

کنترل بهینه ریزشبهه به منظور بهبود پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن تولید همزمان برق و گرما

حسام رهبری مقام

استادیار - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، واحد رفسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، رفسنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۹

خلاصه: معمولاً در مطالعات کنترل بهینه ریزشبهه با تولید همزمان برق و گرما، بیشتر اهداف اقتصادی و آلاینده‌گی مطرح می‌شود. در این مطالعات، بهینه‌سازی ادوات کنترلی و جبران‌ساز که با اهداف بهبود ابعاد فنی ریزشبهه می‌باشند، مد نظر قرار نمی‌گیرد. لذا در این مقاله این اهداف به صورت همزمان در نظر گرفته شده است. در این مقاله خازن‌ها و راکتورهای موازی، جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو، تپ ترانسفورماتورها و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و توان تولیدی منابع به عنوان متغیرهای کنترلی، با اهداف اقتصادی، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده‌اند. شبکه مورد مطالعه دارای ۲۲ باس می‌باشد که شامل منابع فتوولتائیک و پیل سوختی است. تمامی داده‌ها و اطلاعات شبکه، از یک سیستم حقیقی اقتباس شده است. در نتیجه سیستم مورد مطالعه می‌تواند کاملاً بیانگر یک سیستم واقعی باشد. به منظور کامل‌تر کردن مطالعه سیستم، آلاینده‌گی حاصل از تولید پیل سوختی در بهینه‌سازی لحاظ شده است. بازده پیل سوختی به صورت یک مدل استاندارد واقعی متغیر با بار در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: ریزشبهه، منابع تولید پراکنده، فتوولتائیک، پیل سوختی، پروفیل ولتاژ، بهینه‌سازی.

Optimal Control of Micro Grid to Improve Voltage Profile Including Combined Heat and Power System

Hesam Rahbarimagham

Assistant Professor – Dept. of Electrical Engineering, Rafsanjan Branch, Islamic Azad University, Rafsanjan, Iran

Abstract: Usually, in the studies of optimal control for the micro grid (MG) with combined heat and power (CHP), economic and environmental goals have been raised. In these studies, the optimization of control devices and compensators that are aimed at improving the technical aspects of micro grid (MG) has not been considered. Therefore, in this paper, these goals are considered simultaneously. In this paper the shunt capacitor, shunt reactor, static var compensator, load ratio control transformer, step voltage regulator and power generation of DGs are investigated as control variables with the aim of considering costs, losses and voltage profile improvement. The case under study is a distribution test system including 22 buses, which consists of photovoltaic and fuel cell. All network data is extracted from a real system. As a result, the system can completely represent a real system. In order to complete the study of the system, the emissions of fuel cells are considered in the objective function. The efficiency and electrical and thermal output power of the fuel cell are considered related to load ratio as a real standard model introduced in previous studies.

Index Terms: Microgrid, distributed generation resource, photovoltaic, fuel cell, voltage profile, optimization.

۱. مقدمه

روش کنترلی متمرکز به صورت برخط^۱ یک زیرساخت مخابراتی در کل شبکه فرض شده است که تمام اطلاعات ادوات کنترلی را قابل دسترس می‌کند.

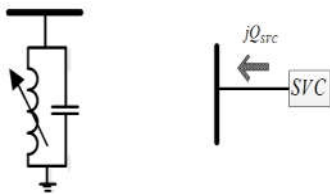
به صورت خلاصه در [۱۸] بحث‌های آلاینده‌گی و اقتصادی مطرح نشده و تأمین بارهای گرمایی نیز مد نظر نبوده است. در [۲۰-۲۱] بارهای گرمایی در نظر گرفته شده است اما هیچ ادوات کنترلی به منظور بهبود عملکرد بهینه شبکه مطرح نشده است.

شبکه ۲۲ باسه استفاده شده در این مقاله شامل دو نوع منبع تولید پراکنده (فتوولتائیک و پیل سوختی) است که ظرفیت گرمایی پیل سوختی برای تأمین بارهای گرمایی نیز به عنوان یک متغیر کنترلی در بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفته شده است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. وضعیت ادواتی مانند ShC، LRT، ShR، SVR و SVC از یک سو و توان تولیدی منابع از سوی دیگر به عنوان متغیرهای کنترلی استفاده شده است. هدف کلی، کنترل بهینه به منظور بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات، آلاینده‌گی و هزینه‌های سوختی با در نظر گرفتن تأمین بارهای الکتریکی و گرمایی به صورت همزمان است.

۲. مدل‌سازی ادوات کنترلی SVC

SVC یک وسیله یا سیستم الکتریکی ساکن است که می‌تواند جریان راکتیو خازنی یا سلفی از سیستم قدرت بکشد یا تزریق کند و به این ترتیب توان راکتیو، تولید یا جذب کند. این منبع تولید توان راکتیو به صورت موازی به شبکه متصل می‌شود. مفهوم استاتیک در SVC به این معنی است که برخلاف جبران‌کننده‌های سنکرون دارای اجزاء چرخنده و متحرک نمی‌باشد و این ویژگی سبب می‌شود پاسخ سریعتری به تغییرات شبکه بدهد (پاسخ‌گوئی در ۳ سیکل به جای ۳۰ سیکل در کندانسورهای سنکرون). در ضمن نداشتن جزء گردان باعث کاهش خرابی و کم‌شدن هزینه تعمیرات می‌شود.

شکل (۱) یک مدل ساده برای SVC به عنوان یک منبع توان راکتیو را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل SVC
Fig. (1): SVC model.

۳. SVR و LRT

در این مطالعه مدل SVR و LRT به صورت معادل در نظر گرفته شده است. شکل (۲-الف) یک مدار معادل LRT و شکل (۲-ب) معادل چهار ترمیناله این مدار را نشان می‌دهد. روابط مربوط به مدار معادل شکل (۲-الف) به ترتیب زیر است [۱۸]:

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n & -(\frac{1}{n})Z_T \\ 0 & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

در سال‌های اخیر منابع تولید پراکنده و ریزشبکه‌ها به دلایل اقتصادی، کاهش آلاینده‌گی، افزایش قابلیت اطمینان و تأمین برق به صورت متمرکز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. بسیاری از منابع تولید پراکنده به منظور تأمین محلی بارهای الکتریکی و گرمایی به کار می‌روند که باعث کاهش تلفات و افزایش سود اقتصادی می‌شوند [۲]. اما با اضافه شدن منابع تولید پراکنده، باید مسائلی مانند عدم تعادل شبکه و ایجاد اغتشاش در پروفیل ولتاژ شبکه بررسی شود. همچنین حداقل‌سازی هزینه‌ها و میزان آلاینده‌گی از اهداف ریزشبکه‌ها هستند [۳]. این اهداف با بهینه‌سازی استراتژی عملکرد یعنی تعیین میزان تولید منابع و نحوه تعامل با شبکه اصلی صورت می‌پذیرد. عواملی مانند نوع و ظرفیت منابع، هزینه سوخت و بهره‌برداری، میزان دسترسی به انرژی‌های طبیعی و قیمت برق در استراتژی عملکرد تاثیرگذار هستند. بهینه‌ترین پاسخ ممکن در استراتژی عملکرد در صورتی به دست می‌آید که نوع و ظرفیت منابع با توجه به عوامل موثر مانند قیمت‌ها، اندازه بار و میزان دسترسی به انرژی‌های طبیعی به صورت بهینه تعیین شده باشند [۴].

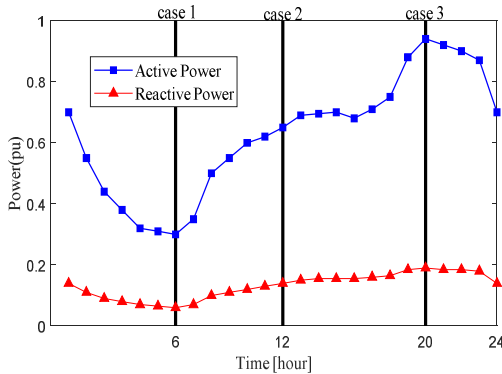
در بسیاری از مطالعات انجام شده قبلی در زمینه ریزشبکه‌ها، بحث کنترل بهینه ادوات سیستم انتقال انعطاف‌پذیر پراکنده AC (ادوات D-FACTS) در ریزشبکه برای ایجاد یک عملکرد بهینه سراسری مورد توجه نبوده است [۵]. به عنوان مثال، در [۶] و [۷] پخش بار اقتصادی با هدف کاهش آلاینده‌گی مطرح شده است. تعیین اندازه ریزشبکه یا تعیین ظرفیت بهینه منابع موجود در ریز شبکه نیز در [۸] و [۹] مورد بررسی قرار گرفته است و در [۱۰] و [۱۱] به طور همزمان طراحی ریزشبکه و استراتژی عملکرد آن برای طول عمر ریزشبکه بهینه شده است.

در مجموع، می‌توان این جمع‌بندی را داشت که معمولاً در مطالعات کنترل بهینه ریزشبکه با تولید همزمان برق و گرما، بیشتر اهداف اقتصادی و آلاینده‌گی مطرح می‌شود. در این مطالعات، بهینه‌سازی ادوات کنترلی و جبران‌ساز که با اهداف بهبود ابعاد فنی ریزشبکه می‌باشند، مدنظر قرار نمی‌گیرد. از طرفی در مطالعاتی که از ادوات D-FACTS استفاده شده است، هدف بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات است. لذا هدف این مقاله در نظر گرفتن این اهداف به صورت همزمان است. در مرجع [۱۸] از یک سیستم واقعی در ژاپن جهت پیاده‌سازی روش کنترلی پیشنهادی با هدف بهبود ابعاد فنی شبکه استفاده شده بود. لذا، در این مقاله با اضافه کردن منبع تولید پراکنده پیل سوختی، تأمین بارهای گرمایی نیز مد نظر قرار گرفته شده است و علاوه بر در نظر گرفتن کنترلرها و اهداف بهینه‌سازی قبلی هزینه‌های سوخت نیز لحاظ شده است. در این روش کنترلی جامع علاوه بر متغیرهای کنترلی مربوط به ادوات استفاده شده در شبکه، توان تولیدی منابع نیز به عنوان یک متغیر کنترلی برای کاهش هزینه و آلاینده‌گی استفاده شده است. در این مقاله به دلیل اضافه شدن هزینه‌های سوختی و بارهای گرمایی به شبکه، یک مدل واقعی‌تر برای بازده تولیدی منابعی از قبیل پیل سوختی استفاده شده است. مطابق یک شبکه واقعی [۱۸]، بازده پیل سوختی به صورت یک تابع متغیر با بار در نظر گرفته شده است [۲۰-۲۱]. علاوه بر این به منظور ارائه این

Table (1): Line Impedances

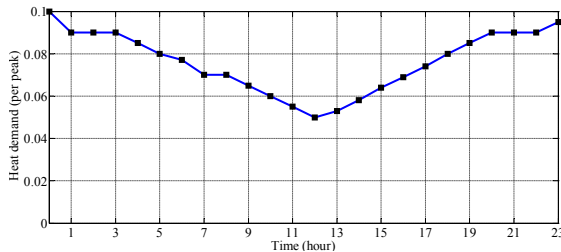
جدول (۱): امپدانس خطوط

From Bus	To Bus	R(p.u.)	X(p.u.)
LRT	N1	۰.۰۲۷۰	۰.۰۳۲۸
N1	N2	۰.۰۲۱۵۸	۰.۰۳۶۸۶
N1	N21	۰.۰۴۳۱۶	۰.۰۷۳۷۲
N21~N23	N22~N24	۰.۰۲۱۵۸	۰.۰۳۶۸۶
N2	N3	۰.۰۲۱۵۸	۰.۰۳۶۸۶
N3	N31	۰.۰۴۳۱۶	۰.۰۷۳۷۲
N31~N32	N32~N33	۰.۰۷۴۸۰	۰.۰۲۹۹۲
N3~N12	N4~N13	۰.۰۲۱۵۸	۰.۰۳۶۸۶



شکل (۴): نمودار بار الکتریکی در ۲۴ ساعت [۱۸]

Fig. (4): Daily load curves [18]

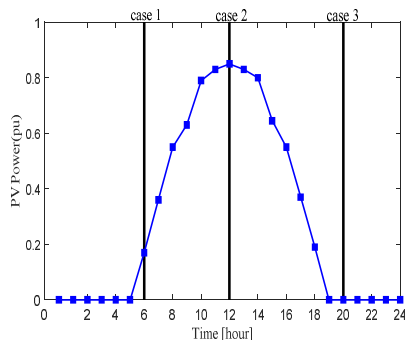


شکل (۵): نمودار بار گرمایی [۲۰]

Fig. (5): Thermal load curve [20]

۶. سلول خورشیدی

منبع فتوولتائیک استفاده شده در این مطالعه دارای یک توان خروجی مطابق نمودار شکل (۶) است. این شکل توان تولیدی PV را در طول ۲۴ ساعت شبانه روز نشان می‌دهد. طبق الگوی بار معرفی شده و این نمودار، سه ساعت متفاوت از کل ۲۴ ساعت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸].



شکل (۶): توان تولیدی PV

Fig. (6): Power generation of PV

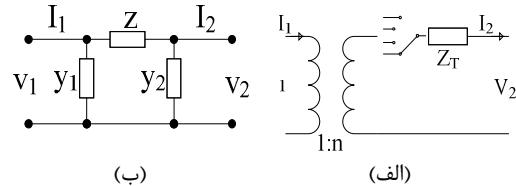
این روابط برای مدار معادل چهار ترمیناله در معادله (۲) نشان داده شده است:

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + zy_1 & -z \\ -(y_1 + y_2 + y_1 y_2 z) & 1 + zy_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

با مساوی قرار دادن روابط (۱) و (۲)، معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$z = \frac{Z_T}{n}, \quad y_1 = \frac{n(n-1)}{Z_T}, \quad y_2 = \frac{(1-n)}{Z_T} \quad (3)$$

به این ترتیب این عنصر به شکل مناسبی برای استفاده در Y_{bus} کلی شبکه آماده شده است.



شکل (۲): مدار معادل LRT. (الف) معمول (ب) چهار ترمیناله.

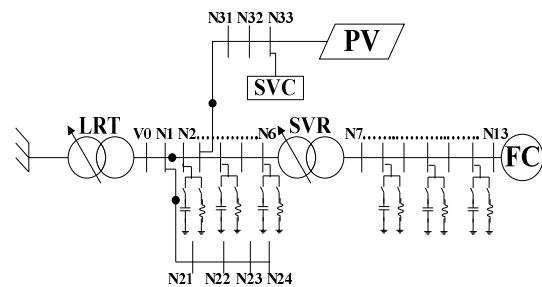
Fig. (2): Equivalent circuit of LRT. (a) Conventional (b) Four-terminal.

۴. ShR و ShC

خازن و راکتور یکی از پر کاربردترین ادوات مورد استفاده در شبکه قدرت برای جبران‌سازی توان راکتیو هستند. این ادوات که به صورت موازی به شبکه وصل می‌شوند در کاربردهای کنترلی معمولاً به صورت منابع توان راکتیوی مدل می‌شوند که با ظرفیت ثابت تنها می‌توانند دو وضعیت وصل (On) و قطع (Off) را داشته باشند. خازن‌ها به صورت یک منبع تولید توان راکتیو و راکتورها به عنوان یک منبع جذب توان راکتیو استفاده می‌شوند.

۵. شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه ۲۲ باسه است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. امپدانس خطوط در جدول (۱) آورده شده است. داده‌های این شبکه بر اساس یک سیستم قدرت در ژاپن [۱۸] مدلسازی شده‌اند. این شبکه شامل دو منبع تولید پراکنده است: فتوولتائیک (PV) و پیل سوختی (FC). نمودار بار الکتریکی در بازه ۲۴ ساعت در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار بار مشخص است پیک بار در ساعت ۲۰ اتفاق می‌افتد که در این لحظه توان تولیدی PV برابر صفر خواهد بود. نمودار بار گرمایی نیز در شکل (۵) نمایش داده شده است [۱۸].

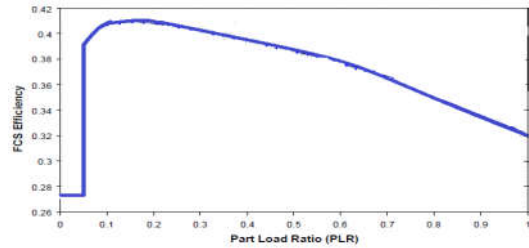


شکل (۳): شبکه توزیع مورد مطالعه [۱۸]

Fig. (3): Case study distribution network [18]

۷. پیل سوختی

توان تولیدی پیل سوختی به عنوان یک معیار حساس که علاوه بر تامین بارهای الکتریکی و بهبود شارش توان، وظیفه تامین بارهای گرمایی را با در نظر داشتن مسائل زیست محیطی نیز دارد، در نظر گرفته شود. با توجه به عملکرد مهم این منبع، از یک مدل واقعی تر برای فرمولنویسی بازده خروجی آن استفاده شده است. در یک منبع پیل سوختی واقعی، مطابق شکل (۷)، بازده توان تولیدی وابسته به نسبت بار (PLR) متغیر است و از رابطه زیر تبعیت می کند [۲۰]:



شکل (۷): رابطه بازده تولیدی پیل سوختی با نسبت بار
Fig. (7): The relationship between fuel cell production efficiency and load ratio

$$N(f_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & \text{if } f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 0 & \text{if } f_i^{\max} \leq f_i \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه f_i^{\min} و f_i^{\max} به ترتیب مقدار مینیمم و ماکزیمم تابع هدف نام هستند.

تابع هدف اصلی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$f_{main} = 1 - \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4} \times N(f_i) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، f_{main} تابع هدف اصلی است.

۱۰. پروفیل ولتاژ شبکه

$$f_1 = \min \sum \text{abs}(V_i - V_{i,ref}) \quad (9)$$

که در آن V_i ولتاژ باس نام و $V_{i,ref}$ ولتاژ مرجع باس نام می باشد (در این مطالعه این ولتاژ مرجع برای تمام باس ها یک پریونیت در نظر گرفته شده است).

۱۱. تلفات الکتریکی

$$f_2 = \min \sum P_{loss} \quad (10)$$

P_{loss} : توان تلفاتی هر شاخه
مجموع هزینه های الکتریکی و گرمایی

$$f_3 = \min \sum Cost_{total} = \min \sum C_{FC} + C_{Grid} + C_{Heat} \quad (11)$$

رابطه (۱۱) شامل سه هزینه است:

الف) هزینه تولید انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی در ساعت نام (C_{FC}) [۲۲]:

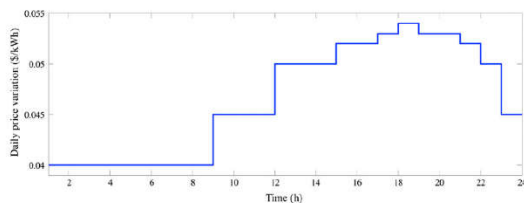
$$C_{FCi} = 0.04 \$/kw \times \frac{P_{FCi}}{\eta_{FC,i}} \quad (12)$$

ب) هزینه تامین بار الکتریکی توسط شبکه در ساعت نام $(C_{Grid,i})$:

$$C_{Grid,i} = Price_i \times P_{Grid,i} \quad (13)$$

که در آن $Price_i$ و $P_{Grid,i}$ به ترتیب قیمت انرژی الکتریکی در ساعت نام و میزان توان تولیدی توسط شبکه برای تامین بار الکتریکی در ساعت نام هستند.

تغییرات قیمت در طول ۲۴ ساعت مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است.



شکل (۸): تغییرات قیمت انرژی الکتریکی

Fig. (8): Electrical energy price variations

ج) هزینه تامین بار گرمایی به صورت مستقیم از گاز (C_{Heat}) : بخشی از کل بار گرمایی توسط توان گرمایی تولیدی پیل سوختی تامین می شود

$$\eta_{FC,i} = \begin{cases} 0.2716, PLR_i \leq 0.05 \\ 0.9033PLR_i^5 - 2.9996PLR_i^4 + 3.6503PLR_i^3 \\ - 2.0704PLR_i^2 + 0.4623PLR_i + 0.3747, PLR_i \geq 0.05 \end{cases} \quad (4)$$

که در آن PLR_i در ساعت نام به صورت نسبت توان تولیدی پیل سوختی به مقدار ماکزیمم تولید FC مدل می شود.

$$PLR_i = \frac{P_{FCi}}{P_{maxFC}} \quad (5)$$

در این رابطه، P_{FCi} و P_{maxFC} به ترتیب توان تولیدی پیل سوختی در ساعت نام و ماکزیمم توان تولیدی توسط این منبع هستند. همان طور که در شکل نشان داده شده است در بار کامل بازده تولیدی کمتر از حالت کم باری است. توان گرمایی تولیدی توسط پیل سوختی معمولاً نسبتی از توان الکتریکی آن است. نسبت توان تبدیلی از الکتریکی به گرمایی که با η_{FCi} نمایش داده شده است، با تابع زیر مدل شده است [۲۰]:

$$\eta_{FC,i} = \begin{cases} 0.6816, PLR_i \leq 0.05 \\ 1.0785PLR_i^4 - 1.9739PLR_i^3 + 1.5005PLR_i^2 \\ - 0.2817PLR_i + 0.6838, PLR_i \geq 0.05 \end{cases} \quad (6)$$

۸. فرمول بندی مسئله

هدف اصلی یافتن ظرفیت ظرفیت بهینه منابع و تعیین استراتژی عملکرد ادوات کنترلی توان راکتیو به گونه ای است که علاوه بر بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات، آلاینده گی و هزینه های سوخت را نیز در پی داشته باشد. تابع هدف پیشنهادی شامل چند قسمت است.

۹. تابع هدف

تابع هدف اصلی شامل چهار زیر تابع است: پروفیل ولتاژ شبکه (f_1) ، تلفات الکتریکی (f_2) ، مجموع هزینه های الکتریکی و گرمایی (f_3) و آلاینده گی (f_4) .

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (23)$$

در این رابطه پارامترها به شرح زیر تعریف شده‌اند:
 (تعداد باس‌های سیستم = n_{bus}) $i=1, 2, \dots, n_{bus}$

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (\text{تفاضل زوایای باس‌های } i, j)$$

$$V_i, V_j \quad (\text{ولتاژ باس‌های } i, j)$$

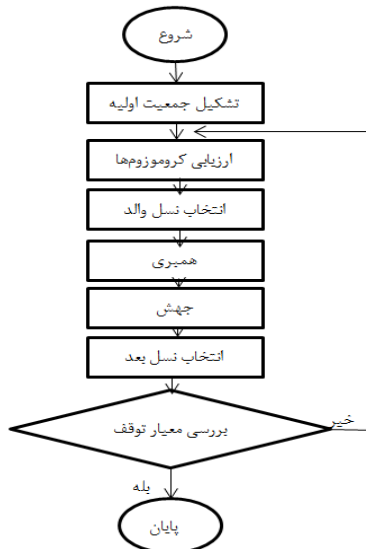
P_i, P_{gi} و P_{di} (توان اکتیو، توان اکتیو تولیدی و توان اکتیو مصرفی باس i ام)

Q_i, Q_{gi} و Q_{di} (توان راکتیو، توان راکتیو تولیدی و توان راکتیو مصرفی باس i ام)

۱۴. الگوریتم حل مسئله

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای تعیین متغیرهای کنترلی استفاده شده است.

نمودار شکل (۹) الگوریتم ژنتیک را به صورت خلاصه معرفی می‌کند.



شکل (۹): الگوریتم ژنتیک

Fig. (9): Genetic algorithm

تعداد ۱۱ متغیرهای تصمیم‌گیری (کروموزومها) در حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. ۹ متغیر n_1 تا n_9 مربوط به تجهیزات کنترلی ریزشکبه و n_{10} و n_{11} توان تولیدی منابع PV و FC هستند. جدول (۳) این متغیرها را معرفی می‌کند.

Table (3): Decision variables in optimization

جدول (۳): متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی

متغیر	توضیح
n_1	تنظیم LRT
n_2	تنظیم SVR
n_3	تولید راکتیو SVC
$n_4 - n_9$	وضعیت خازن‌ها و راکتورهای موازی (0 یا 1 یا -1)
n_{10}	توان تولیدی PV
n_{11}	توان تولیدی FC

که میزان توان گرمایی تولیدی توسط پیل سوختی از معادله (۶) به دست می‌آید. اما بخش دیگری از بار گرمایی که باقی می‌ماند باید به صورت مستقیم از گاز طبیعی تامین شود که هزینه آن با رابطه زیر در بهینه‌سازی لحاظ شده است:

$$C_{Heat,i} = Price_{Gas,i} \times P_{Gas,i} \quad (14)$$

در این رابطه $Price_{Gas,i}$ قیمت گاز طبیعی و برابر 0.05\$/kw است. $P_{Gas,i}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{Gas,i} = P_{Heat-Load,i} - P_{FC-Heat,i} \quad (15)$$

$P_{FC-Heat,i}$ و $P_{Heat-Load,i}$ به ترتیب کل بار گرمایی در ساعت i ام و توان گرمایی تولیدی توسط FC هستند.

۱۲. آلاینده‌ها

در این مطالعه، معیار آلاینده‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$f_4 = \min \sum Emission = \min \sum E_{FC} + E_{Grid} \quad (16)$$

که E_{FC} و E_{Grid} به ترتیب آلاینده‌های ناشی از پیل سوختی و شبکه به صورت زیر هستند [۲۲].

$$E_{FC} = NOx_{FC} + SO2_{FC} = (0.03 + 0.006)^{lb/MW} \times P_{FC} \quad (17)$$

$$E_{Grid} = NOx_{Grid} + SO2_{Grid} = (5.06 + 7.9)^{lb/MW} \times P_{Grid} \quad (18)$$

در این روابط، NOx_{FC} و $SO2_{FC}$ به ترتیب آلاینده‌های اکسید نیتروژن و اکسید گوگرد مربوط به پیل سوختی و NOx_{Grid} و $SO2_{Grid}$ به ترتیب آلاینده‌های اکسید نیتروژن و اکسید گوگرد مربوط به شبکه هستند.

۱۳. قیود مسئله

الف) محدودیت توان تولیدی PV:

$$P_{PV} \leq 0.17 (pu) \quad (19)$$

ب) توان تولیدی FC:

$$P_{FC} \leq 0.2 (pu) \quad (20)$$

ج) قیود ادوات کنترلی:

ظرفیت ادوات استفاده شده برای روش کنترلی پیاده شده در جدول (۲) داده شده است.

Table (2): Capacity of control equipment

جدول (۲): ظرفیت تجهیزات کنترلی

ShC(p.u)	SR(p.u)	SVC(p.u)
0.05	0.05	0.1

همچنین تپ مربوط به LRT و SVR بین ۰/۹ تا ۱/۱ با گام ۰/۰۲ تغییر می‌کند.

د) ولتاژ باس‌ها:

ولتاژ هر باس نباید از یک محدوده مشخص خارج شود:

$$V_i, \min \leq V_i \leq V_i, \max \quad (21)$$

ه) قیود پخش بار [۲۳]

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (22)$$

۱۵. نتایج شبیه‌سازی

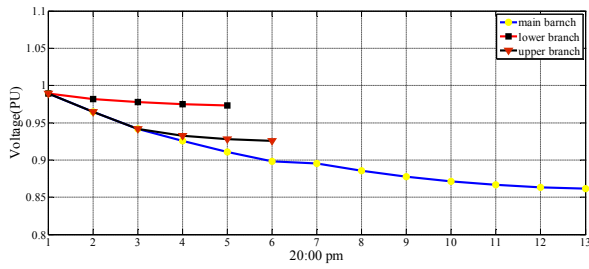
در این قسمت کارایی روش مطرح شده روی شبکه مورد مطالعه، بررسی شده است.

مطالعه در سه ساعت انجام شده است:

ساعت ۶ (کم باری)

ساعت ۱۲ (میان باری)

ساعت ۲۰ (پر باری)

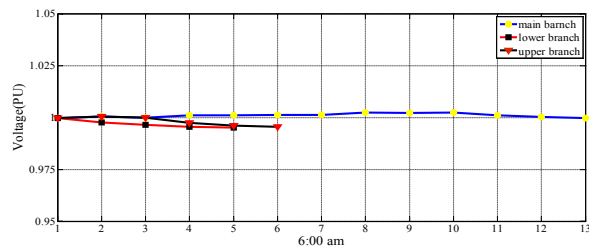


(ج)

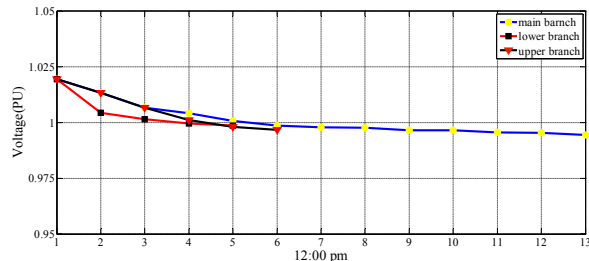
شکل (۱۰): ولتاژ باس‌های ریز شبکه در حالت بدون کنترل (الف) ساعت ۶. (ب) ساعت ۱۲. (ج) ساعت ۲۰

Fig. (10): Voltage of microgrid nodes in uncontrolled mode. (a) at 6 A.M (b) 12 A.M (c) 20 P.M

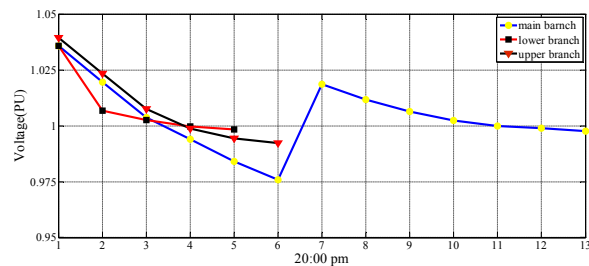
پس از کنترل بهینه ادوات کنترلی شبکه و میزان تولید منابع، وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه در هر سه ساعت مورد مطالعه بهبود یافته است. شکل (۱۱) وضعیت پروفیل ولتاژ بهبود یافته شبکه را پس از اعمال کنترل، در سه ساعت مورد مطالعه نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۱): ولتاژ باس‌های ریز شبکه در حالت کنترل شده (الف) ساعت ۶. (ب) ساعت ۱۲. (ج) ساعت ۲۰

Fig. (11): Voltage of microgrid nodes in controlled mode. (a) at 6 A.M (b) 12 A.M (c) 20 P.M

جدول (۴) مقادیر شایستگی تابع هدف در هر ۳ ساعت مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر متغیرهای کنترلی و توان‌های تولیدی در این سه ساعت در جدول (۵) و (۶) جمع‌بندی شده است.

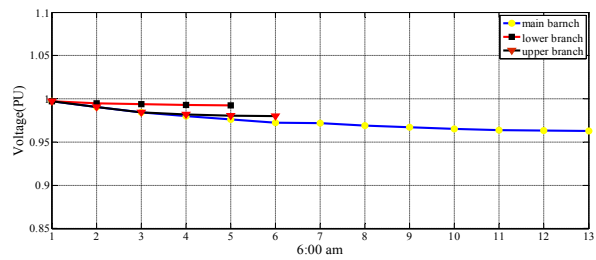
در ساعت ۶ صبح، توان الکتریکی مصرفی در پایین‌ترین سطح قرار دارد. این در حالی است که توان تولیدی PV با وجود غیر صفر بودن، ظرفیت پایینی دارد. بار گرمایی در این ساعت تقریباً برابر $0/9$ بار پیک می‌باشد. نکته مهم دیگر در این ساعت تغییرات قیمت انرژی الکتریکی است که در پایین‌ترین مقدار می‌باشد.

در ساعت ۱۲ ظهر، سیستم در پیک توان تولیدی PV، میان‌باری الکتریکی قرار دارد، قیمت انرژی در حد متوسط و بار گرمایی در سطح پایین‌تری نسبت به ساعت ۶ قرار دارد.

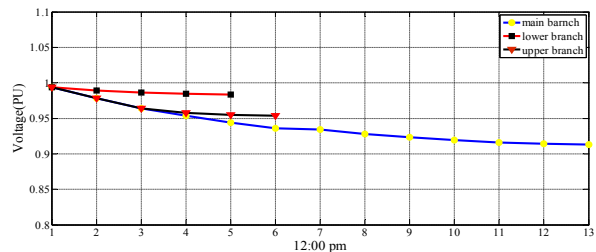
سومین ساعت مورد مطالعه (ساعت ۲۰ شب) بیانگر بیشترین مصرف بار الکتریکی با بالاترین قیمت انرژی و توان تولیدی PV برابر صفر می‌باشد. در این ساعت بار گرمایی وضعیتی مشابه ساعت ۶ صبح دارد.

هر چند که در این مقاله هدف انجام یک کنترل همزمان است که علاوه بر پروفیل ولتاژ شبکه، عوامل موثر دیگری نظیر آلاینده‌گی و هزینه را نیز مد نظر قرار داده است، با این وجود کنترل‌کننده‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای پروفیل ولتاژ شبکه را نسبت به حالت بدون کنترل بهبود داده‌اند.

شکل‌های ۱۰ (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه بدون اعمال کنترل در سه ساعت مورد مطالعه ۶ صبح، ۱۲ ظهر و ۲۰ شب را نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)

جدول (۷) میزان آلاینده‌گی و هزینه کل در سه ساعت مورد مطالعه را بیان می‌کند.

Table (4): The values of the fitness function

جدول (۴): مقادیر شایستگی تابع هدف

ساعت ۶	ساعت ۱۲	ساعت ۲۰
۰/۱۳	۰/۵۴۲	۰/۸۳

Table (5): Values of control variables

جدول (۵): مقادیر متغیرهای کنترلی

متغیر کنترلی	ساعت ۶	ساعت ۱۲	ساعت ۲۰
n1	۱	۱/۱,۰۲	۱/۰۴
n2	۱	۱	۱/۰۴
n3	۰/۵	۰/۸	۰/۴
n4	۱	۱	۱
n5	۱	۱	۱
n6	۰	۰	۱
n7	۱	۱	۰
n8	۱	۱	۰
n9	۰	۱	۱

Table (6): Power level (pu)

جدول (۶): میزان توان (پرونیوت)

توان تولیدی	ساعت ۶	ساعت ۱۲	ساعت ۲۰
PV	۰/۰۳۲۴	۰/۱۶۳۲	۰
FC (الکتریکی)	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۲۱
FC (گرمایی)	۰/۰۵۷	۰/۰۴	۰/۰۹
بازده FC (الکتریکی)	۰/۳۹	۰/۴۰۳	۰/۳۷۶
Grid (الکتریکی)	۰/۲۳۷۲	۰/۴۷۲	۰/۸۸۲
Grid (گرمایی)	۰/۰۲	۰/۰۱	۰
تلفات	۰/۰۴۹	۰/۰۴۵	۰/۰۷۳

Table (7): Pollution and cost

جدول (۷): میزان آلاینده‌گی و هزینه

	ساعت ۶	ساعت ۱۲	ساعت ۲۰
آلاینده‌گی (lb/MW)	۰/۰۷۶۹۹	۶/۱۱۹۳	۱۱/۴۳۵
هزینه (\$/kw)	۰/۰۱۸۷	۰/۰۲۷۷	۰/۰۶۰۷۶

در ساعت ۶ بار شبکه بسیار کم است. در این حالت توان تولیدی PV بسیار کم هست ولی با توجه به عدم تولید آلاینده‌گی و عدم هزینه در ظرفیت ماکزیمم قرار گرفته است. با توجه به کم‌باری ریزشکه در این ساعت، توان تولیدی FC و توان گرفته شده از شبکه اصلی در مقایسه با سایر ساعات مورد مطالعه کمتر است. در نتیجه میزان آلاینده‌گی و هزینه نیز در کمترین مقدار خود قرار دارد، هر چند که میزان تلفات در این

ساعت کمی بیشتر از ساعت ۱۲ است. وضعیت پروفیل ولتاژ نیز در هر سه شاخه مطابق شکل ۱۱-الف) در بهترین حالت قرار گرفته است. ریزشکه در ساعت ۱۲ در حالت میان‌باری قرار گرفته است. در این حالت توان تولیدی PV در بیشترین مقدار است. با وجود اینکه توان تولیدی FC کم است ولی توان گرفته شده از شبکه نسبت به حالت اول تقریباً دو برابر شده است، به همین دلیل آلاینده‌گی و هزینه رشد زیادی داشته است. در حالت سوم (ساعت ۲۰) توان تولیدی PV صفر است و FC توان نسبتاً بالایی به ریزشکه تزریق می‌کند. به دلیل پر باری در این ساعت، شبکه نیز توان بالایی وارد می‌کند. در نتیجه میزان آلاینده‌گی و هزینه در بدترین وضعیت قرار گرفته است.

به طور کلی PV در ماکزیمم ظرفیت خود تولید می‌کند. زیرا از هزینه تولید و آلاینده‌گی آن صرف‌نظر شده است. همانطور که از جداول مشخص است، در صورت نیاز، FC متناسب با توجه به راندمان و آلاینده‌گی خود در تولید انرژی مشارکت داشته است.

۱۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک بهینه‌سازی همزمان، کنترل ادواتی نظیر SVC، SVR، LRT، خازن‌ها و راکتورهای موازی به منظور بهبود پروفیل ولتاژ شبکه و بهبود تلفات، کاهش هزینه و میزان آلاینده‌گی ارایه شده است. در این روش بهینه‌سازی از الگوریتم ابتکاری ژنتیک برای تنظیم ادوات کنترلی ریزشکه استفاده شد. شبکه مورد مطالعه شامل منابع فتوولتائیک و پیل سوختی است که میزان توان تولیدی این منابع نیز متناسب با بار و اهداف کنترلی متغیر است. برای نزدیک شدن به مدل واقعی ریزشکه، بازده پیل سوختی به صورت متغیر با نسبت بار در نظر گرفته شد. مسئله مهم دیگری که در این روش بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفت، تامین بارهای گرمایی ریزشکه با استفاده از ظرفیت گرمایی پیل سوختی و شبکه اصلی با در نظر گرفتن هزینه سوخت است.

با توجه به نتایج، عملکرد بهینه ریزشکه زمانی است که بار به میزانی باشد که منبع فتوولتائیک بتواند قسمت قابل توجهی از آن را تامین کند و کمترین توان از منبع پیل سوختی و شبکه اصلی دریافت شود. زمانی که منبع فتوولتائیک توان تولیدی کمی دارد و یا بار مصرفی ریزشکه افزایش می‌یابد، میزان توان دریافتی از پیل سوختی و شبکه اصلی نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش هزینه و آلاینده‌گی می‌شود. در این وضعیت، به دلیل کنترل هماهنگ و همزمان در ریزشکه، سایر ویژگی‌های شبکه نظیر تلفات و پروفیل ولتاژ نیز تحت تاثیر قرار گرفتند که این تغییرات نیز در مقاله بحث شد.

پی‌نوشت:

1. On-Line

References

- [1] T. Morstyn, B. Hredzak, V.G. Agelidis, "Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 9, No. 4, pp. 3652-3666, July 2018.
- [2] L.I. Dulău, D.Bică, "Optimization of generation cost in a microgrid", *Procedia Manufacturing*, Vol. 22, No. 1, pp.703-708, 2018.
- [3] C.C. Thompson, P.E. Konstantinos Oikonomou, A. H. Etemadi, V.J. Sorger, "Optimization of data center battery storage investments for microgrid cost savings, emissions reduction, and reliability enhancement", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 52, No. 3, pp. 2053-2060, May-June 2016.
- [4] A. Hussain, V. Bui, H. Kim, "A resilient and privacy-preserving energy management strategy for networked microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 9, No. 3, pp. 2127-2139, May 2018.
- [5] B. Lokeshgupta, S. Sivasubramani, "Multi-objective dynamic economic and emission dispatch with demand side management", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 97, pp. 334-343, April 2018.
- [6] F.P. Mahdi, P. Vasant, V. Kallimani, J. Watada, P.Y.S. Fai, M. Abdullah-Al-Wadud, "A holistic review on optimization strategies for combined economic emission dispatch problem", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 3006-3020, Jan. 2018.
- [7] G. Liu, Y.L. Zhu, W. Jiang, "Wind-thermal dynamic economic emission dispatch with a hybrid multi-objective algorithm based on wind speed statistical analysis", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 12, No. 17, pp. 3972-3984, Sep. 2018.
- [8] M.L. Di Silvestre, G. Graditi, E. Riva Sanseverino, "A generalized framework for optimal sizing of distributed energy resources in micro-grids using an indicator-based swarm approach", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 1, pp. 152-162, Feb. 2014.
- [9] H. Bakhtiari, R.A. Naghizadeh, "Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 8, pp. 883-892, June 2018.
- [10] M.H. Moradi, M. Eskandari, S.M. Hosseinian, "Operational strategy optimization in an optimal sized smart microgrid", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 6, No. 3, pp. 1087-1095, May 2015.
- [11] M.H. Moradi, M. Eskandari, H. Showkati, "Hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 56, pp. 241-258, March 2014.
- [12] P. Penkey, H. Samkari, B.K. Johnson, H.L. Hess, "Voltage control by using capacitor banks and tap changing transformers in a renewable microgrid", *Proceeding of the IEEE/ISGT*, Washington, DC, pp. 1-5, April 2017.
- [13] M. Gheydi, A. Nouri, N. Ghadimi, "Planning in microgrids with conservation of voltage reduction", *IEEE Systems Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 2782-2790, Sept. 2018.
- [14] A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, M.H. Moradi, "Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 67, pp. 336-349, May 2015.
- [15] J. Park, S. Nam, J. Park, "Control of a ULTC considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 755-761, May 2007.
- [16] H. Ahmadi, J.R. Martí, "Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 30, No. 1, pp. 25-33, Feb. 2015.
- [17] A. Elmitwally, M. Elsaid, M. Elgamal, Z. Chen, "A fuzzy-multiagent self-healing scheme for a distribution system with distributed generations", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 30, No. 5, pp. 2612-2622, Sept. 2015.
- [18] T. Senjyu, Y. Miyazato, A. Yona, N. Urasaki, T. Funabashi, "Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 1236-1242, April 2008.
- [19] N. Daratha, B. Das, J. Sharma, "Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributedgeneration", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 29, No. 1, pp. 289-299, Jan. 2014.
- [20] H. Karami, M.J. Sanjari, A. Tavakoli, G.B. Gharehpetian, "Optimal scheduling of residential energy system including combined heat and power system and storage device", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 41, No. 8, pp. 765-781, 2013.
- [21] H. Karami, M.J. Sanjari, S.H. Hosseinian, G.B. Gharehpetian, "An optimal dispatch algorithm for managing residential distributed energy resources", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, pp. 2360-2367, 2014.
- [22] T. Niknam, H. Zeinoddini Meymand, "Impact of fuel cell power plants on multi-objective optimal operation management of distribution network", *Fuel Cells*, Vol. 12, No. 3, pp. 487-505, April 2012.
- [23] M. SailajaKumari, S. Maheswarapu, "Enhanced genetic algorithm based computation technique for multi-objective optimal power flow solution", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 6, pp. 736-742, July 2010.