



آنالیز میزان توان و انرژی سالیانه تولیدی و تبادلی بین منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و شبکه توزیع

جواد بهکش

شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل

اردبیل، ایران

JJ3307@gmail.com

است. همچنین در طول یکسال، 0.158mkWh انرژی از طرف منابع تولید پراکنده به طرف شبکه بالادست منتقل شده است. مابقی انرژی بار شبکه، از طریق تولید 0.861mkWh نیروگاه خورشیدی و تولید 0.882mkWh واحد بادی تامین شده است. انرژی کل تلف شده در شبکه 0.498mkWh می‌باشد.

واژه‌های کلیدی — سیستم خورشیدی؛ نیروگاه بادی؛ منحنی بار؛ معاهده COP21. مجموعه داده سالیانه هواشناسی؛

۱. مقدمه

افزایش نگرانی‌های زیست محیطی از یک سو و کاهش منابع فسیلی برای تامین انرژی الکتریکی از سوی دیگر و همچنین تعهد جهانی COP21 برای تامین انرژی الکتریکی از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در سال‌های اخیر باعث گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر شده است. شرکت‌های توزیع در راستای اجرای سیاست‌های تشویقی وزارت نیرو و شرکت‌های توانیر اقدام به عقد قراردادهای خرید تضمینی انرژی پاک نموده است. این امر باعث گسترش احداث و اتصال منابع تولید پراکنده مقایس کوچک به شبکه‌های توزیع در سطوح ولتاژی مختلف شده است. ادغام منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع باعث می‌شود که حالت شعاعی شبکه و عبور یکسویه توان از بین رفته و شبکه شعاعی ساده جای خود را به شبکه پیچیده بدهد [۱]. میزان توان تولیدی منابع تولید پراکنده مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی به شرایط محیطی مانند سرعت باد، شدت تابش نور خورشید و دما وابسته است [۲]. از طرف دیگر به دلیل ماهیت تصادفی بارهای متصل به

چکیده — با اجرایی شدن تعهدات بین‌المللی نشست COP21 برای تامین برق 7500mW برق از طریق منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در ایران، شاهد گسترش روزافزون استفاده از اینگونه منابع در مقایس‌های کوچک و بزرگ هستیم. علاوه بر این، وجود پتانسیل‌های لازم برای ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، انجام مطالعات پتانسیل‌سنجی در سال‌های گذشته، ارائه مشوق‌های مناسب از طرف شرکت مادر تخصصی توانیر و خرید تضمینی انرژی از طرف وزارت نیرو باعث توسعه این بخش در استان اردبیل شده است. در این بین، آگاهی از میزان توان و انرژی سالیانه تولیدی واحدهای بادی و نیروگاه‌های خورشیدی متصل به شبکه، می‌تواند کمک شایانی در برنامه‌ریزی آینده داشته باشند. در این مقاله سعی شده است با استفاده از مجموعه داده‌های سالیانه هواشناسی (TMY) شامل میزان شدت تابش نور خورشید و سرعت متوسط باد نرم‌افزار Metenorm میزان سالیانه توان و انرژی تولیدی نیروگاه 660kW بادی و نیروگاه 500kW خورشیدی برآورد شود. برای مدل‌سازی نیروگاه بادی و خورشیدی از مدل (Long Term) منابع تولید پراکنده استفاده شده است. بارهای شبکه به صورت بارهای سه گانه خانگی، تجاری و صنعتی پیش‌بینی شده است. منحنی بار سالیانه از مدل بار شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل در سال ۱۳۹۴ اقتباس شده است. برای شبیه‌سازی بارهای سه‌گانه از مدل بار Exponential وابسته به زمان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم تحت مطالعه، برای تامین بار کل شبکه (4.38mkWh)، با حضور منابع تولید پراکنده منصوبه، از طرف شبکه توزیع در طی یکسال 3.14mkWh انرژی تحویل داده شده

۲. مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی و بادی به

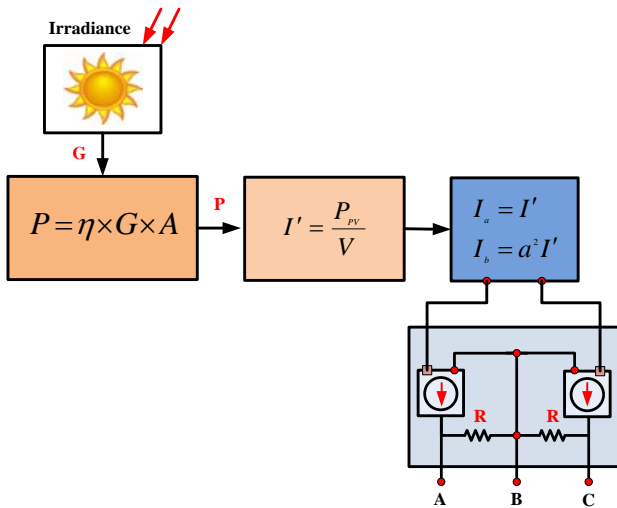
روش طولانی مدت^۴

توان و انرژی خروجی یک نیروگاه خورشیدی معمولاً تابعی از دما محیط و شدت تابش خورشید می‌باشد [۴].

$$P_{PV} = f(Temp, Irrad) \quad (1)$$

$$E_{PV} = P_{PV} \times t = f(Temp, Irrad, t) \quad (2)$$

معمولاً در شبیه‌سازی‌های کوتاه مدت^۵ از معادلات فوق به جهت دقت بالا خروجی استفاده می‌شود. ولی به دلیل سرعت پائین و زمانبر بودن اجراء در شبیه‌سازی‌های طولانی مدت استفاده از معادلات فوق معقول نمی‌باشد. شکل (۱) مدل طولانی مدت نیروگاه خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مدل (Long Term) سیستم خورشیدی

در شبیه‌سازی‌های طولانی مدت نیروگاه‌های خورشیدی روابط ذیل کاربرد زیادی دارند. به طور کلی توان ظاهری یک نیروگاه خورشیدی سه فاز برابر است با [۵-۶]:

$$S = P_{PV} + jQ_{PV} \quad (3)$$

با فرض اینکه اکثراً نیروگاه‌های خورشیدی جهت تزریق توان اکتیو طراحی شده‌اند، بنابراین مقدار توان راکتیو صفر فرض می‌شود [۵-۶].

$$Q_{PV} = 0$$

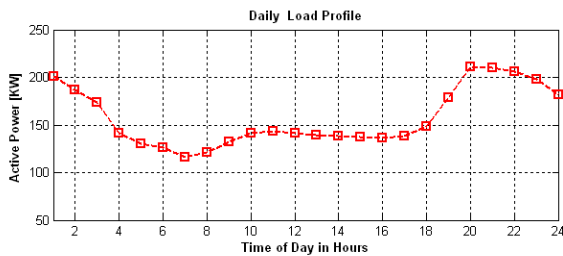
$$S = P_{PV} = \frac{3}{2}(V \times I') = \eta \times G \times A \quad (4)$$

شبکه توزیع و متغییر بودن زمان ورود و خروج آنها در شبکه، امکان ارائه مدل دقیقی از میزان انرژی تبدلی بین منابع، شبکه و بارها وجود ندارد [۳]. برای اینکار داشتن منحنی بار سالیانه و اطلاعات دقیقی از وضعیت جوی محیط می‌تواند مناسب‌ترین روش برای انجام مدل‌سازی باشد. نرم‌افزار Meteonorm یک نرم افزار قدرتمند و معتبری جهت ساخت داده‌های اقلیمی برای بسیاری از شهرها و نقاط جهان می‌باشد. مشکلی که همواره در شبیه‌سازی‌های انرژی در ساختمان و یا هر نوع شبیه‌سازی که اطلاعات آب و هوایی محل در آن دخیل است، وجود دارد، فقدان داده‌های وسیع اقلیمی (خصوصاً روزانه و ساعتی) می‌باشد. اعتبار این نرم‌افزار به اندازه‌ای است که در بسیاری از نرم افزارهای طراحی و شبیه‌سازی، Meteonorm با عنوان Meteosyn همراه با نرم افزار اصلی نصب و وظیفه تولید فایل‌های اقلیمی را تنها برای آن نرم افزار بعهده می‌گیرد. این برنامه اطلاعات خود را از ۸۳۲۵ ایستگاه هواشناسی معتبر، ۵ ماهواره هواشناسی و ۳۰ سال تجربه دریافت می‌کند. وقتی این سه فاکتور در کنار هم قرار می‌گیرند از بابت اعتبار برنامه جای هیچ شک و شبه‌ای باقی نمی‌ماند. در این مقاله سعی شده است با استفاده از مجموعه داده‌های سالیانه هواشناسی^۱ شامل میزان شدت تابش نور خورشید و سرعت متوسط باد نرم‌افزار Metenorm میزان سالیانه توان و انرژی تولیدی نیروگاه ۶۶۰kW بادی و نیروگاه ۵۰۰kW خورشیدی برآورد شود. برای مدل‌سازی نیروگاه بادی و خورشیدی از مدل طولانی مدت^۲ منابع تولید پراکنده استفاده شده است. بارهای شبکه به صورت بارهای سه گانه خانگی، تجاری و صنعتی پیش‌بینی شده است. منحنی بار سالیانه از مدل بار شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل در سال ۱۳۹۴ اقتباس شده است. برای شبیه‌سازی بارهای سه‌گانه از مدل بار نمایی^۳ وابسته به زمان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با حضور منابع تولید پراکنده منصوبه، از طرف شبکه توزیع در طی یکسال ۳.۱۴m kWh انرژی برای تامین بار تحویل داده است میزان بار کل شبکه ۴.۳۸m kWh است. در مدت زمان ۰.۱۵۸m kWh انرژی از طرف منابع تولید پراکنده به طرف شبکه بالادست منتقل شده است. مابقی انرژی بار از طریق تولید ۰.۸۶۱m kWh نیروگاه خورشیدی و تولید ۰.۸۸۲m kWh واحد بادی تامین شده است. انرژی کل تلف شده در شبکه ۰.۴۹۸m kWh می‌باشد.

1 typical meteorological year (TMY)
2 Long Term
3 Exponential

4 Long Term
5 Short Term

بودن زمان ورودی و خروج آنها در شبکه توزیع و ماهیت بارها در طول ۲۴ ساعت رفتار متغیری دارند.



شکل ۲: نمونه‌ای از منحنی بار روزانه

مدل دینامیکی بار را می‌توان با استفاده از یک تابع بین توان اکتیو، راکتیو، ولتاژ و فرکانس بار در یک بازه زمانی (t) نمایش داد. در مطالعات موردی، می‌توان از مدل بار دینامیکی سه فاز-سه سیم، براساس بارگذاری پروفیل روزانه، هفتگی، ماهیانه و یا سالیانه استفاده نمود. توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) جذب شده توسط بار در طی ۲۴ ساعت متفاوت است، بنابراین می‌توان به عنوان تابعی از مولفه مثبت ولتاژ و پروفیل بار تعریف کرد [۸،۱۰]. مدلی که توان اکتیو و راکتیو را به صورت توابعی نمایشی از دامنه و فرکانس ولتاژ بار در یک بازه زمانی ارائه می‌دهد به نوع مدل بار دینامیکی نمایشی وابسته به زمان معروف است. چنانچه در این مدل حساسیت فرکانسی چندان مطرح نباشد روابط به صورت ذیل تعریف می‌شود.

$$P_i(t) = P_{loadprofile}(t) \times \left(\frac{V_i(t)}{V_+}\right)^{n_p} \quad (10)$$

$$Q_i = Q_{loadprofile}(t) \times \left(\frac{V_i(t)}{V_+}\right)^{n_q}$$

که در رابطه بالا $P_{loadprofile}$ و $Q_{loadprofile}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار در ولتاژ نامی است. n_p و n_q نیز به ترتیب ضرایب تابع نمائی ولتاژ بار اکتیو و راکتیو است. ضرایب نمائی برای بارهای جریان ثابت $n_p = n_q = 1$ است. برای بارهای با امپدانس ثابت $n_p = n_q = 2$ خواهد بود. مقدار n_p و n_q برای بارهای مختلف خانگی، تجاری و صنعتی در جدول (۱) ارائه شده است [۱۰].

جدول ۱: مقدار ضرایب n_p و n_q [۱۰]

بار	n_p		n_q	
	روز	شب	روز	شب
خانگی	۱,۰۴	۴,۱۹	۱,۳	۴,۳۸
تجاری	۱,۵	۳,۱۵	۱,۵۱	۳,۴
صنعتی	۰,۱۸	۶	۰,۱۸	۶
ثابت	۰	۰	۰	۰

که در رابطه فوق، G شدت تابش نور خورشید (W/m^2)، η راندمان ماژول خورشیدی، A نیز مساحت کل سیستم خورشیدی (m^2) است [۶].

با تعریف عملگر $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ داریم:

$$V = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2 V_{bc}) \quad (5)$$

$$I' = \frac{P_{PV}}{V} \quad (6)$$

و در نهایت داریم:

$$I_a = I' \quad (7)$$

$$I_b = a^2 I'$$

برای شبیه‌سازی نیروگاه بادی به صورت طولانی مدت توان تولیدی توربین بادی از رابطه ذیل قابل محاسبه است [۷-۸]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cin} \\ P_n \left(\frac{v - v_{cin}}{v_n - v_{cin}}\right)^3 & v_{cin} \leq v \leq v_n \\ P_n & v_n \leq v \leq v_{cout} \\ 0 & v \geq v_{cout} \end{cases} \quad (8)$$

که در رابطه (۸) v_{cin} حد پائین سرعت قطع، v_{cout} حد بالای سرعت قطع، P_n توان نامی و v_n سرعت نامی توربین بادی است. با توجه به اینکه نیروگاه‌های بادی عملاً مصرف کننده توان راکتیو هستند [۷-۸].

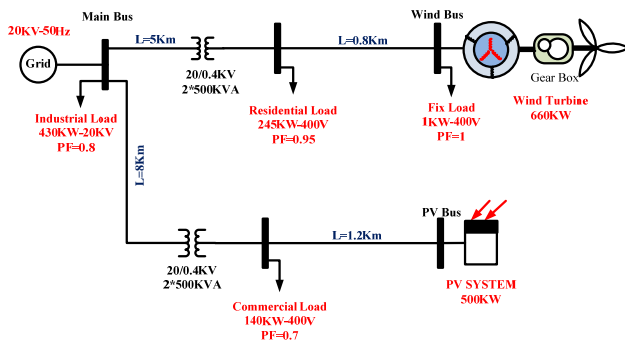
با فرض ثابت بودن توان راکتیو مصرفی نیروگاه داریم [۹]:

$$S - Q_{Constant} = P_{WT} = \frac{3}{2}(V \times I') = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cin} \\ P_n \left(\frac{v - v_{cin}}{v_n - v_{cin}}\right)^3 & v_{cin} \leq v \leq v_n \\ P_n & v_n \leq v \leq v_{cout} \\ 0 & v \geq v_{cout} \end{cases} \quad (9)$$

مشابه روابط (۵) تا (۷)، می‌توان برای بدست آوردن ولتاژ خروجی نیروگاه بادی از جریان‌های I_a و I_b استفاده کرد.

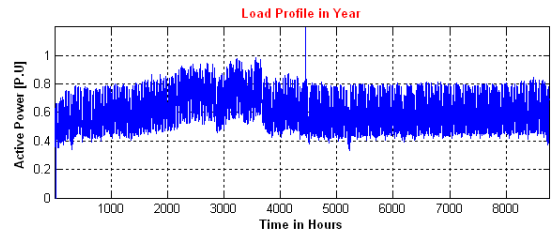
۳. مدل دینامیکی بار وابسته به زمان

شکل (۲) منحنی بار روزانه یک سیستم توزیع را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود بارهای شبکه در ساعات مختلف به دلیل تصادفی



شکل ۴: دیاگرام تک خطی سیستم تحت مطالعه

برای افزایش دقت محاسبات در شبیه‌سازی بارهای سه‌گانه، از نرم‌الیزه شده الگوی بار مصرفی سالیانه استان اردبیل در واحد پریونیت استفاده شده است [۱۱]. این الگوی مصرف در شکل (۳) نشان داده شده است.



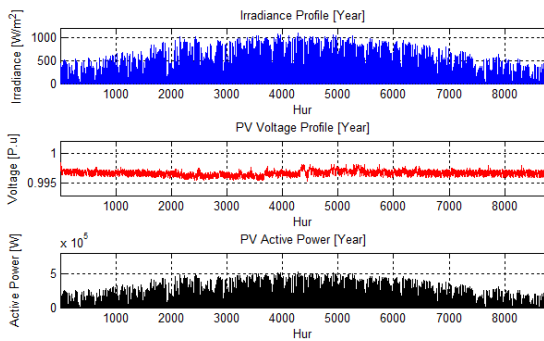
شکل ۳: نرم‌الیزه شده الگوی مصرف بار سالیانه استان اردبیل [۱۱]

۵. نتایج شبیه‌سازی

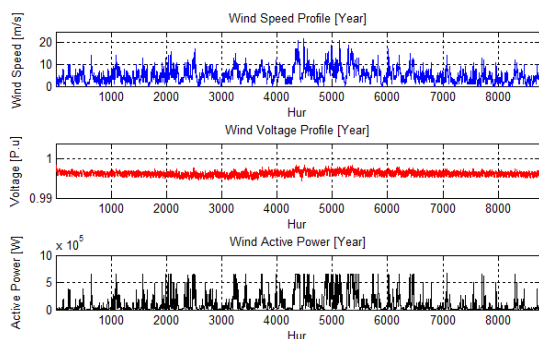
شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink به صورت Real-Time انجام شده است. در ضمیمه مدل‌سازی سیستم تحت مطالعه در محیط نرم‌افزار آورده شده است. نتایج شامل میزان توان و انرژی تولیدی نیروگاه بادی و خورشیدی، عملکرد شبکه توزیع برای تامین بارهای شبکه در طی یکسال است.

۴. سیستم تحت مطالعه

شکل (۴) بلوک دیاگرام تک خطی سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد. بارهای مسکونی و تجاری از طریق ترانسفورماتور (20/0.4kV) به شبکه توزیع متصل شده است. بار صنعتی به صورت 20kV به شبکه توزیع وصل می‌باشد. توان تولیدی سیستم خورشیدی 550kW و نیروگاه بادی 660kW در نظر گرفته شده است. منابع تولید پراکنده به علت رعایت استانداردهای اتصال به شبکه توزیع از طریق ترانسفورماتورهای (0.4/20kV) به شبکه 20kV وصل شده است. سایر مشخصات شبکه توزیع در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۵: میزان توان اکتیو تولیدی نیروگاه خورشیدی



شکل ۶: میزان توان اکتیو تولیدی نیروگاه بادی

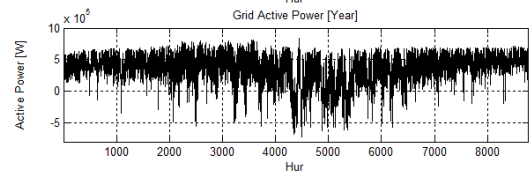
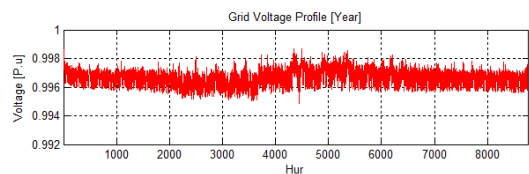
جدول ۲: مشخصات سیستم تحت مطالعه

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	طول کل شبکه فشار متوسط	15km
۲	ولتاژهای شبکه توزیع	3Ph - 20/0.4kV
۳	فرکانس شبکه	50Hz
۴	بار صنعتی / ضریب توان	430kW / 0.8
۵	بار خانگی / ضریب توان	245kW / 0.95
۶	بار تجاری / ضریب توان	140kW / 0.7
۷	حداکثر توان تولیدی نیروگاه PV	550kW
۸	حداکثر توان تولیدی نیروگاه بادی	660kW

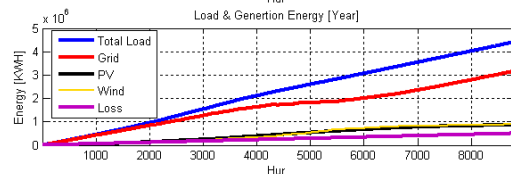
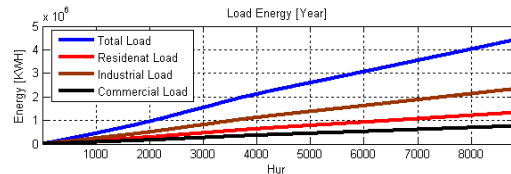
مطابق شکل‌های (۵) و (۶) میزان توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و خورشیدی متناظر با میزان سرعت باد و شدت تابش خورشید است و صحت عملکرد هر دو نیروگاه را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات اندازه ولتاژ در طی دوره یکساله در Wind Bus و PV Bus در محدوده استاندارد است. شکل (۷) قرمز رنگ) تغییرات اندازه پریونیت شده ولتاژ در باس مرجع طی یکسال و شکل (۷ سیاه رنگ) میزان تبادل توان بین شبکه و منابع تولید تجدیدپذیر برای تامین بارهای سه‌گانه را نشان می‌دهد. در شکل (۸) نشان داده شده است که از طرف شبکه توزیع در طی یکسال به میزان 3.14mkWh انرژی برای تامین مجموع بارها (Total Load Energy=4.38mkWh) تحویل داده و در این فاصله زمانی به میزان 0.158mkWh انرژی از طرف منابع تولید پراکنده به سمت شبکه بالادست منتقل شده است. مابقی انرژی مورد نیاز بارها از طریق تولید 0.861mkWh نیروگاه خورشیدی و تولید 0.882mkWh واحد بادی تامین شده است. انرژی تلف شده در کل شبکه 0.498mkWh (تقریباً یازده درصد) می‌باشد. در شکل (۹) آبی رنگ) میزان توان تزریقی از شبکه به بارها و در شکل (۹ قرمز رنگ) میزان توان انتقالی از منابع تولید تجدیدپذیر به سمت شبکه بالادست را در طی یکسال نشان داده شده است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که میزان (3.14mkWh) انرژی از شبکه به سمت بار انتقال یافته و میزان (0.158mkWh) انرژی از طرف منابع تولید تجدیدپذیر به شبکه تزریق شده است.

۶. نتیجه‌گیری

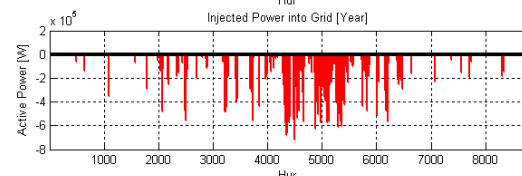
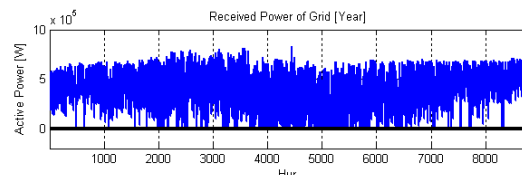
در این مقاله یک شبکه توزیع متصل به انواع مختلف منابع تولید پراکنده در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink به صورت Real-Time شبیه‌سازی گردید. برای مدل‌سازی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر از مدل طولانی مدت منابع استفاده شد. برای مدل‌سازی بارها از مدل دینامیکی نمایی وابسته به زمان مبتنی بر الگوی مصرف سالیانه استفاده گردید. اطلاعات مربوط به شدت تابش خورشید و سرعت متوسط باد از مجموعه داده‌های سالیانه هواشناسی (TMY) نرم‌افزار Meteonorm استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد که در طی یک سال مقدار 0.861mkWh انرژی از سیستم خورشیدی و میزان 0.882mkWh از نیروگاه بادی قابل استحصال است. همچنین شبکه برای تامین کل بار (4.38mkWh) فقط 3.14mkWh انرژی تحویل داده است. تلفات انرژی در کل سیستم برابر یازده درصد می‌باشد. نکته قابل توجه این است که میزان انرژی منتقل شده از طرف منابع تولید پراکنده به شبکه بالا دست در طی یکسال به میزان 0.158mkWh است.



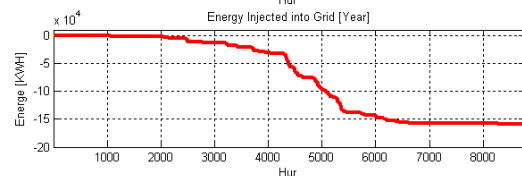
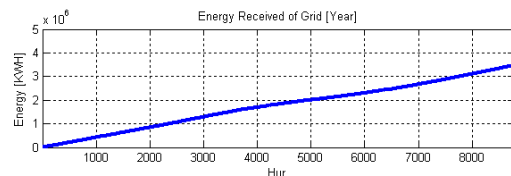
شکل ۷: میزان توان تبدلی از سمت شبکه به طرف بارها



شکل ۸: انرژی تحویلی نیروگاه بادی، خورشیدی، شبکه برای تامین بارها



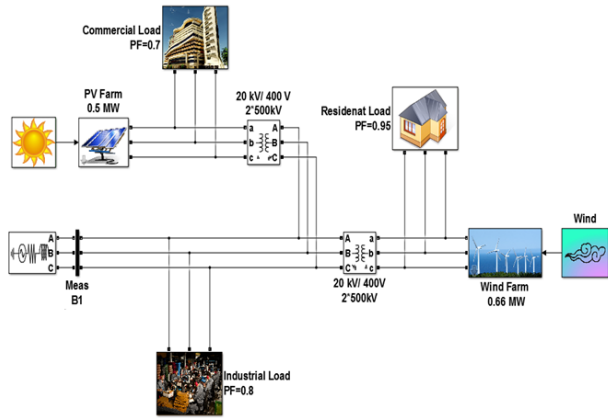
شکل ۹: تبادل توان در باس اصلی شبکه توزیع



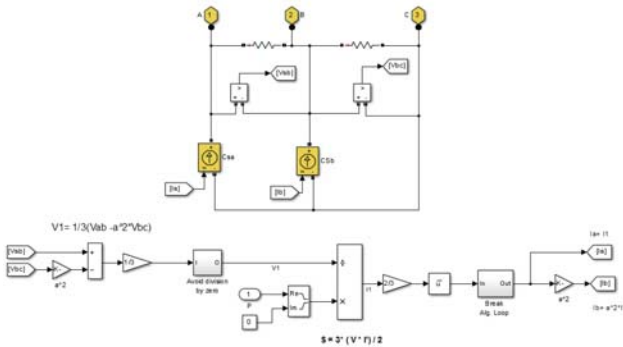
شکل ۱۰: تبادل انرژی در باس اصلی شبکه توزیع

منابع

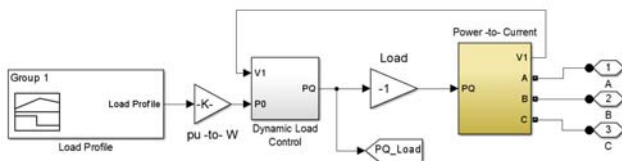
- [1] Atwa YM, El-Saadany EF, Salama MMA, Seethapathy R, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization". IEEE Trans Power Syst 25(1):360-370,2010.
- [2] Nadarajah Mithulananthan, Duong Quoc Hung, Kwang Y. Lee, "Intelligent Network Integration of Distributed Renewable Generation". Springer International Publishing, 2017.
- [3] Viktor M. Perelmutter Sun. "Electrotechnical systems Simulation with Simulink® and SimPowerSystems™". Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [4] Hung DQ, Mithulananthan N, Lee KY, "Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models". IEEE Trans Power Syst 29(6):3048-3057,2014.
- [5] Stefan Pfenninger, Iain Staffell, "Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data". Energy Vol.114,2016.
- [6] Mustapha Koussa, Djohra Saheb, Seddik Hadji., "Long-term PV system performances evaluation by only the main weather parameters data uses. Case of study: Desert and arid climate", Renewable and Sustainable Energy Conference, 2014.
- [7] Barth, R., Meibom, P., Weber, C., "Simulation of short-term forecasts of wind and load for a stochastic scheduling model". IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 24-29, 2011.
- [8] M. Asmine, J. Brochu, J. Fortmann, R. Gagnon, Y. Kazachkov, C.E. Langlois, E. Muljadi, J. MacDowell, P. Pourbeik, S. Seman and K. Wiens, "Model validation for wind turbine generator models." Power Systems, IEEE Transactions on 26.3, 1769-1782, 2011.
- [9] Khalid, M., Savkin, A.V., "A method for short-term wind power prediction with multiple observation points". IEEE Trans. Power Syst. 27, 579-586, 2012.
- [10] Casper SG, Nwankpa CO, Bradish RW, Chiang H-D, Concordia C, Staron JV, Taylor CW, Vaahedi E, Wu G. "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation". IEEE Trans Power Syst 10(1):523-538, 1995.
- [11] Ardabil Province Power Distribution Company website, www.aped.com, 2017.



ضمیمه الف: مدل سیستم تحت مطالعه در محیط نرم افزار Matlab



ضمیمه ب: مدل سازی نیروگاه بادی و خورشیدی (Long Term)



ضمیمه پ: مدل سازی بار نمایی در محیط نرم افزار