



## تبادل بار و فاز در سیستم توزیع قدرت

منصوره زنگی آبادی

محبوبه زراعت زاده

دانشگاه شهید باهنر کرمان

شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان

ایران

کلیدواژه: تعادل بار - جبران ساز - تعادل فاز - الگوریتم SA

به روشهای پیشین است که با شرح این روش و نحوه کاربرد آن مقایسه بین روشهای مختلف صورت خواهد پذیرفت.

## ۱- مقدمه:

در سیستمهای توزیع قدرت، نامتعادلی بار پدیده ای معمول است. فیدرهای نامتعادل نه تنها اتلاف انرژی را افزایش میدهند بلکه روی کیفیت انرژی و قیمت برق اثر می گذارند. طراحی سیستم براساس خصوصیات بار متعادل و یا پیش بینی بار متعادل است وقتی که بار نامتعادل شود، نامتعادلی فیدر ایجاد می گردد. نامتعادلی فیدر وضعیتی را توصیف می کند که در آن ولتاژهای سه فاز در اندازه برابر نباشند یا اختلاف فاز آنها ۱۲۰ درجه الکتریکی نباشد یا هر دو مورد وجود داشته باشد.

برای فائق آمدن بر نامتعادلی بوجود آمده هم می توان از روشهای بالانس بارو هم از روش بالانس فاز استفاده نمود. در روش بالانس بار فیلترهای اکتیو ضمن تزریق جریانهای مناسب، نامتعادلی بار را جبران می کنند و در روش

## چکیده:

طراحی سیستمهای قدرت براساس عملکرد متقارن میباشد و عملکرد نامتقارن منجر به ایجاد مولفه های جریان توالی صفر و منفی میگردد. اینگونه مولفه ها باعث اثرات نامطلوبی در شبکه میگردد. در ضمن وجود بارهای غیرخطی نیز سبب تولید هارمونیک و کاهش ضریب توان است. در شبکه های توزیع، نامتقارن بودن بار و فاز امری مشهود و نیز غیرقابل انکار است که باعث اشغال ظرفیت خطوط، افزایش تلفات، افزایش افت ولتاژ و در نتیجه تحمیل زیانهای مالی میگردد. هدف مقاله ارائه راهکار مناسب برای فائق آمدن بر مسائل ناشی از عدم تقارن بار و نامتعادلی فاز است. تئوری مؤلفه های متقارن لحظه ای، الگوریتمی مناسب برای محاسبه جریانهای مرجع سه فاز ارائه میدهد. با تزریق این جریانها به سیستم قدرت تقارن لازم در سیستم بوجود آمده و بدین ترتیب جبران سازی به گونه ای مناسب صورت می پذیرد. استفاده از الگوریتمهای هوشمند، روشهای مناسب در حل مسئله نامتعادلی فاز است. روش SA روشی نوین و دارای مزایا و برتری هائی نسبت

۲- مولفه متناوبی توان لحظه ای ۱۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند بنابراین مجموع آنها صفر است. اما برای استفاده از مفاهیم رایج، توان راکتیو سه فاز به صورت زیر تعریف می شود.

$$Q_{3\phi} = 3Q \quad (7)$$

باید به این مسئله توجه داشته باشیم که توان راکتیو فقط مطابق تعریف محاسبه می شود و مجموع آن در سه فاز متعادل برابر صفر است.

۲-۲- منبع ولتاژ سینوسی و بارهای غیر خطی  
در این حالت منبع ولتاژ مطابق رابطه (۱) می باشد اما جریان شامل هامورنیک است:

$$i_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (8)$$

و روابط زیر حاکم است:  
- توان لحظه ای

$$p_o(t) = VI_1 \cos \varphi_1 (1 - \cos 2\omega t) - VI_1 \sin \varphi_1 \sin 2\omega t + \sum_{n=2}^{\infty} 2VI_n \sin \omega t \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (9)$$

- توان اکتیو متوسط

$$P = VI_1 \cos \varphi_1 \quad (10)$$

- مقدار rms جریان

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T i_o^2 dt} \quad (11)$$

که T دوره تناوب  $i_o(t)$  است.

- توان ظاهری

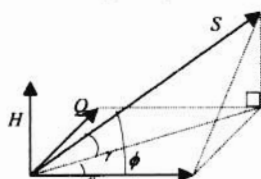
$$S = VI \quad (12)$$

از روابط (۱۱) و (۱۲) رابطه زیر بدست می آید:

$$S^2 = V^2 I^2 = V^2 (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) \quad (13)$$

توان راکتیو را می توان چنین تعریف نمود.

$$Q = VI_1 \sin \varphi_1 \quad (14)$$



شکل ۱-هرم توان

بالانس فاز که امروزه توجه شرکتها را به خود جلب کرده است، ولتاژ در هر نقطه از فیدر متعادل می گردد. عوض کردن فازها یک راه معمول برای بالانس فاز است و هدف اصلی پیدا کردن الگوی جابجائی مناسب فاز برای متعادل کردن یک فیدر با کمترین بهاست.

در این مقاله ضمن بررسی روشهای فوق سعی خواهد شد روش عملی مناسب پیشنهاد گردد.

۲- مفاهیم رایج توان [۱]

برای درک بهتر مفاهیم توان، ابتدا مفاهیم رایج که برای حالت پایدار معتبرند ارائه می گردد.

۲-۱- منبع ولتاژ سینوسی و بارهای خطی

۲-۱-الف) حالت تکفاز - اگر منبع ولتاژ و جریان بار به صورت زیر باشند:

$$v_o(t) = \sqrt{2} V \sin \omega t, \quad i_o(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \quad (1)$$

توان لحظه ای بدین ترتیب محاسبه میگردد:

$$p_o(t) = v_o i_o = VI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - VI \sin \varphi \sin 2\omega t \quad (2)$$

عبارت لحظه ای از دو جمله تشکیل شده است جمله اول مقدار متوسطی برابر  $VI \cos \varphi$  دارد این جمله هیچگاه منفی نمی شود و بنابراین توان dc است. جمله دوم مولفه متناوبی است که فرکانسی ۲ برابر فرکانس خط، مقدار پیک  $VI \sin \varphi$  و مقدار متوسط صفر دارد.

بنابراین توان اکتیو متوسط و توان راکتیو (پیک جمله دوم) به صورت زیر بیان میگردد:

$$P = VI \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (4)$$

عبارت (۲) را می توانیم به این صورت بنویسیم:

$$p_o(t) = p(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t \quad (5)$$

۲-۱-ب) حالت سه فاز - با در نظر گرفتن یک سیستم سه فاز، متعادل با فازهای a, b, c و بارهای خطی به این نتایج خواهیم رسید:

۱- توان لحظه ای سه فاز اکتیو

$$p_{3\phi}(t) = p_o(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3P = P_{3\phi} \quad (6)$$

یعنی توان سه فاز لحظه ای ثابت و برابر با مقدار متوسط اش است.

و توان هارمونیک نیز

$$H = V\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (15)$$

خواهد بود. رابطه (۱۳) را می توان چنین نوشت:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (16)$$

برای نمایش رابطه اخیر می توان از هرم توان به جای مثلث در حالت خطی استفاده نمود که در شکل (۱) نمایش داده شده است و بوسیله این شکل می توان ضریب های مهمی را استخراج نمود.

ضریب توان اصلی

$$\cos \varphi_1 = \frac{Q}{P}$$

ضریب اعوجاج

$$\cos \gamma = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S} = \frac{I_1}{I}$$

ضریب توان کلی

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \cos \varphi_1 \cos \gamma$$

ضریب توان اصلی، ضریب توان سیستم بدون هارمونیک است و چون فقط به مولفه اصلی جریان بستگی دارد ضریب توان اصلی نامیده می شود. ضریب توان کلی هم به مولفه های اصلی و هم به مولفه های هارمونیک بستگی دارد و بهمین دلیل ضریب توان کلی نامیده می شود.

اگر روابط (۱۰) و (۱۲) و (۱۴) و (۱۵) در عدد ۳ ضرب شوند روابط سیستم سه فاز متعادل بدست خواهند آمد و موارد زیر را می توان نتیجه گرفت:

$P, Q$  فقط به مولفه جریان در فرکانس اصلی بستگی دارند.

$H$  به مولفه های جریان با فرکانس های هارمونیک (فرکانس های متفاوت با  $\omega$ ) بستگی دارد.

مولفه  $V I_1 \sin \varphi_1 \sin 2\omega t$  توان مقدار متوسط صفر دارد و توسط یک خازن یا سلف قابل حذف است. اتصال یک سلف یا خازن موازی با بار، با تولید جریانی در فرکانس  $\omega$  توان راکتیو مورد نیاز بار ( $Q$ ) را جذب یا تولید می کند.

باید توجه شود که از این پروسه برای تولید یا جذب توان هارمونیک  $H$  نمی توان استفاده

نمود زیرا  $H$  فرکانس هائی متفاوت با مولفه اصلی دارد.

مولفه های توان رابطه (۹) که به فرکانسهائی متفاوت با  $\omega$  بستگی دارند، مقدار متوسط صفر داشته و بوسیله یک خازن یا سلف قابل حذف نیستند. حذف  $H$  به فیلترهائی بستگی دارد که برای هارمونیک جریان تولید شده توسط بار، اتصال کوتاه عمل می کنند.

### ۳- مفاهیم مولفه های متقارن لحظه ای

در قسمت قبل مولفه های توان به صورت یک هرم بررسی شد اما این مطالب براساس رفتار حالت پایدار است.

در حالت گذرا نیاز به یک تئوری دیگر است که رفتار بار را با تغییرات پیوسته در حضور هارمونیکها ارائه دهد.

مفاهیم جدیدی از توان اکتیو و راکتیو پیشنهاد شده است. این مفاهیم از بین تمام روشهائی که برای تولید شکل موجهای جریان مرجع استفاده می شود توجه قابل ملاحظه ای به خود جلب کرده است که در این قسمت ضمن معرفی طرح جدید به این مفاهیم خواهیم پرداخت. [۲]

### ۳-۱- تعریف مولفه های متقارن لحظه ای:

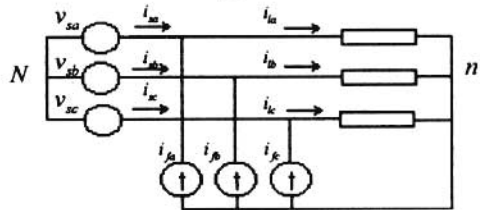
فرض کنید جریانهای لحظه ای سه فاز بوسیله  $i_a, i_b, i_c$  تعریف شده باشند در این صورت مولفه های متقارن لحظه ای بدین ترتیب خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در آن  $a = e^{j120^\circ}$  می باشد. بایستی توجه داشت که بردارهای لحظه ای  $i_{a1}, i_{a2}$  مزدوج مختلط یکدیگر هستند و  $i_{a0}$  یک مقدار حقیقی است که اگر جریان متعادل باشند مقدارش صفر می شود. در طرحی که در ادامه خواهد آمد، فرض بر اینست که منبع ولتاژ متعادل است. در واقع زاویه بین بردارهای  $i_{a1}, i_{a2}$  مبین ضریب توان بین جریانها و ولتاژهای منبع متعادل است. در طرح پیشنهادی این زاویه می تواند مطابق دلخواه ما تغییر کند.

### ۳-۲ طرح تولید جریان مرجع

شکل ۲ طرح جبران سازی بوسیله جریانهای مرجع را به نمایش میگذارد. هدف طرح، تولید شکل موجهای جریان مرجع  $i_{fa}^*$ ,  $i_{fb}^*$ ,  $i_{fc}^*$  است. بگونه ای که جریان و ولتاژ بار را چنان تغییر دهند که از دید منبع، بار متعادل گردد.



شکل ۲- طرح جبران سازی برای بار اتصال ستاره

بعبارت دیگر هدف فراهم نمودن جریان منبع متعادلی است که مولفه صفر آن صفر باشد.

بنابراین:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (18)$$

فرض کنید زاویه بردار  $i_{sa}^*$  به اندازه  $\theta$  از  $v_{sa1}$  عقب تر باشد در اینصورت:

$$\angle \{v_{sa} + av_{sb} + a^2 v_{sc}\} = \angle \{i_{sa}^* + ai_{sb}^* + a^2 i_{sc}^*\} + \theta \quad (19)$$

با قرار دادن مقدار  $a$  در رابطه فوق، معادله بالا را می توان چنین نوشت:

$$\tan^{-1} \left( \frac{K_1}{K_2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{K_3}{K_4} \right) + \theta \quad (20)$$

که در آن:

$$K_1 = \sqrt{3/2} (v_{sb} - v_{sc}), \quad K_2 = \left( \frac{3}{2} \right) v_{sa}$$

$$K_3 = \sqrt{3/2} (i_{sb} - i_{sc}), \quad K_4 = i_{sa} - \frac{i_{sb}}{2} - \frac{i_{sc}}{2}$$

با تعریف  $\beta = \tan \theta / \sqrt{3}$  و حل رابطه (۲۰) خواهیم داشت:

$$(v_{sb} - v_{sc} - \beta v_{sa}) i_{sa}^* + (v_{sc} - v_{sa} - \beta v_{sb}) i_{sb}^* + (v_{sa} - v_{sb} - \beta v_{sc}) i_{sc}^* = 0 \quad (21)$$

توجه به مفهوم رابطه (۲۱) جالب به نظر می رسد زیرا وقتی که فرض شود ضریب توان صفر باشد توان راکتیو تامین شده بوسیله منبع،

صفر می شود. بعبارت دیگر وقتی که این زاویه غیر صفر باشد منبع توان راکتیوی  $\beta$  برابر توان لحظه ای تولید می کند.

توان لحظه ای در یک مدار سه فاز متعادل ثابت است در حالیکه برای یک مدار نامتعادل مولفه ای با فرکانس دوپل به اضافه یک مقدار DC دارد. هدف جبران ساز اعمال مولفه فرکانس دوپل است به گونه ای که منبع مقدار dc توان بار را تغذیه کند.

بنابراین:

$$v_{sa} i_{sa}^* + v_{sb} i_{sb}^* + v_{sc} i_{sc}^* = P_{lav} \quad (22)$$

توان بار متوسط ( $P_{lav}$ ) با استفاده از فیلتر متوسط متغیر (MA) که زمان متوسط یک نیم سیکل را دارد قابل محاسبه است. باید توجه کرد که فرمول (۲۲) هم برای جریان بار هارمونیک و هم برای جریان بار غیر متناوب معتبر است.

با استفاده از شکل ۲ خواهیم داشت:

$$i_{sa} = i_{la} - i_{fa}^*, \quad i_{sb} = i_{lb} - i_{fb}^*, \quad i_{sc} = i_{lc} - i_{fc}^* \quad (23)$$

با ترکیب روابط (۱۸) و (۲۱) و (۲۳) شکل ماتریس برداری زیر حاصل می شود:

$$A i_f^* = A i_l - P_l \quad (24)$$

که در آن:

$$i_f^{*T} = [i_{fa}^* \quad i_{fb}^* \quad i_{fc}^*], \quad i_l^T = [i_{la} \quad i_{lb} \quad i_{lc}]$$

$$P_l^T = [0 \quad 0 \quad P_{lav}]$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ v_{sb} - v_{sc} & v_{sc} - v_{sa} & v_{sa} - v_{sb} \\ -\beta v_{sa} & -\beta v_{sb} & -\beta v_{sc} \\ v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \end{bmatrix}$$

$$|A| = \sum_{i=a,b,c} v_{si}^2 = 3(\text{rms phase voltage})^2$$

سپس رابطه زیر برای جریانهای مرجع قابل استخراج است

$$i_{fa}^* = i_{la} - \frac{v_{sa} + (v_{sb} - v_{sc})\beta}{|A|} P_{lav}$$

$$i_{fb}^* = i_{lb} - \frac{v_{sb} + (v_{sc} - v_{sa})\beta}{|A|} P_{lav}$$

$$i_{fc}^* = i_{lc} - \frac{v_{sc} + (v_{sa} - v_{sb})\beta}{|A|} P_{lav} \quad (25)$$

رابطه (۲۵) نشان می‌دهد که اگر بار متعادل باشد و  $\theta$  همان فاز جریان بار باشد جریانهای جبران‌ساز صفر می‌شود. مدار جبران‌ساز شامل سه منبع جریان است می‌تواند از اینورتر منبع ولتاژ (Vs Ts) در هر فاز تشکیل شده باشد که به یک خازن متصل شده باشد. [۳]

مسئله‌های برنامه ریزی صحیح غیر خطی هستند. در ادامه روش SA در راستای جابجائی فاز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ابتدا روش الگوریتم SA شرح داده می‌شود و سپس ضمن در نظر گرفتن یک تابع هدف غیر خطی نحوه بکارگیری SA بررسی و نتایج با الگوریتم گریدی و کوا نچینگ مقایسه خواهد گردید.

#### ۴-بالانس فاز [۴]

در بالانس فاز ولتاژ هر نقطه بار در فیدر بالانس می‌شود. بالانس فاز، سیستم توزیع را قادر می‌سازد که کیفیت برق را بهبود بخشد و هزینه‌ها را کاهش دهد. بالانس فاز به دو طریق بازسازی دوباره فیدر در سطح سیستم و روش جابجائی فازها در سطح فیدر امکان پذیر است. بازسازی دوباره فیدر در چند دهه اخیر شدیداً مطرح بوده است. حالیکه جابجائی فاز نادیده گرفته شده است. از آنجا که بازسازی دوباره فیدر در ابتدا جهت متعادل کردن بار در طول فیدر طراحی می‌شود لذا بالانس فاز بعنوان هدف در بازسازی فیدر در نظر گرفته نمی‌شود و در حقیقت بازسازی فیدر برای رسیدن به بالانس فاز محدودیت‌هایی دارد.

#### ۴-۱- الگوریتم SA (Simulated Annealing)

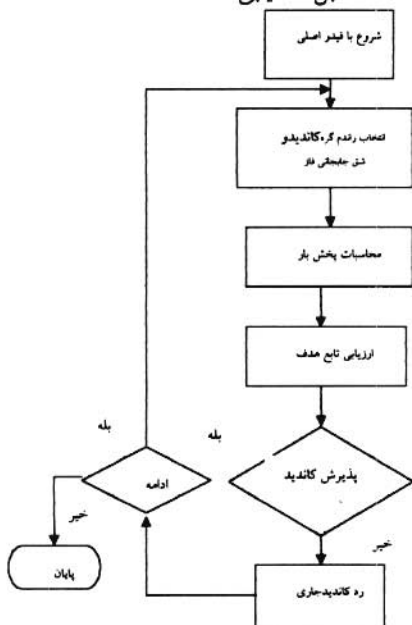
الگوریتم شبیه سازی آبکاری (SA) یک روش معمول ایتیم کردن است که سرد کردن یک سیستم فیزیکی را شبیه سازی می‌کند. ایده اصلی وجود یک تابع هزینه (H) می‌باشد که در واقع ارتباطی بین هزینه، یک حالت از سیستم مثل دما (T) و روشهای گوناگون تغییر این حالت است. در این الگوریتم ابتدا تغییر ایجاد می‌گردد این تغییر در تکرارهای بعدی به تغییرات بعدی می‌انجامد و در هر تکرار پذیرش یا عدم پذیرش تغییر بررسی می‌شود. نتیجه یک تغییر پیشنهادی تغییر  $\delta H$  در تابع H خواهد بود. معیار Metropolis معیار پذیرش یا رد تغییر پیشنهادی است. اگر تابع هزینه کاهش یابد ( $\delta H < 0$ ) تغییر بدون هیچ شرطی پذیرفته می‌شود در غیر اینصورت با احتمال  $\exp(-\delta H/T)$  پذیرفته می‌شود. تعداد اتمهاد نمونه‌های مایع یا جامد حدود  $10^{23}$  در  $cm^3$  حالت متعادل گرمائی مشاهده می‌شود. رفتار متوسط سیستم بوسیله مجموعه‌ای از موقعیت مکانی اتمی  $\{r_i\}$  تعریف می‌شود که با ضرب احتمال بولتزمن وزن می‌گیرد یعنی  $E(\{r_i\})/KBT$  که در آن  $E(\{r_i\})$  انرژی سیستم،  $K_B$  ثابت بولتزمن و T دما می‌باشد.

تا کنون، مهندسان از روش جابجائی فاز برای بالانس کردن فاز بر اساس تجربه و روش‌های سعی و خطا استفاده کرده‌اند که روشی پر دردسر، وقت گیر و غیربینه است. مسئله جابجائی فازها در واقع یک مسئله پخش بار بینه است. برای مثال تابع هزینه باید تلفات انرژی را حداقل نماید. متغیرهای کنترل شقهای جابجائی فازگره‌های کاندید می‌باشند. جابجائی فاز یک مسئله پیچیده و چند جمله ایهای با عدم قطعیت است بنابراین محاسبات، متناسب با تعداد گره‌های کاندیدی به صورت نمائی افزایش می‌یابد.

وقتی که دما صفر باشد تغییرات، تنها در صورتی پذیرفته می‌شوند که H کاهش یابد. الگوریتم "تبه نوردی" با الگوریتم "گریدی" یک الگوریتم شناخته شده در این زمینه است که سیستم به حالتی می‌رسد که در آن هیچیک از تغییرات پیشنهادی نمی‌تواند تابع هزینه را کاهش دهد، اما این حالت یک ایتیم ضعیف است. در زندگی واقعی ممکن است که سعی کنیم به بالاترین نقطه یک کوه بوسیله پیاده روی معمولی به سمت بالا برسیم و شاید در این راستا به بالاترین نقطه تپه‌ای در کنار کوه اصلی برسیم که بالاتر از آن هم نمی‌توان

می‌توان مسئله بالانس فاز را با (MIP) Mixed-Integer-Programming فرموله کرد. اما در بعضی حالتها مثلاً برای مینیمم کردن تلفات انرژی، تابع هدف تابعی صحیح غیر خطی می‌شود که حل تحلیلی آن مشکل است. روشهای محاسباتی هوشمند نظیر منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی آبکاری فولاد (SA) روشهایی قوی برای حل

برگشت به سمت ابتدای فیدر (Backward) تلفات قابل دستیابی هستند .



شکل ۳-فلوجارت استفاده از SA در جابجائی فاز

محاسبات پخش بار جدا از پروسه اپتیمم سازی انجام می شود . یعنی یکبار یک کاندید برای جابجائی فاز تولید می شود ، به منظور به روز کردن اطلاعات پخش بار ، یکبار دیگر پخش بار اجرا می شود و سپس تابع هدف بر اساس پخش بار جدید ارزیابی می گردد، سپس SA تصمیم میگیرد که کاندید ما پذیرفته شود یا رد شود . این پروسه که فلوجارت آن در شکل ۳ ارائه گردیده، ادامه پیدا می کند تا دمای نهائی بدست آید . بر این اساس جمله های زیر قابل تعریف هستند

-تعداد جابجائی فاز

$$H_1 = \sum_i \xi(T_i^k, T_i^o) \quad (26)$$

که در آن

$$\xi(T_i^k, T_i^o) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_i^k = T_i^o \\ 1 & \text{if } T_i^k \neq T_i^o \end{cases} \quad (27)$$

-تابع جریمه

$$H_2 = \sum_i w_j \sum_{ph} g \left( \frac{f_{j,ph}}{c_j} \right) \quad (28)$$

رفت . بر عکس ، اگر دما خیلی بالا باشد تمام تغییرات پذیرفته می شود و به دلیل خاصیت قابل حصول بودن مجموعه تغییرات ، تمام حالت های سیستم استخراج گردیده است که این حالتها شامل اپتیمم های محلی نیز هستند . در عمل نیز دمای پائین یک شرایط مناسب برای تشکیل کریستال ( با حالت های پائین ترین انرژی ) نیست به همین دلیل سرد کردن ماده به دقت صورت می پذیرد یعنی ماده مذاب برای مدت طولانی در مجاورت نقطه انجماد نگهداری می شود . در غیر اینصورت کریستال حاصله نقصانهای زیادی خواهد داشت یا ممکن است یک شیشه با هیچ ساختار کریستالی و فقط در حالت پایداری فلزی و ساختار اپتیمم محلی بدست آید . آقای Metropolis یک الگوریتم ساده معرفی کرده است که برای فراهم نمودن شیشه سازی موثر ، مجموعه ای از اتمهای در حالت تعادل در یک دمای معین قابل استفاده است . [5] در هر گام از الگوریتم ، یک جابجائی تصادفی کوچک به اتم داده می شود و تغییر انرژی ( $\Delta E$ ) بدست می آید . اگر  $\Delta E \leq 0$  باشد جابجائی پذیرفته شده این ترکیب با اتم جابجا شده ، نقطه شروع گام بعدی قرار میگیرد . برای حالت  $\Delta E > 0$  بابررسی احتمال رفتار می شود . احتمال اینکه این ترکیب پذیرفته شود  $\exp(-\Delta E/kT)$  است با تکرار این عمل حرکت گرمائی اتمها در تماس با محیط گرم در T شیشه سازی می شود . آقای Kirkpatrick الگوریتم Metropolis را به الگوریتم SA به منظور شیشه سازی عددی تقریبی رفتار سیستم در دمای معین بسط داد [6] . SA یک ابزار مناسب برای انتقال تکنیک های مکانیک آماری به اپتیمم سازی است بعبارت دیگر یک پروسه جستجوی تصادفی برای حل مسائل ترکیبی پیچیده و مسائل غیر خطی می باشد .

#### ۴-۲-تابع هدف

برای رسیدگی به اثرات افت ولتاژ و / یا تلفات ، یک مدل پخش بار در فرموله سازی جابجائی فاز باید مد نظر گرفته شود . برای مسئله جابجائی فاز ، تابع هزینه بعد از به روز کردن پخش بار قابل ارزیابی است . برای یک سیستم شعاعی با حرکت به سمت انتهای فیدر (Forward) دامنه وزاویه ولتاژ ها و بوسیله

که در آن

$$g(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0.3 \\ e^{x-1} - e^{-0.7} & \text{if } 0.3 \leq x < 1.0 \\ e^{2(x-1)} - e^{-0.7} & \text{if } x \geq 1.0 \end{cases} \quad (29)$$

شاخص کلی برای مسئله جابجائی فاز  
(30)

$$H = \delta.H_1 + \tau.H_2$$

که :

$f_{j,ph}$	بخش فاز روی شاخه $a, b, c = j, ph$
$T_j^0$	طرح تینگ اصلی در گروه I
$T_j^k$	طرح تینگ اصلی در گروه k در k امین نتیجه کاندید
$C_j$	ظرفیت ژامین قسمت خط
$w_j$	ضریب وزن قسمت j
$\delta$	هزینه برای هر جابجائی فاز
$\tau$	ضریب برای هزینه جریمه نامتعادلی
$H$	شاخص کلی تعادل سیستم

تعداد جابجائی فاز ( $H_1$ ) نشاندهنده هزینه های جابجائی فاز و تابع جریمه ( $H_2$ ) نشاندهنده ضرر عدم انجام بالانس فاز است. تابع جریمه کمتر نتیجه تعادل بیشتر فیدر میباشد. ضریب وزن بر اساس اهمیت هر فیدر مقدار میگیرد. شاخص کلی تعادل ( $H$ ) مصالحه بین هزینه و مزایای جابجائی فاز است.

#### 4-3- پروسه بکار گیری الگوریتم

گروه نامتعادل و تینگ بار به صورت تصادفی انتخاب می شوند تا یک حل کاندید بر اساس طرح تینگ فیدر موجود ایجاد گردد. برای به روز کردن اطلاعات سیستم برنامه بخش بار اجرا و سپس شاخص  $H$  طبق رابطه (29) محاسبه می شود. اگر مقدار  $H$  افزایش یافته باشد (حل نامناسب) گروه کاندید در صورتی پذیرفته می شود که احتمال پذیرش آن بر اساس توزیع بولتسمن از یک عدد تصادفی بین 0 و 1 بزرگتر باشد و اگر  $H$  کاهش پیدا کرده باشد (حل بهتر) کاندید پذیرفته می شود، و قتیکه یکبار کاندید پذیرفته شد کاندید بعدی از روی حل جدید ایجاد

می گردد. همانطور که تکرار ادامه پیدا می کند احتمال پذیرش حل نامناسب کاهش می یابد و در نهایت پروسه جستجو وقتی پایان می پذیرد که دما به حد کافی سرد شده باشد.  
SA برای جابجائی فاز به 4 مولفه اصلی زیر نیاز دارد [V].

ترکیب: یک مدل که نشان دهنده جابجائی فاز باشد، یک و فقط یکعدد بار در یک گروه به فاز اختصاص داده می شود.

مجموعه حرکتها: در هر گروه نامتعادل قابل قبول، 6 طرح تینگ فاز وجود دارد. که هر یک از آنها یک حرکت معتبر است. اگر کاندید با آنکه وجود دارد یکی باشد در اینصورت یک کاندید دیگر ایجاد می شود.

تابع هزینه: تابع هزینه می تواند بخش نامتعادلی، شاخص تعادل و تابع هزینه کل تعریف شده رابطه (30) باشد. در بحث جاری تابع هزینه کلی باید حداقل شود و در نتیجه فیدر تعادل گردد.

برنامه سرد کردن: کلیدی است برای اطمینان از اینکه SA به یک حل ایتیم می رسد یا خیر. در واقع بایستی یک نقطه گرم آغازین و قانونهای تعیین کننده زمان کاهش دما، میزان کاهش دما و زمان اتمام سرد کردن تعیین گردند. در مجموع برنامه سرد کردن با 4 آیتیم تعریف می شود: دمای اولیه، دمای نهائی، تعداد تکرارها و نرخ سرد شدن.

دمای اولیه ( $T_{initial}$ ): دمای اولیه به گونه ای تعیین می شود که تمام احتمالات جابجائی فاز را شامل شود. در اینجا انتخاب دمای اولیه بیشترین تفاوت تابع هدف برای هر 2 طرح جابجائی فاز است.

دمای نهائی ( $T_{final}$ ): دمای نهائی به گونه ای تعیین می شود که در یک نقطه ایتیم، بهبودهای مورد انتظار در تابع هدف قابل صرف نظر کردن باشند.

تعداد تکرارها ( $N$ ): تعداد تکرارها بوسیله  $K$  (50~10) دفعه از تعداد شقهای ممکن تعیین میشود. در مثالی که در ادامه می آید  $K=10$  است و تعداد شقها به تعداد گروه ها در فیدر و تعداد فازها در هر گروه بستگی دارد.

نرخ سرد کردن ( $r_{cooling}$ ): نرخ سرد کردن حدود 0.99-0.50 است. این نرخ تابعی از دمای اولیه، دمای نهائی و تعداد تکرارها است. از آنجا که تنها یک کاندید در هر سطح دما اجرا

Solution \ Method	Optima (438)	Near-Optima (444)	Near-Optima (444)
Greedy	79	0	21
Quenching	83	3	14
SA	52	29	19

جدول ۱- مقایسه از دید ایتیم سازی

این سه الگوریتم از دیدگاههای دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته اند که نتایج آنها در جداول ۲ تا ۴ ارئه گردیده است. همانطور که در این جداول مشخص است الگوریتم SA در مجموع عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتمها دارد.

#candidate \ Method	10	15	20	25	30
Greedy	17	32	61	77	179
Quenching	14	41	69	105	184
SA	63	102	207	334	546

جدول ۲- مقایسه زمان محاسبه

#candidate \ Method	10	15	20	25	30
Greedy	661	539	991	931	1645
Quenching	661	539	991	931	1645
SA	660	539	991	928	1643

جدول ۳- مقایسه هزینه ایتیم

#candidate \ Method	10	15	20	25	30
Greedy	668	550	1001	943	1660
Quenching	665	557	1000	939	1659
SA	672	543	997	943	1658

جدول ۴- مقایسه هزینه متوسط

### ۵- نتیجه گیری

به منظور ایجاد یک سیستم متعادل ضمن در نظر گرفتن هزینه ها، بالانس فاز روشی با کاربرد بهتر به نظر میرسد که قابلیت اجرای نسبتا خوبی در شبکه های توزیع دارد. با پیاده سازی الگوریتم SA بعنوان بخشی از

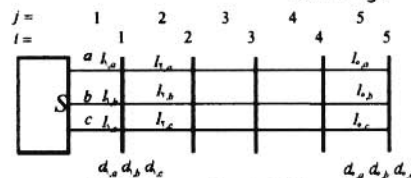
می شود نرخ سرد کردن بوسیله رابطه زیر محاسبه می شود.

$$r_{cooling} = \sqrt{\frac{t_{final}}{t_{initial}}} \quad (31)$$

بعنوان مثال اگر دمای اولیه ۴۵۰ و دمای نهایی ۰٫۱ و تعداد تکرارها ۳۰۰ باشد نرخ سرد کردن ۰٫۹۷۲۳ خواهد بود. این پروسه نیاز به صرف مدت زمان طولانی در دماهای مجاور، منطقه انجماد دارد در روش SA دما در آغاز پروسه سریعتر از انتهای پروسه کاهش پیدا میکند. مثلا نرخ سرد کردن در ۵۰ تکرار اول ۰٫۹۵ است و سپس به ۰٫۹۹ میرسد. با سپری شدن زمان به اندازه کافی طولانی در مجاورت نقطه انجماد، از حل ایتیم مسئله اطمینان حاصل میگردد. این زمان ممکن است ۱۰۰ تکرار طول بکشد.

مثال تشریحی:

از سیستم ۵ گره ای شکل ۴ برای تشریح الگوریتم SA در مسئله جابجائی فاز میتوان استفاده کرد. همزمان با SA نتایج اعمال الگوریتمهای quenching و greedy نیز بررسی خواهد شد.



شکل ۴- یک سیستم ۵ گره

تابع هزینه برای این مثال H (۳۰) بوده که یک تابع صحیح غیرخطی است. این مسئله ایتیم سازی بوسیله روشهای ریاضی مرسوم قابل حل نیست در حالیکه می توان با استفاده از الگوریتمهای SA و Quenching و Greedy آن را حل نمود. نتایج حل سیستم فوق برای ۱۰۰ بار اجرا در جدول ۱ لیست شده است. عدد ۷۹ در جدول نشان دهنده اینست که الگوریتم Greedy بعد از ۷۹ تکرار از ۱۰۰ تکرار به مقدار ایتیم (حداقل هزینه ۴۳۸) خواهد رسید.

در بین این الگوریتمها، الگوریتم Quenching برای این مثال بهتر از بقیه عمل می کند اما اگر سیستم بزرگتر شود عملکرد SA بهتر خواهد بود.



## ۶-مراجع

- [1] E.H.Watanabe, R.M.Stephan, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads," IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.8, No.2, April 1993.
- [2] H.Akagi, Y.Kanagawa and A. Nabae- "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits"-Int. Conf. Power Electronics, Tokyo, 1983.
- [3] A.Ghosh, A.Joshi, "A New Approach to Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution System," IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.15, No.1, January 2000.
- [4] J.Zhu, G.Bilbro, M.Chow, "Phase Balancing using Simulated Annealing," IEEE Transactions On Power Systems, Vol.14, No.4, November 1999.
- [5] N.Metropolis, A.Rosenbluth, M. Rosenbluth, A.Teller and E.Teller, "Journal of Chem. Physics." Journal of Chem. Physics, vol.21, pp.1087, 1953.
- [6] S.Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and J. M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, vol.220, pp.671-80, 1983.
- [7] R. Rutenbar, "Simulated Annealing Algorithms: An Overview," IEEE Circuits and Devices Magazine, pp.19-26, 1989.

سیستمهای مکانیزه که قابلیت‌های بالائی نظیر انجام پخش بار را دارند قادر خواهیم بود همزمان با طراحی بهینه، ضمن انجام بالانس بار حرکت مفیدی در راستای بهره برداری بهینه از شبکه توزیع را آغاز نمود.