بررسی میزان افزایش سود حاصل از تبادل انرژی در بازار برق با توجه به عدم قطعیت منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها

مهرداد حجت/عضو هیئت علمی دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود/Mehrdad.hojat@gmail.com

علی گلدوست/ دانشجو دکترا گروه برق/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرورد/ Aligoldoust86@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، روشی برای استفاده بهینه و همزمان از واحدهای تولید پراکنده[1] بادی و خورشیدی در کنار نیروگاه‌های قابل‌دیسپچ[2]، بارهای منعطف[3] و ذخیره‌سازهای انرژی[4] در سیستم‌های توزیع با هدف ماکزیمم کردن سود استحصالی از تولید توان و مبادله آن با بازار برق[5] مطرح شده است. روش ارایه شده بر اساس یک مدل احتمالی و با در نظر گرفتن تمامی شرایط عملکردی ممکن برای واحدهای تجدیدپذیر بنا نهاده شده است. برای حل مسئله، از برنامه‌ریزی ترکیبی غیرخطی-عدد صحیح (MINLP) با هدف بیشینه‌سازی منفعت و سود انرژی تولیدی نیروگاه مجازی استفاده شده است. قیود و محدودیت‌های در نظر گرفته شده شامل حدود توان و انرژی تولیدی نیروگاه قابل‌دیسپچ، حدود توان و انرژی مصرفی بار منعطف، حدود توان و انرژی قابل ذخیره تجهیز ذخیره‌ساز و اندازه مجاز توان و انرژی تولیدی واحدهای تولید پراکنده می‌باشند. روش ارایه شده به یک نمونه نیروگاه مجازی[6] در یک ریز شبکه[7] اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور تولیدات پراکنده باعث افزایش سود محاسبه شده می‌شوند.

کلمات کلیدی: نیروگاه قابل‌دیسپچ، بار انعطاف‌پذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و تولیدات غیرقطعی توان، توربین بادی[8]، نیروگاه خورشیدی[9]، نیروگاه مجازی، ریز شبکه، بازار برق.

۱.مقدمه

بشر از دیرباز، همواره به دنبال دستیابی به یک منبع انرژی پایدار بوده است تا با تکیه بر آن نیازهای کنونی و آینده خود را مرتفع سازد. امروزه تأمین انرژی از مهم‌ترین دغدغه‌های برنامه‌ریزان و طراحان سیستم‌های قدرت است. این موضوع از مهم‌ترین مشکلات بشر در سال‌های آینده است که به‌طور مستقیم بر تعاملات کشورها و دولت‌ها تأثیر می‌گذارد. ازاین‌رو توان بادی و خورشیدی به‌عنوان انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، امروزه بسیار موردتوجه قرار گرفته است. به‌کارگیری انرژی‌های تجدید پذیر در تولید انرژی الکتریکی سبب تغییرات ناگهانی بار، وقوع خطا در خطوط انتقال انرژی، افت ولتاژ سیستم و ایجاد چالش در قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند. از راهکارهایی که برای جبران طبیعت متغیر انرژی‌های تجدید پذیر در کوتاه‌مدت استفاده می‌شود، می‌توان استفاده از بارهای منعطف و ذخیره‌سازی انرژی را نام برد. با در نظرگرفتن محدودیت‌های تولید توان کل واحدهای، DG در مراجع [۱] و [۲] نحوه بهینه سازی میزان تولید و مصرف در بازار برق صحبت شده است. در مرجع [۳] نحوه تعیین قیمت برق در حالت بهره‌برداری robustness پیشنهاد شده است. در مراجع [۴]، [۵] و [۶] روش‌های مختلف بهره‌برداری در بازار برق توصیف و به کار گیری آن‌ها پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] ریزشبکه‌ها را به‌عنوان شبکه‌های پیشرفته‌ی توزیع در آینده پیشنهاد داده است. در مرجع [۸] تاثیرات انرژی باد و ذخیره‌سازها و نحوه تعامل آن‌ها در تأمین انرژی شبکه بحث شده و نقش هریک توصیف شده است.

در مرجع [۹] نحوه پاسخگویی به میزان دیماند بار در شبکه مدل شده است و نحوه تامین انرژی و رفتار منابع رزرو در بازار برق پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۰] روشی برای نحوه پاسخگویی بار به‌صورت ساعتی و با توجه به خصوصیات بارها پیشنهاد شده است. در مرجع

[۱۱] روشی برای تعیین استراتژی نیروگاه‌های مجازی جهت شرکت در بازارهای انرژی و ذخیره چرخان ارایه شده است. در مرجع [۱۲] مدلی بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی برای نیروگاه‌های مجازی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۳] در زمینه تولیدات پراکنده، تعاریف، مزایا و سیاست‌های انرژی لازم بحث شده است. در مرجع [۱۴] تاثیرات انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع برق و مزایای آن‌ها ارایه شده است. در مرجع [۱۵] برنامه‌ریزی خطی با ذکر قیود و کاربردها برای انواع تجهیزات و منابع موجود در این نوع نیروگاه‌ها در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است.

۲. روابط حاکم بر مطالعات

نیروگاه مجازی به‌طور کلی مجموعه‌ای از نیروگاه‌های قابل‌دیسپچ، بارهای منعطف، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و تولیدات پراکنده (تولیدکننده غیرقطعی توان) است که به‌صورت گروهی به شکل یک مولفه واحد عمل می‌کنند. هدف اولیه در این نیروگاه‌ها هماهنگی مدیریت بار و تولید اجزا با هدف افزایش سود مجموعه است[۱۷].

۲-۱ نیروگاه قابل دیسپچ

نیروگاه‌های مقیاس کوچک با سوخت فسیلی نظیر توربین‌های گازی یا دیزل ژنراتورها برای تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) هستند. مشخصه اصلی هر نیروگاه تابع هزینه برحسب واحد پولی نسبت به انرژی تولیدی است که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$C(E_G) = aE_G^2 + bE_G + c \qquad (۱)$$

که در این رابطه $C(E_G)$ تابع هزینه است و C هزینه بی‌باری تعریف می‌شود.

میزان محدودیت تولید توان الکتریکی این نیروگاه در هر مقطع زمانی به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$v_i(t)P_{Gi}^{min} \le P_{Gi}(t) \le v_i(t)P_{Gi}^{max} \qquad (۲)$$

که در این رابطه P_{Gi}^{min} و P_{Gi}^{max} به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر تولید توان الکتریکی واحد iام هستند و $v_i(t)$ پارمتر در مدار بودن واحد i ام در مقطع زمانی tام است و برابر با دو مقدار ۰ (در مدار نبودن واحد) و۱(در مدار بودن واحد) است.

همچنین مقادیر حداقل و حداکثر انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه قابل دیسپچ با روابط (۳) و (۴) توصیف شده‌اند.

$$E_{Gi}^{min} = P_{Gi}^{min} \times \tau \qquad (۳)$$

$$E_{Gi}^{max} = P_{Gi}^{max} \times \tau \qquad (۴)$$

که در این روابط E_{Gi}^{min} و E_{Gi}^{max} به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر تولید انرژی الکتریکی برای واحد iام تعریف می‌شوند و τ پارامتر طول بازه زمانی است.

هزینه‌های روشن و خاموش شدن و بی‌باری نیروگاه قابل دیسپچ به ترتیب در روابط (۵)، (۶) و (۷) ارایه شده است.

$$C_i^{SU}(t) \ge S_i^U\big(v_i(t) - v_i(t-1)\big), \quad C_i^{SU}(t) \ge 0 \qquad (۵)$$

$$C_i^{SD}(t) \ge S_i^D\big(v_i(t-1) - v_i(t)\big), \quad C_i^{SD}(t) \ge 0 \qquad (۶)$$

$$C_i^{NL}(0) = C_i(0)v_i(t) \qquad (۷)$$

که در این روابط $C_i^{SU}(t)$ و $C_i^{SD}(t)$ به ترتیب هزینه روشن و خاموش شدن در مقطع زمانی tام و $C_i^{NL}(0)$ هزینه بی‌باری برای واحد iام تعریف می‌شوند و S_i^U و S_i^D به ترتیب نرخ هزینه روشن و خاموش شدن نیروگاه قابل دیسپچ iام هستند.

قید دیگری که در رابطه با این نوع نیروگاه‌ها مطرح است، میزان نرخ افزایش و یا کاهش تولید نیروگاه بین هر دو مقطع زمانی است که به‌صورت روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شوند.

$$P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \le \Delta_{Gi} \times \tau \qquad (۸)$$

$$P_{Gi}(t-1) - P_{Gi}(t) \le \Delta_{Gi} \times \tau \qquad (۹)$$

که در این روابط Δ_{Gi} شیب نرخ افزایش و یا کاهش تولید نیروگاه قابل‌دیسپچ است.

همچنین میزان انرژی الکتریکی تولید شده در هر مقطع زمانی و برای هر واحد نیروگاهی به‌صورت رابطه (۱۰) قابل‌محاسبه است.

$$E_{Gi}(t) = \frac{P_{Gi}(t-1) + P_{Gi}(t)}{2} \qquad (۱۰)$$

۲-۲ بارهای منعطف

مجموعه‌ای از بارهای خانگی و صنعتی متصل به زیرساخت‌های ارتباطی و کنترلی جهت مدیریت میزان مصرف هستند. بار منعطف، باری است که توانایی افزایش، کاهش یا تغییر زمان مصرف خود را دارد. هر بار انعطاف‌پذیر با یک تابع مطلوبیت که مبین میزان انتفاع بار از مصرف الکتریسیته است، تعریف می‌شود که در رابطه (۱۱) نشان داده شده است.

$$U(E_L) = dE_L^2 + eE_L + f \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه $U(E_L)$ تابع مطلوبیت است. میزان محدودیت مصرف توان الکتریکی این نوع بارها در هر مقطع زمانی به‌صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$P_{Lj}^{min} \le P_{Lj}(t) \le P_{Lj}^{max} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه P_{Li}^{min} و P_{Li}^{max} به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر مصرف توان الکتریکی واحد jام هستند. میزان نرخ افزایش و یا کاهش مصرف بار منعطف بین هر دو مقطع زمانی است که به‌صورت روابط (۱۳) و (۱۴) تعریف می‌شوند.

$$P_{Lj}(t) - P_{Lj}(t-1) \le \Delta_{Lj} \times \tau \qquad (۱۳)$$

$$P_{Lj}(t-1) - P_{Lj}(t) \le \Delta_{Lj} \times \tau \qquad (۱۴)$$

که در این روابط Δ_{Lj} شیب نرخ افزایش و یا کاهش مصرف بار منعطف است.

همچنین میزان انرژی الکتریکی مصرف‌شده در هر مقطع زمانی و برای هر بار به‌صورت رابطه (۱۵) قابل‌محاسبه است.

$$E_{Lj}(t) = \frac{P_{Lj}(t-1) + P_{Lj}(t)}{2} \qquad (۱۵)$$

آخرین قید در ارتباط با بارهای انعطاف‌پذیر میزان حداقل انرژی الکتریکی مصرفی هر بار در کل زمان مورد مطالعه است که در رابطه (۱۶) این قید تعریف شده است.

$$\sum_{t=1}^{T} E_{Lj}(t) \ge E_{Lj}^f \qquad (۱۶)$$

که در این رابطه E_{Lj}^f میزان حداقل انرژی الکتریکی مصرفی است.

۲-۳ سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

ادوات فیزیکی جهت ذخیره‌سازی انرژی و استفاده از آن در زمان مناسب هستند. مدل‌سازی تجهیزات ذخیره‌ساز با استفاده از یک معادله متغیر با زمان از سطح انرژی تجهیز انجام می‌شود. در رابطه (۱۷) میزان انرژی ذخیره‌شده در تجهیز ذخیره‌ساز مدل شده است.

$$E_{SK}(t) = E_{SK}(t-1) + \eta_K^C P_{SK}^C(t)\tau - \frac{1}{\eta_K^d} P_{SK}^d(t)\tau \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه $E_{SK}(t)$ انرژی ذخیره‌شده واحد kام تجهیز ذخیره‌ساز انرژی در مقطع زمانی tام است. η_K^C و η_K^d به ترتیب بازده شارژ و بازده دشارژ تجهیز ذخیره‌ساز هستند. $P_{SK}^C(t)$ و $P_{SK}^C(t)$ نیز به ترتیب توان‌های شارژ و دشارژ تجهیز ذخیره‌ساز می‌باشند. میزان محدودیت ذخیره و تخلیه توان الکتریکی در این نوع تجهیزات در هر مقطع زمانی در روابط (۱۸) و (۱۹) ارایه شده است. همچنین محدودیت انرژی ذخیره‌شده در رابطه (۲۰) نشان داده شده است.

$$0 \le P_{SK}^C(t) \le P_{SK}^{C.max} \qquad (۱۸)$$

$$0 \le P_{SK}^d(t) \le P_{SK}^{d.max} \qquad (۱۹)$$

$$E_{SK}^{min} \le E_{SK}(t) \le E_{SK}^{max} \qquad (۲۰)$$

که در این روابط $P_{SK}^{C.max}$ و $P_{SK}^{d.max}$ به ترتیب حداکثر توان قابل شارژ و حداکثر توان قابل دشارژ تجهیز ذخیره‌ساز هستند و E_{SK}^{min} و E_{SK}^{max} به ترتیب معرف حداقل و حداکثر انرژی ذخیره‌شده هستند.

۲-۴ تولیدات پراکنده

تولیدکننده‌های غیرقطعی توان شامل نیروگاه‌هایی مانند نیروگاه بادی و خورشیدی هستند که تولیدشان به شرایط آب و هوایی وابسته است. برای مدل‌سازی رفتار این واحدها در بهره‌برداری باید از پیش‌بینی مقادیر غیرقطعی بهره برد.

۲-۵ تابع هدف

هدف از مدل‌سازی برنامه‌ریزی ماکزیمم کردن سود حاصل از مبادله انرژی در بازار برق تحت تمامی شرایط عملکردی ممکن است. این تابع هدف در رابطه (۲۱)ارایه شده است.

$$\rho = \sum_{t=1}^{T}\left[\lambda^D(t)P^D(t)\tau - \sum_{i\epsilon I}\left[C_i(E_{Gi}(t)) + C_i^{SU}(t) + C_i^{SD}(t)\right] + \sum_{j\epsilon J}\left[U_j\left(E_{Lj}(t)\right)\right]\right] \qquad (۲۱)$$

که در این رابطه $\lambda^D(t)$ قیمت برق در مقطع زمانی tام در بازار است و $P^D(t)$ میزان توان الکتریکی مبادله شده نیروگاه مجازی با بازار برق است که در صورت مثبت بودن مقدار آن عبارت $\lambda^D(t)P^D(t)\tau$ نشان‌دهنده فروش انرژی در بازار و به دست آوردن سود و در صورت منفی بودن مقدار آن به معنی گرفتن انرژی از بازار و صرف هزینه است. هزینه کل تولید توان در نیروگاه‌های قابل‌دیسپچ در نیروگاه مجازی در مقطع زمانی tام با عبارت $\sum_{i\epsilon I} C_i\left(E_{Gi}(t)\right)$ مدل‌سازی شده است. همچنین جملات $\sum_{i\epsilon I} C_i^{SU}(t)$ و $\sum_{i\epsilon I} C_i^{SD}(t)$ در رابطه (۲۱) به ترتیب نشان‌دهنده هزینه‌های کل راه‌اندازی و خاموشی هر واحد در مقطع زمانی مشابه هستند. همچنین منفعت کل کسب‌شده از مصرف انرژی توسط بارهای منعطف در نیروگاه مجازی در مقطع زمانی tام با عبارت $\sum_{j\epsilon J}\left[U_j\left(E_{Lj}(t)\right)\right]$ مدل شده است.

۲-۶ معادله تعادل انرژی تولیدی و مصرفی در هر دوره زمانی

رابطه متقابل بین نیروگاه مجازی و بازار برق که شامل یک سیستم انرژی بسته است باید در هر مقطع زمانی t متعادل باشد. با توجه به تعریف ارایه شده برای نیروگاه مجازی و اجزای به‌کار رفته در آن که در قسمت‌های قبل شرح داده شد، این مفهوم به این معنا است که مجموع مقدار انرژی به دست آمده از نیروگاه‌های قابل‌دیسپچ، تولیدکننده‌های غیرقطعی توان و دشارژ واحدهای ذخیره‌ساز انرژی باید با مجموع مقدار انرژی مصرفی در بارهای منعطف، شارژ واحدهای ذخیره‌ساز انرژی و فروخته شده در بازار در هر مقطع زمانی t برابر باشد. معادله تعادل انرژی در رابطه (۲۲) مدل‌سازی شده است.

$$\sum_{i\epsilon I} E_{Gi}(t) + \left(\sum_{q\epsilon Q}\left(P_{Solar_q}(t) - P_{Solar}^{curt}(t)\right) + \sum_{r\epsilon R}\left(P_{Wind_r}(t) - P_{Wind}^{curt}(t)\right) + \sum_{k\epsilon K} P_{Sk}^d(t)\right)\tau = \sum_{j\epsilon J} E_{Lj}(t) + \left(\sum_{k\epsilon K} P_{Sk}^c(t) + P^D(t)\right)\tau \qquad (۲۲)$$

که در این رابطه $P_{Solar_q}(t)$ و $P_{Wind_r}(t)$ به ترتیب متغیرهای تصادفی میزان تولید توان خورشیدی و بادی در مقطع زمانی tام هستند و $P_{Solar}^{curt}(t)$ و $P_{Wind}^{curt}(t)$ به ترتیب میزان قطع تولید توان الکتریکی از منبع تولید پراکنده خورشیدی و بادی در مقطع زمانی tام هستند. محدودیت این کاهش‌های تولید به ترتیب در روابط (۲۳) و (۲۴) نشان داده شده‌اند.

$$0 \le P_{Solar}^{curt}(t) \le P_{Solar}(t) \qquad (۲۳)$$

$$0 \le P_{Wind}^{curt}(t) \le P_{Wind}(t) \qquad (۲۴)$$

همچنین $P^D(t)$ متغیر تصمیم‌گیری است که باید قبل از مشخص شدن متغیر تصادفی برای مثال از بازار روز پیش تعیین شود. بقیه متغیرها، متغیرهای تصمیم‌گیری که با مشخص شدن میزان تولید تصادفی برای بهینه شدن کل سیستم تعیین می‌گردند.

در این مقاله سعی بر آن شده است تا علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت‌های و روش‌های قبلی ذکر شده در منابع، به نحوه تأثیر عدم قطعیت نیروگاه‌های تجدید پذیر در میزان سود استحصالی از انرژی مبادله شده در بازار برق با در نظر گرفتن حضور هم‌زمان موارد ذکر شده در بخش مطالعه موردی پرداخته شده است.

۳. مطالعه موردی

جهت بررسی اثر تولیدات پراکنده در میزان سود استحصالی برای مالک نیروگاه مجازی، از تجهیزاتی که در شکل (۱) به‌صورت شماتیک نشان داده شده [۱۶]، استفاده شده است.

شکل ۱: شماتیک یک نمونه از یک ریز شبکه

نیروگاه مجازی مورد مطالعه برای یک دوره ۲۴ ساعت از واحدهایی به شرح زیر تشکیل شده است[۱۷].

الف. یک واحد نیروگاه قابل‌دیسپچ توربین گازی با مشخصات زیر:

- ظرفیت حداقل تولید: ۱ مگاوات،
- ظرفیت حداکثر تولید: ۵ مگاوات،
- حداکثر شیب تغییرات توان: ۲ مگاوات،
- تابع هزینه نیروگاه: $C(E_G) = 5E_G^2 + 10E_G + 50$،
- هزینه راه‌اندازی: ۱۰دلار،
- توان اولیه: ۲ مگاوات.

ب. یک کارخانه ساخت چرخ‌دنده به عنوان بار منعطف با مشخصات زیر:

- ظرفیت حداقل مصرف: ۰/۵ مگاوات،
- ظرفیت حداکثر مصرف: ۲ مگاوات،
- حداکثر شیب تغییرات توان: ۱ مگاوات،
- تابع مطلوبیت کارخانه: $U(E_L) = -30E_L^2 + 150E_L + 5$،
- حداقل انرژی الکتریکی مصرفی: ۲/۵ مگاوات ساعت،
- مصرف ابتدایی: ۱/۵ مگاوات.

ج. یک واحد تلمبه ذخیره‌ای به عنوان تجهیز ذخیره‌ساز با مشخصات زیر:

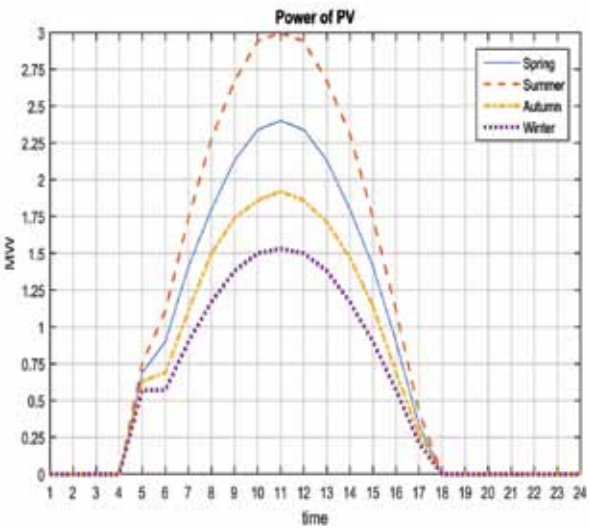
- حداکثر توان مصرفی هنگام شارژ: ۰/۳ مگاوات،
- حداکثر توان تولیدی هنگام دشارژ: ۰/۵ مگاوات،
- حداقل انرژی الکتریکی قابل ذخیره: ۰/۲ مگاوات ساعت،
- حداکثر انرژی الکتریکی قابل ذخیره: ۱ مگاوات ساعت،
- میزان انرژی ذخیره‌شده اولیه: ۰/۴ مگاوات ساعت،
- بازده شارژ و دشارژ: ۸۰ درصد.

د. یک واحد دیزل ژنراتور در صورتی که تجهیزات به اندازه کافی انعطاف لازم جهت پاسخگویی بار را نداشته باشند، با مشخصات زیر:

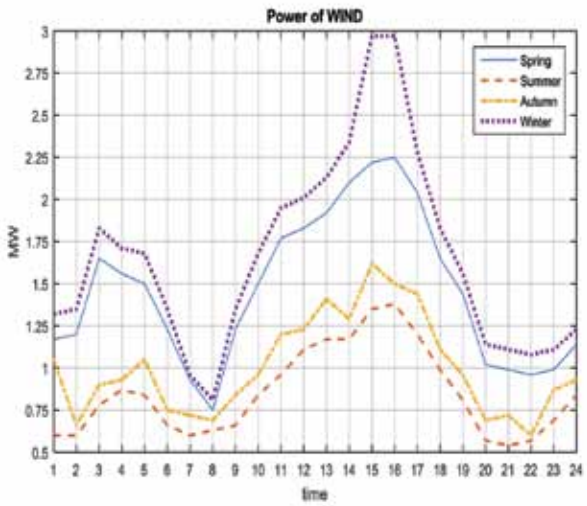
- ظرفیت حداکثر تولید: ۰/۵ مگاوات،
- قیمت هر مگاوات توان تولیدی: ۲۰۰ دلار.

ه. یک نیروگاه خورشیدی و یک نیروگاه بادی به عنوان تولیدکننده‌های غیرقطعی توان با مشخصات زیر:

- ظرفیت حداکثر تولید هر واحد: ۳ مگاوات،
- نحوه تولید توان هر کدام از این واحدها در یک شبانه‌روز برای فصول مختلف سال به ترتیب در شکل (۲) برای نیروگاه خورشیدی و در شکل (۳) برای نیروگاه بادی نشان داده شده است[۱۸].



شکل ۲: میزان تولید نیروگاه خورشیدی در یک شبانه‌روز برای فصول مختلف سال

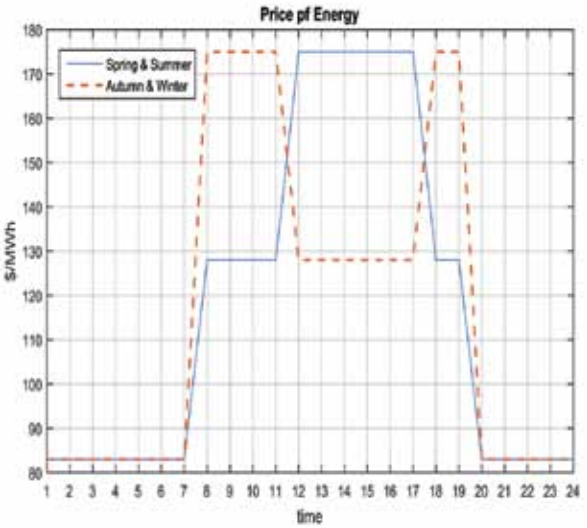


شکل ۳: میزان تولید نیروگاه بادی در یک شبانه‌روز برای فصول مختلف سال

و. قیمت برق در طول شبانه‌روز با دو نوع قیمت متفاوت در فصول گرم و سرد سال در شکل (۴) ارایه شده است[۱۹].

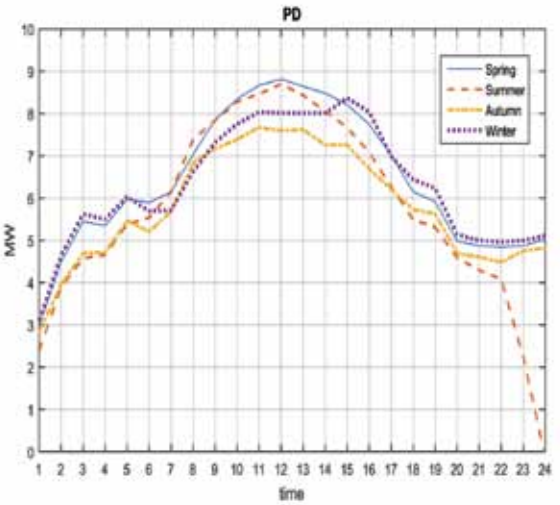
۴. نتایج

مدل‌سازی ریاضی روابط ارایه شده جهت بررسی میزان سود بر اساس اصول برنامه‌ریزی آمیخته غیرخطی-عدد صحیح (MINLP) در نرم‌افزار GAMS با استفاده از تصمیم‌گیری خطی متغیر انجام شده است[۲۰]. در ادامه به ارایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود و اثر منابع تجدیدپذیر در فصول مختلف سال در میزان سود استحصالی از مبادله توان در بازار برق سنجیده می‌شود.



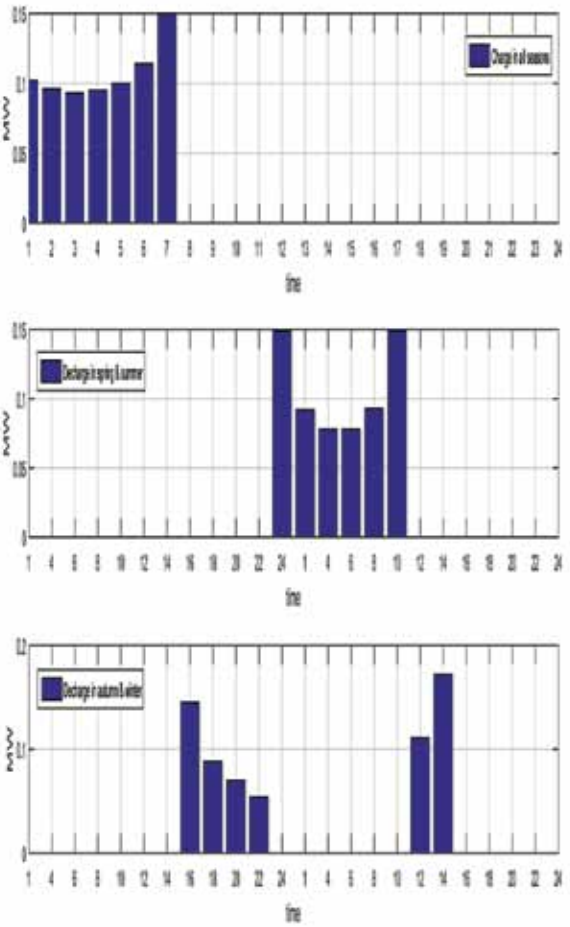
شکل ۴: قیمت برق دریک شبانه‌روز در فصول سرد و گرم سال

در شکل (۵) میزان توان مبادله شده با بازار در فصول مختلف بهره‌برداری را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار توان مبادله شده در فصول بهار و زمستان به خاطر تولید بیشتر نیروگاه بادی در این دو فصل بیشتر است و به علت بیشتر بودن توان تولیدی نیروگاه خورشیدی در فصل بهار میزان توان مبادله شده در فصل بهار نسبت به زمستان بیشتر است.

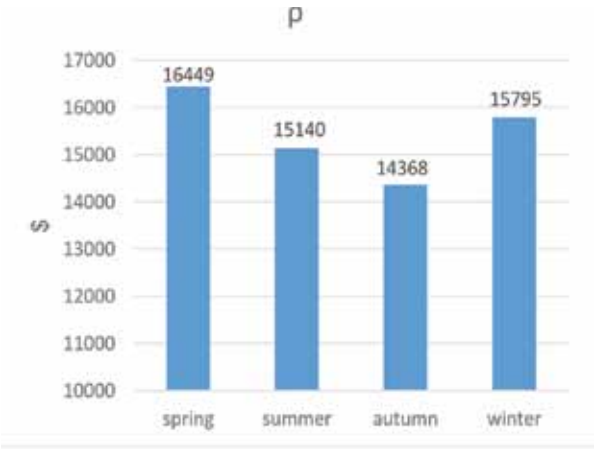


شکل ۵: میزان توان مبادله شده با بازار در سناریوهای مختلف بهره‌برداری

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با توجه به هر دو نوع نرخ برق در فصول و گرم و سرد توان در ساعات اولیه که قیمت ارزان‌تر است ذخیره می‌شود و در ساعات گرانی نرخ برق با توجه به هر فصل تخلیه و مورد استفاده قرار می‌گیرد یا به فروش می‌رسد.



شکل ۶: نحوه شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز در نیروگاه مجازی



شکل ۷: میزان سود به دست آمده از سناریوهای مختلف بهره‌برداری

در شکل (۷) میزان سود استحصالی از سناریوهای مختلف بهره‌برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مالک نیروگاه مجازی می‌تواند با تصمیم‌گیری مناسب و استفاده از منابع تولید پراکنده در فصول مختلف به سود بیشتری دست یابد.اما مقدار سود استحصالی در فصل بهار به دلایل شرایط آب و هوایی و نرخ برق در ساعات مشخص بیشتر است که رقم قابل‌توجهی برای مالکان نیروگاه‌های مجازی است. همان‌طور که دیده می‌شود حضور منابع تولید غیرقطعی توان باعث افزایش قابل‌توجهی در مجموع سود بهره‌برداری شده است.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده بهینه و هم‌زمان از واحدهای تولید پراکنده بادی و خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی در سیستم‌های توزیع یکی از مهم‌ترین مباحث مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر است که در سالیان اخیر مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. این مساله با اهداف مختلفی انجام می‌شود. در این مقاله این موضوع با هدف ماکزیمم کردن سود و بر اساس یک مدل احتمالی و با در نظر گرفتن تمامی شرایط عملکردی ممکن برای واحدهای تجدید پذیر ارایه گردید. نتایج حل مساله با اعمال روش MINLP و با لحاظ قیود مختلف نشان داد که استفاده از ذخیره‌سازها در کنار توربین‌های بادی و خورشیدی می‌توانند بیشترین سود را تضمین نمایند.

***

پی‌نوشت‌ها:

1-Distributed Generation
2-Dispatchable Power Plants
3-Flexible Loads
4-Storage Units
5-Eelectricity market
6-Virtual Power Plant
7-Smart grid
8-Wind Turbine
9-Photovoltaic Power plant

ادامه در صفحه ۴۴

آن، چنانچــه با روش‌های جدید در تکنولوژی همراه باشــند، برای مهندسین در صنعت راهگشا هســتند. مثلاً روش‌های جدید تولید انرژی در نیروگاه‌ها، که امروزه سهم بالایی در تولید انرژی الکتریکی دارند، باید در سرفصل تولید نیروگاه‌ها گنجانده شوند.
۳. اقتصاد مهندسی بایستی در دروس وجود داشته باشد.
۴. از طــرف دیگر باید روش‌های اســتارت اپ را بــه فارغ‌التحصیلان آموزش داد.

■ **دکتر محمد فرشاد**
عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد مینودشت

بــه نظر من چنانچه دروس آزمایشــگاهی و کارگاهی به همراه درس مرتبطٍ ارائه شوند کارایی بیشتری دارند.
مثــلاً: درس مدار ۱ و آزمایشــگاه مجموعا ۳ واحــد، درس مدار ۲ و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس تحلیل سیستم‌های انرژی الکتریکی ۱ و آزمایشــگاه مجموعــا ۳ واحد، درس تحلیل سیســتم‌های انرژی الکتریکی ۲ و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس ماشین ۱ و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس ماشین ۲ و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس تجهیــزات پســت و کارگاه مجموعا ۳ واحــد، درس رله و حفاظت و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس کنترل خطی و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس الکترونیک صنعتی و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس عایق و فشــارقوی و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس کنترل صنعتی و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد، درس اندازه‌گیری و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحــد، درس الکترونیک ۱ و آزمایشــگاه مجموعــا ۳ واحد، درس الکترونیک ۲ و آزمایشگاه مجموعا ۳ واحد و ...
در ایــن صورت بیــن مطالبی که دانشــجو یاد می‌گیــرد و از طریق آزمایش عملی مشاهده می‌کند فاصله نخواهد افتاد، ضمن آنکه استاد درس می‌توانــد با توجه به صلاحدید، تعادلی بین زمان دروس تئوری و عملی ایجاد نماید.
در حال حاضر، عملاً زمان خیلی از آزمایشگاه‌ها تلف می‌شود.

■ **دکتر کسری حقیقی**
شرکت Uniquesec-سوئد

۱. ادغام مدار یک و ۲ در یک درس.
۲. ادغــام ۳ درس الکترونیک در یــک درس و افزودن ۲ درس جدید میکروکنترلر و شبکه‌های مخابراتی (برای همه گرایش‌ها).
۳. ادغام مخابرات ۱ و ۲ در یک درس برای همه گرایش‌ها.
۴. افــزودن دروس اجباری اندازه‌گیری ۲ و ابزار دقیق و آز ابزار دقیق برای همه گرایش‌ها.
۵. افزودن درس منابع تغذیه برای همه گرایش‌ها.
۶. افزایش درس مدیریت پروژه
۷. افزایش درس مبانی بهینه‌سازی
۸. حذف دوس تکنیک پالس

■ **دکتر سعید توکلی**
عضو هیأت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

طبق دســتورالعمل جدید انتخــاب ۲ درس از دروس زیر در گرایش قدرت الزامی است:
ماشــین مخصوص-طرح خط-طرح پست-عایق و فشار قوی-تحقیق در عملیات-تولید و نیروگاه
کــه البته من فکر کنم به جز تحقیق در عملیات همه آن‌ها برای یک مهندس قدرت باید الزامی باشد.

تهیه کننده:دکتر مصطفی رجبی مشهدی

***

ادامه از صفحه ۲۹ >>

مراجع

[1] Arroyo, J., Conejo, A.: Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market. IEEE Trans. Power Syst. 15(3), 1098–1104 (2000)
[2] Bertsimas, D., Brown, D., Caramanis, C.: Theory and applications of robust optimization. SIAM Rev. 53(3), 464–501 (2011)
[3] Bertsimas, D., Sim, M.: The price of robustness. Oper. Res. 52(1), 35–53 (2004)
[4] Birge, J.R., Louveaux, F.: Introduction to Stochastic Programming, 2nd edn. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer, New York (2011)
[5] Chao, H., Huntington, H.: Designing Competitive Electricity Markets. Fred Hillier's International Series in Operations Research & Management Science. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA (1998)
[6] Conejo, A.J., Carrión, M., Morales, J.: Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets. International Series in Operations Research & Management Science. Springer Verlag, New York (2010)
[7] Fang, X., Misra, S., Xue, G., Yang, D.: Smart grid—The new and improved power grid: A survey. IEEE Commun. Surv. Tutor. 14(4), 944–980 (2012)
[8] Hedegaard, K., Meibom, P.: Wind power impacts and electricity storage—A time scale perspective. Renew. Energy 37(1), 318–324 (2012)
[9] Karangelos, E., Bouffard, F.: Towards full integration of demand-side resources in joint forward energy/reserve electricity markets. IEEE Trans. Power Syst. 27(1), 280–289 (2012)
[10] Khodaei, A., Shahidehpour, M., Bahramirad, S.: SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics. IEEE Trans. Smart Grid 2(3), 564–571 (2011)
[11] Mashhour, E., Moghaddas-Tafreshi, S.: Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation. IEEE Trans. Power Syst. 26(2), 949–956 (2011)
[12] Pandžíc, H., Morales, J.M., Conejo, A.J., Kuzle, I.: Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming. Appl. Energy 105, 282–292 (2013)
[13] Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer, W.: Distributed generation: Definition, benefits and issues. Energy policy 33(6), 787–798 (2005)
[14] Schleicher-Tappeser, R.: How renewables will change electricity markets in the next five years. Energy Policy 48, 64–75 (2012)
[15] Soyster,A.: Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. Oper. Res. 21(5), 1154–1157 (1973)
[16] www.civicsolar.com/resource/microgrid-regulatory-policy-us.
[17] Hillier, Frederick S., and Camille C. Price. «Integrating Renewables in Electricity Markets.».
[18] Liu, Ke-yan, et al. «Optimal sitting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs.» International Journal of Electrical Power & Energy Systems 69 (2015): 430-440.
[19] Ontario Time-of-Use Electricity Rates: <http://www.ontario-hydro.com/index.php?page=current_rates>; [accessed 2015].
[20] Washington, DC, USA: GAMS Development Corporation, <www.gams.com>;2014.