quad (1)$$

محاسبه شده، متغیر تصادفی متناظر با شاخص وضوح، تابش خورشید تصادفی مورد نیاز تولید می‌گردد. یکی از توزیع‌های احتمال مورد استفاده برای مطالعات احتمالاتی تابش خورشید و شاخص وضوح تابش، توزیع بتا می‌باشد. محاسبات به صورت زیر صورت می‌گیرد:

$$K_t = \frac{G}{G_0} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{(1 - \bar{k}_t)(\bar{k}_t(\bar{k}_t + 1))}{\sigma_{k_t}^2 - 1} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\bar{k}_t \times \beta}{1 - \bar{k}_t} \quad (10)$$

$$f(k_t) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\alpha)} k_t^{\alpha-1} (1 - k_t)^{\beta-1} \quad (11)$$

$$K_t = \text{inverse} \int_0^{k_t} f(k_t) \quad (12)$$

توان خروجی ماژول سلول خورشیدی به شدت تابش خورشید، دمای محیط و ویژگی‌های ساختاری ماژول وابسته است. با تغییر شاخص روشنایی در هر ساعت، توان خروجی در هر واحد زمانی تغییر می‌کند [۲۱-۲۳]. در روابط زیر، معادلات حاکم بر خروجی واحدهای تولیدی سلول خورشیدی ارائه گردیده است. با در دست داشتن این روابط و تولید متغیر تصادفی نظیر با شاخص وضوح می‌توان در هر گام از شبیه سازی مونت کارلو سیستم، توان قابل

تحویل سلول‌های خورشیدی سیستم را محاسبه نمود. لازم

به ذکر است در زمان‌هایی که خورشید نمی‌تابد، توان خروجی سلول‌های خورشیدی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$T_c = T_a + \left( G \times \frac{(N_{OT} - 20)}{800} \right) \quad (13)$$

$$I = k_t \times (I_{sc} + (T_c - T_a) \times K_I) \quad (14)$$

$$V = V_{oc} - k_V \times T_c \quad (15)$$

$$PPV = N_{PV} \times I \times V \times \eta \quad (16)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2)$$

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

در روش شبیه سازی مونت کارلو نیاز است بر اساس داده‌های آماری واقعی پارامترهای تصادفی مانند سرعت باد، متغیر تصادفی ایجاد شود و شرایط حالت واقعی شبیه سازی شود. یکی از روش‌های ممکن برای تولید متغیر تصادفی بر اساس داده‌های آماری، استفاده از معکوس تابع چگالی تجمعی احتمال سرعت باد است. در روابط (۵) و (۶)، تابع چگالی تجمعی احتمال وایبل برای سرعت باد و نحوه تولید متغیر تصادفی سرعت باد بر اساس آن شرح داده شده است.

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (5)$$

$$V = -c \ln(1-u)^{\frac{1}{k}} = -c \ln(u)^{\frac{1}{k}} \quad (6)$$

با در دست داشتن سرعت باد که به کمک رابطه (۶) تولید خواهد شد، در هر ساعت از شبیه سازی احتمالاتی مونت کارلو کافی است، روابط حاکم بر واحد تولید بادی در سرعت باد شبیه سازی اعمال شود تا توان قابل تحویل واحد تولید بادی مشخص شود. توان خروجی واحد تولید بادی مبتنی بر سرعت باد و پارامترهای منحنی توان توربین بادی می‌باشد. توان خروجی واحد تولیدی بادی در هر لحظه‌ی زمانی و سرعت بادی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۲۶،۲۷]:

$$P_V(v) = \begin{cases} 0 & 0 < v < v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} < v < v_r \\ P_{rated} & v_r < v < v_{ct} \\ 0 & v_{ct} < v \end{cases} \quad (7)$$

۳.۲ مدل کردن تابش خورشید

برای مدل کردن تابش نور خورشید در شبیه سازی احتمالاتی مونت کارلو، مشابه آنچه در مورد مدل‌سازی سرعت باد و تولید سرعت تصادفی باد بیان شد، نیاز است تابع چگالی احتمال شاخص وضوح (Clearness index) مناسب انتخاب شود. سپس با استفاده از معکوس تابع چگالی احتمال تجمعی

### ۳.۳ مدل سازی دیزل ژنراتور

$$\theta_u^i = \theta_{fl}^i \left( \frac{K_i^2 + 1}{R_i + 1} \right)^a; K_i = \frac{S_{m,t}^i}{S_{rated}^i} \quad (17)$$

$$\theta_{0}^i(t) = \theta_u^i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) + \theta_{i}^i e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (18)$$

$$\theta_g^i(t) = \theta_{g(fl)}^i K_i^{2b} \quad (19)$$

$$\theta_{hst}^i(t) = \theta_0^i(t) + \theta_g^i(t) + \theta_a^{m,t}(t) \quad (20)$$

اگر مقدار دمایی اولیه روغن مشخص باشد، محاسبات طبق روند گفته شده در مرجع [۳۰] انجام می‌گیرد.

برای محاسبه‌ی احتمال خرابی هر ترانس، عمر سپری شده واقعی آن بعد از گذشت (T) سال به صورت عبارت موجود در (۲۱) خواهد بود.

$$T = (m-1) + \frac{t}{8760} \quad (21)$$

برای محاسبه‌ی دقیق تاثیرات شرایط گذشته‌ی ترانس بر عملکرد فعلی آن، مفهوم زمان عملکرد معادل در این مقاله بیان می‌گردد [۲۱]. در طول مدت زمان (T) که ترانسفورمر شرایط عملکردی متفاوتی را سپری می‌کند، عمر از دست رفته در واحد زمانی مورد مطالعه و عمر کلی از دست رفته در طول زمان (T) به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$LOL_t^i = \Delta t_i \times \exp \left( \frac{B}{\theta_0^i} - \frac{B}{\theta_{hst}^i(t) + 273} \right) \quad (22)$$

$$LOL_T^i = \sum_{j=1}^{(m-1) \times 8760 + t} LOL_j^i \quad (23)$$

بر اساس مفاهیم احتمالاتی بیان شده در [۲۱] احتمال خرابی ترانس بر اثر دو پارامتر گذشت زمان و مقدار بار قرار گرفته بر روی ترانس از روابط زیر پیروی می‌کنند.

$$L = A \times \exp \left( \frac{B}{\theta_0 + 273} \right) \quad (24)$$

$$(25)$$

خروجی دیزل ژنراتورها کنترل‌پذیر و بدن عدم قطعیت می‌باشد. این منابع دارای ظرفیت ثابت می‌باشند

### ۴. مدل سازی بار

الگوی مصرف مشترکین می‌تواند بر اساس داده‌های گذشته منطقه و یا با استفاده از استاندارد IEEE-RS [۲۲] انجام بگیرد. در این مقاله از استاندارد IEEE استفاده شده است و اطلاعات بار در فصل‌های مختلف به کار گرفته شده است. مقدار ولتاژی که بر روی مشترکین قرار می‌گیرد وابسته به پخش بار می‌باشد. فوروارد بک وارد سویپ (sweep) (forward backward) روش نردبانی (ladder iteration) [۲۴ و ۲۵] و مدل امپدانس گاوسی (Zbus-gauss) [۲۵] از جمله روش‌های به کار گرفته شده در پخش بار می‌باشند. در این مقاله از روش نردبانی که سریع تر و ساده تر می‌باشد برای حل پخش بار کمک گرفته شده است.

### ۵. مدل دینامیکی - حرارتی خطا در

#### ترانسفورماتورها

تضعیف عایق در ترانسفورماتورها وابسته به دو پارامتر دما و زمان می‌باشد [۳۰]. با استفاده از استاندارد IEEE/ANSI C57.91-2011، لحاظ کردن تاثیرات زمان سپری شده و بالاترین نقطه‌ی دمایی سیم پیچ ترانسفورمر، دو پارامتر بسیار مهم در محاسبه خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر می‌باشد. افزایش دمای روغن نسبت به دمای محیط در حالت ماندگار با استفاده از نسبت بار ترانسفورماتور به مقدار نامی آن در (۱۷) بیان گردیده است. همچنین در (۱۸)، افزایش دمای روغن نسبت به محیط در حالت گذرا آورده شده است.

بر اساس روابط موجود در [۳۱ و ۳۲]، بالاترین نقطه‌ی دمایی ترانس نسبت به روغن و همچنین مقدار دمایی بالاترین نقطه دمایی سیم پیچ بعد از t ثانیه از روابط (۱۹) و (۲۰) پیروی خواهد کرد.

$$\frac{\sigma(E(X))}{E(X)} \leq \varepsilon \quad (29)$$

۷. روش ارزیابی قابلیت اطمینان با در نظرگیری خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورماتور در حضور گسترده منابع تولید پراکنده

#### ۷.۱ الگوریتم روش پیاده شده

برای محاسبه روش منت کارلو، انجام مراحل زیر ضروری است:

قدم اول: الگوی مصرف بار مصرف کنندگان باید شبیه سازی گردد

قدم دوم: توان خروجی منابع انرژی محاسبه گردد

قدم سوم: بر طبق پخش بار، توان عبوری از ترانسفورمرها محاسبه گردد. بنابراین نسبت بار به بار نامی ترانسفورمر

(شاخص  $k$ ) محاسبه می‌گردد.

قدم چهارم: نرخ خطای ترانسفورماتورها با توجه به مدل دینامیکی - حرارتی بیان شده، محاسبه می‌گردد.

قدم پنجم: شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه می‌گردد.

#### ۷.۲ سناریوهای مورد مطالعه

چهار سناریو برای بررسی رفتار منابع تولید پراکنده بر قابلیت اطمینان سیستم با توجه به مدل خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورماتورها در نظر گرفته می‌شود.

سناریوی اول: هیچ DG در سیستم قرار نداشته باشد.

سناریوی دوم: تمامی DG ها از نوع دیزلی باشند.

سناریوی سوم: منابع تولید پراکنده از نوع سلول خورشیدی و توربین بادی با ظرفیت‌های یکسان باشد.

سناریوی چهارم: منابع تولید پراکنده از نوع دیزلی، سلول خورشیدی و بادی باشد. ظرفیت ماکسیمم منابع بادی و خورشیدی برابر و نصف ظرفیت دیزلی باشد.

$$\begin{aligned} Pr_t^i &= \Pr(T \leq t \leq T + \Delta t \mid t \geq T) \\ &= \Pr(LOL_T^i \leq t \leq LOL_T^i + LOL_t^i \mid t \geq LOL_T^i, \theta_0^i) \\ &= \frac{CDF^i(LOL_T^i + LOL_t^i \mid \theta_0^i) - CDF^i(LOL_T^i \mid \theta_0^i)}{1 - CDF^i(LOL_T^i \mid \theta_0^i)} \\ &= 1 - \exp\left[\left(\frac{LOL_t^i}{L}\right)^\beta - \left(\frac{LOL_T^i + LOL_t^i}{L}\right)^\beta\right] \end{aligned}$$

#### ۶. محاسبه‌ی قابلیت اطمینان

##### ۶.۱ مدل کردن دسترس پذیری اجزای مختلف سیستم

برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان یک سیستم، تعریف در سرویس بودن و خارج از سرویس بودن اجزای مختلف سیستم ضروری است. طبق روابط زیر زمان در دسترس بودن و زمان خارج از دسترس بودن هر جز سیستم طبق روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌گردد:

$$Up\ time_j = -MTTF_j \times Ln(u_1) \quad (26)$$

$$Down\ time_j = -MTTR_j \times Ln(u_2) \quad (27)$$

در این روابط، متغیرهای رندم  $u_1, u_2$ ، که اعدادی بین صفر و یک می‌باشند، پارامترهای زمان در دسترس بودن و زمان خروج را تولید می‌کنند. سپس متغیر در دسترس بودن هر المان در هر لحظه‌ی زمانی توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد.

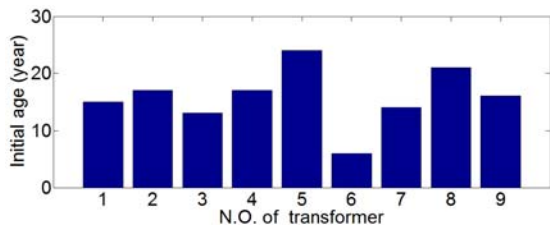
$$Availability(j, t) = \begin{cases} 1 & t \in Up\ time_j \\ 0 & t \in Down\ time_j \end{cases} \quad (28)$$

مقدار ۱، مشخص کننده در دسترس بودن المان در مدار و مقدار ۰ نشان دهنده‌ی خارج شدن المان از سیستم در لحظه‌ی  $t$  است.

##### ۶.۲ محاسبه‌ی قابلیت اطمینان

نسبت توان لحظه‌ای ترانسفور به مقدار نامی آن ( $k$ ) با استفاده از پخش بار صورت می‌گردد. سپس احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب محاسبه‌ی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم با در نظرگیری منابع تولید پراکنده امکان پذیر می‌باشد.

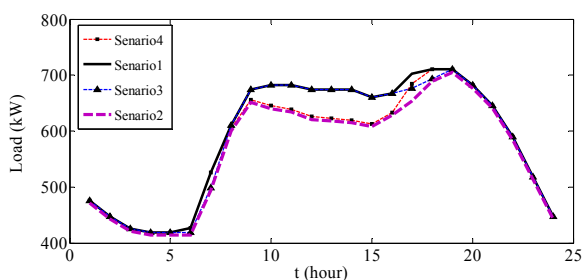
منت کارلو تا زمانی به شبیه سازی خود ادامه می‌دهد که رابطه‌ی زیر محقق نگردد. در این رابطه،  $X$  شاخص قابلیت اطمینان انتخابی می‌باشد که در این مقاله آن را EENS فرض نموده‌ایم.



شکل ۲: سن اولیه ترانسفورمرهای مورد مطالعه

## ۹. نتایج شبیه‌سازی

بر اساس نتایج مدل کارلو و پخش بار، باس بار ۵ دارای شرایط بحرانی می‌باشد زیرا دارای اضافه بار خطرناک در بازه‌های زمانی خاص و خطای دینامیکی - حرارتی بالا در ترانسفورمر مربوطه می‌باشد. همچنین سن بالای این ترانسفورمر که به عنوان مقدار اولیه در مدل خطا به کار می‌رود نیز نقش مهمی در بحرانی تر شدن این ترانسفورمر ایفا می‌کند. به دلیل اهمیتی که این باس بار برای ما دارد، پروفایل بار و منحنی دمایی آن در شکل‌های ۴ و ۵ به نمایش در آمده است. پروفایل بار برای یک روز نمونه آورده شده است و تفاوت به کارگیری سناریوهای مختلف در تغییرات بار عبوری از ترانسفورماتور و بالاترین نقطه دمایی آن که پارامتر مهم در مدل دینامیکی - حرارتی است، به خوبی به نمایش در آمده است.



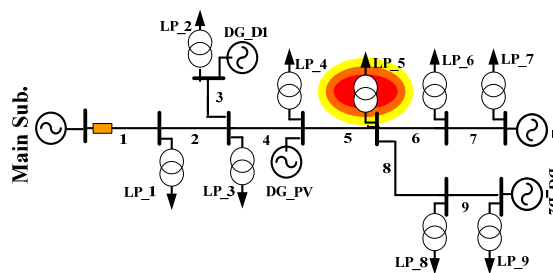
شکل ۳: منحنی بار روزانه برای باس بار بحرانی ۵ با در نظرگیری سناریوهای مختلف

در ادامه ضریب نفوذهای متفاوتی از منابع تولید پراکنده برای بررسی اثراتشان روی کاهش احتمال خطای ترانسفورماتورها و بهبود قابلیت اطمینان شبکه در نظر گرفته شده است.

## ۸. سیستم مورد مطالعه

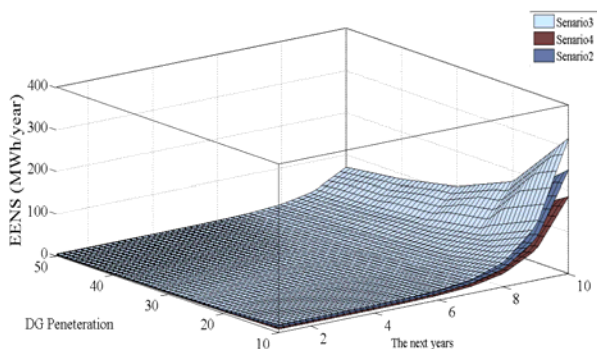
تست سیستمی که در شکل (۱) نشان داده شده است فیدر ۲۰ کیلو ولت برق منطقه‌ای بندر عباس به نام سهند می‌باشد. پیک بار در این شبکه ی توزیع ۶ MW است. چهار واحد تولید منابع تولید پراکنده به همراه بارهای مختلف در شکل به نمایش در آمده است. دیزل ژنراتورها که دارای ظرفیت ۹۰۰ KW می باشند در باس‌های ۲ و ۹ قرار گرفته‌اند. واحد سلول خورشیدی با ظرفیت ۹۰۰ KW به باس بار ۴ متصل گردیده است و توربین بادی نیز با ظرفیت مشابه به باس بار ۷ متصل است. نرخ خطای خطوط بر اساس داده‌های قبلی فیدر سهند ۰/۴۹۷ (failure/year) در نظر گرفته شده است. میانگین زمان خطا و میانگین زمان تعمیر ادوات مختلف سیستم در جدول (۱) به نمایش در آمده است.

پارامترهای ضروری مدل دینامیکی - حرارتی ترانسفورماتورها در جدول (۲) به نمایش در آمده است. همان گونه که در دیاگرام تک خطی سیستم نشان داده شده است، ۹ ترانسفورماتور در شبکه قرار دارد. با توجه به شکل (۴)، طول عمر سپری شده ترانسفورماتورهای ۵ و ۸ بیش از ۲۰ سال می‌باشد. همچنین طول عمر دیگر ترانسفورماتور ها، در این شکل مشخص گردیده است.



شکل ۱: نمایش تک خطی فیدر سهند به عنوان سیستم مورد مطالعه



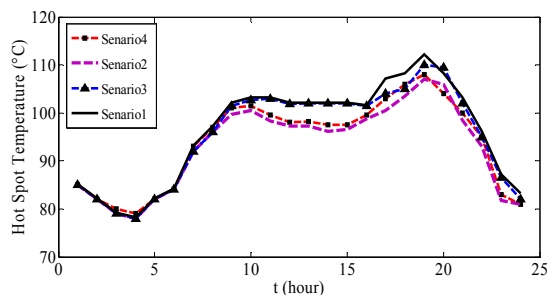


شکل ۶: آنالیز حساسیت EENS بر حسب درصد نفوذ منابع تولید پراکنده و سال مورد مطالعه در سناریوهای مختلف

در شکل (۵)، شاخص EENS (انرژی تامین نشده) با احتساب سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. با افزایش زمان بررسی سیستم، تفاوت‌های استفاده از تکنولوژی‌های منابع تولید پراکنده مختلف به خوبی خود را آشکار می‌سازد. شاخص EENS در سناریوی ۱ که هیچ منبع تولید پراکنده‌ای به کار گرفته نشده است بیش از سناریوهای دیگر است. همچنین افزایش این شاخص در طول ۱۰ سال مورد مطالعه نیز از دیگر سناریوها بیشتر است به طوری که انرژی تامین نشده در دهم سال مورد مطالعه حدود ۲ برابر این مقدار در سناریوهای ۲ و ۴ است. نتایج شکل (۵)، تأثیرات بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش HST را بر روی شاخص قابلیت اطمینان انرژی تامین نشده به خوبی نمایش می‌دهد.

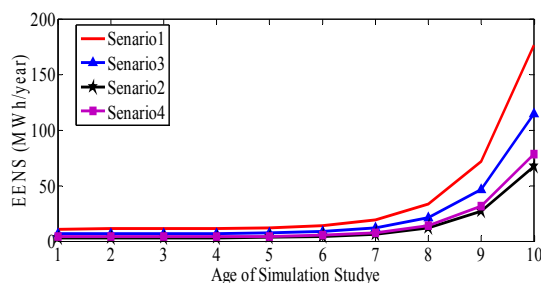
علاوه بر این، آنالیز حساسیت برای شاخص EENS با در نظر گیری ضریب نفوذهای مختلف برای انواع تکنولوژی‌های تولید پراکنده، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان، روند بهتری به خود می‌گیرد. سناریوهای ۲ و ۴ با افزایش سال‌های مورد مطالعه، بهبودی بیشتری را نسبت به سایر سناریوها برای ما فراهم می‌کند.

مقایسه‌ی احتمال خطای ترانسفورمر در سناریوهای مختلف در شکل (۷) به نمایش درآمده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، افزایش احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر در سال‌های هشتم، نهم و دهم افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. این رفتار، با توجه به ماهیت نمایی خطا در



شکل ۴: HST روزانه مربوط به ترانسفورماتور ۵ با در نظر گیری سناریوهای مختلف

نتایج نشان می‌دهد که، در سناریوی اول (استفاده نکردن از منابع تولید پراکنده) منحنی HST ترانس بین ساعات ۱۷ تا ۲۰ از شرایط کار عادی خارج شده است. این شرایط بد بار منجر به افزایش احتمال خطای ترانسفورمر خواهد شد. با افزایش احتمال خطای ترانس، قابلیت اطمینان سیستم هم به خطر خواهد افتاد. پروفایل ولتاژ و نمودار HST سایر سناریوها هم در شکل ۳ و ۴ آورده شده است. فواید استفاده از تکنولوژی‌های مختلف در این شکل‌ها به نمایش درآمده است. در سناریوهای ۲ و ۴ که استفاده از دیزل ژنراتور و هیبرید دیزل ژنراتور با توربین بادی و سلول خورشیدی می‌باشند، بهترین عملکرد مشاهده می‌شود. اگر چه استفاده از دیزل ژنراتورها به عنوان تنها تکنولوژی به کار رفته، شرایط مطلوب تری برای ما فراهم می‌کند اما به دلیل کاهش ندادن آلودگی و استفاده از سوخت‌های فسیلی شرایط نامطلوبی برای ما ایجاد می‌کند. به همین دلیل با وجود برتری سناریوی ۲ نسبت به ۴ در پروفایل بار و HST بهتر، سناریوی ۴ که ترکیبی از دیزل و باد و خورشید است به عنوان بهترین سناریو انتخاب می‌گردد.



شکل ۵: شاخص EENS برای ده سال مطالعه‌ی سیستم در سناریوهای مختلف

جدول ۱: تعداد مشترکین و مقدار بار هر ترانسفورمر

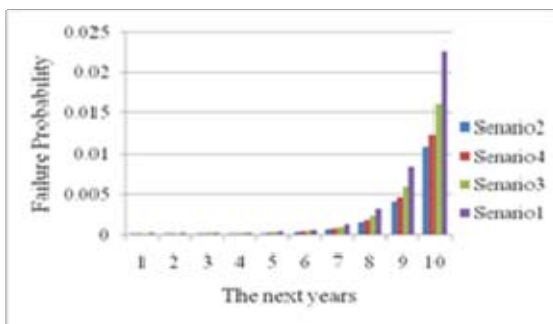
No. of transformers	No. of customers	Load (KW)
1	165	660
2	161	645
3	171	685
4	160	640
5	180	720
6	167	670
7	160	640
8	166	665
9	168	675

جدول ۲: MTTF و MTTR هر جزء

Device	MTTF (hr)	MTTR (hr)
Wind-based DG unit	1920	80
PV module	1920	80
Diesel DG unit	950	50

جدول ۳: پارامترهای مدل دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر

Parameter	Value
$\theta_f$	36°C
$\theta_{g(f)}$	28.6°C
$R$	4.87
$\tau_0$	3.5 hr
$n$	1
$m$	0.8
$A$	0.56
$B$	1500



ترانسفورمر که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، توجیه‌پذیر است. در سناریوهایی که توجهی به منحنی بار صورت نگرفته است و موجب به وجود آمدن پیک منحنی هموار نمی‌گردد، احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله، احتمال خطای دینامیکی - حرارتی ترانسفورمر در یک شبکه توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. اضافه بار، منجر به عبور توان و جریان زیاد از

ترانسفورمر شده و منجر به بالا رفتن دمای بالاترین نقطه‌ی دمایی و در نتیجه افزایش احتمال خطای ترانسفورماتور می‌گردد.

استفاده از تکنولوژی‌های مختلف تولید پراکنده در راستای کاهش جریان عبوری از ترانسفورماتور و کاهش بالاترین نقطه‌ی دمایی ترانسفورماتور است. مطالعه‌ی و ارزیابی شاخص EENS قابلیت اطمینان نیز در ادامه آورده شده است. با کاهش احتمال خطا با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف تولید پراکنده، انرژی تامین نشده سیستم نیز کاهش پیدا کرده و منجر به بهبود قابلیت اطمینان سیستم خواهد گشت.

علاوه بر این، آنالیز حساسیت شاخص EENS با در نظرگیری ضریب نفوذهای مختلف منابع تولید پراکنده، مورد مطالعه قرار گرفته است. افزایش ضریب نفوذ منابع، منجر به کاهش جریان بر روی ترانسفورمر شده و منجر به بهبودی بیشتری در قابلیت اطمینان سیستم خواهد گشت. نتایج در طول ۱۰ سال مورد مطالعه قرار گرفته است و با توجه به خاصیت نمایی خطا، کاهش قابلیت اطمینان سیستم در سال‌های پایانی روند سریع‌تری به خود می‌گیرد. سناریوهایی که شامل دیزل ژنراتور و ترکیب دیزل ژنراتور با منابع بادی و خورشیدی دارد، بهبودی بیشتری نسبت به سناریویی که تنها از منابع تجدیدپذیر استفاده می‌کنیم برای ما فراهم می‌آورد. این امر به دلیل عدم قطعیتی است که در باد و تابش خورشید وجود دارد و بهبود پروفایل بار را دچار عدم قطعیت می‌کند. از آنجایی که استفاده از منابع تجدیدپذیر به دلیل مزایایی که دارند در اولویت قرار دارد و نتایج سناریوهای دوم و چهارم نزدیک به یکدیگر می‌باشند، سناریوی چهارم به عنوان بهترین سناریو انتخاب می‌گردد.

[۱۹] S. K. E. Awadallah, J. V. Milanovic, P. N. Jarman, "Reliability based framework for cost-effective replacement of power transmission equipment," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 5, pp. 2549-2557, Sept. 2014.

[۲۰] S. K. E. Awadallah, J. V. Milanovic, P. N. Jarman, "The influence of modeling transformer age related failures on system reliability," IEEE Trans. Power Syst., vol. PP, no. 99, pp. 1-10, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2331103.

[۲۱] H. Jian, S. Yuanzhang, W. Peng, C. Lin, "A hybrid conditions-dependent outage model of a transformer in reliability evaluation," IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 4, pp. 2025-2033, Oct. 2009.

[۲۲] "IEEE reliability test system—A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, pp. 2047-2054, Nov. 1979.

[۲۳] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 1, pp. 523-538, Feb. 1995.

[۲۴] W. H. Kersting, Distribution system modeling and analysis. CRC Press LLC, New York, 2002.

[۲۵] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas, E. Chelbi, "Distribution system power flow analysis—a rigid approach," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 3, pp. 1146-1152, 1991.

[۲۶] R. Billinton, B. Karki, "Well-Being Analysis of Wind Integrated Power Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 4, pp. 2101-2108, Nov. 2011.

[۲۷] J. Hetzer, D. C. Yu, and K. Bhattacharai, "An economic dispatch model incorporating wind power," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 1, pp. 603-611, 2008.

[۲۸] R. Billinton, Bagen, and Y. Cui, "Reliability evaluation of small standalone wind energy conversion systems using a time series simulation model," Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., vol. 150, pp. 96-100, 2003.

[۲۹] J. Liu, W. Fang, Y. Yang, C. Yang, S. Lei, S. Fu, "Increasing wind power penetration level based on hybrid wind and Photovoltaic generation," TENCON 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference (31194), pp.1-5, 22-25 Oct. 2013.

[۳۰] F. Weihui, J. D. McCalley and V. Vittal, "Risk assessment for transformer loading," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 3, pp. 346-353, Aug 2001.

[۳۱] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995), pp. 1-123, March 2012.

شکل ۷: احتمال خطای دینامیکی - حرارتی مربوط به ترانس ۵ در طول ۱۰

سال مطالعه با در نظر گیری سناریوهای مختلف

## مراجع

- [۱] A. H. Etemadi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Distribution system reliability enhancement using optimal capacitor placement," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 2, no. 5, pp. 621-631, September 2008.
- [۲] H. Hashemi-Dezaki, H. Askarian-Abyaneh, G. B. Gharehpetian, H. Nafisi, "Optimized allocation of DGs to improve system reliability based on loading effects," Arab. J. Sci. Eng., vol. 39, no. 5, pp. 3907-3915, 2014.
- [۳] سعید پائسانی، رضا نوروزیان، وحید رشتچی، "پخش بار احتمالی بر اساس کانولوشن گسسته زمانی بادر نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تولید پراکنده و بارها در شبکه های توزیع شعاعی"، بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، ۱۳۹۲.
- [۴] حسین معرفی، گنورگ قرهپنجان، مرتضی محمدی اردهالی، فرزانه قائمی، مهدی صلاهی نادری، "اثر منابع تولید پراکنده بر قابلیت اطمینان فیدر پربار شبکه‌ی توزیع بندر عباس"، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۲۰۱۱.
- [۵] H. Hashemi-Dezaki, H. Askarian-Abyaneh, A. Agheli, K. Mazlumi, "Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems," Journal of Electrical Engineering (JEEEC), vol. 63, no. 1, pp. 47-52, 2012.
- [۶] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong, "Multi objective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," Electr. Power System Res., vol. 79, no. 1, pp. 1171-1178, 2009.
- [۷] H. Hashemi-Dezaki, H. Askarian-Abyaneh, A. Agheli, S. H. Hosseinian, K. Mazlumi, H. Nafisi, "Optimized investment to decrease the failure rate of distribution lines in order to improve SAIFI," The 4th International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO2010), IEEE Conference, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 23-24 June 2010.
- [۸] B. Amanulla, S. Chakrabarti, S. N. Singh, "Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 2, pp. 918-926, April 2012.
- [۹] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, "Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 3, pp. 1344-1353, June 2014.
- [۱۰] Al-Muhaini, M.; Heydt, G.T., "Evaluating Future Power Distribution System Reliability Including Distributed Generation," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.28, no.4, pp.2264,2272, Oct. 2013
- [۱۱] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, R. Seethapathy, M. Assam, S. Conti, "Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation," IEEE Trans. Power syst., vol. 26, no. 4, pp. 1945-1952, Nov. 2011 .
- [۱۲] D. Singh, D. Singh, and K. S. Verma, "Multiobjective optimization for DG planning with load models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 1, pp. 427-436, Feb. 2009.
- [۱۳] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 4, pp. 764-773, Dec. 2004.
- [۱۴] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, and G. P. Harrison, "Evaluating distributed generation impacts with a multiobjective index," IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1452-1458, Jul. 2006.
- [۱۵] H. A. Gil and G. Joos, "On the quantification of the network capacity deferral value of distributed generation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1592-1599, Nov. 2006.
- [۱۶] H. A. Gil and G. Joos, "Customer-owned back-up generators for energy management by distribution utilities," IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, pp. 1044-1050, Aug. 2007.
- [۱۷] S. M. M. Agah, H. A. Abyaneh, "Distribution transformer loss-of-life reduction by increasing penetration of distributed generation," IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, pp. 1128-1136, April 2011.
- [۱۸] S. M. M. Agah, H. Askarian Abyaneh, "Quantification of the distribution transformer life extension value of distributed generation," IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 3, pp. 1820-1828, July 2011.