

## بکارگیری پخش توان بهینه در سیستمهای قدرت انرژی الکتریکی با کمک الگوریتم دو گان برنامه‌ریزی خطی با حد فوقانی

حمید ایران منش<sup>۱\*</sup> محمد علی ولی<sup>۲</sup> حسین فرهمند<sup>۳</sup> سید هادی حسینی<sup>۴</sup> علیمیراد خواجه زاده<sup>۵</sup>

mvali@mail.uk.ac.ir

HIranmanesh@graduate.uk.ac.ir

۱- هسته پژوهشی سیستمهای قدرت، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- پژوهشکده ماهانی، دانشکده ریاضی و کامپیوتر دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران

۴- شرکت توزیع نیروی شمال استان کرمان

۵- پژوهشکده انرژی، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی

**چکیده:** یکی از پرکاربردترین و مهمترین مسائل در صنعت و در زمینه کنترل، بهینه‌سازی اقتصادی می‌باشد. از آنجا که انرژی الکتریکی اساسی‌ترین وسیله چرخش کارخانجات صنعتی و بهتر بگوییم صنعت یک کشور می‌باشد، و همین مسئله کفایت تا حساسیت نسبت به بهینه‌سازی این انرژی ارزشمند به بالاترین حد خود برسد. برای این منظور از برنامه‌های پخش توان بهینه (OPF) استفاده می‌شود. محاسبات OPF نظیر دنباله‌ای از محاسبات متداول پخش توان نیوتن رافسون می‌باشد که در آن کمیت‌های قابل کنترل معینی به طور خودبخود تنظیم می‌شوند تا با ارضای محدودیتهای شبکه، یک تابع هدف مشخصی را حداقل نماید. در مقاله حاضر ابتدا به بررسی پخش توان بهینه پرداخته و در ادامه نتایج مربوط به اعمال این روش در یک سیستم نمونه ای ۹ شینه IEEE را مشاهده می‌کنیم.

**کلمات کلیدی:** پخش توان، پخش توان نیوتن رافسون، پخش توان بهینه، برنامه ریزی خطی

### ۱- مقدمه:

موضوع بهره‌برداری اقتصادی برای یک سیستم قدرت، از نظر برگشت سود سرمایه‌گذاری انجام شده بسیار مهم است. نرخ‌های تعیین شده به وسیله ارگانهای دولتی و اهمیت صرفه‌جویی در سوخت، شرکت های برق را جهت حصول حداکثر بازدهی ممکن، تحت فشار قرار می‌دهد. اقتصاد بهره‌برداری شامل تولید و توزیع توان به دو بخش تقسیم می‌شود، یک بخش درباره حداقل نمودن هزینه تولید بحث می‌کند که پخش بار اقتصادی نام دارد و بخش دیگر درباره حداقل نمودن تلفات توان تحویلی به مصرف کننده ها بحث می‌کند.

برای هر شرایط بار پیش بینی شده‌ای، پخش بار اقتصادی توان خروجی هر نیروگاه (و هر واحد مولد در داخل یک نیروگاه) را که هزینه کلی سوخت مورد نیاز برای تامین بار سیستم را حداقل می‌کند تعیین می‌نماید. بنابراین پخش بار اقتصادی روی هماهنگ نمودن هزینه تولید در همه نیروگاههای سیستم توجه دارد.

مساله کمترین تلفات می‌تواند به شکلهای متعددی بسته به چگونگی کنترل پخش توان بررسی شود. مساله پخش بار اقتصادی و همچنین مساله کمترین تلفات به وسیله برنامه پخش توان بهینه (OPF) قابل حل است [۱].

## ۲- پخش توان

در حل مسائل پخش توان هم می‌توان از ادمیتانس خودی و متقابل شینه که تشکیل ماتریس ادمیتانس شینه  $Y_{bus}$  را می‌دهند استفاده نمود و هم می‌توان از امپدانسهای نقطه تحریک و امپدانسهای انتقالی که  $Z_{bus}$  را تشکیل می‌دهند سود جست. بررسی را به روشهایی که از ادمیتانس استفاده می‌کنند محدود می‌کنیم. نقطه آغازین در به دست آوردن داده‌هایی که باید برای رایانه تهیه گردد نمودار تک خطی سیستم است. خطهای انتقال به وسیله مدار معادل  $\pi$  نامی در هر فاز نشان داده می‌شوند. برای هر خط مقادیری عددی امپدانسهای سری  $Z$  و ادمیتانس بارگیری کل خط  $Y$  (معمولاً بر حسب مگاوار بارگیری خط در ولتاژ نامی سیستم) لازم است تا رایانه بتواند همه عناصر ماتریس  $N \times N$  ادمیتانس شینه را تعیین کند. عنصر عمومی آن  $Y_{ij}$  عبارتست از:

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (۱)$$

سایر اطلاعات ضروری عبارتند از توان نامی ترانسفورماتورها و امپدانسهای نامی آنها، مقادیر نامی خازنهای موازی، و تنظیم تپهای ترانسفورماتور. پیش از هر مطالعه پخش توان، باید ولتاژ برخی شینه‌های معین و توانهای تزریق شده، به شرحی که در زیر بحث می‌شود، معلوم باشند.

ولتاژ در یک شینه نمونه (i) سیستم در مختصات قطبی به صورت زیر داده می‌شود:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (۲)$$

و ولتاژ شینه (j) بطور مشابه با تغییر زیرنویس i به j نوشته می‌شود. جریان خالص تزریق شده به شبکه در شینه (i) برحسب در آیه‌های  $Y_{in}$  از  $Y_{bus}$  به وسیله جمع زیر داده می‌شود:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (۳)$$

اگر  $P_i$  و  $Q_i$  توان حقیقی و مجازی خالص ورودی به شبکه در شینه (i) را نشان دهد، مزدوج توان مختلط تزریق شده به این شینه عبارتست از:

$$P_i = -jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (۴)$$

از معادله‌های (۱) و (۳) در آن جایگزین می‌کنیم:

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \angle \theta_{in} + \delta_n - \delta_i \quad (۵)$$

با بسط این رابطه و معادل قرار دادن قسمت‌های حقیقی و مجازی، به دست خواهیم آورد:

$$(۶) \quad P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (7)$$

اگر  $P_{gi}$  توان تولیدی برنامه ریزی شده در شینه (i) و  $P_{di}$  توان درخواستی برنامه ریزی شده بار در همان شینه باشد،  $P_{i,sch} = P_{gi} - P_{di}$  عبارتست از توان خالص برنامه ریزی شده که در شینه (i) به شبکه تزریق می گردد، اگر مقدار محاسبه شده  $P_i$  را با  $P_{i,calc}$  نشان دهیم به تعریف انحراف  $\Delta P_i$  می رسیم که تفاضل مقدار برنامه ریزی شده  $P_{i,sch}$  و مقدار محاسبه شده  $P_{i,calc}$  است:

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (8)$$

و برای توان مجازی شینه (i) به طریق مشابه خواهیم داشت:

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (9)$$

### ۳- پخش توان نیوتن رافسون

بسط سری تیلور برای یک تابع دو یا چند متغیره اساس روش نیوتن رافسون در حل مساله پخش توان است.

به منظور به کار گرفتن روش نیوتن - رافسون در حل معادله های پخش توان، ولتاژ شینه ها و ادمیتانس خطها را به شکل قطبی بیان می کنیم. هنگامی که در معادله های (۶) و (۷)،  $n$  را برابر  $i$  قرار دهیم و عبارتهای متناظر آن را از داخل جمعها بیرون آوریم، بنابراین خواهیم داشت:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (10)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (11)$$

$G_{ii}, B_{ii}$  قسمت های حقیقی و موهومی عنصر  $i^{th}$  ماتریس ادمیتانس می باشد.

$\delta_i$  زاویه فازور ولتاژ در باس  $i$  می باشد [۲].

### ۴- برنامه ریزی خطی

شاید برنامه ریزی خطی رایج ترین روش برنامه ریزی باشد. به صورت ساده، برنامه ریزی خطی به دنبال حداقل کردن یک تابع خطی هدف است در عین اینکه یک مجموعه قیود خطی را نیز مد نظر دارد. به عبارتی به دنبال این هستیم که مجموعه ای از مقادیر بهینه  $x$  ها را که تابع هدف زیر را حداقل می کند پیدا کنیم:

$$Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_N x_N$$

در حالیکه قیود خطی زیر اعمال شوند:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2N}x_N &\leq b_2 \\ &\vdots \end{aligned}$$

به علاوه:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad i = 1 \dots N$$

راه حل های متنوعی جهت حل مسئله وجود دارد. بسیاری از آنها مناسب یک مسئله به خصوص است. برنامه ریزی خطی ارائه شده اینجا الگوریتم دوگانه برنامه ریزی خطی با حد فوقانی نامیده می شود. قسمت حد فوقانی این نام به دلیل این است که حدود متغیرها بطور ضمنی در الگوریتم در نظر گرفته می شوند. دو گانه، اشاره به فرضیه ای دارد که بر آن اساس الگوریتم کار می کند.

جهت حل مسئله با یک روش منسجم، باید یک متغیر به نام متغیر اضافی را به هر قید اضافه کرد. متغیر اضافی مساوی تفاوت بین یک قید و حد آن است. با استفاده از متغیر اضافی می توان یک قید نامساوی را به یک قید تساوی تبدیل نمود.

جهت حل الگوریتم، لازم است که تابع هدف و معادلات قید را به صورت زیر مرتب نمائیم:

(۱۲)

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + x_{slack1} &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + x_{slack2} &= b_2 \\ c_1x_1 + c_2x_2 + \underbrace{\phantom{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + x_{slack1}}}_{\text{متغیرهای پایه}} - Z &= 0 \end{aligned}$$

به علت افزودن متغیرهای اضافی مجموعه روابط را عملاً به صورت متعارف در آورده ایم. در این حالت در هر معادله قید حداقل یک متغیر است که ضریب آن در سایر معادلات قیود مساوی صفر است. این متغیرها را متغیرهای پایه می نامیم. حل کامل الگوریتم برنامه ریزی خطی براساس عملیات لولا است که می تواند یک متغیر غیر پایه را با یک متغیر پایه جابجا نماید. یک عمل لولا را با استفاده از روابط (۱۲) نشان می دهیم. فرض کنید که می خواهیم متغیر غیر پایه  $x_1$  را با متغیر اضافی  $x_{slack2}$  جابجا نمائیم. این کار را می توان با عمل لولا بر ستون اول و ردیف دوم انجام داد. گامها به صورت زیر است:

گام اول: ردیف دوم را در  $1/a_{21}$  ضرب کنید. بنابراین هر  $1, \dots, N$  در ردیف دوم به صورت زیر خواهد شد:

$$a'_{2j} = \frac{a_{2j}}{a_{21}} \quad j = 1 \dots N$$

و :

$$b'_2 = \frac{b_2}{a_{21}} \text{ می شود}$$

گام دوم: برای هر ردیف  $i (i \neq 2)$ ، ردیف دوم را در  $a_{i1}$  ضرب کرده و از ردیف  $i$  کم نمائید. بنابراین هر ضریب  $a_{ij}$  در ردیف  $i (i \neq 2)$  به صورت زیر در خواهد آمد:

$$a'_{ij} = a_{ij} - a_{i1}a'_{2j} \quad j = 1 \dots N$$

و :

$$b'_i = b_i - a_{i1}b'_2 \text{ می شود}$$

گام سوم: در دنباله تمام آنها، همان عملیات مرحله دوم را بر ردیف مربوط به هزینه اعمال می نمائیم. بنابراین هر ضریب  $c_j$  به صورت زیر در خواهد آمد:

$$c'_j = c_j - c_1 a'_{2j} \quad j = 1 \dots N$$

نتیجه عملیات فوق به صورت زیر خواهد شد:

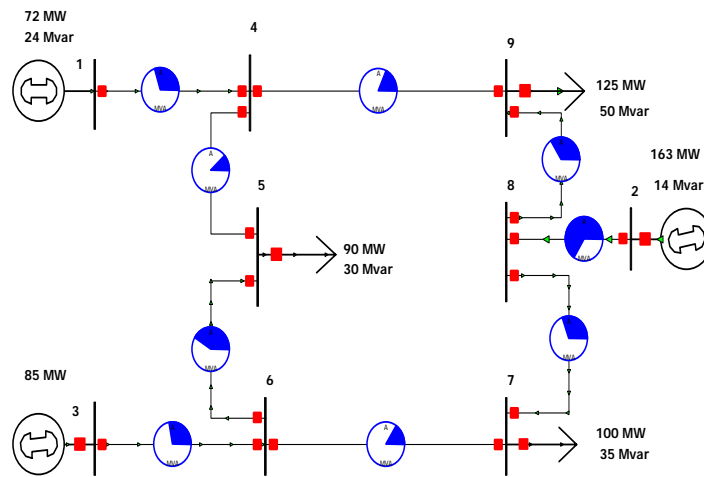
$$\begin{aligned} a'_{12}x_2 + \dots x_{slack1} + a'_{1s2}x_{slack2} &= b'_1 \\ x_1 + a'_{22}x_2 + \dots + a'_{2s2}x_{slack2} &= b'_2 \\ c'_2x_2 + \dots c'_{s2}x_{slack2} - Z &= Z' \end{aligned}$$

توجه کنید پایه جدید روابط اکنون بر متغیرهای  $X_1$  و  $X_{slack1}$  استوار است.  $X_{slack2}$  اکنون در ردیف اول و یا ردیف هزین، ضریب غیر صفر ندارد.

الگوریتم دو گانه برنامه‌ریزی با حد فوقانی با گامهای ساده‌ای به پیش می‌رود که در آن متغیرهای پایه با متغیرهای غیر پایه جابجا می‌شوند. زمانی که یک جابجائی صورت پذیرد یک عمل لولا در ردیف و ستون مناسب انجام می‌پذیرد. متغیرهای غیرپایه در حد بالا یا پائین خود نگاه داشته می‌شوند در حالیکه به متغیرهای پایه اجازه داده می‌شود که هر مقداری را بدون توجه به حدود پائین و بالای خود اختیار نمایند. حل، زمانی به پایان می‌رسد که تمام متغیرهای پایه در داخل محدوده مجاز مربوطه واقع شوند [۳].

## ۵- سیستم مورد مطالعه:

در این قسمت به بررسی اثر پخش بار اقتصادی (OPF)، با استفاده از الگوریتم گفته شده و مقایسه آن با پخش بار معمولی (PF) در شبکه ۹ شینه استاندارد IEEE همانند شکل ۱ پرداخته می‌شود.



شکل ۱- شبکه ۹ شینه IEEE

در شبکه مورد مطالعه روابط زیر برقرار است.

$$P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$0.9 \leq |V_i| \leq 1.1$$

$$10 \leq P_1 \leq 250, 10 \leq P_2 \leq 300, 10 \leq P_3 \leq 270$$

$$-300 \leq Q_1, Q_2, Q_3 \leq 300$$

و همچنین تابع هزینه ژنراتورها به صورت زیر است:

$$f_1 = 0.11 P_1^2 + 5 P_1 + 150$$

$$f_2 = 0.085 P_2^2 + 1/2 P_2 + 600$$

$$f_3 = 0.1225 P_3^2 + P_3 + 335$$

می‌خواهیم تولید بهینه هر کدام از ژنراتورها را برای برآوردن قیود بالا و بهینه کردن تابع هزینه کل بدست آوریم.

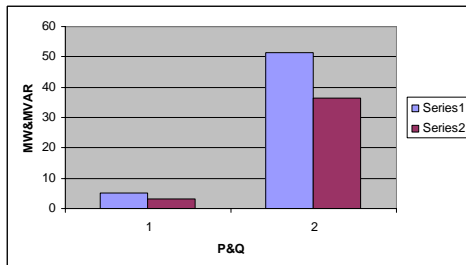
جدول ۱ مقادیر اکتانس خطوط شبکه شبیه سازی شده را نشان می‌دهد [۴ و ۵].

جدول ۱-

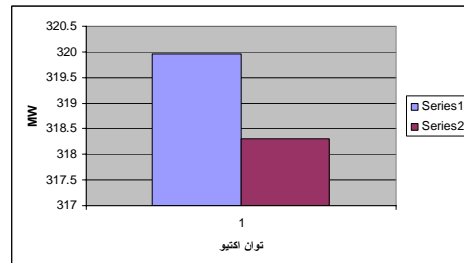
Line	Resistance (p.u)	Reactance (p.u)	Susceptance (p.u)
1-4	0.0000	0.0576	0.0000
4-5	0.0170	0.0920	0.1580
5-6	0.0390	0.1700	0.3580
3-6	0.0000	0.0586	0.0000
6-7	0.0119	0.1008	0.2090
7-8	0.0085	0.0720	0.1490
8-2	0.0000	0.0625	0.0000
8-9	0.0320	0.1610	0.3060
9-4	0.0100	0.0850	0.1760

مقادیر اکتانس خطوط شبکه ۹ شینه

همانطور که از نمودار بلوکی شکل ۲ مشاهده می شود، در حالت پخش بار بهینه میزان تلفات اکتیو و راکتیو خطوط کمتر از زمان بکار گیری پخش بار معمولی می باشد. همچنین با مقایسه میزان توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی توسط ژنراتورها در دو نوع پخش بار انجام شده به این نتیجه می رسیم که در حالت بهینه تولید توان اکتیو به میزان ۱,۶۴۹ MW کمتر از حالتی است که از الگوریتم بهینه سازی استفاده نکرده ایم .



شکل ۲- تلفات اکتیو و راکتیو در حالت های معمولی و بهینه



شکل ۳- تولید توان اکتیو در حالت های معمولی و بهینه

در ادامه با مقایسه بین توانهای راکتیو تولید شده، همانند جدول ۲، در دو حالت مذکور مشاهده می شود که در حالت OPF ژنراتور سوم کاملاً بصورت جذب کننده توان راکتیو در آمده و کل ژنراتورهای شبکه به میزان ۹,۶۴ MVAR توان راکتیو از شبکه جذب می کنند، در صورتیکه در حالت PF کل ژنراتورها مجبور به تولید ۳۴۷,۸۸ MVAR توان راکتیو برای شبکه هستند.

جدول ۲- مقادیر توان تولیدی در حالت های PF & OPF

Reactive Power	PF	OPF
G1	24.069	12.966
G2	14.46	0.031843
G3	-3.649	-22.634
Total	34.88	-9.64

## ۶ - نتیجه گیری:

در این مقاله با کمک الگوریتم دو گانه برنامه ریزی خطی با حد فوقانی به منظور محاسبه پخش توان بهینه جهت کم کردن تلفات خطوط انتقال و همچنین جهت حصول تولید توان های اکتیو و راکتیو با هزینه کم، درمورد یک سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE پیاده سازی شده ونتایج حاصله در این شرایط حاکی از کم شدن تولید توان راکتیو و اکتیو در سیستم مورد نظر می باشد.

## ۷- مراجع:

- [1] Garng. M. Huang, Senior Member, IEEE, and Nirmal-Kumar C Nair, Student Member, IEEE“An OPF based Algorithm to Evaluate Load Curtailment Incorporating Voltage Stability Margin Criterion”
- [2]D.I Sun, B. Ashley, A Hughes, W.F. Tinney, “Optimal power flow by Newton Approach”,IEEE Trans. Power System, vol. 103, 1984, pp. 2684-2880.
- [3]H.W.Dommel, W.F. Tinney, “Optimal power flow solutions”, IEEE PAS, vol. 87, Oct 1968, pp. 1866-1876.
- [4]Tarjei Kristiansen, UTILIZING MATPOWER IN OPTIMAL POWER FLOW  
Department of Electrical Power Engineering Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway.
- [5]Ray D. Zimmerman, Deqiang (David) Gan, MATPOWER, A MATLAB<sup>TM</sup> Power System Simulation Package User's Manual.