

پلی تکنیک تهران

دانشکده برق

بهره برداری از سیستم های قدرت

سجاد صدر ۸۵۱۲۳۰۲۲

بهار ۸۶

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

فهرست

بخش اول: مقالات توزیع بار اقتصادی

تغییری در حل مسئله توزیع بار اقتصادی

۴

حل مسئله بهینه سازی توزیع بار اقتصادی به روشی دیگر با شبکه های عصبی

۱۵

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

کاربردی از محاسبات تکاملی در توزیع بار اقتصادی با توابع هزینه درجه دوم

۲۵

بخش دوم: مقالات توزیع بار

روش جدید برای محاسبه توزیع بار

۴۶

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

تحلیل سیستم های قدرت dc

۵۶

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

برنامه پلان وسیع برای تحلیل توزیع بار dc

۷۱

بخش سوم: مقالات کنترل فرکانس

مدل سازی کنترل فرکانس در یک سیستم مجزا

حداقل کردن اثر اشباع غیر خطی در Ifc توربین بخار

۸۱

۱۰۲

Lfc غیر متمرکز در شبکه های قدرت یک پارچه

۱۱۴

بخش چهارم: به عنوان حسن ختام مقاله ای در باب AVR

میزان سازی تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورهای سنکرون با به کارگیری مدل ژنراتور (on-

line generator) ۱۲۴

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

بخش اول:

مقالات توزیع بار اقتصادی

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

تغییری در حل مسئله توزیع بار اقتصادی

خلاصه

در پخش بار اقتصادی کلاسیک ، هدف توزیع بار بین منابع برای به حداقل رساندن هزینه بر طبق یک سری قید خاص می باشد. اگر تلفات خطوط نیز در نظر گرفته شود هزینه این تلفات نیز بایستی در محاسبات وارد شود. برای حل چنین مسائلی یافتن نمو هزینه کار مشکلی است . این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله پخش بار اقتصادی بدون یافتن نمو هزینه استفاده می کند.

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

## مقدمه

بحران انرژی در جهان ، افزایش سوخت ، در دسترس نبودن انرژی ، بهم پیوستن شبکه های الکتریکی باعث شده اند که از انرژی حداکثر استفاده را بکنیم.

پخش بار اقتصادی شامل دو مسئله مهم است. اولین مسئله اینست که لازم است برای بارهایمان منابع انرژی در دسترس را اختیار کنیم. دومین مسئله اینست که در پخش بار اقتصادی on-line لازم است که هم هزینه را مینیمم کنیم و هم بار را توزیع کنیم. در پخش بار اقتصادی ، مقادیر ژنراتورها ثابت نیست و برای اپتیمم کردن هزینه بین دو حد بالا و پایین یک مقدار را اختیار می کنند.

دور بودن منابع تولید از منابع مصرف باعث می شود که ما مجبور شویم تلفات خطوط را در نظر بگیریم. هر استراتژی که برای حل مسئله پخش بار اقتصادی در نظر گرفته می شود بایستی این مسئله را مد نظر قرار داد.

در برنامه ریزی غیر خطی مقدار هزینه تلفات را با هزینه نیروگاهها جمع می کنند سپس این هزینه کلی را با توجه به قیود مینیمم می کنند. این مستلزم پیدا کردن نمو هزینه می باشد که کار بسیار مشکلی است. هنگام مقایسه هزینه ها معلوم می شود که هزینه ای که بابت تلفات پرداخت می کنیم بسیار کمتر از هزینه نیروگاهها است. بنابراین غیر ضروری است که مقدار نمو هزینه را بدست آوریم. در روش پیشنهاد شده زیر هزینه تلفات خودبخود مینیمم می شود.

الگوریتمهای ژنتیک در تلاشند که پروسه ها را با سرعت زیاد جهش دهند. در اینجا نیز یک نمونه از این کار توضیح داده می شود که دارای بازده بالا و سرعت بالا است. این روش از محاسبه دشوار ضریب تلفات و نمو هزینه جلوگیری می کند و این کار را با استفاده از تلفات خطوط که از پخش بار بدست می آید ، انجام می دهد.

### رمز گذاری و رمز گشائی

#### (۱) رمز گذاری

رمز گذاری برمی گردد به یک سری شماره محدود که به اعضای گروه نسبت داده می شود. که معمولاً اعداد ۰ و ۱ می باشند. در منظور ما این اعداد به یک ناحیه خاص نسبت داده می شوند. نواحی به مجموعه ای از توان ژنراتور بر حسب MW تلقی می شود. برای مسئله ۵ ژنراتوری زیر ، از یک سری میله برای نشان دادن محدوده توان ژنراتور استفاده می کنیم. رشته ها از یک سری ۰ و ۱ که به معنی تغییرات تولید جدید می باشند ، درست شده اند. ساختار داده ها که برای هر عضو مجموعه در نظر گرفته می شود طبق زیر می باشد:

```
Struct member {
```

```
float lower, upper, midvalue;
```

```
int digit; // takes values {0,1}
```

```
};
```

Lower مقدار مینیمم و upper مقدار

ماکزیمم مربوط به هر عضو و midvalue مقدار متوسط را نگه می دارد. رنج

اولیه قدرت تولیدی برای هر ژنراتور به وسیله  $UPPER_{initial}$  و  $LOWER_{initial}$  محدود

می شود. در مسئله ما و در تمامی این مقاله مقدار  $UPPER_{initial}$  برابر 600MW و

$LOWER_{initial}$  برابر 200MW می باشد. نواحی مجاز هر ژنراتور در شکل ۱ نشان

داده شده است:

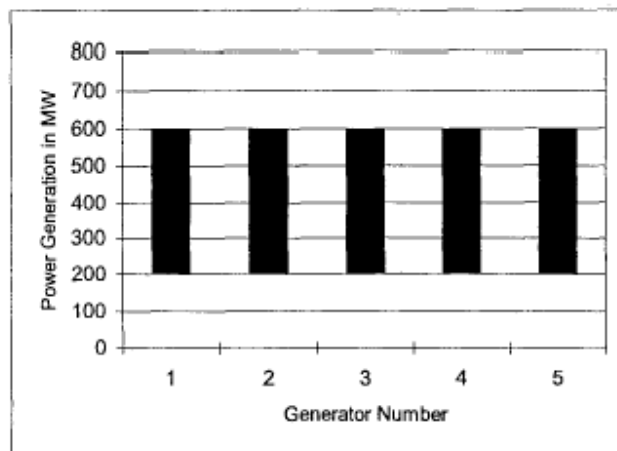


Fig. 1. Initial search region

(۲) رویه ایجاد رشته ها

برای تولید رشته ها ، ۱ به قسمت بالائی تولید هر نیروگاه و ۰ به قسمت پائینی

تولید هر نیروگاه تلقی می شود. این تغییرات متناظر با Lower و upper و



midvalue میباید. در مثال بالا ۱ به ناحیه 400-600 MW و ۰ به ناحیه 200-400 MW  
400 MW اتلاق می گردد. فرض کنید که تولید جدید عبارتست از: {0 1 1 0 1}

، بنابراین شکل ۲ بدست میاید:

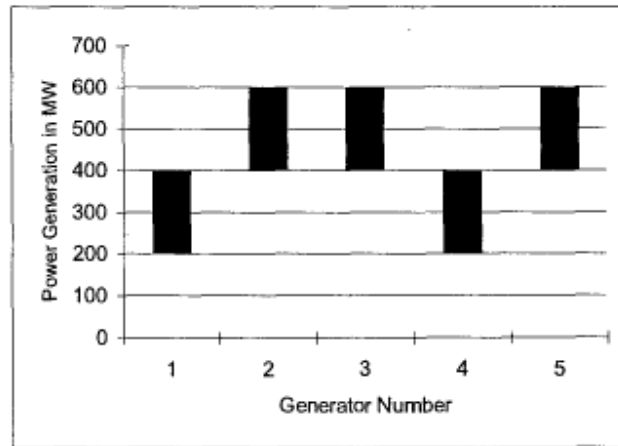


Fig. 2. Note the contracted region represented by the new string 01101. Future generations will also comprise of 0s and 1s, but their interpretation will be different

همانطور که دیده می شود تولید هر نیروگاه با مجموعه ای از مقادیر نشان داده می شود.

تعداد مراحل حل لازم عبارتست از:

$$\log_2 (UPPER_{initial} - LOWER_{initial}) \quad (1)$$

رمز گذاری سیستم به خاطر دلایل زیر می باشد:

• محدودیتهای تولید مستقیماً با یک رشته عددی نمایش داده می شود.

- حافظه کمتری برای ذخیره سازی گرفته می شود.
- درستی نتایج با افزایش تعداد تکرار حلها افزایش میابد.
- بهترین راه حل برای حل مسئله می باشد.
- اضافه کردن ژنراتورها کار ساده ای است .
- از کار انداختن ژنراتور کار ساده ای است ، فقط کافیست که مقادیر  $UPPER_{initial}$  و  $LOWER_{initial}$  مساوی + قرار داده شود.

۳) رمز گشائی

برای رمزگشائی کافیست که مقدار **midvalue** نمونه ها نمونه برداری شود. مقدار واقعی تولید بین دو مقدار بالا و پایین قرار دارد. خصوصیت اصلی الگوریتم اینست که بهترین مقدار را دیکد می کند. مزیت دیگر الگوریتم اینست که **penalty factor** را بدست می آورد.

مسائل فرمولاسیون

در پخش بار اقتصادی ما می کوشیم که:

(۱) تابع هزینه زیر را مینیمم کنیم:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^k F_i . \quad (2)$$

where

$$F_i = \sum_{j=1}^4 A_{ij} P_i^{4-j} . \quad (3)$$

در اینجا توابع هزینه ها را درجه ۳ در نظر می گیریم.

(۲) تلفات انتقال را مینیمم کنیم:

$$\text{Minimize } P_L = \sum \sum P_m B_{mn} P_n . \quad (4)$$

با توجه به قیود زیر:

$$P_T - P_D - P_L = 0 . \quad (5)$$

and

$$0 \leq P_L \leq 0.1 P_D . \quad (6)$$

and

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, m . \quad (7)$$

where

$k$  is the number of generators; in our sample problem its value is five.

$F_i$  is the cost of generation for the  $i^{\text{th}}$  generator,

$A_{ij}$  is the general element in the cost coefficient matrix,

$B_{mn}$  is the general element in the loss coefficient matrix,

$P_m$  and  $P_n$  are the source loadings,

$P_i$  is the power generated by the  $i^{\text{th}}$  generator, ranging between  $P_{\min}$  and  $P_{\max}$ ,

$P_T$  is the total power generated,

$P_L$  is the total power loss,

and  $P_D$  is the desired power.

داده ها

ماتریس A برابر است با:

$$\begin{bmatrix} 1.270E-7 & 9.680E-4 & 6.950 & 749.55 \\ 6.453E-8 & 7.375E-4 & 7.051 & 1285.00 \\ 9.980E-8 & 1.040E-3 & 6.531 & 1531.00 \\ 1.270E-7 & 9.680E-4 & 6.950 & 749.55 \\ 6.453E-8 & 7.375E-4 & 7.051 & 1285.00 \end{bmatrix}$$

ماتریس B برابر است با:

$$\begin{bmatrix} 0.0003 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00012 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0007 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00009 \end{bmatrix}$$

توابع fitness

در اینجا روشی را برای محاسبه طول اعضاء معرفی می کنیم. هر مقدار قابل مشاهده به تنهایی محاسبه می شود و مقادیرها با هم جمع زده می شوند تا بوجود بیاورند یک ضریب شایستگی خاص که با  $\text{figure\_of\_merit} = x+y+z$  نشان

داده می شود. مقادیر  $x, y, z$  طبق روابط زیر محاسبه می شوند:

برای اعمال محدودیت رابطه ۵ فرض می کنیم که:

$$x = \left( 1 - \left( \frac{P_D}{P_T - P_L} \right) \right) \quad (8)$$

حل برای  $P_T - P_L < P_D$  حل غیر قابل قبول است.

برای مینیمم کردن هزینه معادله ۲، داریم که:

$$y = \text{cost}[\text{member}] / \text{average cost of population members} \quad (9)$$

Y کوچک مطلوب است.

برای مینیمم کردن تلفات در معادله ۴، داریم که:

$$z = \left(1 - \frac{P_D}{P_T}\right) \quad (10)$$

وقتی که تلفات کم باشد آنگاه Z عدد کوچکی است.

معادله ۶ در هنگام اجرای برنامه چک می شود. و در آخر هم شکل زیر رسم می شود:

$$\text{figure\_of\_merit} = x + y + z \quad (11)$$

هر چه مقدار `figure_of_merit` کوچک باشد ما به جواب نزدیکتر می شویم.

توضیح الگوریتم

در اینجا الگوریتم تصحیح شده را مورد بررسی قرار می دهیم:

(۱) ایجاد طرح اولیه

این اولین گام در تعیین اعضای محتملتر است. یک عضو نوعی در شکل ۴ نشان

داده شده است.

روش اینست که بهترین عضو در الگوریتم ژنتیک پیدا شود. در حل اولیه ما درمی یابیم که فرآیند تغییر پروسه تاثیری در همگرایی ندارد. به طور تناوبی ما بعضی از اعضای ضعیف را با اعضای مناسب جایگزین می کنیم. این در همگرایی بسیار موثر است. چیزی دیگری که به نظر می رسد اینست که مکمل فضا را جایگزین کنیم. در تولید نهائی هنگامی که پایداری مسئله مهمی نباشد، این مفهوم جایگذاری مستقیم به حل مسئله کمک شایانی می کند.

۲) کاربرد الگوریتم ژنتیک برای جستجوی نواحی که توسط اعضاء اولیه بیان می شوند

۱. در نواحی که توسط اعضاء قدیمی بیان می شود، توزیع تصادفی بوجود میاید.

۲. الگوریتم ژنتیک این اعضاء تنها را fit می نماید.

۳. تعداد run ها توسط آزمایشها قطعی می شود و خطاها و بهترین عضوهای نهائی انتخاب می شوند.

۴. اعضای بهتر جایگزین اعضاء قدیمی می شود. در شکل ۵ این تغییر نشان داده شده است.

۵. مراحل 1-4 تا زمانی که به مطلوب نرسیده ایم ادامه می یابد.

برای قدرت مصرفی 1800 MW که توسط سیستم ۵ ژنراتوری تامین می شود،  
الگوریتم را اجرا می کنیم. بعد از ۹ مرحله تولید به جواب زیر می رسیم:

$$X = \{201.17, 396.48, 305.07, 428.51, 469.14\} \text{ MW}$$

که در آن  $P(\text{crossover}) = 0.8$  ،  $P(\text{mutation}) = 0.04$  است.

شکلهای ۳ تا ۸ مراحل اجرا را نمایش می دهد. فقط ۵ مرحله نمایش داده می  
شود:

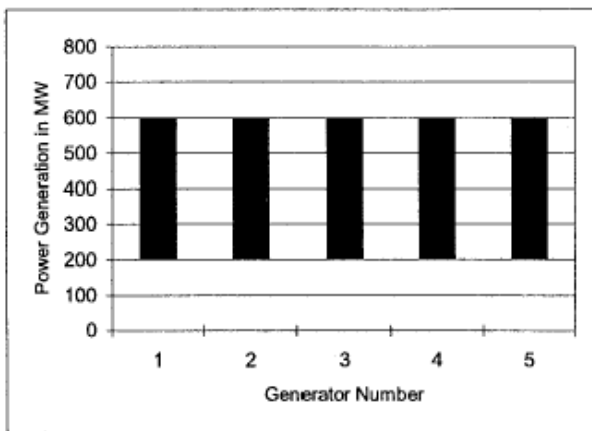


Fig. 3. Initial search region

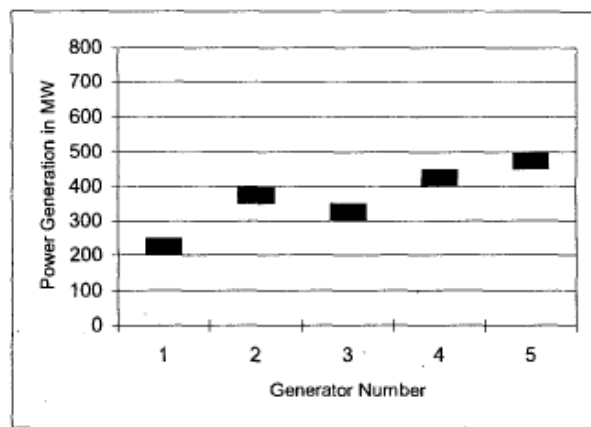


Fig. 6. Search region in the third generation

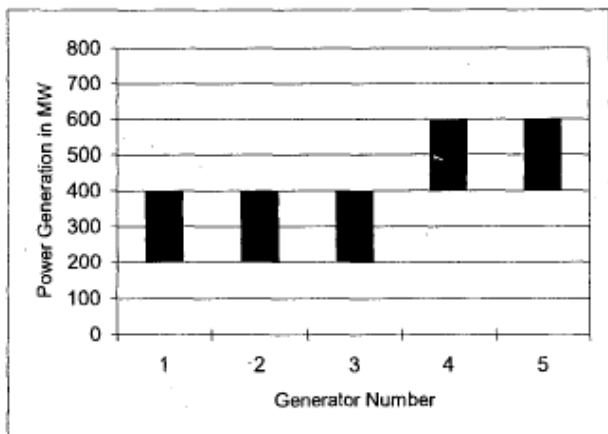


Fig. 4. Search region in the first generation

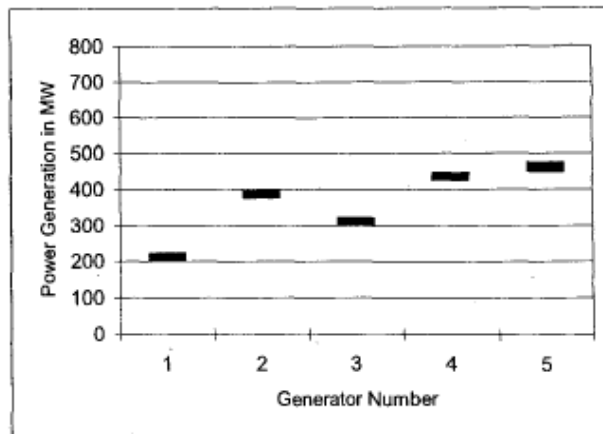


Fig. 7. Search region in the fourth generation

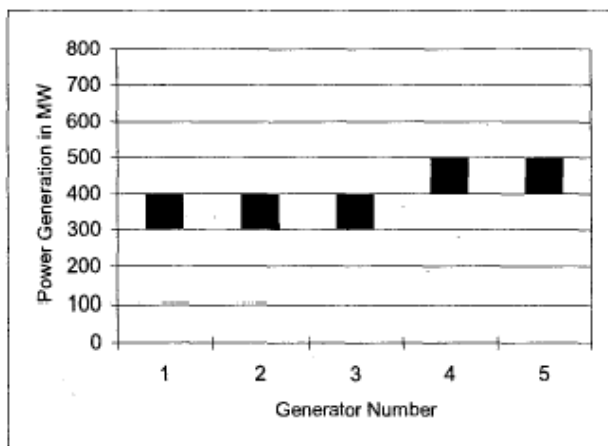


Fig. 5. Search region in the second generation

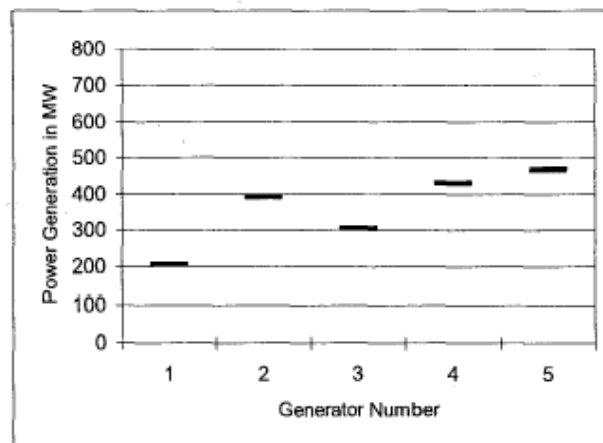


Fig. 8. Search region in the fifth generation

بحث در مورد نتایج

نتایج برای حل این مسئله با دو روش (۱) الگوریتم ژنتیک (۲) الگوریتم LJ [6,7]

در جدول ۱ و ۲ به ترتیب آورده شده است :



Solution Number	Power Generated in MW	Power Loss in MW	Power Demand in MW	Cost of Generation
1	1926.171875	126.013947	1800.157928	19351.04
2	1962.890625	162.835281	1800.055344	19669.83
3	1962.890625	163.097656	1799.792969	19669.73
4	1914.84375	114.787605	1800.056145	19278.34
5	1939.453125	139.138611	1800.314514	19486.79

**Table 1.** The result of one run of the GA for a power demand of 1800MW supplied by a 5-generator system is shown. Number of members of the population = 5, P (crossover) = 0.8 and P (mutation) = 0.04.

Solution Number	Incremental Cost	Power Generated in MW	Power Loss in MW	Power Demand in MW	Cost of Generation	Cost of Losses	Total Cost
1	8.05	1979.77	179.99	1799.95	20013.02	1449.83	21462.85
2	8.02	1925.87	126	1800.05	19586.7	1010.49	20597.25
3	8.03	1943.82	144	1800	19739.7	1156.82	20896.57
4	8.05	1961.82	162	1800	19875.1	1304.02	21179.11
5	8.05	1979.82	180	1800	20013.4	1449.87	21463.33

**Table 2.** The results of five runs of the LJ algorithm for meeting a power demand of 1800MW supplied by the same 5-generator system is shown. The LJ algorithm is used to solve the ELDP using incremental costs.

از جدول ۲ پیداست که هزینه تلفات خیلی زیاد نیست ( حدود 5% هزینه تولید است). در تمام موارد الگوریتم ژنتیک برتر از الگوریتم LJ می باشد. واضح است که نیازی به محاسبات نمو هزینه نیست.

حل مسئله بهینه سازی توزیع بار اقتصادی به روشی دیگر با شبکه های عصبی

## Hopfield

### چکیده

شبکه های عصبی Hopfield، برای اداره کردن قیودات نامعادله ای به وسیله معرفی کردن روش تابع جریمه<sup>۱</sup> بسط یافته اند. استفاده از تابع جریمه، برای تبدیل مسائل بهینه سازی مقید، به مسائل نامقید می باشد. شبکه عصبی Hopfield تنها می تواند برای بهینه سازی با قیودات معادله ای و نامعادله ای خطی، بکار رود. چون مسأله در بر گرفته شده در اینجا، قیودات معادله ای درجه دوم را شامل می شود، ما برای تبدیل آنها به قیودات خطی از بسط سری تیلور، استفاده می کنیم. در این مقاله، روش دیگری برای بسط شبکه های عصبی Hopfield برای حل قیودات نامعادله ای و تبدیل قیودات معادله ای درجه دوم به شکل خطی برای استفاده در مسأله پخش بار اقتصادی، ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> penalty function

## مقدمه

مسأله پخش بار اقتصادی درباره چگونگی پخش توان خروجی حقیقی در یک ناحیه برای تأمین یک بار موردنظر، در شرایطی که کل هزینه های عملیاتی کمینه شود، بحث می کند. این یکی از مهمترین مسائل اقتصادی در یک سیستم قدرت می باشد. شبکه عصبی Hopfield، ظرفیت مناسبی برای حل مسائل بهینه سازی دارد. به منظور حل مسائل برنامه ریزی 0-1 درجه دوم با قیودات نامعادله ای و معادله ای خطی، Gee و Prager [4] و همچنین S. Abe [2] روش هایی را برای بهبود روش شبکه عصبی Hopfield به وسیله معرفی کردن متغیرهای Slack برای اداره کردن قیودات نامعادله ای، معرفی کرده اند.

به منظور حل پخش بار اقتصادی با قیودات ظرفیت انتقال، توسط T.Yalcincoz et.al. [7]، روش خاصی برای بهبود بخشیدن به عملکرد شبکه های عصبی Hopfield برای حل مسائل بهینه سازی ترکیبی، ارائه شده است. این روش بر اساس شبکه عصبی Hopfield، Gee استوار است. قیودات به وسیله بکاربردن ترکیبی از مدل های Gee و Abe، برداشته می شوند. زمان محاسبه به گونه ای قابل ملاحظه، می تواند کاهش یابد. در این مقاله، مدل Hopfield به وسیله بکاربردن تابع جریمه، برای تبدیل مسائل مقید به مسائل نامقید، گسترش می یابد. تلفات توان اکتیو ناشی از انتقال، در سیستم قدرت بر حسب جملاتی درجه دوم از توان

حقیقی تولید شده، بیان می شوند. حل این مسأله با استفاده از شبکه عصبی Hopfield مشکل است؛ زیرا این روش فقط برای بهینه سازی با قیودات معادله ای و نامعادله ای خطی کاربرد دارد. در روش جدید، تلفات انتقال در انتهای تکرارها محاسبه شده و سپس فرض شده است که در تکرار بعدی ثابت هستند. روش دیگری برای برطرف کردن این سختیها به وسیله تبدیل قیودات غیرخطی به شکل خطی و استفاده مستقیم از آنها در قیودات معادله ای، پیشنهاد شده است.

بخش بار اقتصادی

مسأله ELD پیدا کردن حل بهینه برای توان تولید شده است؛ به نحوی که هزینه کل، کمینه شود، در حالیکه قیودات سیستم ارضاء شوند. بطور ریاضی، این مسأله را می توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\sum_i C_i = \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (1)$$

که:

$P_i$ : توان خروجی مولد  $i$  ام

$a_i, b_i, c_i$ : ضرائب هزینه  $i$  امین مولد

$C_i$ : هزینه تولید نیروگاه  $i$

که در معرض ارضاء کردن این قیودات، قرار می گیرد:

(الف) معادله توازن توان حقیقی

$$P_D + P_L = \sum_i P_i \quad (۲)$$

$$P_L = \sum_i \sum_j B_{ij} P_i P_j \quad \text{که:}$$

$P_D$ : کل بار

$P_L$ : تلفات انتقال

$B_{ij}$ : ضریب تلفات انتقال

(ب) محدودیت بیشینه و کمینه توان

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (۳)$$

که:

$P_{i \min}$ : حد کمینه تولید واحد  $i$

$P_{i \max}$ : حد بیشینه تولید واحد  $i$

شبکه عصبی Hopfield استاندارد

شبکه Hopfield، از یک مجموعه نورونها و یک مجموعه منطبق از تأخیرهای

واحد تشکیل شده است که یک سیستم چندین حلقه ای پس خوری را تشکیل

می دهند. تعداد حلقه های فیدبک برابر تعداد نورونهاست. شبکه Hopfield یک

شبکه به هم کوپل شده متقابل است و دارای ساختار غیر مرتبه ای می باشد. ورودی نورون  $i$  ام توسط دو منبع مختلف تأمین می شود؛ یعنی خروجی نورونهای دیگر و ورودی خارجی.

رابطه ورودی- خروجی عموماً به وسیله یک تابع حلقوی<sup>۲</sup>، بصورت زیر، توصیف می شود:

$$V_i = g_i(U_i) \quad (۴)$$

$V_i$  یک متغیر پیوسته در فاصله ۰ تا ۱ است، و  $g(U_i)$  یک تابع افزایشی یکنواخت<sup>۳</sup> است که  $V_i$  را در این فاصله مقید می کند.

$$g_i(U_i) = 0.5(1 + \tanh(U_i/u_0)) = 1/(1 + \exp(-2U_i/u_0)) \quad (۵)$$

که:

$U_i$ : کل ورودی نورون  $i$

$V_i$ : خروجی نورون  $i$

$u_0$ : ثابت شکل<sup>۴</sup> تابع حلقوی

معادله ویژگیهای دینامیکی سیستم را می توان با معادله زیر توصیف نمود:

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_j T_{ij} V_j + I_i \quad (۶)$$

<sup>2</sup> sigmoid function

<sup>3</sup> monotonically increasing function

<sup>4</sup> shape constant

که:

$I_i$ : جریان بایاس ورودی نورون  $i$  ام

$T_{ij}$ : استحکام پیوند داخلی از نورون  $j$  به  $i$

$T_{ii}$ : استحکام پیوند خودی نورون  $i$

تابع انرژی شبکه عصبی Hopfield بصورت زیر تعریف می شود:

$$E = -(1/2) \sum_i \sum_j T_{ij} V_i V_j - \sum_i I_i V_i \quad (7)$$

مشتق  $E$  نسبت به زمان برابر است با:  $\frac{dE}{dt} < 0$

تابع انرژی  $E$  شبکه عصبی Hopfield یک تابع یکنواخت کاهشی از زمان می باشد. این نشان می دهد که شبکه به سمتی حرکت می کند که تابع انرژی به مینیمم محلی اش همگرا شود.

برای حل مسأله پخش توان اقتصادی بوسیله شبکه عصبی Hopfield، اضافه

کردن یک قید معادله ای به تابع هدف، تابع انرژی را تشکیل می دهد:

$$E = \left(\frac{A}{2}\right) \left(P_D + P_L - \sum_i P_i\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right) \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (8)$$

که  $A$  و  $B$  فاکتورهای وزنی هستند.

مقدار توان خروجی  $P_i$  را به صورت زیر، می توان نشان داد:

$$P_i = g_i(U_i)$$

برای استفاده از قید نامعادله ای بوسیله استفاده از تابع حلقوی، بعنوان تابع ورودی - خروجی، داریم:

$$g_i(U_i) = (P_{i\max} - P_{i\min})(1 + \tanh(U_i/u_0))/2 + P_{i\min} \quad (9)$$

بوسیله مقایسه (۷) با (۸)، پارامترهای وزنی و ورودی خارجی نرون  $i$  شبکه، بصورت زیر داده می شوند:

$$\begin{aligned} T_{ii} &= -A - Bc_i \\ T_{ij} &= -A \end{aligned} \quad (10)$$

اگر فرض شود  $P_L$  ثابت باشد، داریم:

$$I_i = A(P_D + P_L) - Bb_i/2$$

بوسیله معادلات (۶) و (۱۰) داریم:

$$\begin{aligned} \Delta U_i &= \left\{ -A \left( \sum_j V_j - P_D - P_L \right) - B(a_i P_i + b_i/2) \right\} \Delta t \\ P_i &= g_i(U_i) \end{aligned}$$

بوسیله بروز رسانی<sup>۵</sup> خروجی هر نرون، حل بتدریج به یک نقطه کمینه محلی موجود، همگرا می شود.

روش پیشنهادی دیگر

به منظور تبدیل مسائل بهینه سازی مقید به مسائل نامقید، ما از روش تابع جریمه

استفاده می کنیم.

<sup>5</sup> updating



مینیمم کردن تابع هدف:  $C = f_i(x)$

در معرض:

قیودات معادله ای:

$$g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

قیودات نامعادله ای:

$$h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ما می توانیم تابع انرژی را بصورت زیر فرمول بندی کنیم:

$$E = A \sum_{i=1}^m [(g_i(x))]^2 + B f_i(x) + C \sum_{i=1}^n [(h_i(x))]^2 u_i(h_i)$$

که:

$$u_i(h_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } h_i(x) \leq 0 \\ 1 & \text{if } h_i(x) > 0 \end{cases}$$

یک شبکه عصبی Hopfield را تنها می توان برای یک قید معادله ای خطی بکار

برد. چون مسأله اینجا، قید معادله ای درجه دوم دارد، ما باید آن را به شکل خطی

تبدیل کنیم. با استفاده از بسط تیلور، می توان تابع درجه دوم را با یک تابع

خطی، تقریب زد.

فرمول تلفات عمومی که فرمول تلفات کرون<sup>۶</sup> نامیده می شود؛ بصورت زیر داده می شود:

$$P_L = K_{L0} + \sum_{i=1}^m B_{i0} P_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m B_{ij} P_i P_j$$

ما می توانیم  $P_L$  را با استفاده از سری تیلور به شکل خطی در بیاوریم؛ یعنی:

$$f(z) = f(a) + f'(a)(z-a)$$

$$P_L = K_{L0}^* + \sum_i B_{i0}^* P_i$$

قید معادله ای تبدیل می شود به:

$$\sum_i (1 - B_{i0}^*) P_i = P_D + K_{L0}^*$$

پس تابع انرژی را می توان بصورت زیر، تغییر داد:

$$E = (A/2) \left[ (P_D + K_{L0}^*)^2 - 2(P_D + K_{L0}^*) \left( \sum_i (1 - B_{i0}^*) P_i \right) + \left( \sum_i \sum_j (1 - B_{i0}^*) (1 - B_{j0}^*) P_i P_j \right) \right] + (B/2) \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$$

بوسیله در نظر گرفتن تابع انرژی شکل گرفته شده در بالا، پارامترهای وزنی و ورودیهای خارجی می شوند:

$$T_{ii} = -A(1 - B_{i0}^*)(1 - B_{i0}^*) - Bc_i$$

$$T_{ij} = -A(1 - B_{i0}^*)(1 - B_{j0}^*)$$

$$I_i = A(P_D + K_{L0}^*) - Bb_i / 2$$

بنابراین، فرآیند محاسبه را می توان مانند شبکه عصبی Hopfield استاندارد،

انجام داد.

<sup>6</sup> Kron

## نتایج شبیه سازی

در این قسمت، ما سیستم قدرت را با سه واحد تولیدی که در [1] داده شده

است، در نظر می گیریم:

$$C_1 = 213.1 + 1166.9P_1 + 53.3P_1^2$$

$$C_2 = 200.0 + 1033.3P_2 + 88.9P_2^2$$

$$C_3 = 240.0 + 1083.3P_3 + 53.3P_3^2$$

قیود هر واحد، در سیستم در واحدی با مبنای 100MW بصورت زیر هستند:

$$0.5 \leq P_1 \leq 2.0$$

$$0.375 \leq P_2 \leq 1.5$$

$$0.45 \leq P_3 \leq 1.8$$

قدرت مورد تقاضا در مبنای 100MW برابر با 2.5pu می باشد. تلفات انتقال

برابر هستند با:

$$P_L = [P_1 \quad P_2 \quad P_3] \begin{bmatrix} 0.06760 & 0.00953 & -0.00507 \\ 0.00953 & 0.05210 & 0.00901 \\ -0.00507 & 0.00901 & 0.02940 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} +$$

$$[-0.07660 \quad -0.00342 \quad 0.01890] \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

پارامترهای Hopfield بصورت زیر، تنظیم شده اند:

$$A = 10^5 \quad ; \quad B = 1.0 \quad ; \quad C = 1.0$$

نتایج بدست آمده از شبیه سازی در حالت بهینه، در جدول ۱، نشان داده شده و با نتایج حل معمولی مقایسه شده اند. اندکی اختلاف در خروجی مولدها وجود دارد.

جدول ۱: شرایط بهینه برای هر واحد به وسیله ضرایب لاگرانژ و روش پیشنهادی دیگر

Gen (p.u.)	Demand (p.u.)	Lagrange Multiplier Method	Proposed alternative Method
P <sub>1</sub>	2.1	0.736600	0.733534
P <sub>2</sub>		0.699851	0.696017
P <sub>3</sub>		0.751803	0.751812
P <sub>1</sub>	2.5	0.885947	0.880899
P <sub>2</sub>		0.800264	0.797229
P <sub>3</sub>		0.931678	0.932723
P <sub>1</sub>	3.2	1.15045	1.143310
P <sub>2</sub>		0.97883	0.976914
P <sub>3</sub>		1.25830	1.259600

نتیجه گیری

ما روشی را برای تبدیل قید معادله ای درجه دوم به شکل خطی، در نظر گرفتیم. از این روش پیشنهادی برای حل مسأله پخش بار اقتصادی با استفاده از شبکه عصبی Hopfield استفاده شد، که برای قیودات معادله ای و نامعادله ای فرمول بندی شده است. در این روش قیودات نامعادله ای بدون وارد سازی متغیر Slack،

اداره می شوند. نتایج با آنهاییکه از الگوریتم عددی متداول، بر مبنای ضرایب لاگرانژ، بدست می آیند، مقایسه شدند.

مراجع

- [1] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, Second edition, John Wiley & Sons New York, 1996.
- [2] David A. Wismer, R. Chattergy, *Introduction to Nonlinear Optimization*, North-Holland Publishing Company, 1978.
- [3] Abe, Shigeo et.al., *Solving Inequality Constrained Combinatorial Optimization Problems by the Hopfield Neural Networks*, Neural Networks, Vol.5, pp. 663-670, 1992.
- [4] Park, J.H., et.al., *Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield neural Network*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993.
- [5] Gee, A.H., and Prager, R.W., *Polyhedral combinatorics and Neural Networks*, Neural comput., 1994, 6, pp. 161-180
- [6] Ching-Tzong Su, Gwo-Jen Chiou, *A Fast-Computation Hopfield Method to Economic Dispatch of Power System*, IEEE transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997.
- [7] Yalcinoz, T., Short, M.J., *Hopfield Neural Network*, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. vol. 144, No. 2, March 1997.
- [8] Yalcinoz, T., Short, M.J., *Neural Network Approach for Solving Economic Dispatch Problem with Transmission Capacity Constraints*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [9] El-Hawary, M.E., *Applications of artificial neural networks in electric power systems operational planning*, Engineering Intelligent Systems, Vol. 7, no.1, March 1999.

کاربردی از محاسبات تکاملی در توزیع بار اقتصادی با توابع هزینه درجه دوم

چکیده

این مقاله، محاسبات تکاملی برای حل مسأله پخش بار اقتصادی<sup>۷</sup> (ELD) را با توابع هزینه درجه دوم تکی<sup>۸</sup> و توابع هزینه درجه دوم تکه ای<sup>۹</sup>، ارائه می دهد.

الگوریتم ژنتیک<sup>۱۰</sup> (GAs)، برنامه ریزی تکاملی<sup>۱۱</sup> (EP) و استراتژی تکامل

تدریجی<sup>۱۲</sup> (ESs) در مسائل ELD به کار برده می شوند. برای بهبود بخشیدن این

روشها در مسائل بهینه سازی غیر خطی، دو روش بهینه سازی ترکیبی با بهره

برداری کردن از مزایای هر روش محاسبات تکاملی گسترش داده می شوند.

روشهای بهینه سازی با ترکیبی از GA با ES، و EP با ES در مسأله ELD با

توابع هزینه درجه دوم تکه ای، مورد آزمایش قرار می گیرند. مطالعات موردی<sup>۱۳</sup>

برتری روش های پیشنهادی را بر روشهای محاسباتی موجود نشان می دهند.

کلید واژه: محاسبات تکاملی، پخش بار اقتصادی، توابع هزینه درجه دوم تکه ای

<sup>7</sup> Economic Load Dispatch

<sup>8</sup> single quadratic cost functions

<sup>9</sup> piecewise quadratic cost functions

<sup>10</sup> Genetic algorithms

<sup>11</sup> Evolutionary programming

<sup>12</sup> Evolution strategies

<sup>13</sup> case studies

## مقدمه

هدف پخش بار اقتصادی (ELD) کمینه کردن هزینه سوخت با تضمین قابلیت اعتماد بالا می باشد. در مسائل ELD، تابع هزینه برای هر مولد، با یک تابع درجه دوم منفرد تقریب زده می شود. اما، خیلی واقع گرایانه است که تابع هزینه تولید برای نیروگاههای سوخت فسیلی با یک تابع درجه دوم تکه ای قطعه قطعه شده ارائه شود، که در این حالت نقطه کار شیر ثابت است. با افزایش هزینه سوخت های فسیلی، داشتن مدلی مناسب برای هزینه هر مولد، اهمیت زیادی پیدا می کند. بنابراین یک فرمول بندی خیلی دقیق برای مسأله ELD به وسیله بیان تابع هزینه تولید به عنوان تابع هزینه درجه دوم تکه ای بدست می آید. اما، روشهای حل مسأله ELD با تابع هزینه درجه دوم تکه ای نیاز به الگوریتم های بسیار پیچیده ای دارد از قبیل روند ساختار مرتبه ای<sup>۱۴</sup>. اخیراً، محاسبات تکاملی (ECs)، که روش های جستجوی تصادفی بهینه با بکار بردن تئوری تکامل تدریجی و ژنتیک هستند، کاربرد گسترده ای در آموزش شبکه های عصبی، عمل تیون کردن توابع fuzzy membership، یادگیری ماشین، شناسایی سیستم، کنترل، مسائل بهینه سازی و غیره یافته اند [1-7]. از آنجاییکه فرآیند جستجوی ECs موازی است، از احتمال بیشتری برای پیدا کردن حل های بهینه،

<sup>14</sup> hierarchical structure approach

برخوردار است. ECs همچنین از اطلاعات تابع هدف استفاده نموده و از مشتقات و یا دیگر اطلاعات کمکی استفاده نمی کند [3,4].

مسأله ELD، یکی از مهمترین مسائل بهینه سازی در یک سیستم قدرت است. بیان تابع هزینه تولید به عنوان یک تابع درجه دوم تکه ای، امری کاملاً واقع بینانه است. از این رو بکار بردن ECs در مسائل پخش بار اقتصادی با توابع هزینه درجه دوم تکه ای، می تواند حل بهتری را در مقایسه با روش های معمولی ارائه دهد.

در این مقاله، سه گونه اصلی EC، که شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، استراتژی تکامل تدریجی (ESc)، و برنامه ریزی تکاملی (EP)، به ترتیب در حل مسائل ELD بکار برده می شوند که در این مسأله مینیمم محلی وجود ندارد. ویژگیهای جستجوی هر روش مقایسه و تحلیل می شود. سپس، دو روش بهینه سازی ترکیبی که از مزایای هر سه روش اصلی بهره برداری می کند، گسترش داده می شوند. بطور خاص، GA با ES و EP با ES ترکیب می شوند. این روشهای جدید برای حل یک مسأله ELD بکار برده می شوند که تابع هزینه درجه دوم تکه ای با مینیمم محلی دارد [8,9] و با یک روند مرتبه ای مقایسه شده اند [8]. روش های پیشنهادی ترکیبی برای تحقق خیلی ساده تر می باشند و نتایج بهتر با هزینه کمتر را نشان می دهند.



## محاسبات تکاملی

### الگوریتم های ژنتیک

GA، یک الگوریتم بهینه سازی بر مبنای قوانین ژنتیک و انتخاب عادی می باشد که در اوایل ۱۹۷۰ به وسیله John Holland معرفی شد. این روش بهترین جواب مناسب را به وسیله جستجوی فضای حل با یک روش احتمالی و یک مبادله مرتبه ای اطلاعات بین هر دو جزء، پیدا می کند.

GA از پارامترهای واقعی استفاده نمی کند بلکه از کروموزومهای تشکیل شده از رشته های کد شده genotypes استفاده می کند. GA تقاطع<sup>۱۵</sup> و جهش<sup>۱۶</sup> سیستم های طبیعی را شبیه سازی نموده که به آن توانایی جستجوی کلی را می دهد.

### استراتژیهای تکامل تدریجی

ESS تکامل تدریجی یک ارگانیسم فاقد خاصیت جنسی دوباره تولید شونده را شبیه سازی میکند. در حالیکه GA، حل ترکیبی را به وسیله روش متقاطع انجام می دهد، ES فقط از روند جهش و انتخاب استفاده می کند. همچنین، Esc از پارامترهای حقیقی استفاده می کند، بر خلاف GA که از کروموزومها استفاده می کند.

<sup>15</sup> crossover

<sup>16</sup> mutation

$(\mu + \lambda) - ES$ ، به وسیله Schwefel پیشنهاد گردید، که  $\mu$  های والد برای ایجاد

فرزندان  $\lambda$  استفاده می شود و همه حل ها برای بقاء رقابت می کنند، با بهترین  $\mu$

فرزندان انتخاب شده که به عنوان والد برای تولید بعدی هستند.

روند  $(\mu + \lambda) - ES$  به گونه زیر قابل اجرا است:

(الف) مقدار دهی اولیه: یک جمعیت بردارهای اولیه والد،  $X_i$ ،  $i=1, \dots, \mu$  بطور

تصادفی از یک محدوده عملی انتخاب می شود.

(ب) جهش: یک بردار فرزند  $X'_j$ ،  $j=1, \dots, \lambda$  از هر والد  $X_i$  به وسیله جمع کردن

یک متغیر تصادفی گاوسی ایجاد می شود (میانگین صفر و انحراف استاندارد از

قبل تعیین شده) برای هر جزء  $X_i$ .

(ج) تکامل: تکامل دادن شایستگی های  $X_i$  و  $X'_j$ .

(د) انتخاب: والدین جدید،  $X_i$ ، ناشی از تولید بعدی از  $X_i$  و  $X'_j$  بر اساس مقدار

مناسبشان انتخاب می شوند.

(ه) تکرار پله های (ب) تا (د)، تا زمانی که حل بدست آمده شرایط همگرایی را

برآورده سازد.

برنامه ریزی تکاملی

در EP، والدین  $\mu$  برای تولید اولاد  $\mu$  بکار برده می شوند و همه حل ها برای بقاء

رقابت می کنند، که مشابه با  $(\mu + \mu) - ES$  بوده و بهترین رشته به عنوان والد برای

تولید بعدی انتخاب می شود. اما آن بر حل های گوناگون به وسیله بکار گرفتن مسابقات احتمالی تأکید می کند. در یک مسابقه احتمالی افراد بصورت مستقیم با یکدیگر برای تولید بعدی رقابت می کنند. همچنین، یک جزء با سطح شایستگی کم، احتمال زیادی برای انتخاب شدن پیدا می کند، هنگامیکه سطح شایستگی طرف مقابلش پایین تر باشد. روند EP بصورت زیر پیاده سازی می شود:

(الف) مقدار دهی اولیه: یک بردار اولیه از جمعیت والدین،  $X_i, i=1, \dots, \mu$  بطور تصادفی از یک محدوده عملی انتخاب می شود.

(ب) جهش: یک بردار فرزند،  $X'_j, j=1, \dots, \lambda$  از هر والد به وسیله جمع کردن یک متغیر تصادفی گاوسی برای هر جزء  $X_i$  ایجاد می شود.

(ج) تکامل: تکامل دادن شایستگی های  $X'_j$  و  $X_i$ .

(د) رقابت: رقابت  $q$  عدد بطور تصادفی در  $X'_j$  و  $X_i$  شایستگی های هر جزء و مخالفش مقایسه شده و سپس وزن  $w_j, j=1, \dots, 2\mu$  به وسیله (۱) محاسبه می شود:

$$w_j = \sum_{i=1}^q w_i \quad \forall j=1, \dots, 2\mu \quad (1)$$

$$w_i = \begin{cases} fitness_i - fitness_t & \text{if } fitness_i \geq fitness_t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{که:}$$

شایستگی جزء  $i$  ام،  $fitness_i$ ، با شایستگی رقیب،  $fitness_i$ ، مقایسه شده و اگر شایستگی جزء  $i$  ام بزرگتر از رقیب باشد، وزن، تفاوت بین آن دو خواهد بود. در غیر این صورت وزن صفر است.

(ه) انتخاب: والدین جدید تولید بعدی بر طبق وزنشان انتخاب می شوند.

(و) تکرار مراحل (ب) تا (ه)، تا زمانی که حل بدست آمده شرایط همگرایی را ارضاء کند.

محاسبات تکاملی پیشنهاد شده  $EP+ES$  و  $GA+ES$

$GA$  و  $EP$  نزدیکترین حل بهینه را به سرعت پیدا می کنند، اما به کندی همگرا می شوند. از طرف دیگر،  $ES$  به حل نزدیک بهینه خیلی کند می رسد، اما به حل بهینه همگرا می شود، با تولیدهای کم در غیاب مینیمم محلی. در حالیکه،  $GA$  و  $EP$  برای پیدا کردن حل های بهینه کلی مناسب هستند،  $ES$  برای یافتن حل بهینه محلی بسیار مناسب است.

در این مقاله، برای شرح مزایای هر روش، ما  $GA$  را با  $ES$  ( $GA+ES$ ) و  $EP$  را با  $ES$  ( $EP+ES$ ) ترکیب می کنیم. روش  $GA+ES$  شامل جستجوی  $GA$  برای حل ها برای یک تکرار اولیه مناسب است، سپس  $ES$  با جستجوی حل ها با بکار بردن رشته هایی با بهترین شایستگی می پردازد. روش  $EP+ES$  به وسیله مقدار اولیه  $EP$  به جستجوی حل می پردازد، و بعد از یک سلسله تولیدهای مناسب،  $ES$  را

به جمعیت کروموزومهای با بهترین شایستگی اعمال می کند. این روشها از بهترین توانایی های جامع GA و EP استفاده می کند. GA و EP یک حل بهینه نزدیک را بدون همگرایی به مینیمم محلی پیدا می کند. بعد از آن، ما از ES برای تقویت کردن ظرفیت جستجوی محلی استفاده می کنیم. روش پیشنهادی استفاده از GA+ES و EP+ES به صورت زیر می باشد:

(الف) مقدار دهی اولیه: یک جمعیت اولیه از بردارهای والد،  $X_i$ ،  $\mu$ ،  $i=1, \dots, \mu$  بطور تصادفی از یک محدوده عملی انتخاب می شود.

(ب) اجرا کردن GA در روش GA+ES و EP در روش EP+ES. اگر هر تکرار به عدد از پیش از تعیین شده برسد یا شایستگی بهترین مقدار از مقدار از قبل تعیین شده بیشتر شود، رشته با بهترین شایستگی به عنوان حل انتخاب می شود.

(ج) اجرا کردن  $(1+\lambda)$ -ES.  $(1+\lambda)$ -ES مشابه  $(\mu+\lambda)$ -ES و  $(\mu+\mu)$ -ES است. در  $(1+\lambda)$ -ES، ۱ والد برای خلق  $\lambda$  اولاد استفاده شده و همه حل ها برای بقاء رقابت می کنند. که بهترین به عنوان والد برای تولید بعدی انتخاب می شود.

(د) تکرار مرحله (ج) تا زمانی که حل بدست آمده، شرایط همگرایی را ارضاء کند.

## مسائل پخش بار اقتصادی

### ELD با تابع هزینه درجه دوم

هدف مسائل ELD پیدا کردن ترکیب بهینه مولدها برای کمینه کردن هزینه تولید و برطرف کردن کل تقاضا است [9,10].

### ELD با تابع هزینه درجه دوم تکه ای

در واقع، به خاطر باز و بسته شدن دریاچه و تغییر سوخت، تابع هزینه غیر پیوسته است؛ بنابراین یک تابع غیر محدب<sup>۱۷</sup> می باشد. هنگامیکه به وسیله یک تابع درجه دوم تقریب زده شود، خطای زیادی را در بر دارد. از این رو، تخمین زدن تابع هزینه با یک تابع درجه دوم تکه ای، بسیار مناسب است. هنگامیکه از توابع درجه دوم تکی استفاده شود، کل هزینه بصورت زیر تعریف می شود:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) \quad (2)$$

$$C_i(P_i) = \begin{cases} a_1 + b_1 P_i + c_1 P_i^2 & \text{if } P_i^{MIN} \leq P_i < P_1 \\ a_2 + b_2 P_i + c_2 P_i^2 & \text{if } P_1 \leq P_i < P_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{im} + b_{im} P_i + c_{im} P_i^2 & \text{if } P_{im-1} \leq P_i < P_i^{MAX} \end{cases}$$

که:

C: کل هزینه

<sup>17</sup> nonconvex

$C_i(P_i)$ : هزینه مولد  $i$  ام

$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$ : ضریب هزینه مولد  $i$  ام برای سطح توان  $j$  ام

$P_i$ : توان تولید شده مولد  $i$  ام [MW]

$N$ : تعداد مولدها

مسائل ELD با بکاربردن محاسبات تکاملی

ELD با بکاربردن الگوریتم ژنتیک

مسائل ELD با بکاربردن GAS، کدینگ<sup>۱۸</sup>، و روند مقدار دهی اولیه در شکل ۱، نشان داده شده است.

	unit 1	...	unit i	...	unit N
string 1	10...10	...	11...11	...	10...10
...	...	...	...	...	...
string S-1	11...10	...	10...01	...	01...01
string S	10...10	...	11...11	...	11...11

$l$  bits

$$P_i = 1 \times 2^{l-1} + 1 \times 2^{l-2} + \dots + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

$S$ : اندازه جمعیت،  $N$ : شماره واحد

شکل ۱: کدینگ و مقداردهی اولیه GA

توان خروجی هر مولد نرمالیزه شده و با  $l$  بیت، کدگذاری شده تا تشکیل یک رشته امکان پذیر شود.  $S$  رشته بطور تصادفی برای شکل دادن جمعیت اولیه، تولید شده اند. قیود نامعادله ای در خروجیهای تولید شده، بطور اتوماتیک در

<sup>18</sup> coding

فرآیند نرمالیزه کردن و کد گذاری کروموزومهای اولیه، ارضاء می شوند. نرمالیزه کردن به وسیله (۳) بدست می آید [1]:

$$\bar{P}_i = \left( \frac{P_i - P_i^{MIN}}{P_i^{MAX} - P_i^{MIN}} \right) \cdot (2^l - 1) \quad (3)$$

که:  $\bar{P}_i$ : خروجی نرمالیزه شدن مولد  $i$ ام

$l$ : طول رشته

GA ممکن است زود همگرا شود اگر تفاوت سطح شایستگی هر جزء در جمعیت،

در فرآیند اولیه خیلی بزرگ باشد. برای جستجوی کامل، یک تابع شایستگی<sup>۱۹</sup>

[2] با استفاده از درصدی از متغیرهای ورودی شامل قیودات معادله ای استفاده

می شود.

$$Fitness = A[(1 - \%COST)] + B[(1 - \%ERROR)] \quad (4)$$

که  $A, B (> 0)$ ، ضرایب وزنی هستند.

$$Error = \left| \sum_{i=1}^N P_i - P_L - P_{TL} \right|$$

$$\%COST = \frac{String\ cost - Min\ cost}{Max\ cost - Min\ cost}$$

$$\%ERROR = \frac{String\ error - Min\ error}{Max\ error - Min\ error}$$

**Stringcost**: مقدار شایستگی رشته

**Mincost**: مقدار کمینه تابع هدف در جمعیت

<sup>19</sup> fitness function



*Maxcost*: مقدار بیشینه تابع هدف در جمعیت

*Stringerror*: خطای رشته در محدوده قید معادله ای

*Minerror*: خطای کمینه قید در جمعیت

*Maxerror*: بیشینه خطای قید در جمعیت

در (۴)، هر جزء با کمترین هزینه کل و خطا، بیشترین شایستگی را دارد. در این مقاله، برای بهبود دادن الگوریتم ژنتیک ساده<sup>۲۰</sup> (SGA) ما ۴ روش زیر را معرفی می کنیم:

(۱) GA1: یک رشته که دارای بهترین شایستگی است، برای تولید بعدی

دوباره تولید می شود. جهش به یک بیت کروموزومی که بطور تصادفی

انتخاب شده است، مطابق با احتمال جهش، اعمال می شود.

(۲) GA2: روند مشابه GA1 است، بجز اینکه بعد از تعداد معینی تولید،

تقاطع و جهش برای تغییر خروجی هر مولد اعمال می شود؛ که این

عمل باعث تغییر در یک محدوده کوچک می شود.

(۳) GA3: روند مشابه GA1 است، بجز اینکه جهش به همه بیت ها

مطابق احتمال جهش، اعمال می شود.

<sup>20</sup> simple genetic algorithm

(۴) GA4 : این روندی مشابه GA3 است، اما بعد از تعداد معینی تولید،

تقاطع و جهش برای تغییر خروجی هر مولد اعمال می شود؛ که باعث

تغییر در یک محدوده کوچک می شود.

ELD با بکاربردن استراتژی تکامل تدریجی

ES از مقادیر واقعی خروجی مولدها به جای مقادیر کد شده استفاده می کند.

از این رو، حافظه مورد نیاز و زمان اجراء برای پیدا کردن حل بهینه، کاهش می

یابد. شایستگی به روشی مشابه با GAS برای ساده سازی مقایسه، محاسبه

می شود. ما از  $(1+\lambda)-ES$  برای استراتژی انتخاب استفاده می کنیم که یک

روش متداول می باشد. مشابه تکامل تدریجی در طبیعت، Esc تنها تفاوت

های کوچکی مابین تولیدات متوالی ایجاد می کند. به این دلیل، یک انحراف

استاندارد کوچک باید انتخاب شود. ولی، اگر دو انحراف استاندارد کوچک

انتخاب شود، حل به مینیمم محلی، همگرا می شود.

ELD با بکاربردن برنامه ریزی تکاملی

در EP، شایستگی به وسیله (۴) محاسبه می شود که با GA و ES یکسان بوده و

روندهای جهش با  $(\mu + \mu)-ES$  یکسان هستند. در روند رقابت، ۱۰ رقیب انتخاب

شده و اوزان مطابق شکل (۱) برای تضمین یک اختلاف حل ها در جمعیت، انتخاب

می شوند.

## مطالعه موردی

مسائل با یک تابع هزینه درجه دوم منفرد  
پیش از بکاربردن ECs در مسأله ELD با یک تابع هزینه درجه دوم تکه ای، اینها به مسأله ساده ELD برای اثبات فواید و ویژگیهایشان، اعمال می شوند. مسأله ELD انتخاب شده در [10]، سه حالت دارد. نتایج شبیه سازی به وسیله ECs با نتایج بدست آمده به وسیله محاسبات عددی در [10]، مقایسه شده اند. بار کل  $P_L$ ، 850[MW] است و تابع هزینه هر سه مولد در [10] بیان شده است.  
(۱) مورد ۱: ضرائب هزینه، مقادیر کمینه و بیشینه هر مولد در جدول ۱، آورده شده اند.

(۲) مورد ۲: همه شرایط مشابه مورد ۱ هستند، اما بواسطه هزینه کمتر سوخت برای مولد ۱، تابع هزینه اش به صورت زیر تغییر داده می شود:

$$a_1=459, \quad b_1=6.48, \quad c_1=0.00128$$

(۳) مورد ۳: همه ضرائب با مورد ۱، یکسان هستند، اما اکنون تلفات انتقال در

نظر گرفته می شوند. تلفات انتقال به صورت زیر بیان می شود:

$$P_{TL}=0.00003P_1^2+0.00009P_2^2+0.00012P_3^2$$

variable generator	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$P_i^{\max}$ [MW]	$P_i^{\min}$ [MW]
Unit 1	561	7.92	0.001562	600	150
Unit 2	310	7.85	0.00194	400	100
Unit 3	78	7.97	0.00482	200	50

جدول ۱: ضرائب هزینه، بیشینه و کمینه توان

پارامترهای بکار رفته برای شبیه سازی در GA در جدول ۲، داده شده اند.

مقادیر نرمالیزه شده خروجی هر مولد، با ۱۴ بیت کد شده اند، بنابراین هر رشته

۴۲ بیت دارد. در موارد GA2 و GA4، بعد از ۴۰۰ بار تولید، تقاطع و جهش فقط

بر روی ۶ بیت پایین تر هر متغیر اعمال می شوند.

ما GA اصلاح شده را به مورد ۱ اعمال نموده و کل خروجی تولید شده و هزینه

کل محاسبه می شوند. جدول ۳، نتایج SGA و جدول ۴، نتایج روش GA اصلاح

شده بعلاوه روش های متداول را نشان می دهد.

جدول ۲: پارامترهای شبیه سازی در GAS

A	1
B	1.5
string length	42
population	150
mutation probability	0.01 (for GA3 and GA4) 0.95 (for GA1 and GA2)
crossover probability	0.95
generation	500

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

جدول ۳: نتایج شبیه سازی برای SGA و GAS اصلاح شده

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

case	method	P1 [MW]	P2 [MW]	P3 [MW]	total power [MW] (loss)	total cost [\$/h]
case 1	numerical method	393.20	334.60	122.20	850.00	8194.36
	SGA	397.07	360.92	91.89	849.88	8199.07
	GA1	392.13	331.37	126.50	850.00	8194.47
	GA2	393.25	333.93	122.82	850.00	8194.36
	GA3	397.04	330.25	122.71	850.00	8194.42
	GA4	391.88	337.04	121.08	850.00	8194.38
case 2	numerical method	600.00	187.10	62.20	850.00	7252.83
	SGA	529.63	202.80	117.52	849.95	7312.98
	GA1	600.00	190.75	59.25	850.00	7252.92
	GA2	599.97	187.40	62.63	850.00	7252.85
	GA3	599.89	184.67	65.44	850.00	7252.94
	GA4	600.00	189.18	60.82	850.00	7252.86
case 3	numerical method	435.10	300.0	130.70	865.80 (15.80)	8344.31
	SGA	406.60	325.73	134.33	866.15 (16.67)	8347.86
	GA1	430.91	306.68	128.42	866.01 (16.01)	8344.74
	GA2	435.33	300.05	130.44	865.82 (15.82)	8344.50
	GA3	440.61	291.52	133.48	865.61 (15.61)	8344.89
	GA4	435.06	295.09	135.57	865.72 (15.72)	8344.79

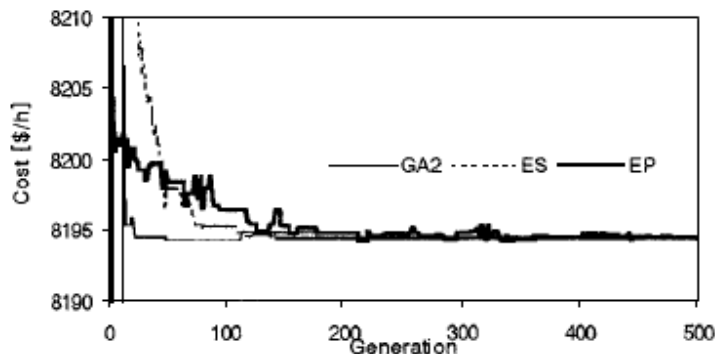
جدول ۴: پارامترهای شبیه سازی در ES و EP

coefficients \ methods	ES	EP
A	1	1
B	1.5	1.5
$\mu$	1	150
$\lambda$	150	150
standard deviation	2	2
generation	500	500

روش های این مقاله، نتایج بهتری را با هزینه کمتر نشان می دهند. در حالیکه SGA اندکی از حل بهینه دور است، GA اصلاح شده به نزدیکترین حل بهینه، همگرا شده است. بطور ویژه، GA2 نزدیک حل بهینه را پیدا کرده است. جدول ۴، پارامترهای شبیه سازی را در ES و EP نشان میدهد. نتایج با استفاده از ES و EP در جدول ۵، نشان داده شده اند. شکل ۲، ویژگیهای همگرایی را برای روشهای GA2، ES و EP در مورد ۱، نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲، نشان داده شده است؛ GA و EP نزدیکترین حل بهینه را به سرعت پیدا می کنند، اما نسبتاً کند، همگرا می شوند. به عبارت دیگر، ES به نزدیک حل بهینه، خیلی کند می رسد، اما به حل بهینه با تولیدهای کمی در غیاب مینیمم محلی، همگرا می شود. از این رو، در حالیکه GA و EP برای پیدا کردن حل های کلی بهینه مناسبند، ESS برای پیدا کردن حل های بهینه محلی، بسیار مناسب است.

جدول ۵: نتایج شبیه سازی برای ES و EP

case	method	P1 [MW]	P2 [MW]	P3 [MW]	total power [MW] (loss)	total cost [\$ /h]
case 1	ES	392.23	335.61	122.16	850.00	8194.36
	EP	391.87	338.13	120.00	850.00	8194.41
case 2	ES	599.99	187.12	62.89	850.00	7252.84
	EP	599.97	181.54	68.48	849.99	7252.97
case 3	ES	435.53	298.82	131.45	865.80 (15.80)	8344.60
	EP	435.18	300.50	130.15	865.83 (15.88)	8344.49



شکل ۲: ویژگیهای همگرایی برای GA2، ES و EP در مورد ۱

مسائل با مینیمم محلی

در یک مطالعه موردی، برای مقایسه بین روشهای پیشنهادی با روش های متداول، ما از اطلاعات داده شده در [8]، برای شبیه سازی استفاده می کنیم. ۱۰ مولد وجود دارد و ضرائب تابع هزینه برای هر مولد هنگامیکه سوخت تغییر می کند، عوض می شود. ما ۴ شبیه سازی را انجام داده ایم که کل بار  $P_L$  بین  $2400[MW]$  و  $2700[MW]$  تغییر می کند. از تلفات انتقال چشم پوشی شده

است. جدول ۶، پارامترهای شبیه سازی در ECs را نشان می دهد.

جدول ۶: پارامترهای شبیه سازی در ECs



methods parameters	GA2	ES	EP	GA+ES	EP+ES
A	1	1	1	1	1
B	1	1.5	1.5	1.5	1.5
length of string	140	10	10	40(GA) 10(ES)	10
population	100	100	100	100	100
mutation probability	0.95	×	×	0.01 (GA)	×
crossover probability	0.95	×	×	0.95 (GA)	×
standard deviation	×	2	2	1(ES)	4(EP) 1(ES)
generation	600	600	600	200(GA) 200(ES)	200(EP) 200(ES)

زمانی طولانی برای اجرای GA2 لازم است؛ زیرا کروموزومهای GA طولانی هستند. در مورد GA+ES، برای کاهش زمان اجرا، ما هر رشته را به یک عدد دهمی کد می کنیم. بعد از ۲۰۰ تولید بوسیله GA، ۲۰۰ تولید را بوسیله ES اجرا می کنیم. همچنین، در مورد EP+ES، بعد از اجرا ۲۰۰ تولید بوسیله EP، ما ۲۰۰ تولید را به وسیله ES اجرا می کنیم. جدول ۷، توان تولید شده برای هر مولد، هزینه کل، کل توان تولید شده و زمان محاسبه را به وسیله کامپیوتر شخصی 486 DX-50 هنگامیکه کل بار [MW] 2400 باشد، نشان می دهد. روشهای ترکیبی پیشنهادی بهترین نتایج را با کمترین هزینه نشان می دهند. به خاطر کمبود فضا، نتایج برای کل بار از [MW] 2500 تا [MW] 2700 داده نشده اند. اما نتایج برای روش های پیشنهادی مشابه نتایج برای یک سیستم با بار [MW] 2400 هستند.

زمان شبیه سازی روش مرتبه ای با VAX 11/780 اندکی بیشتر از ۱ ثانیه بوده، در حالیکه زمان شبیه سازی روش ترکیبی پیشنهادی با کامپیوتر شخصی 486 DX-50 حدود ۲۵ الی ۳۶ ثانیه می باشد.

با استفاده از یک کامپیوتر شخصی به جای main frame، تقریباً هیچ اختلافی در زمان محاسبه وجود ندارد. بنابراین، روش پیشنهادی در کاربردش، یک شایستگی مناسب را تضمین می نماید.

جدول ۷: نتایج حاصل از روش مرتبه ای و روشهای محاسبات تکاملی هنگامیکه کل بار [MW] 2400 است

Unit \ methods	hierarc-hical method	GA2	ES	EP	GA+ES	EP+ES
Unit 1	193.2	190.43	190.78	186.93	189.88	188.29
Unit 2	204.1	202.59	201.44	202.75	202.92	202.12
Unit 3	259.1	258.69	255.56	256.79	252.88	255.68
Unit 4	234.3	231.14	234.03	232.71	233.30	233.80
Unit 5	249.0	236.09	242.10	242.48	240.70	240.88
Unit 6	195.5	231.96	232.53	230.89	234.04	233.14
Unit 7	195.5	261.22	251.50	252.78	252.44	254.29
Unit 8	260.1	235.34	233.94	233.53	233.39	232.81
Unit 9	234.3	313.13	319.86	322.48	320.22	319.66
Unit 10	325.3	239.40	238.27	238.66	240.24	239.32
Total power	2401.2	2399.9	2400.0	2400.0	2400.0	2400.0
Total cost (\$/h)	488.50	482.00	481.75	481.79	481.74	481.74
computation time (sec.)	1.08	180	40	87	36	37
	VAX 11/780	PC 486 DX-50				

جدول ۸، هزینه کلی را در مقایسه با یک روش مرتبه ای با ECs هنگامیکه کل بار از [MW] 2400 تا [MW] 2700 تغییر می کند، نشان می دهد.

جدول ۸: محاسبات هزینه کل نتایج شبیه سازی

Total load [MW]	hierarchical method (\$/h)	GA2 (\$/h)	ES (\$/h)	EP (\$/h)	GA+ES (\$/h)	EP+ES (\$/h)
2400	488.50	482	481.75	481.79	481.74	481.74
2500	526.70	526.48	526.27	526.27	526.25	526.24
2600	574.03	574.59	574.41	574.39	574.39	574.40
2700	625.18	624.20	623.83	623.89	623.83	623.82

همانگونه که در جدول ۸، نشان داده شده است، روش های پیشنهاد شده در این

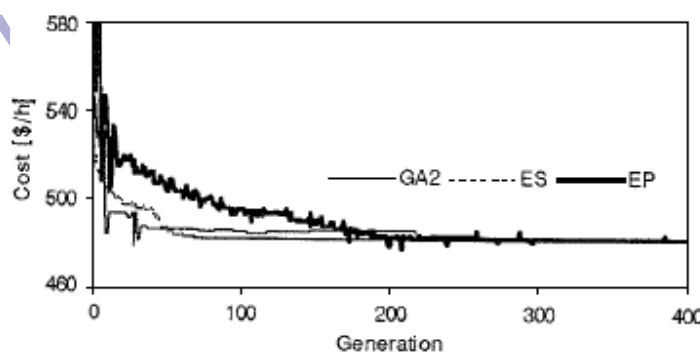
مقاله، حل های بهتری را در مقایسه با روش مرتبه ای پیدا می کنند [8].

شکل های ۳ و ۴، ویژگیهای همگرایی را برای روش های GA2، ES، EP،

GA+ES و EP+ES، هنگامیکه کل بار 2400[MW] می باشد، را نشان می

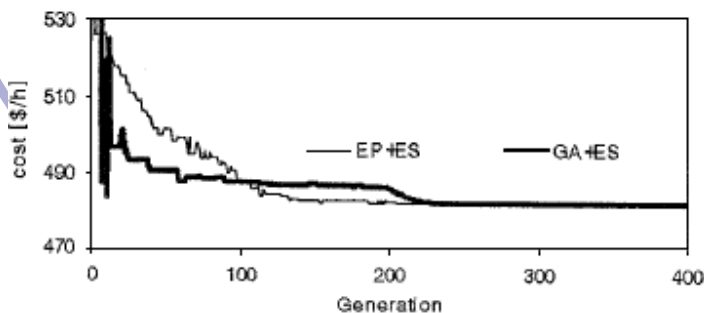
دهند. بطور ویژه، با بکاربردن GA+ES و EP+ES می توان مسأله بهینه سازی

را بهتر و سریعتر از GA، ES یا EP به تنهایی، حل نمود.



شکل ۳: ویژگیهای همگرایی برای GA2، ES، EP هنگامیکه کل بار

2400[MW] باشد



شکل ۴: ویژگیهای همگرایی برای EP+ES و GA+ES هنگامیکه کل بار 2400 [MW] باشد

#### نتیجه گیری

نشان دادن تابع هزینه تولید برای یک نیروگاه سوخت فسیلی با تابع درجه دوم تکه ای مجزا، خیلی دقیق می باشد. ولی، این کار به الگوریتم بسیار پیچیده ای برای حل مسأله ELD در مقایسه با روش عددی عمومی از قبیل روند مرتبه ای، نیاز دارد.

در این مقاله، دو روش ترکیبی بهینه سازی با شرح مزایای هر الگوریتم تکاملی، توسعه داده شده اند. روش های بهینه سازی با ترکیب GA با ES و EP با ES، در مسأله ELD با توابع هزینه درجه دوم تکه ای آزمایش شده اند که نتایج بهتر با هزینه کمتر و الگوریتم بسیار ساده تر را نشان داده اند. همچنین، این روش های ترکیبی، مسأله بهینه سازی را بهتر و سریعتر از GA، EP یا ES به تنهایی، حل می کنند. روش محاسبات تکاملی، همچنین، می تواند به سادگی به مسائل ELD با تعداد زیادی از مولدها، اعمال شود. در مطالعه موردی، ما امکان کاربرد

محاسبه تکاملی را در مسأله ELD با توابع هزینه غیر محدب معمولی، نشان داده

ایم.

مراجع

- [1] Masashi Yoshimi, Swarup, K.S. and YoshioIzui, "Optimal Economic Power Dispatch Using Genetic Algorithms", *Proceeding of the 2th international forum on ANNPS*, April 1993, pp. 157-162.
- [2] D. C. Walters, G.B. Sheble, "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 3, Aug. 1993, pp. 1325-1332.
- [3] D.B. Fogal, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization", *IEEE Trans. on Neural Network*, vol. 5, no. 1, Jan. 1994, pp. 3-14.
- [4] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley, 1989
- [5] A. Varšek, T. Urbančič, and B. Filipič, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning ", *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 5, Sep/Oct. 1993, pp. 1330-1339.
- [6] V. Maniezzo, "Genetic Evolution of the Topology and Weight Distribution of Neural Networks", *IEEE Trans. on Neural Network*, vol. 5, no. 1, Jan. 1994, pp. 39-53.
- [7] J.J. Buckley and Y. Hayashi, "Fuzzy Genetic Algorithms for Optimization", *Proceeding of 1993 International Joint Conference on Neural Networks*, 1993, pp. 725-728.
- [8] C.E. Lin and G.L. Viviani, "Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Functions", *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-103, no. 6, June 1984.
- [9] J.H. Park, Y.S. Kim and K.Y. Lee, "Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 3, Aug. 1993, pp. 1030-1038.
- [10] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, John Wiley & Sons, 1984.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

بخش دوم :

مقالات توزیع بار

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

## روش جدید برای محاسبه توزیع بار

### خلاصه

در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه پخش بار توضیح داده می شود. این روش از نتایج پخش بار استفاده کرده و ماتریس حساسیت سیستم را بدست می آورد و از این ماتریس برای محاسبه دیگر پخش بارها استفاده می کند. بدلیل اینکه در این روش از مدل‌های عناصر قدرت استفاده نمی شود، خطای محاسباتی از بین می رود. نتایج، درستی ادعا را ثابت می کند.

### مقدمه

پخش بار یکی از محاسبات مهم در شبکه قدرت می باشد. درستی نتایج اهمیت زیادی در امنیت و پایداری شبکه دارد. استفاده از روشهای قدیمی مثل: گاوس سایدل،  $N-R$  باعث خطاهایی می شود که عمدتاً از موارد زیر موجب می شوند:

(۱) مدل‌های دقیق عناصر قدرت در دسترس نمی باشد.

(۲) پارامترهای مدل به صورت دقیق مشخص نیست.

با روشهای کامپیوتری و ریاضی نمی توان این خطاها را از بین برد. در اینجا از یک روشی که نیاز به مدل عناصر نداشته باشد استفاده می کنیم.

ایده و تاکتیکهای بکار گرفته شده

بسیاری از پرسنل سیستم قدرت که تجربه کاری زیادی دارند ادعا می کنند که می توانند مقادیری مثل ولتاژ باسها و توان منتشر شده در خطوط را پیش بینی کنند. این بدان علت است که این نقاط ، نقاط کلیدی شبکه می باشند که اندازه آنها امنیت شبکه را تحت تاثیر قرار می دهد. در واقع اپراتور به ارتباط بین متغیرها در طی زمان طولانی پی می برد. تغییر متغیرهای کنترل ( مثل : توان اکتیو تولیدی ، ولتاژ باس ژنراتور ، توان اکتیو و ولتاژ باسهای کنترل ولتاژ) و متغیرهای توزیع ( مثل : توان اکتیو و راکتیو بارها و باسهای PQ ) باعث تغییر این نقاط کلیدی ( متغیرهای حالت ) می شوند.

در سیستم قدرت مدام تغییراتی داده می شود و چون اپراتور نمی تواند تمام این تغییرات را به خاطر آورد، بنابراین ناگزیر به استفاده از کامپیوتر هستیم.

اجرای این روش شامل دو قسمت می باشد: **on-line & off-line** . در **off-line** از یک سری داده معتبر که از پخش بار بدست آمده است و ارتباط بین متغیرهای کنترل و توزیع را با متغیرهای حالت بیان می دارد استفاده می کنیم.

در **on-line** برای هر حالت کاری ، الگوهای بدست آمده را که نزدیکتر به حالت کاری ما است انتخاب می کنیم. اندازه متغیرهای حالت بر اساس ارتباط بین



متغیرهای حالت با متغیرهای کنترل و توزیع بدست میاید. در شکل‌های ۱ و ۲ مراحل on-line & off-line نشان داده شده است:

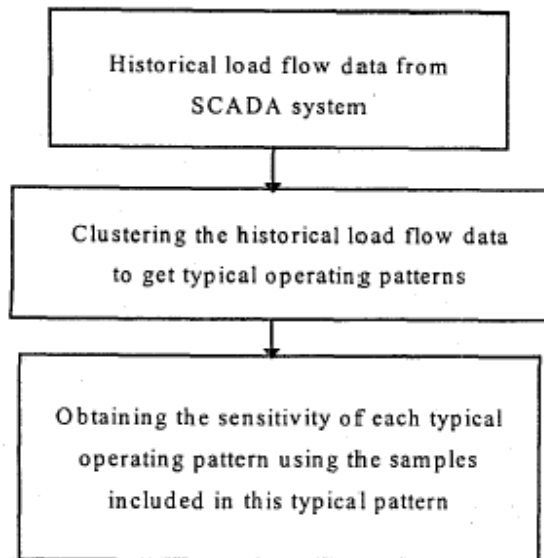


Fig. 1 Off-line training procedure

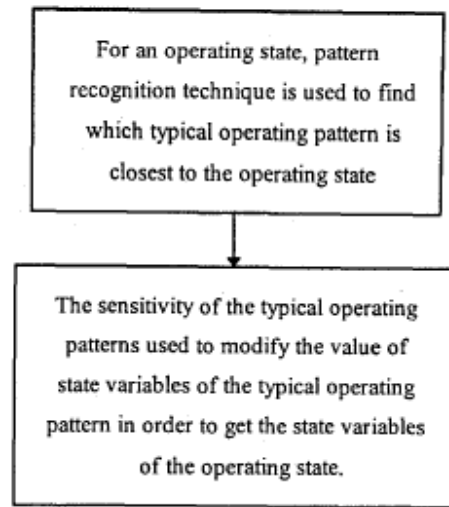


Fig. 2 On-line implementation procedure

در اینجا ما به دنبال ماتریس حساسیت می گردیم که ارتباط بین متغیرهای

کنترل و توزیع را با متغیرهای حالت نشان دهد.

روش بدست آوردن ماتریس حساسیت

ماتریس حساسیت به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where:  $S_{ij}$ : the elements of sensitivity matrix;

$\Delta U_i$ : the increment of control/disturbance variable;

$\Delta X_i$ : the increment of state variable caused by the increment of control/disturbance variable;

ماتریس حساسیت با معکوس کردن ماتریس ژاکوبی بدست میاید.

یک روش بدست آوردن ماتریس حساسیت اینست که یکی از متغیرهای کنترل

یا توزیع را تغییر داده در حالی که بقیه ثابت باشند. که در نتیجه داریم که:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Then:

$$\begin{bmatrix} S_{1i} \\ S_{2i} \\ \vdots \\ S_{ni} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta U_i} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

اگر پروسه برای تمام متغیرهای کنترل یا توزیع تکرار شود ، تمامی عناصر

ماتریس حساسیت بدست میاید.

در پخش بار ، تغییرات پارامترها به صورت تصادفی می باشد. بنابراین برای منظور

ما مناسب نمی باشد. در زیر چگونگی حل این مشکل را توضیح می دهیم:

فرض کنید که در حالت اولیه متغیرهای کنترل یا توزیع و متغیرهای حالت به صورت زیر باشند:

$$U^{(0)} = (U_1^{(0)}, U_2^{(0)}, \dots, U_m^{(0)}) \quad (4)$$

$$X^{(0)} = (X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_m^{(0)}) \quad (5)$$

حال اگر تغییرات کوچکی در این متغیرها داده شود داریم که:

$$\begin{aligned} U^{(1)} &= U^{(0)} + \Delta U^{(1)} \\ &= (U_1^{(0)} + \Delta U_1^{(1)}, U_2^{(0)} + \Delta U_2^{(1)}, \dots, U_m^{(0)} + \Delta U_m^{(1)}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta U^{(1)} = (U_1^{(1)} - U_1^{(0)}, U_2^{(1)} - U_2^{(0)}, \dots, U_m^{(1)} - U_m^{(0)}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= X^{(0)} + \Delta X^{(1)} \\ &= (X_1^{(0)} + \Delta X_1^{(1)}, X_2^{(0)} + \Delta X_2^{(1)}, \dots, X_m^{(0)} + \Delta X_m^{(1)}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta X^{(1)} = (X_1^{(1)} - X_1^{(0)}, X_2^{(1)} - X_2^{(0)}, \dots, X_m^{(1)} - X_m^{(0)}) \quad (9)$$

بنابراین  $\Delta X^1$  از رابطه زیر بدست میاید:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1^{(1)} \\ \Delta U_2^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta U_m^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(1)} \\ \Delta X_2^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta X_n^{(1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

و اگر این متغیرها تغییرات دیگری داشته باشند، داریم که:

$$\begin{aligned} U^{(2)} &= U^{(0)} + \Delta U^{(2)} \\ &= (U_1^{(0)} + \Delta U_1^{(2)}, U_2^{(0)} + \Delta U_2^{(2)}, \dots, U_m^{(0)} + \Delta U_m^{(2)}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta U^{(2)} = (U_1^{(2)} - U_1^{(0)}, U_2^{(2)} - U_2^{(0)}, \dots, U_m^{(2)} - U_m^{(0)}) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} X^{(2)} &= X^{(0)} + \Delta X^{(2)} \\ &= (X_1^{(0)} + \Delta X_1^{(2)}, X_2^{(0)} + \Delta X_2^{(2)}, \dots, X_m^{(0)} + \Delta X_m^{(2)}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Delta X^{(2)} = (X_1^{(2)} - X_1^{(0)}, X_2^{(2)} - X_2^{(0)}, \dots, X_m^{(2)} - X_m^{(0)}) \quad (14)$$

آنگاه  $\Delta X^2$  از رابطه زیر بدست میاید:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1^{(2)} \\ \Delta U_2^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta U_m^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(2)} \\ \Delta X_2^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta X_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

و در حالت تغییر  $m$  ام داریم که:

$$U^{(m)} = U^{(0)} + \Delta U^{(m)} \\ = (U_1^{(0)} + \Delta U_1^{(m)}, U_2^{(0)} + \Delta U_2^{(m)}, \dots, U_m^{(0)} + \Delta U_m^{(m)}) \quad (16)$$

$$\Delta U^{(m)} = (U_1^{(m)} - U_1^{(0)}, U_2^{(m)} - U_2^{(0)}, \dots, U_m^{(m)} - U_m^{(0)}) \quad (17)$$

$$X^{(m)} = X^{(0)} + \Delta X^{(m)} \\ = (X_1^{(0)} + \Delta X_1^{(m)}, X_2^{(0)} + \Delta X_2^{(m)}, \dots, X_m^{(0)} + \Delta X_m^{(m)}) \quad (18)$$

$$\Delta X^{(m)} = (X_1^{(m)} - X_1^{(0)}, X_2^{(m)} - X_2^{(0)}, \dots, X_m^{(m)} - X_m^{(0)}) \quad (19)$$

و  $\Delta X^m$  از رابطه زیر بدست میاید:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1^{(m)} \\ \Delta U_2^{(m)} \\ \vdots \\ \Delta U_m^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(m)} \\ \Delta X_2^{(m)} \\ \vdots \\ \Delta X_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

بر طبق معادلات 10,15,20 داریم که:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1^{(1)} & \Delta U_2^{(1)} & \dots & \Delta U_m^{(1)} \\ \Delta U_1^{(2)} & \Delta U_2^{(2)} & \dots & \Delta U_m^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta U_1^{(m)} & \Delta U_2^{(m)} & \dots & \Delta U_m^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ \vdots \\ S_{1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{(1)} \\ \Delta X_1^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta X_1^{(m)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1^{(1)} & \Delta U_2^{(1)} & \dots & \Delta U_m^{(1)} \\ \Delta U_1^{(2)} & \Delta U_2^{(2)} & \dots & \Delta U_m^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta U_1^{(m)} & \Delta U_2^{(m)} & \dots & \Delta U_m^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{21} \\ S_{22} \\ \vdots \\ S_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_2^{(1)} \\ \Delta X_2^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta X_2^{(m)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1^{(1)} & \Delta U_2^{(1)} & \dots & \Delta U_m^{(1)} \\ \Delta U_1^{(2)} & \Delta U_2^{(2)} & \dots & \Delta U_m^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta U_1^{(m)} & \Delta U_2^{(m)} & \dots & \Delta U_m^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{n1} \\ S_{n2} \\ \vdots \\ S_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_n^{(1)} \\ \Delta X_n^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta X_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

بنابراین ماتریس حساسیت بر طبق روابط فوق بدست میاید.

مثالها

در شکل ۳ سیستم ۵ باسه مورد استفاده نشان داده شده است:

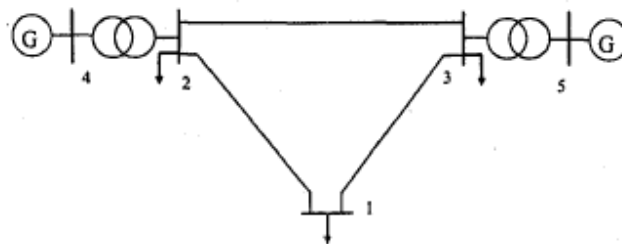


Fig. 3 5-bus test system

باسه‌های 1,2,3 PQ اند و باس ۴، PV و باس ۵، SLACK میباشد.

بنابراین متغیرهای توزیع اند و  $P_{G4}, V_4$  متغیرهای کنترل

اند و متغیرهای حالت عبارتند از:  $V_1, V_2, V_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$

در جدول ۱ مقادیر کاری آورده شده اند:

Table 1 The operating pattern, p.u.

$P_{L1}$	$Q_{L1}$	$P_{L2}$	$Q_{L2}$	$P_{L3}$	$Q_{L3}$	$P_{G4}$	$V_4$
1.6	0.8	2.0	1.0	3.7	1.3	5.0	1.05

۸ نمونه انتخاب شده است و ماتریس حساسیت را در جدول ۲ موجب شده است:

Tab. 2 sensitivity matrix, p.u.

	$P_{L1}$	$Q_{L1}$	$P_{L2}$	$Q_{L2}$	$P_{L3}$	$Q_{L3}$	$P_{G4}$	$V_4$
$\theta_1$	-0.30028	-0.05668	-0.11149	0.00856	-0.03218	-0.01369	0.13290	0.09370
$V_1$	-0.1140	-0.2914	0.04439	-0.0128	-0.0016	-0.0245	-0.0367	1.1769
$\theta_2$	-0.1384	0.03463	-0.2221	0.01291	-0.0312	0.00564	0.22666	-0.7561
$V_2$	-0.0077	-0.0191	0.00580	-0.0153	-0.0000	-0.0029	-0.0065	1.0626
$\theta_3$	-0.0300	-0.0071	-0.0217	-0.0003	-0.0292	-0.0022	0.02223	0.03954
$V_3$	0.0008	-0.0247	0.01580	-0.0034	-0.0019	-0.0295	-0.0164	2.2141
$\theta_4$	-0.1372	0.03822	-0.2236	0.01332	-0.0311	0.00651	0.24082	-0.8909

از ماتریس حساسیت برای اصلاح پخش بار استفاده می کنیم.

در جدول ۳، ۵ مورد نمونه بر حسب درصد بیان شده است آورده شده است. در جدول ۴ نتایج با استفاده از روش پخش بار و در جدول ۵ اختلاف بین روش

پخش بار و این روش آورده شده است:

ضمیمه

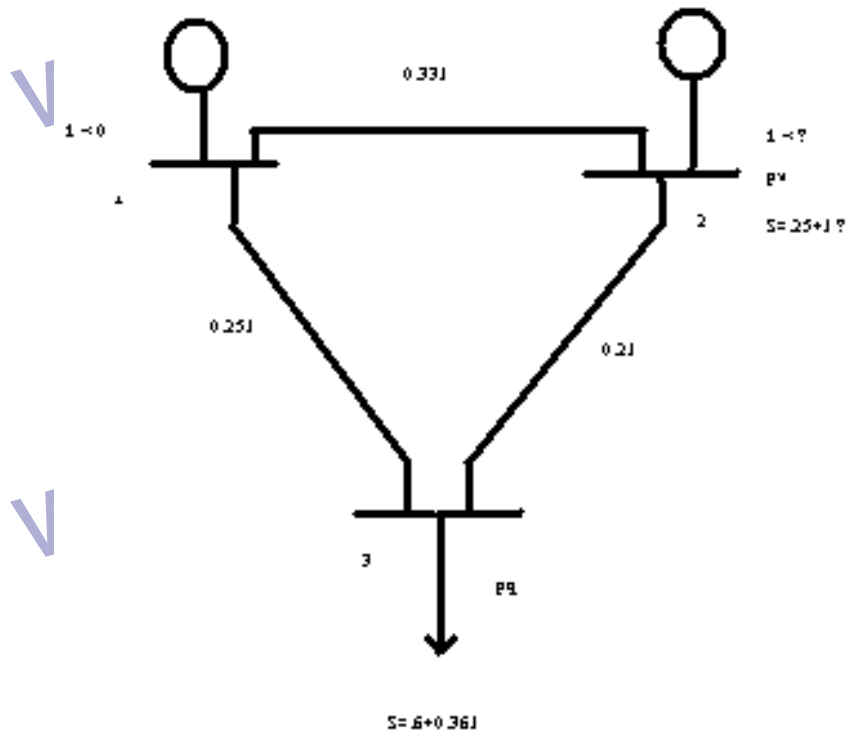
Tab. A.1 Bus data, p.u.

number	type	P	Q	V	$\theta$
1	PQ	1.6	0.8		
2	PQ	2.0	1.0		
3	PQ	3.7	1.3		
4	PV	5.0		1.05	
5	Slack			1.05	0.0

Tab. A.2 Line data, p.u.

from	to	R	X	B/2 or Tap
1	2	0.04	0.25	0.5
1	3	0.1	0.35	0.
2	3	0.08	0.30	0.5
4	2	0.	0.015	1.05
5	3	0.	0.03	1.05

در زیر نتایج را برای سیستم سه باسه زیر با استفاده از روش بالا بدست می آوریم:



با استفاده از برنامه نوشته شده 4 power، ولتاژها را بدست می آوریم:

$Y_{bus} =$

$0 - 7.0000i$	$0 + 3.0000i$	$0 + 4.0000i$
$0 + 3.0000i$	$0 - 8.0000i$	$0 + 5.0000i$
$0 + 4.0000i$	$0 + 5.0000i$	$0 - 9.0000i$

$v =$

1.0000  
1.0000  
0.9557



delta ( rad )=

0  
-0.0163  
-0.0789

تغییرات زیر را به متغیرهای کنترل و توزیع اعمال کرده ایم:

dv2=.01\*[1 2 -5 -2]

dp2=.01\*[2 -1 1 -1]

dp3=.01\*[1 1 -1 3]

dq3=.01\*[1 -1 2 5]

بنابراین ماتریس حساسیت برابر است با:

S =

-0.1065 -0.0015 -0.1932 -0.0128  
-0.1743 -0.0129 -0.1050 0.0713  
-0.0212 -0.1153 -0.0016 0.5937

حال با استفاده از ماتریس حساسیت و لتازها را به ازای تغییر زیر در کمیتهها بدست می آوریم:

dv2=.03;  
dp2=.04;  
dp3=.005;  
dq3=-.02;

بنابراین بدست می آید که:

d delta2= -0.0040  
d delta3= -0.0077  
d v3= -0.0171

بنابراین:

$$\text{delta } 2 = -.0203$$

$$\text{delta } 3 = -.0866$$

$$v3 = .9386$$

در حالی که مقدار دقیق آنها عبارتست از:

$$\text{delta } 2 = -0.0245$$

$$\text{delta } 3 = -0.0862$$

$$v3 = 0.9405$$

می بینیم که اختلاف بسیار ناچیز است. بنابراین روش بکار گرفته شده قابل قبول می باشد.

## تحلیل سیستم های قدرت dc

### خلاصه

سیستم جریان مستقیم در نیروگاههای هسته ای و خطوط انتقال قدرت به کرار استفاده می شود. مهمترین مسئله در انتقال DC مسئله ولتاژ و افت ولتاژ در باس بارها می باشد. در این مقاله روش پخش بار نیوتن-رافسون DC ارائه می گردد. در شبیه سازی ژنراتورهای DC، باتریها، یکسوکنندههای جریان مستقیم، بار مقاومتی در نظر گرفته شده است.

### مقدمه

در یک سیستم قدرت نوعی و در شرایط اضطراری، ولتاژ تولیدی توسط باتری با اتصال بارها تغییر می کند. بارها در زمانهای مختلف وارد و یا از مدار خارج می شوند. بنابراین سیستم انتقال از وضعیتی به وضعیت دیگر تغییر حالت می دهد. مطالعه در این حالت بایستی در بازه های زمانی مختلف که تغییرات انجام گیرد، انجام داد و در هر بازه مقادیر را به ازای همان بازه در نظر می گیریم. با انجام این کار پروفایل ولتاژ بر حسب زمان بدست می آید.

توان مانند جریان آب که در خطوط لوله با توجه به پارامترهای لوله منتشر می شود، در اینجا هم با توجه به امپدانس مسیر و بارها پخش می گردد. برنامه های

زیادی برای پخش بار AC موجود است که با اندکی تفاوت در پخش بار DC نیز کاربرد دارند. چون در موارد اضطراری از برق DC استفاده می کنیم که مقدار آن با توجه به زمان ( تغییرات بار ) تعیین می گردد، لازم است که بتوان پخش بار DC را برای این حالت نیز در نظر گرفت.

سیستم توزیع DC شامل سه بخش ، منبع ، شبکه و بار می باشد. سه نوع منبع DC وجود دارد: ژنراتور DC ، باتری و رکتیفایر. فیدرها در سیستم DC به عنوان یک مقاومت ثابت و شبکه با یک ماتریس کندکتانس مدل می گردد. بار میتواند به صورت توان یا جریان یا مقاومت ثابت مدل شود.

ژنراتور DC با یک منبع ثابت مدل می شود. سه تا کنترل برای رکتیفایر وجود دارد: کنترل ولتاژ DC ، کنترل جریان DC ، کنترل زاویه آتش. برای کنترل ولتاژ بهتر، از ترانس تپ دار استفاده می کنند. باتری از یک خازن بزرگ ساخته می شود که در مواقع ضروری انرژی آن به شبکه تزریق می شود.

مسائل پخش بار DC غیر خطی اند. بنابراین از روش نیوتن رافسون برای حل آن استفاده می شود. ماتریس ژاکوبین ، ماتریس تنگی است. بنابراین می توان تکنیکهای سرعت بخشی به محاسبات را به کار برد. در اینجا نیز از این روش استفاده می کنیم.

مدلهای بار و منبع و شبکه  
در شکل ۱ یک نمونه کلی از سیستم DC نشان داده شده است:

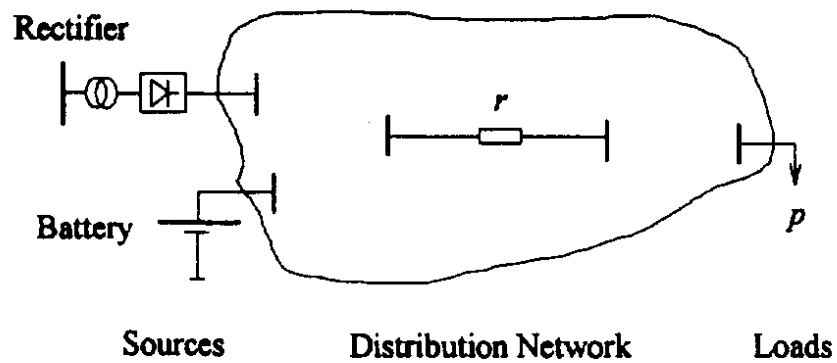


Fig.1 A Typical DC Distribution System

(۱) شبکه  
فیدرها در سیستم DC به عنوان یک مقاومت ثابت مدل می شوند. بنابراین رابطه  
ماتریسی زیر برای شبکه برقرار است:

$$i = G v \quad (1)$$

که  $G$  از رابطه زیر بدست میاید:

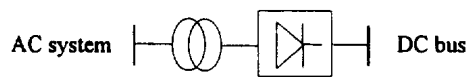
$$\begin{cases} g_{ij} = -\frac{1}{r_{ij}} & (i \neq j) \\ g_{ii} = \frac{1}{r_i} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{1}{r_{ij}} \end{cases} \quad (2)$$

(۲) منبع

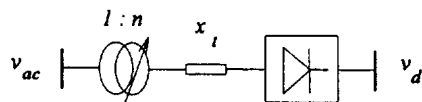
سه نوع منبع DC وجود دارد: ژنراتور DC، باتری و رکتیفایر. ژنراتور DC با یک منبع ثابت مدل می شود. دو منبع دیگر در قسمتهای بعدی مدل آنها توضیح داده می شوند.

(۳) رکتیفایر

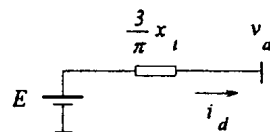
در شکل ۲ طریقه تبدیل ولتاژ AC به DC و مدار معادل آن نشان داده شده است:



(a)



(b)



(c)

Fig.2 A Rectifier and its Equivalent Circuit

(a) Ac/dc rectifier converter;

(b) Rectifier circuit;

(c) Equivalent circuit for load flow study.

که اندازه منبع از رابطه زیر بدست میاید:

$$E = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n \times v_{ac} \times \cos \alpha \quad (3)$$

که  $\alpha$  زاویه آتش است.

یک حد پایین برای  $\alpha$  ( $\alpha_{\min}$ ) و دو حد بالا و پایین ( $n_{\min} - n_{\max}$ ) برای ترانس وجود دارد.

(۴) باتری

ولتاژ باتری بعد از مدتی با توجه به ثابت زمانی آن کاهش میابد. که مدل آن در

شکل ۳ آورده شده است:

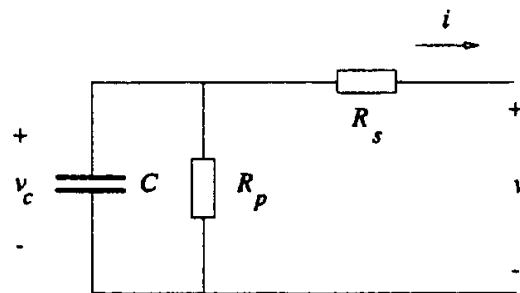


Fig.3 Battery Simulation Model

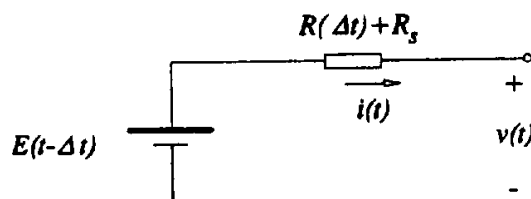


Fig.4 Battery Step-by-step Solution Model

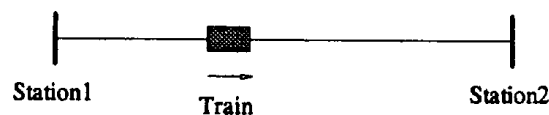
معادله حاکم بر باتری عبارتست از :

$$\frac{dv_{\epsilon}}{dt} = -\frac{1}{C} \left( \frac{v_{\epsilon}}{R_p} + i \right) \quad (4)$$

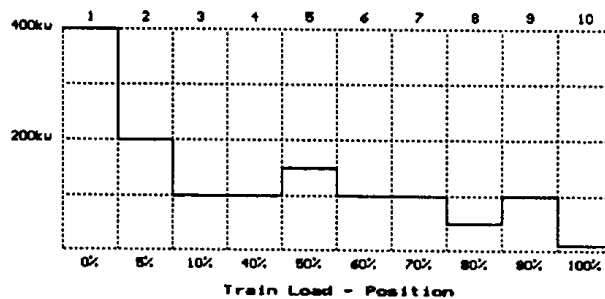
برای حل این معادله از روشهای عددی مانند روش دوزنقه استفاده می کنیم. در شکل ۴ مدار این حالت که برای هر گام زمانی بایستی حل شود آورده شده است.

(۵) بار

بار میتواند به صورت توان یا جریان یا مقاومت ثابت مدل شود. بارها مدام روشن و خاموش می شوند. برای آنالیز سیستم قطار شکل 5.a را در نظر می گیریم، قطار بین دو ایستگاه قرار دارد. شکل 5.b توان انتقالی را بر حسب موقعیت قطار نشان داده است:



(a) Diagram



(b) Load profile

Fig.5 A Transient System and its Load Profile



بنابراین به علت تغییرات زمانی بار ، بایستی مدل مناسبی انتخاب شود.

فرآیند مطالعه پخش بار

برای ولتاژ معین منابع و توان معین بارها ، ولتاژ باسها را توسط تکرار با یک تلورانس معین بدست می آوریم. همگرایی توسط رابطه زیر تضمین می شود:

$$\max_{1 \leq i \leq n} |\Delta p_i| \leq \varepsilon \quad (5)$$

توان تزریقی به باسها برابر است با:

$$p_i = v_i \times \sum_{j=1}^n g_{ij} v_j \quad (6)$$

با خطی سازی معادله فوق داریم که:

$$\Delta p_i = (2g_{ii}v_i + \sum_{i=1, i \neq j}^n g_{ij}v_j)\Delta v_i + v_i \sum_{i=1, i \neq j}^n g_{ij}\Delta v_j \quad (7)$$

بنابراین ولتاژ باسها توسط رابطه تکراری زیر بدست میاید:

$$v^{(k+1)} = v^{(k)} - J^{-1}(v^{(k)})\Delta p^{(k)} \quad (8)$$

J ماتریس ژاکوبی است. معادله فوق را برای تمام بازه های زمانی که بار تغییر می

کند انجام می دهیم. اگر منبعمان باطری باشد ، معادله را برای دو زمان شروع و

خاتمه انجام می دهیم.

مثالها

(۱) سیستم DC با منبع ولتاژ ثابت V

سیستم مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است:

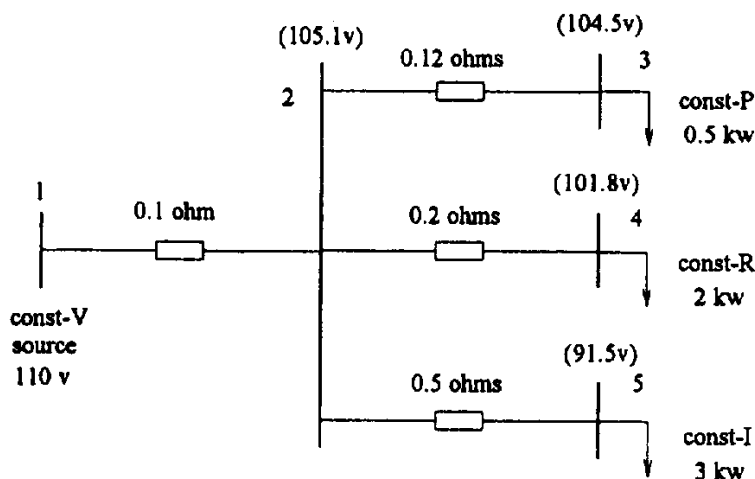


Fig.6 A dc System with a Constant-V Source

منبع دارای ولتاژ ۱۱۰ ولت می باشد. بارها در شکل بر حسب KW نشان داده شده است. نتایج پخش بار تا خطای ۰.۰۰۰۵ کیلو وات در شکل بر روی باس بارها نشان داده شده است.

(۲) سیستم DC همراه با باتری

ساختار همان ساختار فوق می باشد با این تفاوت که به جای منبع DC از باتری که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است ، استفاده شده است. کل زمان در مدار

بودن باطری ۱۹.۵ دقیقه است که به ۱۰ بازه زمانی تقسیم شده است. جدول ۲ این زمانها و تغییرات بارها را در این مدت نشان می دهد:

Table-1 Parameters of the Battery

Open circuit voltage : 114v,	Rated voltage : 110v,
Rated current : 50 am,	Energy stored : 100 am-hrs,
Leak 10% of stored am-hrs in 10 hrs if stand-by.	

Table-2 Specifications of the Loads

Period	Length (min)	Bus#3 (kw)	Bus#4 (kw)	Bus#5 (kw)
1	1.5	5.0	1.0	1.0
2	1.5	2.0	1.0	2.0
3	2.0	2.0	2.0	1.0
4	2.5	2.0	3.0	2.0
5	0.5	2.0	2.0	1.0
6	3.0	2.0	1.0	3.0
7	1.0	1.0	2.0	3.0
8	1.0	1.0	1.5	0.35
9	1.5	1.0	0.3	1.0
10	5.0	1.0	2.0	2.0

پروفایل ولتاژ باطری در شکل ۷ و انرژی باطری در شکل ۸ و پروفایل ولتاژ و توان

باس ۳ در شکل ۹ آورده شده است:

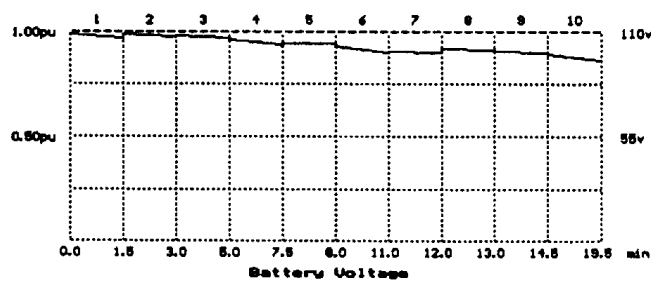


Fig.7 Battery Voltage Profile

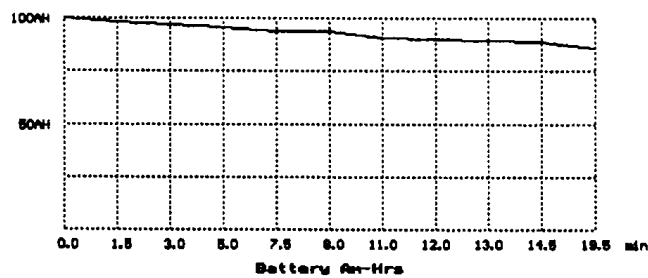


Fig.8 Battery Energy (Am-Hrs) Discharge Curve

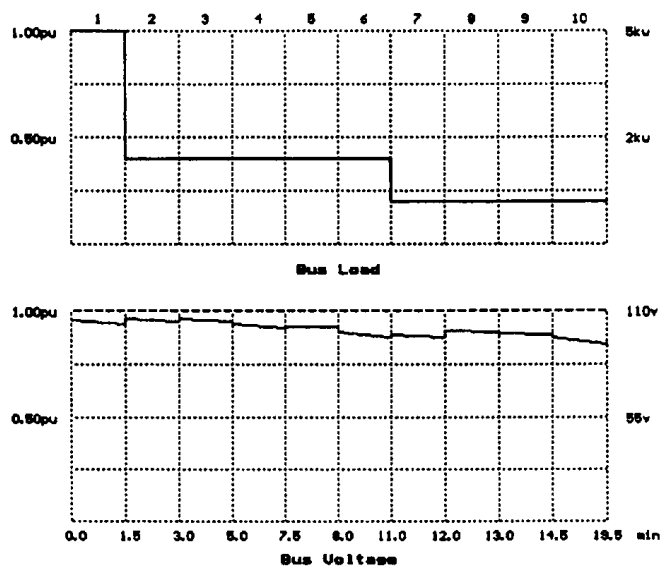


Fig.9 Load and Voltage Profile of Bus #3

۳) سیستم انتقال قطار برقی DC

این سیستم در شکل ۱۰ نشان داده شده است:

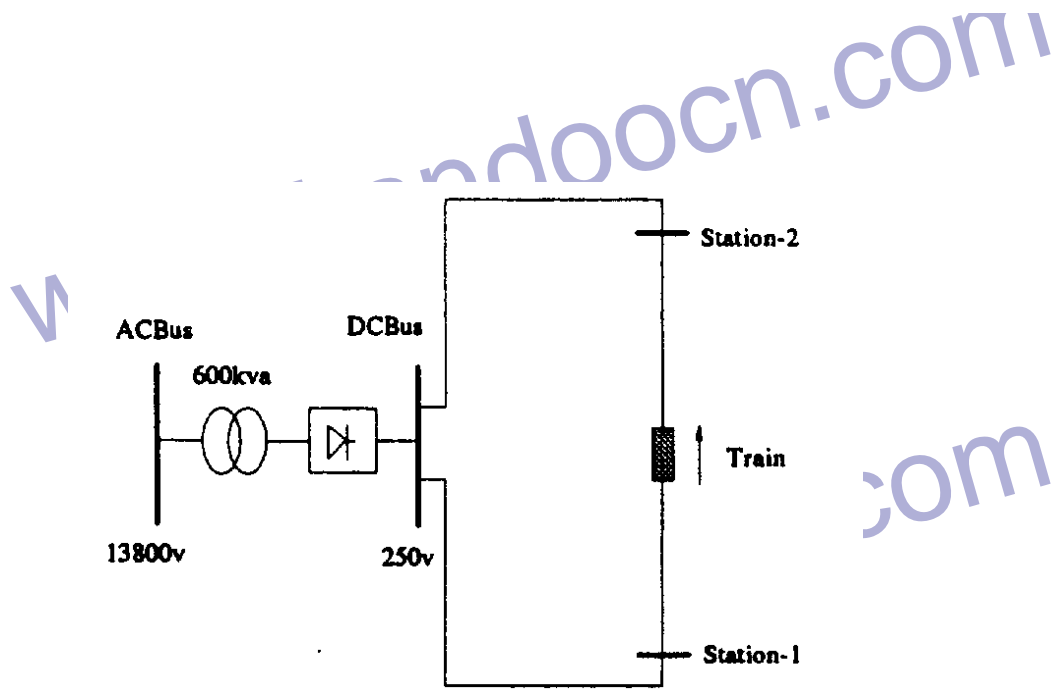


Fig.10 A transit system

این قطار بین دو ایستگاه ۱ و ۲ حرکت می کند. ولتاژ DC توسط رکتیفایر بدست می آید که خصوصیات آن در جدول ۳ آمده است. بار قطار و ولتاژ قطار بسته به نوع موقعیت در شکل ۱۱ نشان داده شده است:

Table-3 Rectifier Station Specifications

Ac Bus :	System voltage 13800 v, Actual voltage 14000 v
Transformer :	5% $x_r$ , 600 kva, 13800/190 v, Tap $n$ : 100%, $n_{max}$ : 110%, $n_{min}$ : 90%, Auto tap change : no
Rectifier :	Voltage control, preferred $\alpha$ : 15°, $\alpha_{min}$ : 5°, V-order: 250 v

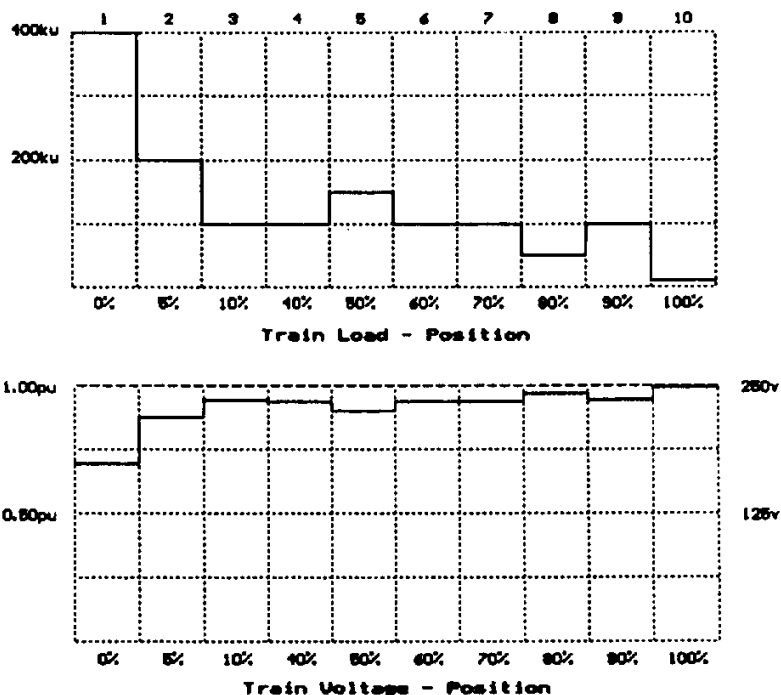


Fig.11 Train voltage profile

در شکل ۱۲ زاویه آتش تریستورها و قدرت اکتیو راکتیو مصرفی رکتیفایر نشان داده شده است. در اینجا از رکتیفایر ۶ پالس استفاده می شود که هارمونیکهای را به شبکه قدرت تزریق می کند که برای رفع این مشکل از فیلتر استفاده می کنند. در شکل ۱۳ هم طیف هارمونیک نشان داده شده است:

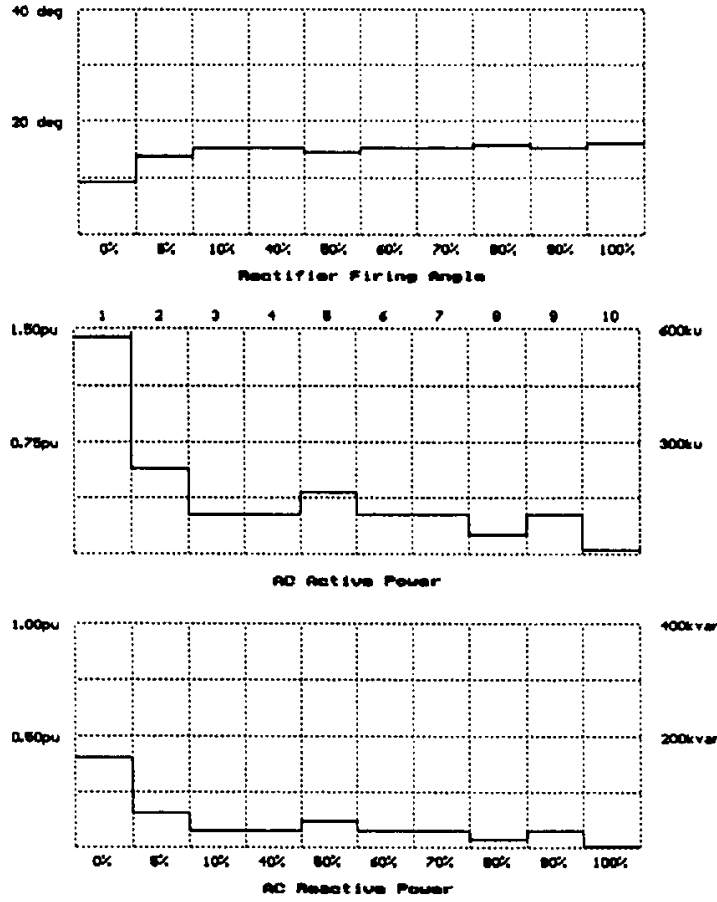


Fig.12 Converter Station Simulation Results

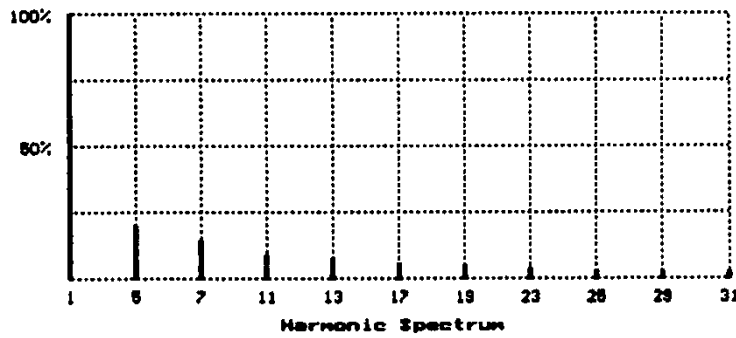


Fig.13 Converter ac Current Harmonics Spectrum

شبيه سازى به وسيله نرم افزار MATLAB  
در زير نتايج شبيه سازى را با MATLAB توضيح مى دهيم:

(۱) آناليز سيستم شكل ۶ با منبع ثابت 110V  
برنامه ۱ power را اجرا مى كنيم و داريم كه:

$$V = 86.7747 \quad 100.0634 \quad 103.4811 \quad 104.0609 \quad 110.0000$$

(۲) آناليز سيستم شكل ۶ با منبع خازنى

با استفاده از جدول ۱ مقادير نامى خازن را بدست مى آوريم:

$$w = .5 * c * v^2 \Rightarrow c = 59.5 F$$

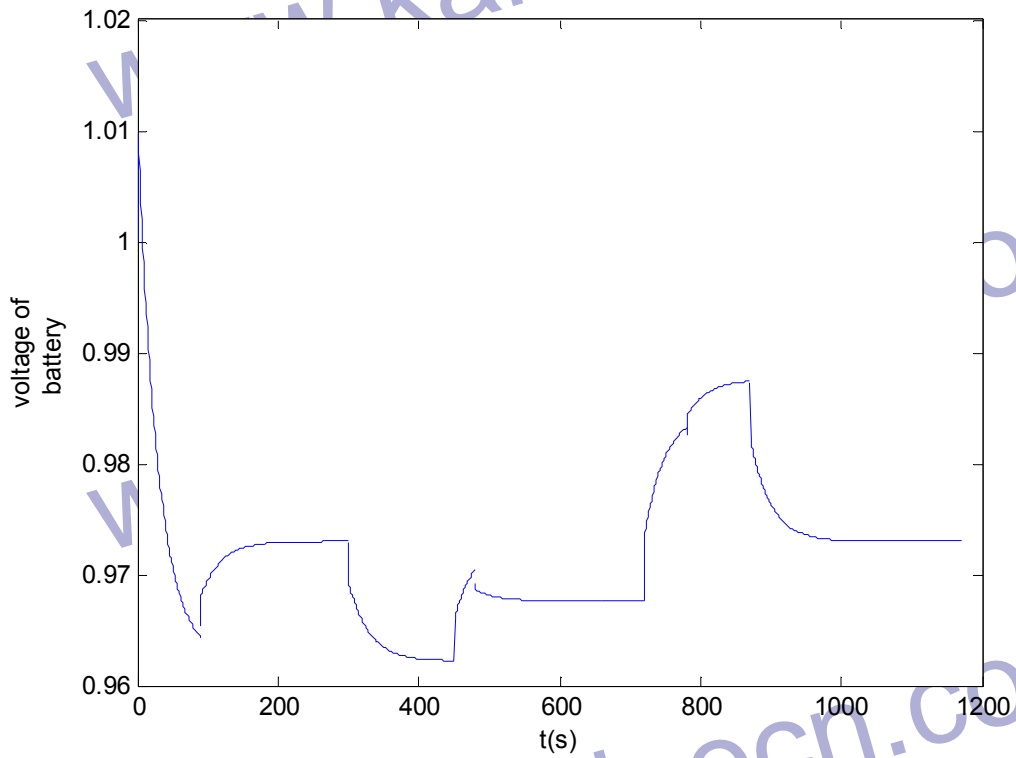
$$R_s = (114 - 110) / 50 = 0.08 \Omega$$

$$E = 114 \exp(-t / R_p c) \text{ at } t = 10 * 3600 s \Rightarrow R_p = 5.74 K\Omega$$

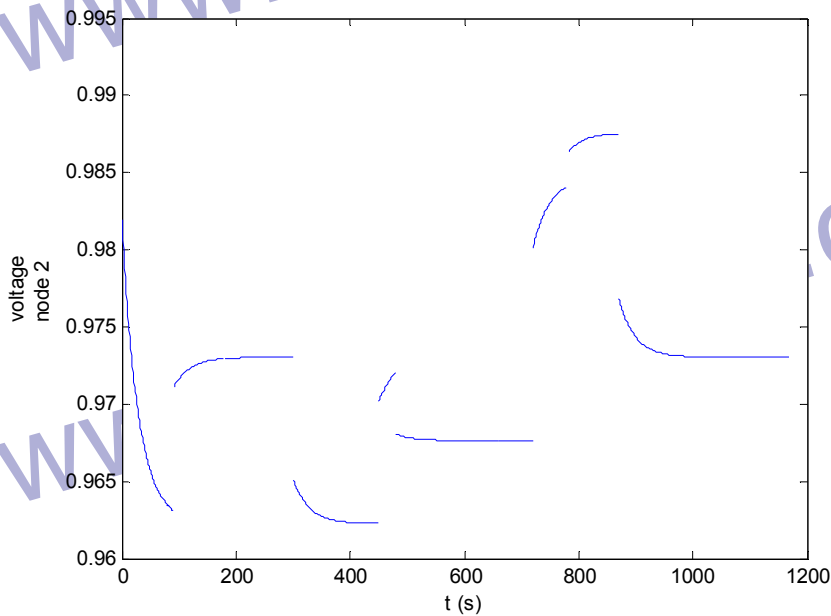
برنامه ۲ power را اجرا مى كنيم . ولتاژ خازن به قرار زير مى باشند:

dt را برابر ۱ ثانيه در نظر مى گيريم:





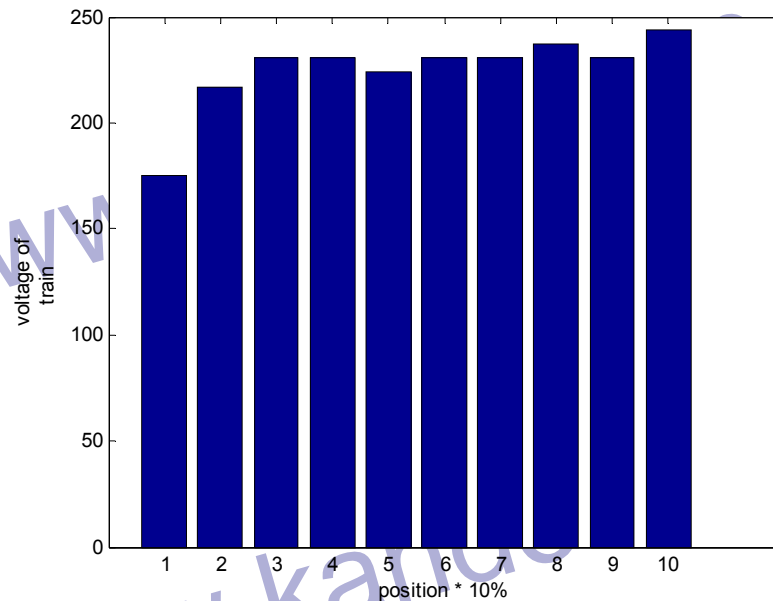
نمودار ولتاژ گره ۲ به شکل زیر می باشد:



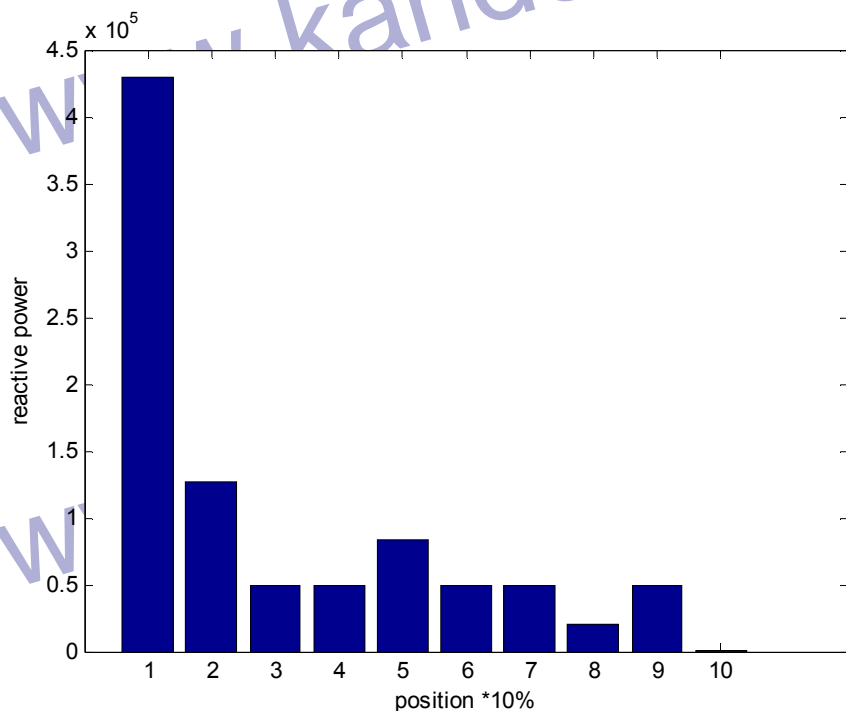
### ۳) آنالیز سیستم قطار برقی

برای داده های در جدول ۳، نمودار ولتاژ بر حسب موقعیت قطار با استفاده از

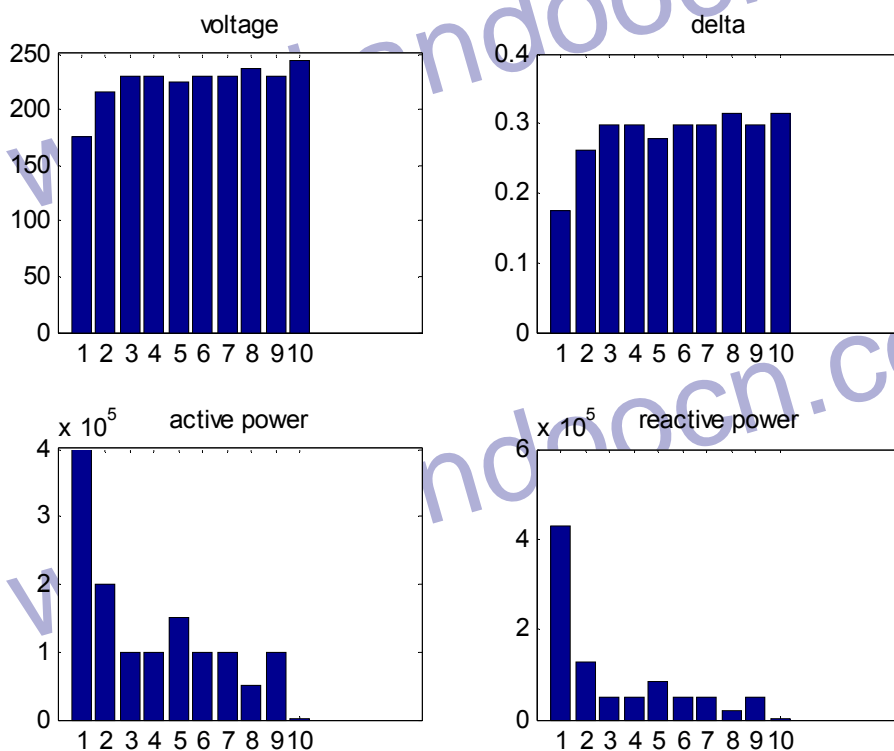
برنامه power3 به صورت زیر در می آید:



توان راکتیو مصرفی توسط یکسوساز به شکل زیر می باشد:



در شکل زیر تمامی نمودارها یکجا آورده شده است:



## برنامه پلان وسیع برای تحلیل توزیع بار dc

### چکیده

این مقاله شرط لازم را برای محاسبه ولتاژهای dc، مورد بحث قرار می دهد. مشکلات اجرایی محاسبات شرح داده می شوند. سرانجام یک روش برای خودکار ساختن این محاسبات در نرم افزار صفحه گسترده، ارائه خواهد شد.

### مقدمه

بسیاری از تجهیزات تغذیه شونده به وسیله سیستم dc، بستگی زیادی به ولتاژ دارند. اگر ولتاژها کم و یا زیاد شوند؛ تجهیزات ممکن است بدرستی کار نکرده و یا آسیب ببینند. از این رو برای یک طراح سیستم dc، محاسبه دقیق افت ولتاژها برای بارهای dc، امری ضروری می باشد.

با بزرگتر شدن و توسعه سیستمهای dc، محاسبات دستی برای اجرا کردن، مشکل تر می شوند. خوشبختانه با گسترش نرم افزار صفحه گسترده، اجرای این محاسبات در کامپیوترهای شخصی امکان پذیر شده است.

www.kandooon.com

بحث

الف) افت ولتاژ تک مداره

محاسبات افت ولتاژ به وسیله یک مثال، می تواند به خوبی شرح داده شود. مدار شکل ۱، را در نظر بگیرید.

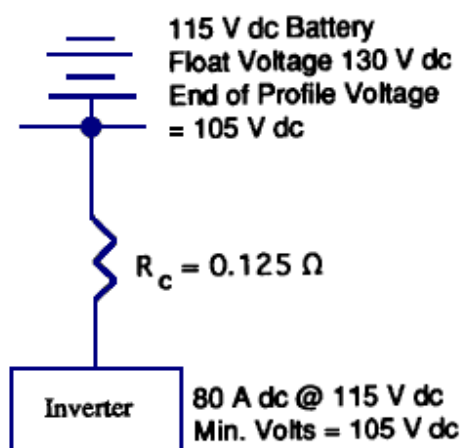
طراح با احتیاط باید محاسبات افت ولتاژ را بگونه ای انجام دهد که ولتاژ مناسب در پایانه های اینورتر (105V dc) مشاهده شود. جریان بار برای توان ثابت بار با

کاهش ولتاژ، افزایش می یابد. از این رو افت ولتاژ کابل برای تأمین جریان بار اینورتر باید محاسبه شود. این منجر به مباحثه دایره ای شکل نشان داده شده در

شکل ۲، می شود.

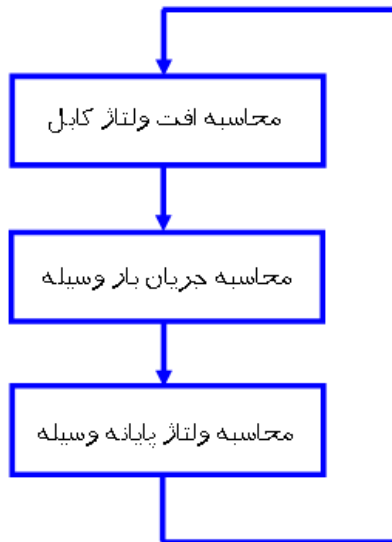
این روش محاسبه را می توان با تکنیک های تکراری انجام داد.

www.kandooon.com



شکل ۱: مدار DC ساده شده

www.kandooon.com



شکل ۲: محاسبه دایره ای

اینها را می توان دستی، با مراحل زیر انجام داد:

(۱) برقرار کردن معادلات ولتاژ

(۲) حدس زدن امتحانی ولتاژ

(۳) محاسبه ولتاژها

(۴) بکاربردن ولتاژهای محاسبه شده بعنوان ولتاژهای امتحانی جدید

(۵) تکرار تا زمان همگرایی ولتاژها

معادلات زیر را می توان با بررسی شکل ۱، بدست آورد:

$$V_B = V_C + V_I \rightarrow V_I = V_B - V_C$$

(1)

$$V_C = I_I * R_C$$

(2)

که:

$V_B$ : ولتاژ باطری

$V_C$ : افت ولتاژ کابل

$V_I$ : ولتاژ پایانه اینورتر

$R_C$ : مقاومت کابل

$I_I$ : جریان اینورتر

باید توجه داشت که جریان اینورتر در  $115V\ dc$ ، لیست شده است. از آنجاییکه

اینورتر یک بار توان ثابت است، جریان با ولتاژ ترمینال، تغییر می کند. جریان

اینورتر را می توان با فرمول زیر محاسبه نمود:

$$I_I = (80 * 115) / V_I$$

(3)

اگر  $R_C = 0.125(\text{ohm})$  باشد، معادلات ۱، ۲، و ۳ را می توان به صورت زیر، دوباره

نوشت:

$$V_I = V_B - 1150 / V_I$$

(4)

باید توجه داشت که  $V_I$  در هر دو طرف معادله، ظاهر شده است. اینگونه از

معادلات را باید با روشهای حل تکراری، حل نمود، بخصوص اگر معادلات همزمان

وجود داشته باشند. مراحل محاسبه گفته شده با معادلات ۳ و ۴ در جدولهای ۱ و ۲ خلاصه شده اند.

به کوپل اینها باید توجه نمود. ولتاژها نسبتاً تندتر همگرا می شوند. جریان اینورتر در  $105V\ dc$ ،  $99.4A$  مستقیم است. این مقدار بطور قابل ملاحظه ای از جریان نامی  $80A\ dc$  نشان داده شده در شکل ۱، بزرگتر است، که اهمیت محاسبه ولتاژها را هنگامیکه تجهیزات تغییر می کنند، نشان می دهد. همچنین باید در برابر افزایش جریان به ابعاد باطری نیز توجه نمود. ابعاد باطری هنگامیکه جریان نامی اش به جای  $99.4A\ dc$ ،  $80A\ dc$  باشد، کاهش می یابد. جداول ۱ و ۲ را می توان به سادگی در اغلب برنامه های صفحه گسترده، پیاده نمود. مضافاً در اغلب برنامه های صفحه گسترده، یک ساختار تکراری وجود دارد.

جدول ۱: تکرارهای دستی با ولتاژ باطری ۱۲۰ ولت

Trial Inveter Volts	Calculated Inveter Volts Equation 4	Calculated Inveter Current Equation 4	Calculated Cable Voltage Drop
115	110.0000	83.6364	10.4545
110.0000	109.5455	83.9834	10.4979
109.5455	109.5021	84.0167	10.5021
109.5021	109.4979	84.0199	10.5025
109.4979	109.4975	84.0202	10.5025
109.4975	109.4975	84.0202	10.5025
109.4975	109.4975	84.0202	10.5025



جدول 2: تکرارهای دستی با ولتاژ باتری 105 ولت

Trial Inverter Volts	Calculated Inverter Volts Equation 4	Calculated Inverter Current Equation 4	Calculated Cable Voltage Drop
115	95.0000	96.8421	12.1053
95.0000	92.8947	99.0368	12.3796
92.8947	92.6204	99.3302	12.4163
92.6204	92.5837	99.3695	12.4212
92.5837	92.5788	99.3748	12.4218
92.5788	92.5782	99.3755	12.4219
92.5782	92.5781	99.3756	12.4219

معادلات مطرح شده را می توان بگونه ای دستکاری نمود؛ که محاسبه ولتاژ در

یک مرحله صورت بگیرد.

معادلات و مراحل را می توان برای بارهای مقاومتی نیز بکار برد. جریان بار

مقاومتی با کاهش ولتاژ، کاهش می یابد. به این مسأله در بازنویسی معادلات باید

توجه نمود.

ب) افت ولتاژ چند مداره

معادلات و تکنیک های ارائه شده، تنها برای حل یک مدار منفرد بکار رفتند، این روش برای حل شبکه های بزرگ پرزحمت می شود. تکنیک های پخش بار و معادلات حل سیستمهای ac را می توان با مدارهای dc، وفق داد. این تکنیک ها بطور اتوماتیک اثرات ولتاژ را بر توان و بارهای مقاومتی، محاسبه می کنند، و از روش های تکراری برای همگرا شدن به یک جواب، استفاده می کنند. یک رساله کامل برای چگونگی ساختن صفحه گسترده برای پیاده سازی این تکنیک ها در ماورای وسعت این مقاله قرار دارد، اما، نکات برجسته مورد بحث قرار گرفته اند.

روش گاوس-سایدل [1] را می توان برای محاسبات تکراری بکار برد. تکنیک های پر سرعتی وجود دارد، اما پیاده سازی آنها برای صفحه گسترده، مشکل می باشد. در [1]، معادله عمومی برای باس ولتاژ با معادله ۵، داده شده است. عدددهای موهومی تنها برای تحلیل ac، بکار می روند. حذف این عناصر، معادله ۶، را بدست می دهد.

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (5)$$

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k}{V_k} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (6)$$

که  $V =$  ولتاژ،  $Y =$  ادمیتانس،  $P =$  توان،  $k =$  شماره باس،  $N =$  تعداد کل باسها و  $n = 1, \dots, N$  می باشد.

در [3]، جزییات لازم برای تشکیل ماتریس ادمیتانس ( $Y$ ) ارائه شده است. یک کاربر پیشرفته می تواند این معادلات و ماتریس ها را در یک صفحه گسترده، برای حل شبکه های بزرگ وارد کند. نویسنده، شبکه ای را با ۳۳ باس، با این تکنیک ها حل نموده است.

ج) محاسبات جریان خطا

هنگامیکه محاسبات پخش بار انجام شد، محاسبات جریان خطا، می تواند انجام شود. در [2]، یک ماتریس  $Z$  با معکوس گیری از یک ماتریس  $Y$  ایجاد شده است. این به عنوان یک تک فرمان در اغلب برنامه های صفحه گسترده، فراهم می شود. عناصر قطری نشان دهنده امپدانس معادل تونن، در باس هستند. پس از محاسبه ولتاژها و امپدانس های معادل، جریان های خطا را می توان به وسیله قانون اهم ( $I_F = V_{bus} / Z_{thevenin}$ ) محاسبه نمود.

## نتیجه گیری

ضرورت محاسبه و لتاژها برای محاسبات dc، شرح داده شد. سپس یک روش برای حل کامپیوتری برای مدار منفرد و شبکه های چند مداره، گسترش داده شد. سپس جزئیات محاسبات خطا، داده شدند.

طراحی خوب سیستم dc، اهمیت حیاتی دارد. هزینه تجهیزات، داده و مدت از کار افتادگی<sup>۲۱</sup> تجهیزات تغذیه شونده به وسیله سیستم dc، اغلب چند برابر هزینه سیستم dc به تنهایی می باشد. برای طراح استفاده مناسب از ابزارهای کامپیوتری تحلیلی، مهم است. ابزارهای تحلیلی کامپیوتری، باید برای ایجاد یک توازن بین طرح محافظه کارانه و قیمت ها بکار روند.

<sup>21</sup> Downtime

## مراجع

- [1] William D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, McGraw Hill Book Co., 1982, pp. 194-196.
- [2] William D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, McGraw Hill Book Co., 1982, pp. 261-266.
- [3] IEEE std 399-1990, IEEE Recommended Practice for Power System Analysis, IEEE Press, 1990, pp. 125-130.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

بخش سوم:

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

مقالات کنترل فرکانس

مدل سازی کنترل فرکانس در یک سیستم مجزا

چکیده

عملکرد روز به روز یک سیستم قدرت مجزا از خیلی جهات به طور قابل ملاحظه

ای با یک شبکه بزرگ به هم پیوسته فرق می کند. به طور ویژه، کنترل فرکانس

سیستم در سیستم های ایزوله شده، دارای مشکلات تکنیکی می باشد که در

بعضی از مواقع حجم آنها بزرگتر از مشکلاتی می باشد که در سیستم های بزرگ به هم پیوسته تجربه شده است. کنترل فرکانس سیستم همچنین باید در مقیاس های کوچک زمانی انجام شود. سیستم تأمین الکتریسیته ایرلند<sup>۲۲</sup>، یک چنین سیستمی است و تعدادی از مسائل عملکردی آن در این مقاله بیان شده است. به طور ویژه، رگولاسیون فرکانس و کنترل اولیه فرکانس، آدرس دهی شده اند. مدلسازی وقایع سیستم مورد بررسی قرار می گیرد و از لحاظ ساختارهای بازاری جدید، بحثی در مورد فرضیات مهم ارائه می شود.

کلید واژه: سیستم های قدرت مجزا، کنترل فرکانس

مقدمه

برای مدت زمانی این گونه تصور می شد که ارتباطی قوی بین فرکانس و عدم تعادل مگاوات در سیستم های قدرت وجود دارد [1]، که عدم تعادل مگاوات ناشی از تفاوت بین تولیدی سیستم و مصرف کلی به علاوه تلفات انتقال می باشد. اگر تقاضا افزایش یابد، فرکانس سیستم می افتد مگر اینکه توسط یک سیستم انطباق دهنده، تولید افزایش یابد، نرخ تغییر فرکانس تابعی از اینرسی سیستم می باشد، اگر اینرسی سیستم بزرگ باشد نرخ تغییر فرکانس کوچک تر می شود. در شبکه های به هم پیوسته ی بزرگ، نگهداری فرکانس سیستم در بین محدوده

<sup>22</sup> Electricity Supply Board of Ireland



هایی محکم، نسبتاً قابل دسترسی آسان می باشد. چنین امری ناشی از حضور تعداد زیادی از مولد های حاضر در شبکه می باشد و اینرسی موجود سیستم توانایی تحمل هر تغییری در تقاضا را دارد. در سیستم های قدرت مجزا، با تعداد مولدهای کم، کنترل فرکانس آسان نیست.

سیستم تأمین الکتریسیته (ESB) ایرلند، یک چنین سیستم مجزایی می باشد. در این مقاله به تعدادی از ملاحظات عملی اشاره می شود و تأکید خاصی بر کنترل فرکانس می شود.

مدلسازی و شناسایی رفتار سیستم در پی فقدان یک مولد مورد بررسی قرار می گیرد و مشخصات برجسته شرح داده می شوند. از اینها، شایستگی و ارزش کنترل فرکانس اولیه، از لحاظ ساختار های بازاری جدید مورد بحث قرار می گیرند

#### سیستم تأمین الکتریسیته

در جمهوری ایرلند، ESB مسئول نقشه بندی، طراحی، ساخت و عملیات تعمیر کردن سیستم های الکتریکی می باشد. فرکانس نامی سیستم 50Hz می باشد. در حال حاضر، پیک تقاضا 3400MW و تولید سالانه 20000Gwh می باشد. در سیستم ESB بیش از 60 مولد نصب شده است، اگر چه عموماً 40 واحد بر

حسب نیاز با یکدیگر کار می کنند. سوخت نیروگاه ها شامل انواع مختلفی از قبیل: زغال سنگ، نفت سنگین، گاز و زغال سنگ نارس می باشد. همچنین، رنج وسیعی از تکنولوژی های تولید وجود دارد: گرمایی / بخاری معمولی، توربین احتراق حلقه باز<sup>۲۳</sup> (OCCT)، توربین احتراق سیکل - ترکیبی<sup>۲۴</sup> (CCGT)، ایستگاه های ذخیره هیدروپمپ<sup>۲۵</sup>. همه تأسیسات گاورنرشان دارای مشخصه **droop**، 4% می باشد [2]. اما، عموماً سیستم های گرمایی و تعدادی از سیستم های پیشرفته هیدرو، حوزه وسیعی از رگولاسیون سیستم را انجام می دهند. مولد کنترلی اتوماتیک هم وجود دارد. نقاط کار<sup>۲۶</sup> واحد، بوسیله عملکرد اپراتور در مرکز کنترل ملی<sup>۲۷</sup> تأیین می شود.

در 1995، ESB با سرویسهای الکتریسیته ایرلند شمالی<sup>۲۸</sup> (NIE)، اتصال یافت که این مسأله موجب سیستم ترکیبی با پیک بار  $4500 MW$  گردید. این مسأله موجب افزایش تعدادمولد های پاسخ دهنده به عدم تعادل  $MW$  در شبکه شد و همچنین اینرسی کلی سیستم را افزایش داد. این نکته موجب کاهش افت فرکانس سیستم بعد از وقوع هر پیشامد برای ژنراتوری، گردید. در اواسط 1980، مجموعه های حریق زغال سنگی گرمایی با توانایی  $305 MW$ ، بزرگترین مجموعه

<sup>23</sup> open-cycle combustion turbine

<sup>24</sup> combined-cycle combustion turbine

<sup>25</sup> hydro and pumped storage station

<sup>26</sup> set points

<sup>27</sup> National Control Centre

<sup>28</sup> Northern Ireland Electricity services

های حاضر در شبکه بودند که می توانستند تا 40% مزاد بر تولیدشان را در شرایط کم باری سیستم، ارائه دهند. این نکته به عنوان مهمترین حوزه دخالت شناخته شده بود و در آن زمان "ابتکار"<sup>۲۹</sup> مأمور بهبود بخشیدن پاسخ سیستم در پی فقدان یک مولد بود. این ابتکارات امروزه نیز وجود دارند و شامل موارد زیر هستند:

- استفاده از تکنیک هایی برای مینیمم کردن پدیده کمبود تولید در سیستم. برای نمونه **fast-wind down** در بعضی از سیستم های بزرگ شناخته شده بود و واحد به طور مستقیم برای یک بویلر یا خطای کمکی، تریپ<sup>۳۰</sup> داده نمی شود.
- انعقاد قراردادهایی با بعضی از مشتریان تحت عنوان "interruptible"، مقدار تعرفه این ها برای عدم پیوستگی در فرکانس های بالا، نسبت به تعرفه استاندارد کمتر می شد.

- بهبود پاسخ منابع رزرو به وسیله اصلاح گاورنر، پاسخ فعال شونده با زیر فرکانس و نرخ تغییر فرکانس و کاهش ولتاژ.

<sup>29</sup> initiative

<sup>30</sup> trip

• به کار گیری پاسخ های کنترلی خاص زیر فرکانسی و مد های عملکرد در سیستم های ایستگاه های ذخیره ای پمپی (pumped storage station)

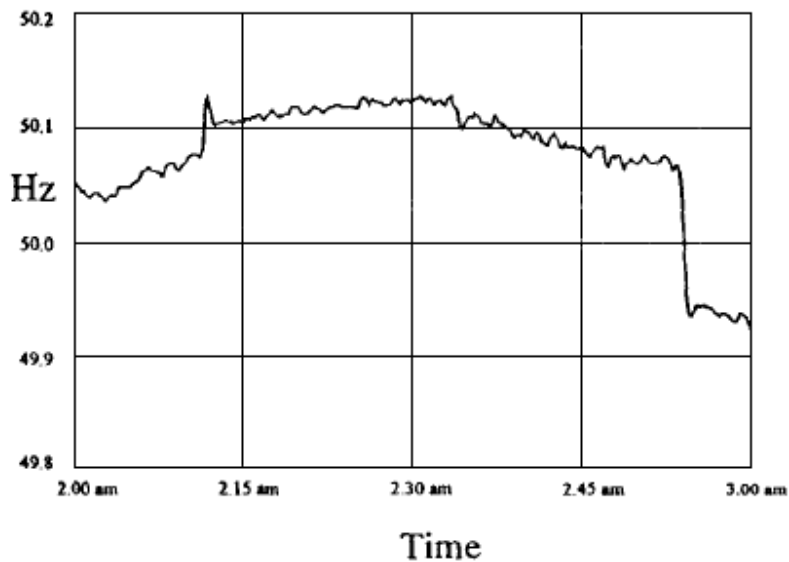
این گونه ابتکارات به کنترل فرکانس کمک می کنند. این کنترل به دو گونه تقسیم می شود: پاسخ به تغییرات کوچک در تقاضا، رگولاسیون و پاسخ به عدم تعادل MW بزرگ، کنترل فرکانس اولیه.

#### رگولاسیون

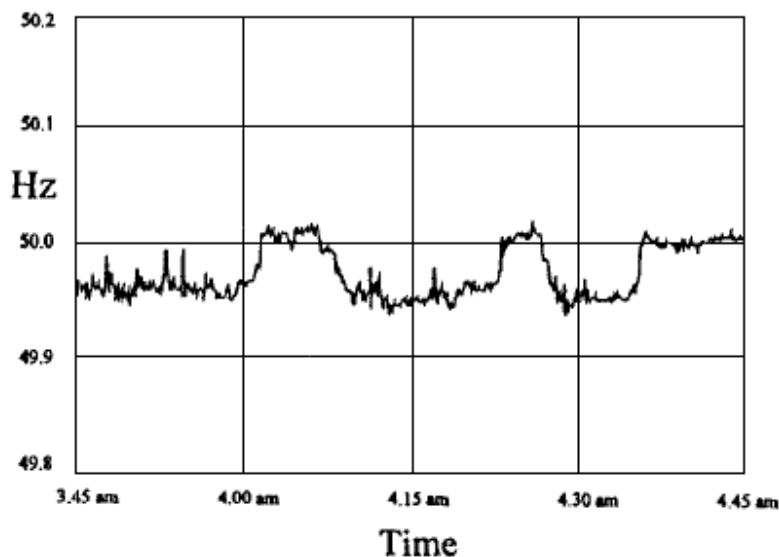
توانایی سیستم های قدرت مجزا در برقراری کنترل خوب فرکانس، مانند آنچه که در شبکه های بزرگ به هم پیوسته از لحاظ اقتصادی انجام می شود، به صورت تکنیکی، شدنی نیست.

در ESB، این نکته (کنترل فرکانس)، به وسیله اجازه دادن به فرکانس برای ماندن در یک محدوده عملکرد نرمال بین  $50.15\text{Hz}$  و  $49.85\text{Hz}$  شناخته شده است، اگر چه کنترل دقیق تر نیز معمولاً قابل دست یابی می باشد. تغییر  $0.1\text{Hz}$  در یک ثانیه برای فرکانس، پدیده ای معمولی می باشد. این ناشی از بار گیری (یا خارج شدن از مدار) یکی از واحد های ذخیره ای پمپی  $73\text{MW}$  یا یک کوره ی قوس الکتریکی  $55\text{MW}$  می باشد. این پدیده، مخصوصاً در تعطیلات یا در شب شایع می باشد. شکل های ۱ و ۲ رفتار نوعی فرکانس را هنگامیکه یک پمپ بار گیری می

شود و هنگامیکه کوره قوس الکتریکی خاموش و روشن می شود، را به ترتیب نشان می دهند.



شکل ۱: منحنی تغییر فرکانس هنگامیکه ایستگاه ذخیره ای پمپی بارگیری می شود



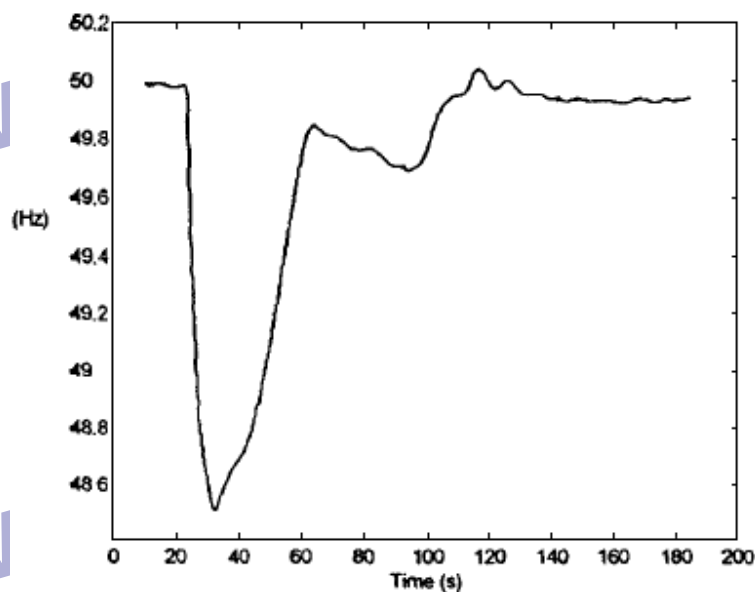
شکل ۲: منحنی فرکانس ناشی از اثر کوره قوس الکتریک

جدای از این گونه پدیده ها، از مقدار نامی  $50\text{Hz}$ ، فرکانس تغییرات کمتری از دیگر وقایع دارد. این ناشی از ماهیت اتفاقی بودن تقاضا می باشد. کنترل دقیق تر پدیده تغییر فرکانس، به وسیله عملکرد کنترل اتوماتیک تولید قابل دست یابی می شود، اما این در سیستم ESB محدود می باشد.

کنترل فرکانس اولیه

در سیستم ESB، عدم حضور هر کدام از مولد های بزرگ، موجب مشکلاتی جدی در فرکانس سیستم می شود. این افت به سرعت اتفاق می افتد و افت فرکانس بین ۳ الی ۷ ثانیه طول می کشد. به واسطه ارتباط داخلی با NIE، انحراف فرکانس ناشی از کانتینجنتی<sup>۳۱</sup> به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. ولی، برای خروجیهای ژنراتور های چند گانه، احتمال کاهش فرکانس تا  $48.5\text{Hz}$  وجود دارد. قبل از ارتباط، فقدان یک واحد بزرگ جداگانه، می توانست موجب کاهش فرکانس تا  $45.5\text{Hz}$  شود، همان طور که در شکل ۳، نشان داده شده است. در این فرکانس، تعدادی از تعرفه های استاندارد و همه مشتریان بدون وقفه، از سیستم قطع می شوند. این، فرکانس را قادر می سازد تا مقدار  $49.8\text{Hz}$  بازیابی شود. ولی، به واسطه کمبود انرژی ذخیره

<sup>31</sup> contingency



شکل ۳: منحنی فرکانس در پی خارج شدن یک واحد  $300 MW$  از قبل متصل شده شده در مجموعه بویلر های حرارتی، توان مولدها افت می کند. بعد از ۱۰۰ ثانیه یک واحد ذخیره ای پمپی وارد مدار شده و فرکانس را به مقدار نرمال می رساند. برای جبران کاهش تولید مجموعه های مولدی بزرگ، رزرو های عملگر اولیه به تعداد کافی مورد نیاز می باشند تا در این زمان ها، این اطمینان را ایجاد کنند که کاهش فرکانس به حدی نرسد تا ژنراتور ها به واسطه **trip** از مدار خارج شوند. این رزروهای عملگر اولیه، از پاسخ ژنراتور های **on-line**، رفتار تقاضا و جدا سازی از خط مشتریان طبق تعرفه های استاندارد و **interruptible** ساخته می شود. در بازه های زمانی که مورد نیاز **ESB** می باشد، پاسخ ژنراتور پیش غالب از رفتار گاورنر توربین ناشی می شود. عملکرد اپراتور یا کنترل ست پوینت واحد در بازه های زمانی به عنوان رزرو عملگر ثانویه می باشد. رفتار تقاضا تابعی از

فرکانس می باشد و منبعی پر ارزش از رزرو اولیه را از دو جهت فراهم می کند. نخست، در ESB تقاضا باعث افت فرکانس با نرخ تقریبی  $2.5\%/Hz$  می شود [2]. این یک پدیده حالت دائمی می باشد. ثانیاً، یک مشخصه دینامیکی وجود دارد که از افت فرکانس در مقیاس های زمانی کوچک، ممانعت به عمل می آورد. از بر طرف کردن بار<sup>۳۲</sup> برای کمک اضافه تر به جلوگیری از کاهش فرکانس استفاده می شود. مشترکان Interruptible در  $49.3 Hz$  از مدار خارج می شوند. مشترکان تعرفه های استاندارد شروع به خارج شدن از خط می شوند بین  $48.5 Hz$  تا  $48.2 Hz$ . تا کنون اتفاقی نیفتاده است که موجب کاهش فرکانس تا  $48.2 Hz$  شود. در حقیقت، به واسطه وجود ارتباط داخلی، وقوع هر گونه پدیده ای که منجر به خارج شدن تعرفه های استاندارد شود، اساساً کاهش یافته است.

#### مدلسازی کنترل فرکانس

یک فرضیه بحرانی در شبیه سازی هر نوع رفتار سیستمی در مدل نهایی مد نظر می باشد. این به طور واضح از طبیعت مدل به کار رفته تجاوز می کند، همچنین از سطح جزئیات و مقدار پارامترهای اصلاحی مورد نیاز. یک پروژه [3]، در اوایل ۱۹۸۰ برای مدلسازی رگولاسیون فرکانس در ESB با استفاده از توسعه مدلسازی

<sup>32</sup> Load shedding



استفاده از جعبه سیاه  $ARMA^{33}$  ( میانگین متحرک واپس رو اتوماتیک ) انجام شده است. این نیاز به پارامتر های اصلاح شده مهم و تست ژنراتورها نیاز دارد. متأسفانه، اکنون ساده سازی تست توسیع یافته مولدها و مدل‌های جعبه سیاه مشخص شده مشکل است؛ یعنی آنها برای سیستم جاری معتبر نیستند. بیشتر تلاش های اخیر [2,4] برای معین کردن رفتار فرکانس سیستم در صورت فقدان یک مجموعه ژنراتور معین انجام شده است که در آنها از مدل‌های دینامیکی مناسب که شامل کنترل فرکانس های اولیه، پاسخ مولدها، رفتار تقاضا و خارج نمودن بار می باشد استفاده شده است. این مدل‌های بنیان فیزیکی دارند و می توانند به طور کافی با تست تعدادی از ژنراتورها تعیین شوند. ولی، دو فرض ساده کننده مهم وجود داشته اند به منظور اینکه مدل سیستم را معتبر سازند که ممکن است برای سیستم های بزرگ به هم پیوسته معتبر نباشند. نخست، از نوسان داخلی ماشین صرف نظر می شود.  $ESB$  یک سیستم قدرت مش گونه بزرگ، با خطوط انتقال کوتاه می باشد. از این رو راکتانس مؤثر بین مولدها کوچک می باشد. این، گشتاورهای سنکرون کننده را در مقایسه با سیستم های مشابه با خطوط انتقال بلند مستحکم تر می کند و منجر به جزئی شدن نوسان داخلی ماشین حتی در شرایط اغتشاشات بزرگ سیستمی می شود. فرض دوم، نادیده

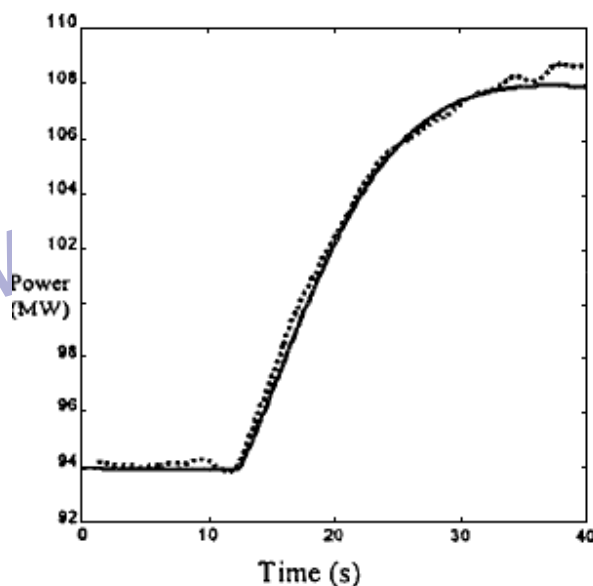
<sup>33</sup> Auto Regressive Moving Average

گرفتن تغییرات تقاضا ناشی از انحرافات ولتاژ در مقایسه با تغییرات تقاضا ناشی از فرکانس بود. این فرض در مورد سیستم های مجزا قابل اعمال می باشد زیرا تغییرات فرکانس بزرگ بوده به حدی که در هر باسی از سیستم دیده می شود. تغییرات ولتاژ، که بزرگ باشند، عموماً فقط اتفاقاتی محلی را ایجاد می کنند که در نتیجه آن یک مولد خارج می شود. از این، تغییرات تقاضا ناشی از فرکانس در حین اغتشاشات جدی سیستمی بر تغییرات ولتاژ غلبه می کنند. با به کار بردن این دو فرض، مشخصات برجسته مدل سیستم در زیر تشریح می شوند.

الف. مولد

کار توسعه یافته در مدلسازی مولد در این نوشته موجود می باشد و اساس آن روش بنا نهاده شده در اینجا می باشد [5,6,7,8]. اولاً، هنگامیکه از پدیده های ولتاژ اغماض شده است فقط مشخصه های مکانیکی واحد مد نظر قرار گرفته اند. ابتدا، با این نکته مواجه شد که دینامیک توربین و گاورنر برای عملکرد صحیح کفایت می کنند. ولی از شبیه سازی معلوم شده است که دینامیک بعضی از بویلر های ساده برای فراهم نمودن پاسخ صحیح لازم می باشد، برای اغلب ۳۰ ثانیه که یک کانتینجیسی را منجر می شود. بنای این مدل از مدل های استاندارد توسعه یافته در [5] استفاده می کند که از دینامیک ساده بویلر بدست آمده است [6]. این مدل به عنوان مدل مناسبی شناخته شده بود، با انتخاب پارامتر های مناسب،

برای مدل‌سازی هر دو سیستم اولی مشخصه های طبلی شکل واحد (شکل ۴) کارهای اضافی مدل مولد را بسط داده اند که در حوزه زمانی دقیقه این مشخصه ها و دینامیک معتبر باشد [9]. اگر چه عملکرد عالی در مدل‌سازی عملکرد مولد می تواند بدست آید اما لازم نیست منجر به شبیه سازی فرکانس بهتر شود. این به واسطه عملکرد اپراتور می باشد که در این بازه های زمانی شایع می باشد و پیش بینی آن مشکل می باشد. روندی مشابه در مدل‌سازی هر دوی توربین های گازی و هیدرو انجام شده است. ابتدا از یک مدل جزئی



شکل ۴: پاسخ واحد در حین یک system contingency، شبیه سازی (توپر)

در مقابل واقعی (خط تیره)

توربین های گازی استفاده شده است [7]. اما، به واسطه ثابت های زمان کوتاه مورد نیاز مدل، در مقایسه با دیگر ثوابت در شبیه سازی کلی سیستم، فهمیده

شد که استفاده از یک مدل شیب ساده کفایت می کند. این موجب کاهش زمان محاسبه مورد نیاز و فراهم نمودن یک شبیه سازی به حد کافی دقیق می شود. شبیه سازی های هیدروتوربین از یک مدل ژنریک<sup>۳۴</sup> استفاده می کند. اساس این شبیه سازی مشخصه های سیستم غیر مینیمم فاز می باشد [1,8] که جزو ذاتی این ماشینها می باشد. این برای شبیه سازی مهم می باشد چرا که تأثیر مهمی در فرکانس سیستم دارد.

#### ب. تقاضا

مدلسازی رفتار مولد، که در شبیه سازی فرکانس سیستم مهم می باشد، تنها جزئی از مشخصه های دینامیکی کلی را در بر می گیرد. رفتار تقاضا عامل مهمی می باشد. متأسفانه، نوشته نشان می دهد که کارهای کمی در مدلسازی بار در مقایسه با مولدها صورت گرفته است. علت این مسأله مشکلات موجود در بدست آوردن مدل مناسبی برای بار در شبیه سازیهای سیستم می باشد [10]. این مشکلات شامل ماهیت تصادفی بار، تعداد گره های بار در سیستم و فقدان اطلاعات کامل در مورد بار می باشد. مشخصه های دینامیک نیز باید در نظر گرفته شوند، چرا که مدل های استاتیک منجر به ایجاد اشتباهات زیادی در شبیه سازی ها می شوند که انحراف فرکانسی بزرگی را در پی دارد [11]. مدل بار که

<sup>34</sup> generic

اکنون پی برده شده در ESB مفید است، جلوه های کلی تقاضا را مشخصه بندی می کند. مدل [12] بدست آمده شده بر اساس در نظر گرفتن خواص مقاومتی و راکتیو بار موتوری می باشد.

مدل توان حقیقی بار را به عنوان تابعی از تغییرات فرکانس در سیستم  $(\Delta f)$ ، مشخصه بندی می کند:

$$\Delta P_{Load} = \frac{k_{pf} + T_{pf} s}{T_i s + 1} \Delta f \quad (1)$$

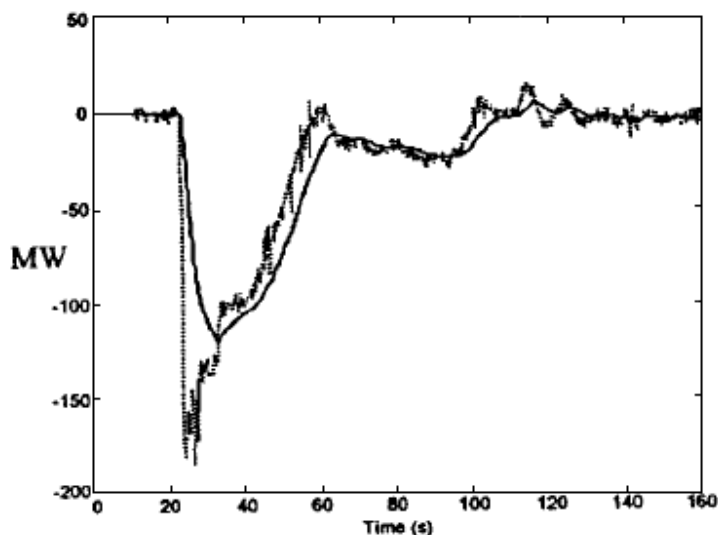
که  $\Delta P_{Load}$  تغییرات تقاضا (MW)،  $T_i$  ثابت زمانی تقاضا ( $Hz^{-1}$ )،  $k_{pf}$  مشخصه های رفتار حالت مانای تقاضا ( $MW/Hz$ ) و  $T_{pf}$  مشخصه دینامیکی تقاضا ( $MW/Hz^2$ ) می باشد. این مدل ساده سازی شده از قبل شناخته شده بود که کافی است با اصلاحات مناسب برای پیش بینی رفتار تقاضای سیستم تا حدود ۳۰ ثانیه که یک کانتینجنتی را نیز شامل می شود. یاد آوری این نکته که مشخصه های دینامیکی تقاضا نقش مهمی را ایفاء می کند، مهم است. برای یک افت ناگهانی در فرکانس، کاهش تقاضا بزرگتر از حالتی است که به وسیله یک مدل کاملاً حالت مانایی، پیش بینی می شود. متشابهاً، اگر فرکانس جبران تقاضا را کند این جبران با یک نرخ بزرگتری از یک پیش بینی حالت مانا می باشد. شکل ۵، پاسخ پیش بینی شده با یک مدل کاملاً حالت مانای تقاضا (توپر) و پاسخ پیش بینی شده که شامل مشخصه های دینامیکی نیز می باشد (خط تیره) را نشان می دهد.

ج. سیستم متصل کننده

برای ساختن یک مدل سیستم، یک سیستم متصل کننده مورد نیاز می باشد. این

به وسیله در نظر گرفتن یک رابطه مستقیم بین تغییر انرژی جنبشی سیستم با

تغییر توان خالص بدست می آید [1,4]، که با عملیات ریاضی داریم:



شکل ۵: اطلاعات شبیه سازی با بکاربردن مدل دینامیکی (خط تیره) در مقابل

مدل حالت مانا (توپر) تقاضا

$$\frac{d}{dt} \Delta f \approx \frac{f_0}{2W_{kin0}} (\Delta P_{gen} - \Delta P_{load}) \quad (2)$$

که  $W_{kin0}$  انرژی جنبشی اولیه مولدها می باشد که از جزئیات مجموعه های on-

line در هر لحظه بدست می آید،  $f_0$ ، فرکانس اولیه سیستم و  $\Delta P_{gen}$  تغییر در

خروجی مولد است.

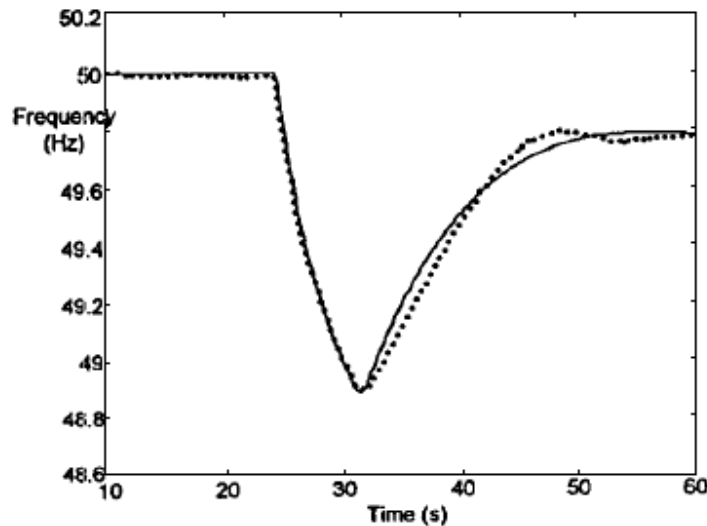
د. شناسایی پارامترها و تأیید مدل

در مدلسازی سیستم، طراحی مدلها که ویژگی های مورد نیاز و مربوط سیستم را شبیه سازی کند، امری ضروری می باشد. همچنین قابل شناسایی شدن مدل به وسیله اطلاعات در دسترس، امری ضروری می باشد. تعدادی از ثبات های اطلاعات در مولدهای سراسر سیستم نصب شده اند. به وسیله مانتیتورینگ اتفاقات انتخابی سیستم، اطلاعات کافی برای شناسایی پارامترهای مولد برای هر مجموعه بزرگ گرمایی، جمع آوری می شود. شناسایی بار خیلی پیچیده بود. این مسأله استفاده از تست های خاص سیستم، که با عنوان تست های قفل<sup>۳۵</sup> شناخته شده اند، را اجباری می سازد [2,4]. ولی به عقیده نویسندگان، تست های خاص ضروری نمی باشند، اگر همه واحدهای مسئول در یک اغتشاش فرکانس، مانیتور شوند.

برای بدست آوردن همه دینامیک های ضروری، این نمونه برداریها باید با نرخ 10Hz یا بالاتر انجام شوند. فقط بعد از cross-validation بر عکس اطلاعات غیر قابل رویت سیستم تشخیص داده شده، مدلها می تواند به محل پاسخ ذخیره واحدها در شبکه کمک کند. شکل ۶، شبیه سازی سیستم تشریح شده در بالا را با مدلسازی خروج یک واحد گرمایی 200MW که اطلاعات اتفاقات آن برای تعیین هیچ گونه پارامتری به کار نرفته را نشان می دهد. به وسیله تأیید مناسب مدل

<sup>35</sup> Lock tests

سیستم، می توان از آن به عنوان یک ابزار واقعی برای تشریح ساختار های جدید بازار استفاده کرد.



شکل ۶: فرکانس واقعی (توپر) در مقابل شبیه سازی (نقطه چین) برای خروج یک واحد گرمایی  $200 MW$

ملاحظات برای یک بازار جدید

یک پیشنهاد قانونی برای پیاده سازی E.U. electricity به طور مستقیم در ایرلند در ۱۹۹۸ چاپ شد [13]. آن با یک سیستم تجاری ساده که ابتدا تأسیس خواهد شد، مواجه شد. اگر بازار برق این سیستم تجاری را شامل شود باید به طور

گسترده تری گسترش یابد.



عموماً، در واحدهای مجتمع عمودی، واحدها باید برای برطرف نمودن تقاضا، با یکدیگر عمل پخش کردن را انجام دهند. مشکل برنامه متمرکز بر کمپنه کردن هزینه مولدهای تأمین کننده بار در معرض قیودات عملی می باشد. سرویس ها کمکی از قبیل کنترل فرکانس هزینه مشخصی در ارتباط با آنها ندارند [14]. اگر یک تأمین کننده انرژی به طور انحصاری عمل کند، پخش کننده ها توانایی خود را در تعیین خروجی مولد برای اجرای کنترل فرکانس امتحان می کنند. در بازار های جدید، این وضعیت چندان معتبر نمی باشد [15]. در گذشته بازارهای کوچکی وجود داشتند که کنترل فرکانس نیز می کردند اما اکنون، بازارها برای این فعالیتها، گسترش یافته اند [16] و عمل پخش بار کردن سیستمها بر اساس عرضه و به مزایده گذاشتن خرید و فروش این سرویس ها می باشد [17].

هزینه های سیستم مرتبط با کنترل فرکانس آشکار نیستند و در محدوده 4% الی 8% کل هزینه عملیاتی سالانه تخمین زده می شوند [18]. این هزینه ها شامل هزینه های واحد و هزینه های عملکرد سیستم می باشند. هزینه های واحد که مرتبط با هزینه های عملکردی واحد هستند کار آیی کمتری برای فراهم کردن ظرفیت رزرو دارند. هزینه های عملکرد سیستم هنگامیکه تولید به وسیله یک واحد ارزان ( که ظرفیتی را برای کنترل فرکانس فراهم می کند ) انجام نشده و به یک واحد خیلی گران جا به جا شده، افزایش می یابد. استخراج هزینه سیستم

رزرو به عنوان متغیری دو گانه از یک مسأله بهینه سازی، امکان پذیر است [19].  
حل بهینه، رزرو را تنها تا نقطه ای افزایش می دهد که هزینه افزایش سیستم<sup>۳۶</sup>  
برای MW رزرو بعدی از مقدار اختصاص داده شده برای خطا تجاوز کند به منظور  
اینکه نیاز های بار را فراهم کند یعنی مقداری که در نبود بار است [20,21].  
هزینه های ژنراتورهای جداگانه برای فراهم کردن کنترل فرکانس شامل فرصتهای  
برای هزینه می شود، که هزینه های نیروگاه ها را افزایش داده و راندمان را پائین  
می آورد.

هزینه های شانسی کاهش در آمد را در خود دارند چرا که یک واحد در خروجی  
کمتری به منظور فراهم کردن سیستم رزرو، وارد عمل پخش بار می شود. قبلاً  
پیشنهاد شده بود [22] که هزینه های رزرو باید به دو قسمت هزینه های شانسی  
و هزینه های انرژی واقعی ذخیره شده، تقسیم شود. ممکن است، رزرو ذاتی در  
تعهد سیستم وجود داشته باشد [20] در این حالت هیچ گونه هزینه شانسی در  
ثانیه وجود ندارد اما مولدها هنوز به تعدادی از محرک های مالی نیاز دارند که  
گاورنرشان را برای جبران سازی افزایش هزینه های نیروگاه که ناشی از تغییر  
خروجی برای رگولاسیون فرکانس سیستم می باشد، قفل نکنند. در نروژ، به  
مولدهای فراهم آورنده رزرو اولیه در صدی از قیمت ساعت برای ظرفیت ذخیره

<sup>36</sup> Incremental cost

پرداخت می شود و بازار تنظیم کننده قیمتی مرزی را برای انرژی خروجی تعیین می کند، اگر به رزرو نیاز باشد [23].

در [22]، پیشنهاد شده است که هزینه های متحمل شده به یک سیستم عملگر برای خریدن رزروها را می توان به دو طبقه تقسیم بندی نمود:

(الف) آنهایی که بوسیله پروتکل های قابل اعتماد، اداره می شوند (ب) آنهایی را که می توان به یک مشتری به عنوان تابعی از عملکرد و رفتار مشاهده شده اش، انتصاب داد. اولی به طور تمام با برنامه بار متناسب است. آنها را می توان به برنامه های دسته بندی شده ای که متناسب با برنامه های ارائه شده آن است، اختصاص داد.

اکنون تحمیلی برای هزینه ها برای همه سرویسهای کمکی که شامل کنترل فرکانس هستند، وجود دارد. سرویس های کمکی یک واحد مثلاً تولیدشان وابسته به توان خروجی آن واحد می باشد. بازار برق و سرویس های کمکی بازار از یکدیگر مستقل نیستند. این ارتباطات برای گسترش تابع هدف باید شناخته شوند [15]. یک روش خرید لحظه ای رزرو و انرژی در یک بازار تکی ترکیبی می باشد. اگر انرژی و سرویس های کمکی به طور لحظه ای در نظر گرفته شوند [22]، واحد ها باید برای جبران سازی هزینه های شانسی شان، اقدام به مزایده گذاشتن انرژی بکنند. این شبیه هزینه هاس شانسی برای رزرو در نروژ می باشد [23]. در

کالیفرنیا، بازار جداگانه ای برای انرژی و رزرو وجود دارد؛ از هنگامی که ISO از مبادلات انرژی مجزا گردید. فقط واحدهای on-line منتخب در مزایده انرژی، می توانند تحولات رزور را تأمین بکنند. این موجب مشکلاتی پیرامون بازار برق و کمبود رزور می شود [22]. چهارچوبی برای بهینه سازی آبی سود اجتماعی بازارهای برق و سرویس های کمکی بازارها، گسترش یافته است [15]. جنبه های مختلف برجسته شده اند. واحد انتخاب شده برای سرویس های کمکی بازار به واسطه پیشنهاد غیر رقابتی در عمل پخش بار، ممکن است شرکت نکند.

این مسأله می تواند به وسیله مجبور کردن مولد برای در نظر گرفتن تعهدشان برای فراهم کردن سرویس های کمکی هنگامیکه در بازار انرژی به مزایده گذاشته می شوند، حل شود.

اگر آنها در پخش بار بکار گرفته نشوند، آنها می توانند شرکت های بازاری دیگری را پیدا کنند، که موافق مسئولیت اجرای سرویس های کمکی شان باشند، یا آنها واحد را تحت هر شرایطی راه اندازی می کنند ولی به واسطه توان خروجی، دریافتی ندارند.

در حالیکه قوانین معین رزور به سادگی قابل تحقق هستند، آنها مسأله ماهیت تصادفی را تطبیق نداده و قابل اعتماد بودن جداگانه مولدها را در نظر نمی گیرند [19].

روش هایی برای در نظر گرفتن ماهیت تصادفی در یک برنامه نمونه، انجام شده است. یک الگوریتم **Lagrangian relaxation unit commitment** ، با در

نظر گرفتن ارزیابی احتمالی رزرو، بدست آمده است [19].

یکی از نقایص این روش نادیده گرفتن قابلیت اعتماد هر مولد در مراحل تعهد می باشد یعنی هیچ برتری برای واحدهای قابل اعتماد در نظر گرفته نشده است.

واحدهای غیر قابل اعتماد برای سیستم هزینه ساز هستند؛ زیرا (الف) آنها

تجهیزات لازم برای کنترل فرکانس را افزایش می دهند (ب) آنها دینامیک

فرکانس سیستم را بدتر می کنند؛ هنگامیکه تحت فشار قرار گرفته و ممکن است

نیاز به انرژی گرانقیمت برای جابجایی آنها باشد. بعلاوه نیاز به هزینه برای

ضرورت جابجایی ظرفیت های کنترل فرکانس می باشد. روشی برای در نظر

گرفتن قابلیت اعتماد مولد، ضروری می باشد. این به تعادل قابلیت اطمینان واحد

در مقایسه با هزینه واحد که به وسیله اپراتور سیستم تعیین می شود، می انجامد.

نتیجه گیری

با گسترش بازار برق در ایرلند، فراهم نمودن کنترل فرکانس اهمیت زیادی به

واسطه ماهیت جداگانه سیستم، پیدا می کند. تجربیات نشان می دهند که بازار

برق و تأمین کنترل فرکانس باید همزمان مورد بررسی قرار گیرند. این اجبار، امنیت و عملکرد کم هزینه سیستم قدرت را اطمینان می دهد.

هزینه فراهم کردن کنترل فرکانس باید با هزینه های لازم برای کمبود منبع، متوازن شود.

مدلسازی دینامیکی و شبیه سازی پاسخ فرکانسی ثابت شده است که امروزه مفید هستند و گسترش ها و دستاوردهای بیشتر باید سبب فراهم کردن ابزارهای مناسبی برای اپراتورهای سیستم شوند.

رفع ادعا  
مطالب ادعا شده در این مقاله، فقط عقیده و نظر نویسندگان می باشد و به هیچ وجه بیانگر خط مشی ها و روند عملکرد شبکه ملی ESB نیست.

## مراجع

- [1] O.I. Elgerd, *Electric Energy Systems and Theory: An Introduction*, McGraw Hill, New York, 1982.
- [2] J.W. O'Sullivan, 'Modelling and Identification of Emergency power reserve with applications to isolated power system', Ph.D.thesis, National University of Ireland, 1996.
- [3] F. McDyer, 'The economic regulation of power system frequency', Ph.D. thesis, National University of Ireland, 1986.
- [4] J.W. O'Sullivan and M.J. O'Malley, 'Identification and Validation of Dynamic Global Load Model Parameters for Use in Power System Frequency Simulations', IEEE Trans. Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 851-857, 1996.
- [5] IEEE Committee Report, *Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies*, IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol. 92, No. 6, pp. 1904-1915, 1973.
- [6] F.P. De Mello, 'Boiler models for system dynamic performance suite studies', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp.66-74, 1991.
- [7] W.I. Rowen, *Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines*, ASME 83-GT-63, pp. 865-870, 1983.
- [8] IEEE Committee, 'Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 167-179, 1991.
- [9] M.E. Flynn and M.J. O'Malley, 'A drum boiler model for long term power system dynamic simulation', IEEE Transactions on Power Systems, in press, PE 456 PWRs-0-04-1998.
- [10] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic, Performance, *Load Representation for Dynamic Performance Analysis*, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp.472-482, 1993.
- [11] E. Welfonder, H. Weber, & B. Hall, *Investigations of the Frequency and Voltage Dependence of Load part Systems using a Digital Self Acting Measuring and Identification System*, IEEE Trans on Power Systems, Vol. 4, No. 1, pp.19-25, 1989.
- [12] C.J. Lin, Y.T. Chen, C.Y. Chiou, C.H. Huang, H.D. Chiang & J.C. Wang, *Dynamic Load Models in the Power Systems Using the Measurement Approach*, IEEE trans. Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp.309-315, 1993.

- [13] Dept. of Public Enterprise, 'Legislative Proposal for Implementation of E.U. Electricity Directive 96/92 EC : consultation document', Govt. Publications, Ireland, 1998.
- [14] N.S. Rau N, 'Optimal system dispatch of a system based on offers and bids- a mixed integer LP formulation', IEEE Transactions on Power Systems, in press, Paper PE-077-PWRS-0-1-1998.
- [15] R.J. Kaye, M.A.B. Zammit and D.J. Hill, 'Co-ordinated spot and ancillary service markets to optimise power system security', Bulk Power System Dynamics and Control IV-Restructuring, August 24-28, Santorini, Greece, 1998.
- [16] S.D.N. Siddiqi, M.L. Baughman, 'Reliability differentiated pricing of spinning reserve', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp 1211-1218, 1995.
- [17] S. Hunt and G. Shuttleworth, 'Competition and choice in electricity', John Wiley & Sons, 1996.
- [18] B.H. Bakken, 'Technical and economic aspects of operation of thermal and hydro power systems', Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, 1997.
- [19] H.B. Gooi, D.P. Mendes, K.R.W. Bell, D.S. Kirschen, 'Optimal scheduling of spinning reserve', IEEE Transactions on Power Systems, in press, PE 302 PWRS-0-06-1998.
- [20] J.W. O'Sullivan, M.J. O'Malley, 'A New Methodology for the Provision of Reserve in an Isolated Power System', IEEE Transactions on Power Systems, in press, PE 474 PWRS-0-05-1998.
- [21] J. Herouard, L. Mogridge, A. Crispin, P. Bosc, G. Testud, F. McNamara, H. Von Markus, 'System and generation interaction: technical and economic implications of requirements at the interface', CIGRE Group 39 Report, 1994.
- [22] H. Singh, A. Papalexopoulos, 'Competitive procurement of ancillary services by an independent system operator', IEEE Transactions on Power Systems, in press, PE 427 PWRS-0-06-1998.
- [23] M. Gibescu, C.C. Liu, 'Optimisation of ancillary services for system security', Bulk Power System Dynamics and Control IV-Restructuring, August 24-28, Santorini, Greece, 1998.

حداقل کردن اثر اشباع غیر خطی در Ifc توربین بخار



خلاصه

در این مقاله کنترلر وظیفه بهبود پاسخ توربین بخار با حضور اشباع را انجام می دهد. در انتهای مقاله شبیه سازی ها که درستی ادعا را ثابت می کند آورده شده است.

لیست سمبلهای بکار رفته:

$T_G$	Governor Time Constant
$T_T$	Turbine Time Constant
$T_p$	Generator Time Constant
$f$	Frequency
$K$	Compensator Gain
$P_v$	Governor Output
$P_T$	Turbine Output
$R$	Speed Regulation
$P_d$	Load Demand
$K_p$	Generator Gain Coefficient
$\delta$	Small Deviations

مقدمه

یکی از مسائل غیر خطی در مهندسی کنترل اشباع محرکه ها می باشد. اشباع محرکه ها نه تنها عامل بدتر کردن پارامترهای کنترل مثل overshoots، زمان نشست است بلکه هنگامی که حلقه فیدبک در ناحیه اشباع شکسته می شود موجب ناپایداری می شود.

مسئله اشباع به قسمتهای زیر تقسیم می شود:

طراحی کنترلی که از اشباع صرفنظر شده است و سپس اضافه کردن مدل اشباع به کنترلر.

گاورنر شیرهای بخار را کنترل می کند. و بدلیل پدیده غیرخطی limiter ممکن است که خروجی کنترلر متفاوت از ورودی توربین باشد. که این محدودیت کنترل فرکانس را در یک بازه مشخص ، محدود می کند. در این مقاله هدف بر طرف کردن این مشکل می باشد که با اضافه کردن یک حلقه فیدبک این امر میسر می شود.

مدل سیستم

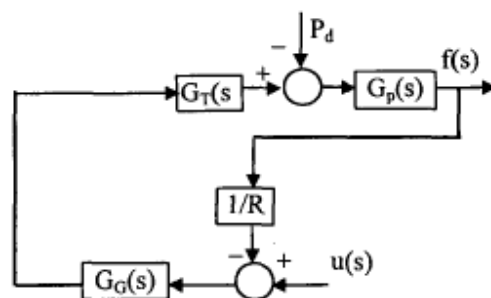
فرضهای زیر را انجام می دهیم:

- (۱) تغییرات کوچک در متغیرها موجب خطی سازی معادلات می شود.
- (۲) برای تغییرات کوچک در مصرف ، مسئله کنترل ولتاژ و کنترل فرکانس از هم مستقلند.

(۳) از دینامیک توربین صرفنظر می شود.

سیستم مورد بحث دارای تغییر کوچکی در بار در حالت کاری نرمال می باشد. بنابراین مدل خطی برای دینامیک سیستم در نظر گرفته می شود. بلوک دیاگرام

سیستم مورد بحث



در شکل ۱ آورده

شده است:

Figure1: System for LFC Study

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

معادله حالت سیستم به قرار زیر می تواند باشد:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + DP_d \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

where

A is the state matrix of dimension n by n  
B is the control matrix of dimension n by 1  
D is a constant matrix of dimension n by 1  
 $P_d$  is the load demand  
 $x(t)$  is the n by 1 state vector  
 $u(t)$  is the control input  
 $y(t)$  is the r by 1 output vector  
C is the r by n output matrix  
p is d/dt

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

در حالت steady state معادله به حالت زیر تقلیل میابد:

$$0 = Ax_o + Bu_o + DP_{d_o} \quad (2)$$

با تغییر کوچکی در بار بردار حالت و بردار کنترل ورودی تغییراتی به صورت زیر

دارند:

$$\begin{aligned} x &= x_o + \delta x \\ u &= u_o + \delta u \end{aligned}$$

بنابراین معادله ۱ به صورت زیر در میاید:

$$p(x_o + \delta x) = A(x_o + \delta x) + B(u_o + \delta u) + D(P_{d_o} + \delta P_d) \quad (3)$$

بنابراین داریم که:

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

$$\begin{aligned} p(\delta x) &= A\delta x + B\delta u + D\delta P_d \\ y &= C\delta x \end{aligned} \quad (4)$$

کنترل انتگرالی

برای بدست آوردن پایداری بیشتر در سیستم ۱، ورودی کنترل  $u$ ، که در اینجا متغیر سرعت می باشد، که دستی می باشد، از یک انتگرالگیر به جای سیستم دستی استفاده می کنیم. بنابراین یک حلقه جدید پدیدار می شود که:

$$\delta u = -K_i \delta f \quad (5)$$

که  $K_1$  ثابت انتگرالگیری است.

بنابراین داریم که:

$$p(\delta x) = A_c \delta x + D\delta P_d \quad (6)$$

توابع تبدیل در حوزه لاپلاس توربین، گاورنر، ژنراتور عبارتند از:

$$\begin{aligned} G_G(s) &= 1/(1 + sT_G), & G_T(s) &= 1/(1 + sT_T) \\ G_P(s) &= K_p/(1 + sT_p) \end{aligned}$$

بنابراین AC برابر است با:

$$\begin{vmatrix} -1/T_p & K_p/T_p & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_T & 1/T_T & 0 \\ -1/(RT_G) & 0 & -1/T_G & 1/T_G \\ -K_i & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

D برابر است با:

$$\begin{vmatrix} -K_p/T_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

C برابر است با:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

بردار حالت برابر است با:

$$\delta x(t) = [\delta f, \delta p_T, \delta p_v, \delta u]^T$$

windup (پدیده غیر خطی اشباع مربوط به limiter)

بدلیل محدودیتهای شیر بخار، وردی توربین ممکن است متفاوت با خروجی کنترلر باشد. و در بسیاری از موارد پاسخ حلقه بسته بدتر از حلقه باز می شود. با وجود این محدودیت در سیستم، سیستم به شکل ۲ تغییر میابد که دامنه

محدودیتها به شکل زیر بیان می شود:

$$w' = \begin{cases} W_{max} & ; W > W_{max} \\ W & ; W_{min} \leq W \leq W_{max} \\ W_{min} & ; W < W_{min} \end{cases}$$

برای غلبه بر این محدودیت از تابع تبدیل  $H(s)$  استفاده می کنیم:

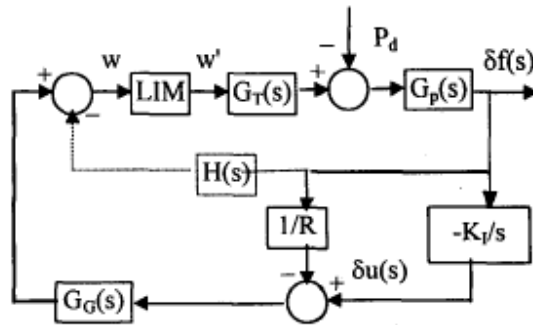


Figure 2: Compensated System

نتایج شبیه سازی

پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 T_G &= 0.08s & T_T &= 3s \\
 T_p &= 20s & K_p &= 120 \\
 K_i &= 0.25 & R &= 2.4 \text{ Hz/puMW} \\
 w_{\max} &= 0.011 & w_{\min} &= 0
 \end{aligned}$$

مقادیر ویژه سیستم عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 &-13.2566 \\
 &-0.9335 + 2.3142i \\
 &-0.9335 - 2.3142i \\
 &-0.7564
 \end{aligned}$$

که پایداری سیستم تضمین می شود. بار به اندازه ۱۰ درصد افزایش میابد. شکل ۳

پاسخ را به ازای دو حالت، اشباع و بدون اشباع نشان داده است:

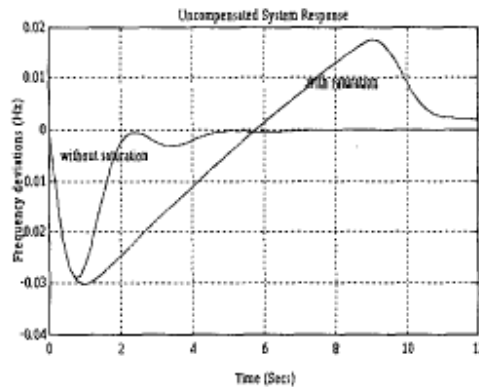


Figure 3: Uncompensated System Response

تغییرات  $W$  و  $W'$  در شکل ۴ نشان داده شده است:

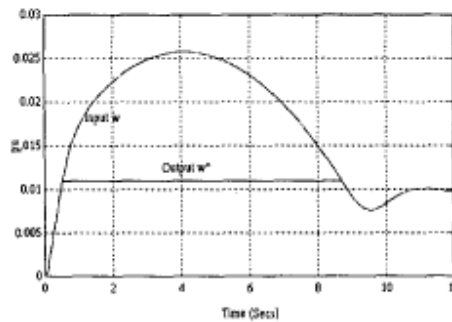


Figure 4: Magnitude Limitation Response

از شکلها پیداست که با وجود اشباع ، پاسخ بدتر از حالت بدون اشباع است. بخصوص overshoot بسیار زیادتر است. با وجود انتگرالگیر سیستم در حالت مانگار به یک حالت ثابت می رسد.

برای جبران سازی در این حالت کنترلر  $H(s)$  با توابع زیر پیشنهاد می گردد:

Controller 1:  $H_1(s) = 10s$   
Controller 2:-  $H_2(s) = 10 + 10s$

پاسخ در این حالت در شکل ۵ نشان داده شده است:

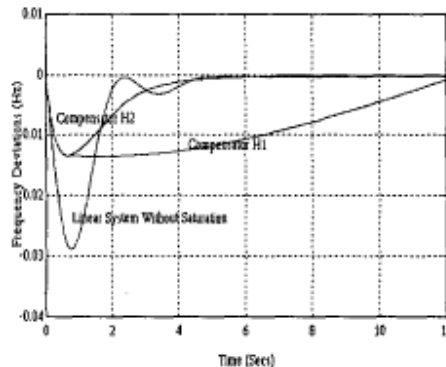


Figure 5: Compensated System Response

هر دو کنترلر overshoot را کاهش داده و تغییرات فرکانس را به صفر می رسانند. کنترلر H2 به مراتب پاسخ سریعتری نسبت به حالت خطی دارد.

شبیه سازی به وسیله نرم افزار MATLAB

در زیر نتایج شبیه سازی شده با MATLAB را می آوریم:

پارامترهای شبیه سازی به قرار زیر می باشند:

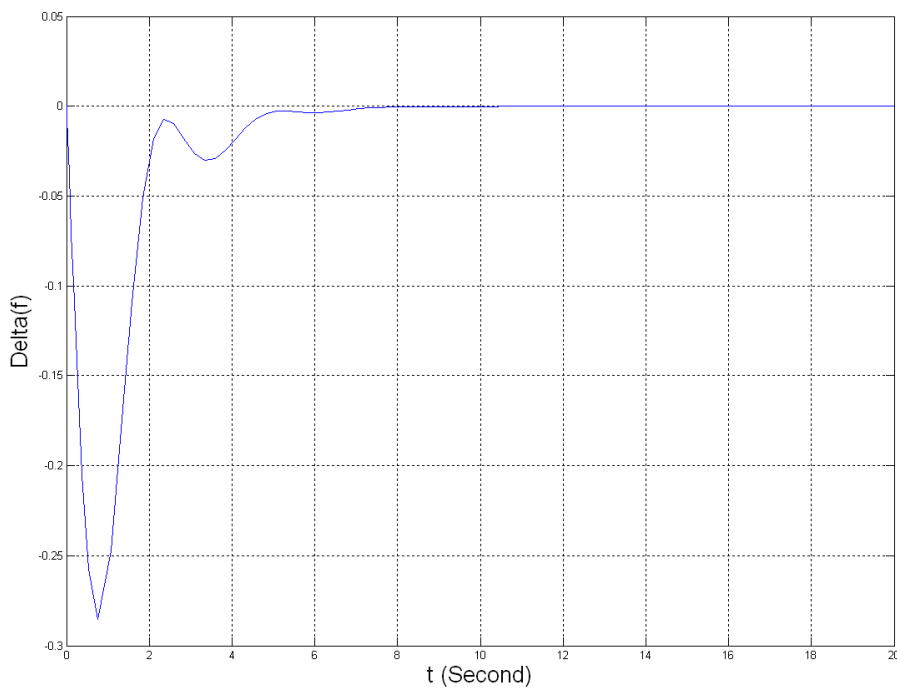
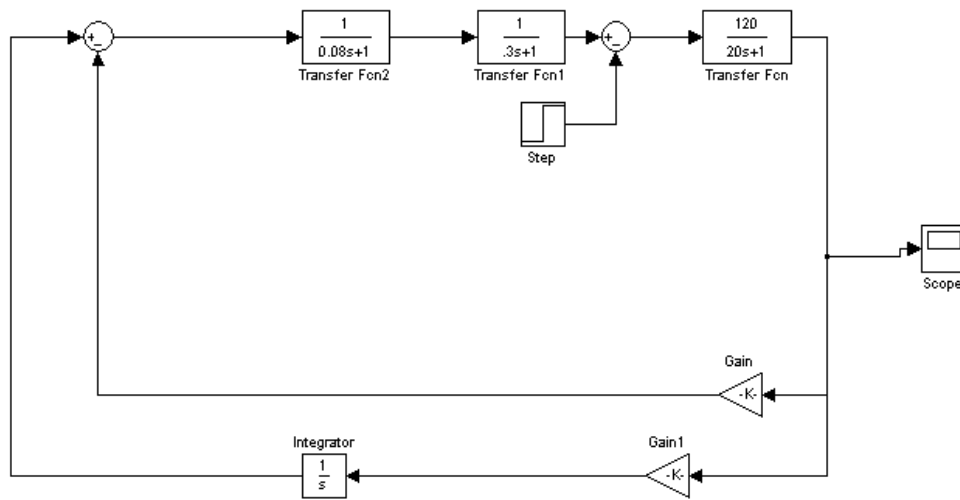
$$T_G = 0.08s, T_T = .3s, T_p = 20s, K_p = 120, \\ K_I = 0.25, R = 2.4, W_{max} = 0.11, W_{min} = 0$$

در ابتدا فرض می کنیم که limiter نداریم ( اغتشاش 10% است). در شکل‌های

زیر بلوک دیاگرام سیستم و نتایج آن با استفاده از فایل simulink ' pow\_1

آورده شده است:

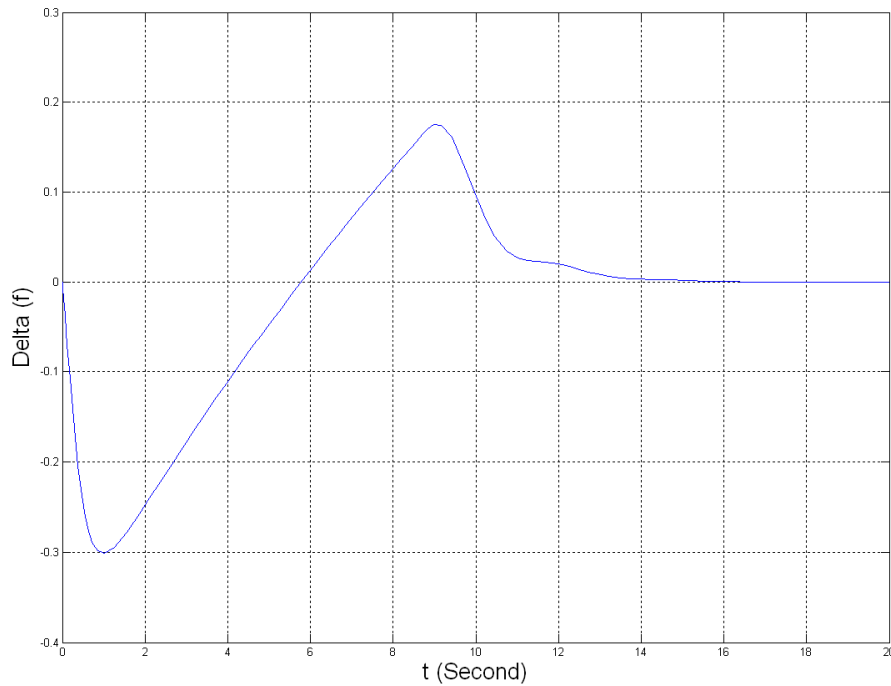
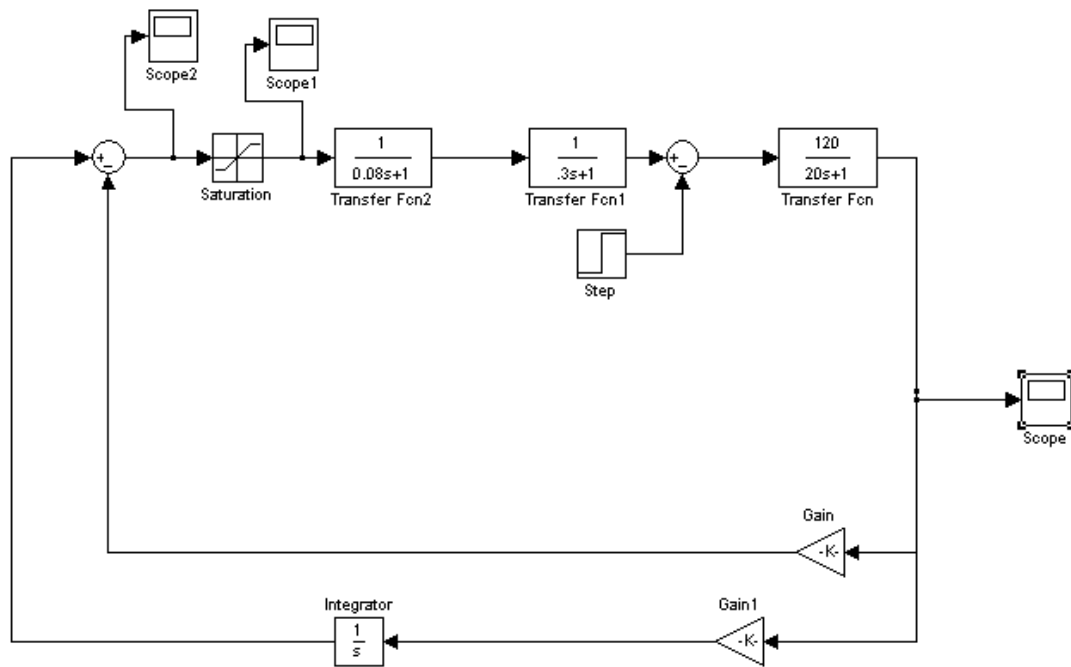




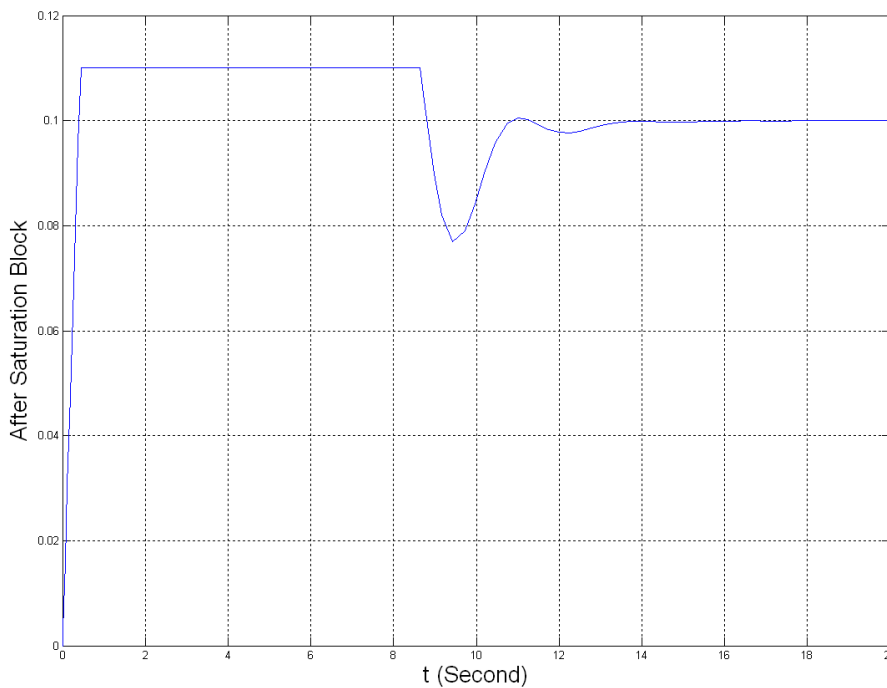
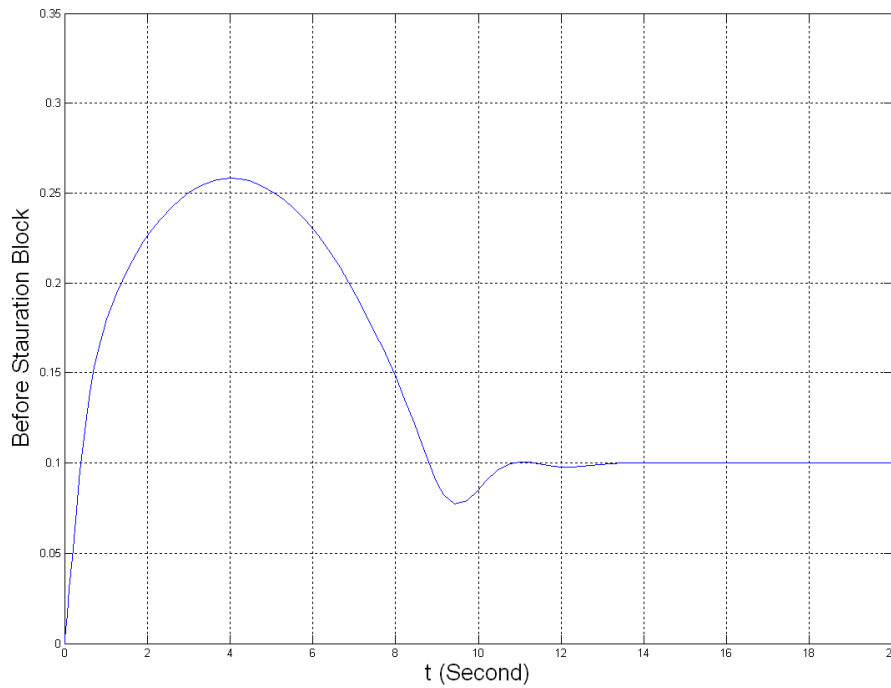
حال limiter را وارد می کنیم. با استفاده از فایل `simulink pow_2` داریم

که:

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)



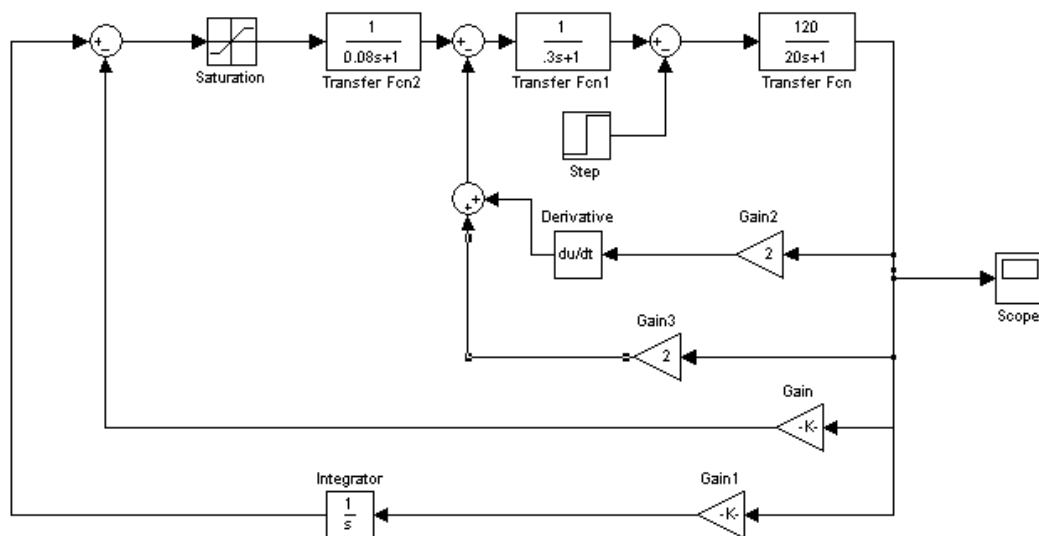
www.kandooocn.com

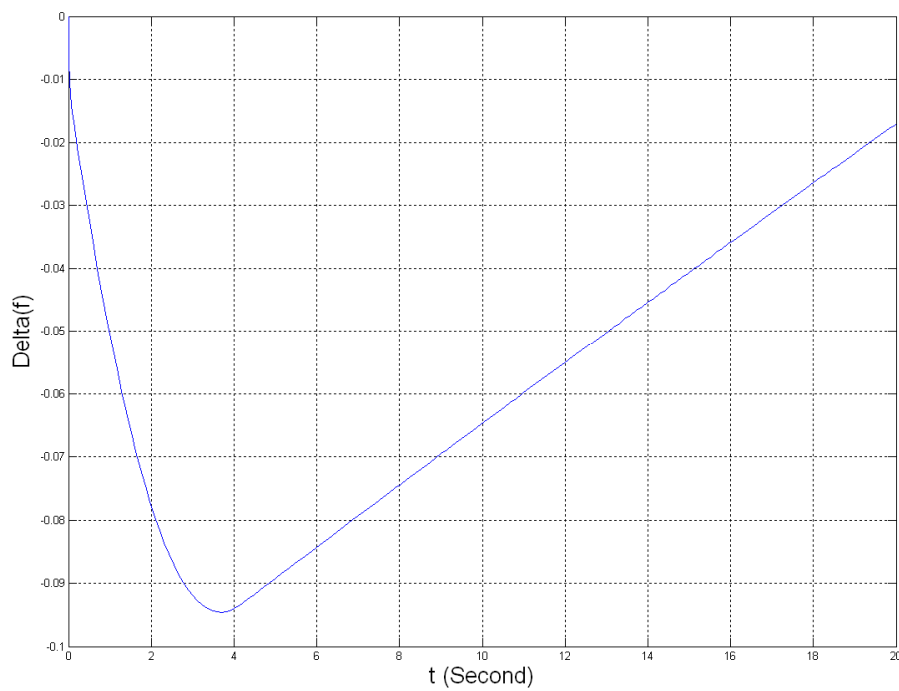


www.kandooocn.com

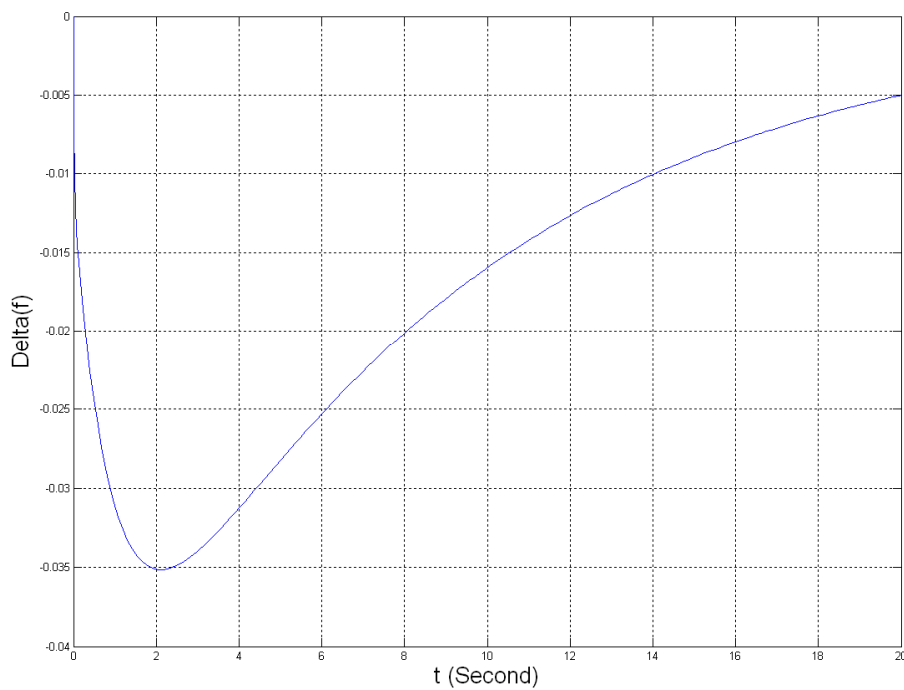
حال از دو کنترلر  $H(s)$  که یکی برابر  $2s$  و دیگری برابر  $2(s+1)$  می باشد استفاده

می کنیم. فایل `pow_3` را اجرا می کنیم:





شکل فوق مربوط به کنترلر 2s می باشد.



[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

شکل فوق مربوط به کنترلر  $2(s+1)$  می باشد.

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

Lfc غیر متمرکز در شبکه های قدرت یک پارچه

خلاصه

در این مقاله LFC غیر متمرکز را برای سیستمهای چند ناحیه ای بررسی می کنیم. از مدل های تقلیل یافته استفاده می کنیم. یک سیستم ۴ ناحیه ای را مورد بررسی قرار می دهیم. نتایج شبیه سازی درستی ادعا را ثابت می کند.

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

مقدمه

کنترل فرکانس چند ناحیه ای اصولاً کار مشکلی است. بنابراین در اینجا از این روش جدید استفاده می کنیم که به مراتب راحتتر است.

در این مقاله، این روش جدید که مبتنی بر کنترل غیر متمرکز می باشد توضیح داده می شود. از مدلهای تقلیل یافته استفاده می کنیم.

مزیت‌های این روش اینست که: (۱) توابع تبدیل سیستمهای بین ناحیه ها نیاز نیست. (۲) از هر زیر مجموعه فقط از متغیرهای حالت نمونه برداری می شود. (۳)

طراحی سیستم کاملاً سیستماتیک می باشد.

از یک سیستم ۴ ناحیه ای استفاده می کنیم و یک کنترلر فیدبک حالت اپتیمم برای آن طراحی می کنیم و مشخصات حلقه بسته را بدست می آوریم. سیستم به ۴ ناحیه مجزا تبدیل می شود. در نهایت سیستم را با حالت متمرکز مقایسه می

کنیم.

معادلات مسئله

به یک سیستم قدرت بهم پیوسته که معادله حالت آن به قرار زیر است دقت

کنید:

$$\dot{x}(t) = A^* x(t) + B u(t) + E d(t) \quad (2.1a)$$

$$\text{with } x(0) = x_0; \quad (2.1b)$$

با توجه به ماهیت سیستم قدرت ماتریسهای  $E, B$  قطری می باشند.

سیستم قدرت را به  $N$  ناحیه تقسیم می کنیم بطوریکه:

$$\sum_{i=1}^N n_i = n, \quad \sum_{i=1}^N q_i = q \quad \text{and} \quad \sum_{i=1}^N r_i = r$$

فرض می کنیم که سیستم معادله ۲.۱ کاملاً کنترل پذیر است. بنابراین فیدبک

کنترل حالت را به صورت زیر برمی گزینیم:

$$u(t) = F x(t) \quad (2.2)$$

بنابراین از روشهای جاگذاری قطب یا کنترل بهینه استفاده می کنیم. فیدبک را

طوری انتخاب می کنیم که مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته در مکانهای دلخواه

قرار گیرد و پاسخ مطلوب را به ما بدهد.

با ترکیب ۲.۱ و ۲.۲ داریم که:

$$\dot{x}(t) = A x(t) + E d(t) \quad (2.3a)$$

$$\text{with } x(0) = x_0; \quad (2.3b)$$

که در آن  $A = A^* + BF$  ماتریس حلقه بسته می باشد. حال هدف پیدا کردن

کنترلی است که با تجزیه سیستم قدرت، همان پاسخ را در حالت متمرکز به ما

بدهد.



روش طراحی کنترلر غیر متمرکز

فرض می کنیم که متغیرهای حالت به صورت زیر باشد:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_i^m(t) \\ x_j(t) \end{bmatrix}$$

(3.1)

و ماتریس کنترل حالت به صورت زیر نوشته شود:

$$F = \begin{bmatrix} F_{ii}^m & F_{ij}^m \\ F_{ji}^m & F_{jj}^m \end{bmatrix}$$

(3.2)

با تغییرات فوق معادله ۲.۳ بصورت زیر در میآید:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_{ii}^* x_i(t) + E_i d_i(t) \\ &+ B_i \{ F_{ii}^m x_i^m(t) + F_{ij}^m x_j(t) \} \end{aligned}$$

(3.3)

که به دو قسمت تقسیم شده است:

$$u_{local}^m = F_{ii}^m x_i^m(t), \quad (3.4a)$$

$$u_{remote} = F_{ij}^m x_j(t). \quad (3.4b)$$

اگر معادله 2.3a را دوباره بازنویسی نمائیم داریم که:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i^m(t) \\ \dot{x}_j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ii}^m & A_{ij}^m \\ A_{ji}^m & A_{jj}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^m(t) \\ x_j(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_i^m \\ E_j \end{bmatrix} d(t) \quad (3.5)$$

تقریبهای زیر را به کار می بریم (زیرا  $A_{ij}$  و  $A_{ji}$  در مقابل  $A_{ii}$  و  $A_{jj}$  کوچک هستند):

$$\dot{\tilde{x}}_i^m(t) = \tilde{A}_{ii}^m \tilde{x}_i^m(t) + \tilde{E}_i^m d(t) \quad (3.6a)$$

where:

$$\tilde{A}_{ii}^m = A_{ii}^m - A_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} A_{ji}^m \quad (3.6b)$$

$$\tilde{E}_i^m = E_i^m - A_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} E_j \quad (3.6c)$$

and

$$\tilde{x}_j(t) = - (A_{jj}^m)^{-1} A_{ji}^m \tilde{x}_i^m(t) - (A_{jj}^m)^{-1} E_j d(t) \quad (3.7)$$

با ترکیب معادله ۳.۷ با 3.4b داریم که:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{remote}(t) = & - F_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} A_{ji}^m \tilde{x}_i^m(t) \\ & - F_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} E_j d(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

بنابراین سیگنال کنترل ورودی برای زیر مجموعه  $i$  ام برابر است با:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(t) = & \{ F_{ii}^m - F_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} A_{ji}^m \} \tilde{x}_i^m(t) \\ & - F_{ij}^m (A_{jj}^m)^{-1} E_j d(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

معادله ۳.۹ نشان می دهد که ورودی از دو بخش ساخته شده است: اولی تابع اندازه گیری حالت و دومی تابع اغتشاش محلی است. این بدان معنی است که هر سیگنال کنترل توسط فیدبک استاتیک تولید می شود مانند جبران سازی پیشرو. با وجود این برای تولید سیگنال پیشرو ، ورودی های اغتشاش بار بایستی معلوم باشند. این مسئله مهمی نیست، زیرا فقط اطلاعات چند کانال مورد نیاز است.

طراحی الگوریتم

مرحله (۱)

قطبهای حلقه بسته را در جای مناسب قرار می دهیم ( با طراحی فیدبک حالت)

مرحله (۲)

متغیرهای حالت را به دو دسته نمونه برداری شده و غیر نمونه برداری شده

تقسیم می کنیم.

مرحله (۳)

با استفاده از تکنیکهای خاص ، متغیرها را بر حسب یکدیگر بدست می آوریم.

مرحله (۴)

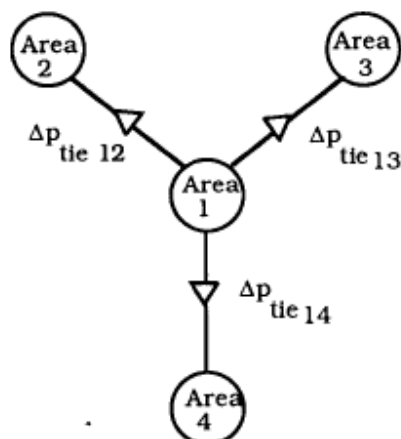
جا دادن مدل بدست آمده در مرحله ۳ در کنترلر محلی.

مرحله ۵)

مرحله ۲-۴ را برای N ناحیه تکرار می کنیم.

مثالهای عددی

سیستم ۴ ناحیه ای زیر را در نظر می گیریم:



Figure(1): Four-area radially interconnected power system

توضیح سیستم قدرت

تعریفها به قرار زیر می باشند:

**state:**

$$\begin{aligned} x(t) = & [ \Delta p_{tie12}(t) \Delta p_{tie13}(t) \Delta p_{tie14}(t) \Delta f_1(t) \\ & \Delta p_{g1}(t) \Delta x_{v1}(t) \int ACE_1(t) dt \Delta f_2(t) \Delta p_{g2}(t) \\ & \Delta x_{v2}(t) \int ACE_2(t) dt \Delta f_3(t) \Delta p_{g3}(t) \Delta x_{v3}(t) \\ & \int ACE_3(t) dt \Delta f_4(t) \Delta p_{g4}(t) \Delta x_{v4}(t) \int ACE_4(t) \\ & dt ]^T \end{aligned}$$

**control:**

$$u(t) = [ \Delta p_{c1} \Delta p_{c2} \Delta p_{c3} \Delta p_{c4} ]^T$$

**disturbance:**

$$d(t) = [ \Delta p_{d1} \Delta p_{d2} \Delta p_{d3} \Delta p_{d4} ]^T$$

خطای کنترلرهای نواحی ۱ تا ۴ به صورت زیر بیان می شوند:

$$ACE_1 = \Delta p_{tie12} + \Delta p_{tie13} + \Delta p_{tie14} + 0.425 \Delta f_1(t)$$

$$ACE_i = - \Delta p_{tie1i} + 0.425 \Delta f_i(t), i = 2, 3, 4.$$

در نهایت معادله زیر را حل می کنیم:

$$\dot{x}(t) = A^* x(t) + B u(t) + E d(t)$$

طراحی کنترلر غیر متمرکز

برای هر ناحیه  $\Delta p_{tiei}, \Delta f_i, \Delta p_{gi}, ACE_i$  برای ساخت کنترلر به کار می رود. بر طبق

الگوریتم طراحی گفته شده در قسمت ۳، کنترلرهای نواحی ۱ و ۲ و ۳ طبق زیر

محاسبه می شوند:

ناحیه ۱:

$$u_1(t) = 0.6594 \Delta p_{tie12}(t) + 0.6594 \Delta p_{tie13}(t) + 0.6594 \Delta p_{tie14}(t) - 0.5299 \Delta f_1(t) - 0.9373 \Delta p_{g1}(t) - 0.781 \int ACE_1(t).$$

و برای ۳ ناحیه دیگر داریم:

$$u_i(t) = 0.3658 \Delta p_{tiei1}(t) - 0.5779 \Delta f_i(t) - 0.9404 \Delta p_{gi}(t) - 0.7804 \int ACE_i(t); \text{ for } i = 2, 3, 4.$$

نتایج شبیه سازی

سیستم پیشنهادی توسط کامپیوتر با تغییر ۰.۰۱ پریونیت در بار ناحیه ۱ آزموده

شده است. نتایج با سیستم کنترلر به صورت متمرکز مقایسه شده است. نتایج در

شکل‌های ۲, ۳, ۴ نشان داده شده است:

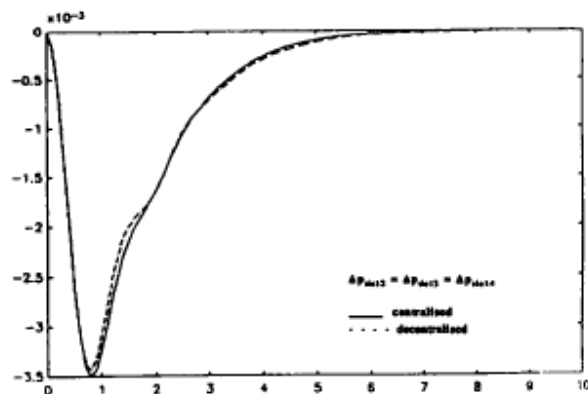


Figure 2: Tie-line power response to a step change in Area 1

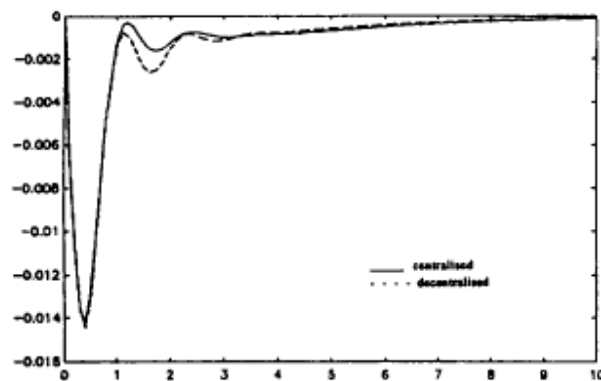


Figure 3: Frequency 1 response to a step change in Area 1

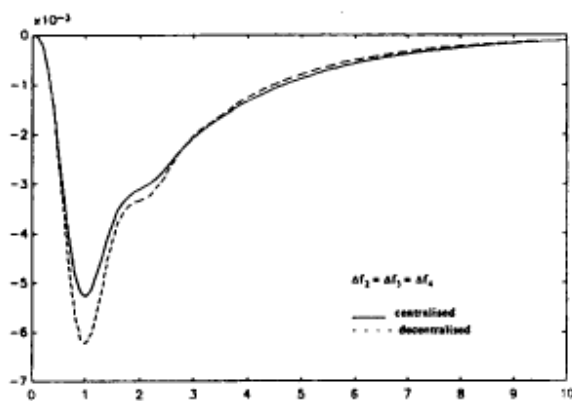


Figure 4: Frequency 2, 3, and 4 responses to a step change in Area 1

به علت تقارن در سیستم ، پاسخ فرکانس نواحی 2,3,4 یکسان است. نتایج با حالت متمرکز تطابق دارد و این نشان از درستی فرضهای انجام شده برای تقلیل سیستم می دهد.



[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

بخش چهارم:

به عنوان حسن ختام مقاله ای در باب AVR

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

on-line میزان سازی تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورهای سنکرون با به کارگیری (

مدل ژنراتور درون خطی (generator)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

## چکیده

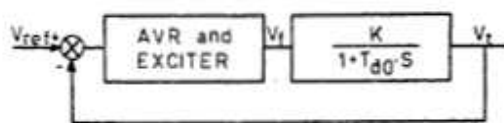
تنظیم، رگولاتورهای ولتاژ اتوماتیک برای کنترل ولتاژ ژنراتورهای یک سیستم قدرت در بسیاری وضعیت ها برای حالت مدار باز یک ژنراتور سنکرون انجام شده است. معادلات اساسی ماشین های الکتریکی و همچنین اندازه گیری های دقیق نشان داده است که AVR ها در حالتی که به شبکه متصل هستند و تحت بار نامی کار می کنند بکلی رفتار متفاوتی نسبت به حالتی که مدار باز هستند از خود نشان می دهند. این مقاله روشی را برای تنظیم یک AVR تحت بار نامی ارائه کرده و سپس مقایسه حالت گذرا را در ولتاژ ترمینال در حالت متصل به شبکه و open-circuit می پردازد.

موضوع مورد مطالعه نصب یک ژنراتور در Calgary ، Canada بود و در آن مشاهده کردیم که هنگامی که یک AVR را در حالتی که به شبکه متصل است تنظیم می کنیم بهبودی بیشتری در میرایی حالت گذرا حاصل می شود. همچنین در این حالت در انتقال توان نیزف میرایی بیشتری در در حالت گذرا حاصل می شود.

## ۱. مقدمه

در بسیاری از مواقع، رگولاتورهای ولتاژ در نیروگاه ها برای ایجاد میرایی قابل توجه برای شرایط گذرا در حالت مدار باز نصب می شوند، در بسیاری از

مواقع، در این رویه میزان سازی لازم است که ابتدا هم خود AVR و هم ژنراتور سنکرون را بر روی یک کامپیوتر آنالوگ و یا دیجیتال مدل کنیم (همانند شکل ۱) تنظیمات مربوط به AVRها معمولاً در نیروگاه و در حین تصدی فازهای ژنراتور و کنترل کننده ها، انجام می گیرد.



شکل ۱) بلاک دیاگرام مربوط به مدل مدار باز یک ژنراتور به منظور تنظیم AVR

ها با کمی تلاش می توان ای ن روش تنظیم سازی در شرایط مدار باز را به گونه ای به کار بریم که بتوانیم با کمک آن AVRها را تحت بار نیز تنظیم کنیم. اگر AVRهای مدار باز تأثیر منفی بر روی عملکرد سیستم هنگام فعالیت در حالت مدار بسته نداشته باشد نیازی به اعمال تغییر بر روی تنظیمات AVR نداریم اما اگر نوسانات سیستم همچنان تداوم داشته باشد، هنگامی که بار ژنراتور در حال کاهش است و یا هنگامی که یک خط اتصال و یا یکی از بارها غالب هستند. آنگاه این به منزله تنظیم نبودن AVR می باشد در چنین شرایطی معمولاً بواسطه چندین فیدبک حول ژنراتور سعی در پایدارسازی سیستم می کنند. این فیدبک ها که مشتمل بر پایدارسازی های قدرتی هستند در سال های اخیر عنوان بسیاری از مقالات در این زمینه بوده که از بین آنها نتایج بسیاری قدرتی هستند

در سالهای اخیر عنوان بسیاری از مقالات در این زمینه بوده که از بین آنها نتایج بسیار مثبتی نیز اخذ شده که بکارگیری آن نتایج در هنگام نوسانات سیستم و یا مواقعی که مسأله تداخل مشکلاتی را در سیستم قدرت ایجاد نموده بسیار سودمند بوده است.

اولین سوالی که معمولاً به ذهن خواننده می رسد این است که آیا در شرایطی که با مدل های سنتی تنظیم AVR ها سروکار داریم، تنظیم یک AVR تحت بار می توان سبب بهبود میرایی گردد و یا می تواند پایداری ژنراتور را در حالت بی باری متضمّن شود؟ این نوشتار سعی بر آن دارد که به این سوال در نمونه عملی از کاربرد یک AVR ایستا (STATIC) بر روی یک خط 400 MW در نیروگاه Canada , Calgary پاسخ دهد. در ابتدا روشی برای تعیین مدل ژنراتور خط از دو سر AVR ارائه می کنیم، از این مدل برای تحقیق در مورد وضعیت ها و حالات مختلف AVR ها استفاده می کنیم. و از شیوه ROOT LOCUS برای تعیین تأثیرات بر روی حالت گذرای سیستم هنگام تنظیم مجدد AVR ها استفاده می کنیم و سرانجام بین حالت گذرای ایجاد شده در این روش و حالت گذرای ایجاد شده در روشی که AVR ها در تحت شرایط مدار باز تنظیم می شوند مقایسه ای صورت می دهیم. کنترل کننده های پیش سو را به کار برده و سرانجام حالت گذرای ایجاد در AVR های بهینه شده را با حالت گذرای ایجاد

شده در AVR های مدار باز را با هم مقایسه می کنیم و البته حالات گذرا در هر دو نوع AVR را در حوزه زمان نیز با هم مقایسه خواهیم نمود.

روند میزان سازی توصیف شده در این مقاله از مدل ساده تک ورودی، تک خروجی بهره می گیرد. کاملاً بدیهی است که یک سیستم قدرت یک سیستم چند متغیره و بنابراین به کار بردن یک مدل گسترده قطعاً دقیق تر خواهد بود. همچنان که مقالات زیادی نیز در مورد سیستم های کنترل مدرن (در سیستم های نوع ۲ و ۳ و ۴) نوشته شده است که از دقت بالاتری نیز برخوردار هستند اما به هر حال باید بگوییم که تمامی این سیستم ها برای تحلیلشان از کامپیوتر و روش های همسان بهره گرفته اند که نتیجه تحلیل آنها طراحی سیستم های رتبه بالا و Multi-feedback شده که اجرا عملی آنها غیرممکن می باشد.

بسیاری از مقالات نیز بر روی مدل state-space (فضای حالت) در ارتباط با سیستم های چند ورودی و چند خروجی کار کرده اند و تأثیر بر روی مقادیر ویژه یک کنترل کننده را مورد مطالعه قرار داده اند. این نوشتار نیز یک سیستم چند ورودی و چند خروجی را مورد مطالعه قرار داده و به تحلیل گر سیستم این امکان را می دهد که بتواند تأثیر آن بر روی یک سیستم مجزا، ببیند. تعداد مقادیر ویژه در یک سیستم پیچیده نسبتاً بزرگ است اما تکنیک هایی در جهت کاهش تعداد آنها به کار خواهیم برد تا بتوانیم تنها بر روی مقادیر مهم و غالب آنها کار کنیم. روش تنظیم AVR بحث شده در این نوشتار مشتمل بر دو مرحله

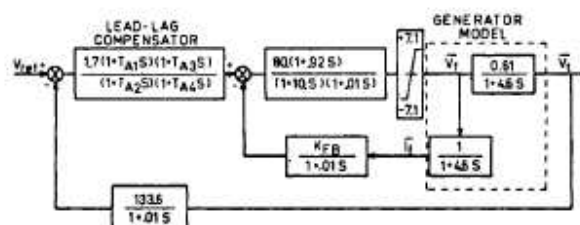
است : مرحله اول : روش های پاسخ فرکانسی بر روی سیستم تا بتوان از روی آن مدل درون خطی (on-line) ژنراتور را که رگولاتور ولتاژ تحت بار نرمال می بیند بدست آوریم.

مرحله دوم : به کار بردن این مدل در روی  $root\ locus$  و فضای حالت و استفاده از مقادیر ویژه به منظور مطالعه تأثیرات ناشی از تغییر پارامترهای AVR بر روی پایداری سیستم. یکی از مزایای استفاده از مدل کاهش یافته (ساده شده) ژنراتور این است که این مدل نگرشی جدید نسبت به، به کار گیری AVR ها درون خطوط به منظور بهبود کارآیی ژنراتورهای ارائه می دهد.

۲. ژنراتور، AVR و مدل های سیستم

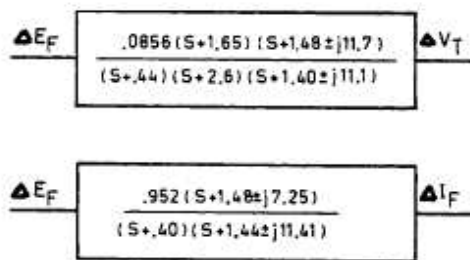
همانطور که پیشتر بیان شد، سیستم تحت مطالعه یک ژنراتور 400 MW حرارتی بوده که در منطقه در کانادا مستقر شده است. بلاک دیاگرام سیستم مزبور در شکل ۲ به همراه بازه تغییرات هر یک از پارامترهای AVR نشان داده شده است. و در این شکل هم چنین مقادیر پیش فرض برای متغیرهای AVR که توسط کارخانه سازنده و یا نیروگاه مزبور تعیین شده نیز به نمایش درآمده است. که میزان میرایی مطلوب را در حالت مدار باز بیان می کند. مدل نشان داده شده در شکل ۲ برای ژنراتور مدار باز می باشد. همانگونه که بیان شد، AVR توسط

جبران ساز Lead-Lag و در یک مسیر پیش سو و در یک حلقه جریان پس خور توصیف شده است.



شکل ۲ ژنراتور مدار باز می باشد

مدل ژنراتور درون خطی از روی نرم افزار پایداری گذرا که در نیروگاه Calgary مورد استفاده قرار می گیرد. اقتباس شده که در آن سیستم مورد نظر حاوی ۹ ژنراتور می باشد. روش پاسخ فرکانسی برای بدست آوردن پاسخ تبدیل مربوط به  $\frac{v_t}{v_f}$  و همچنین مربوط به  $\frac{if}{v_f}$  می باشد (در SD3) در حالی که ماشین در بار کامل و تحت ضریب توان ۰/۹ پس فاز در حال کار کردن است. تابع تبدیل ژنراتور درون خطی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. این توابع تبدیل جایگزین توابع تبدیل مربوط به مدل حلقه باز شده و سرانجام به تنظیم ژنراتور در مدل درون خطی می پردازیم.



شکل ۳ تابع تبدیل ژنراتور درون خطی

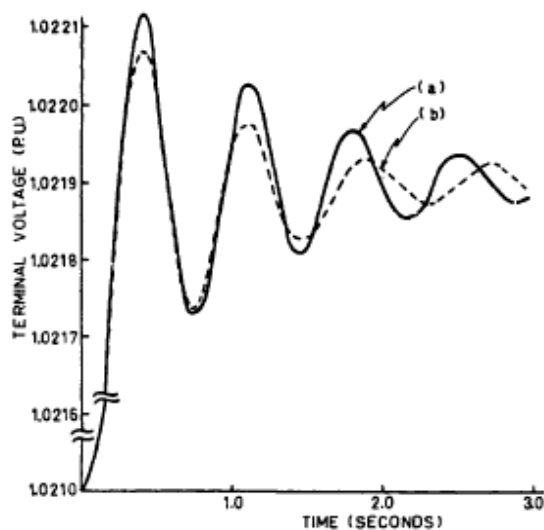
اکنون مایلیم تا مقایسه ای بین حالت گذرای ژنراتور در مدل ساده شده که در شکل ۳ نشان داده شده و حالت گذرای بدست آمده از نرم افزار پایداری گذرای که در آن تمامی ماشین ها منظور گشته اند، داشته باشیم.

شکل ۴ نتایج این مقایسه را در ولتاژ پایانه «SD3» (Sundance#3) نام

نیروگاه) یعنی  $v_f$  به ازای یک disturbance (اختلال) همسان که به AVR ها در هر دو مدل اعمال شده را نشان می دهد، از این شکل چنین برمی آید که منحنی مربوط به مدل مختصر شده با دقت قابل قبولی منطبق بر نمودار واقعی می باشد بنابراین این تعریف، تقریب مناسبی بوده و قابل استفاده است.

گام بعدی به تشریح حالت گذرا در ولتاژ پایانه هنگامی که ژنراتور در مدل مدار باز تنظیم می شود و هنگامی که در مدل درون خطی دستخوش تغییر می گردد می پردازد، حالت گذرای بدست آمده از میزان سازی AVR برای یک مدل مدار باز می توان ملاکی برای اندازه گیری و یا تنظیم سایر AVR ها باشد.





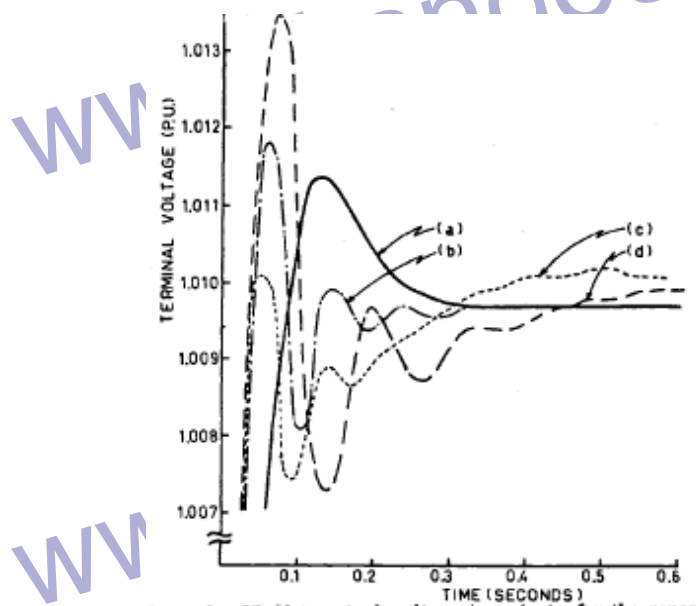
شکل ۴ ژنراتور تحت بار نامی است

۳. میزان سازی AVR ها با به کار بردن مدل درون خطی

در این بخش مقایسه ای بین ولتاژ گذرای اندازه گیری شده زمانی که AVR ها تحت مدل مدار باز تنظیم میشوند و زمانی که تحت مدل درون خطی میزان می شوند به عمل می آوریم. همانگونه که پیش از این بیان کردیم. پارامترهای مربوط به AVR در sun dance #3 توسط نیروگاه و کارخانه سازنده تحت مدل مدار باز تعیین گشته اند. که این مقدار به همراه مدل مدار باز در شکل ۲ نشان شده اند که در آن مدل این مقادیر قابلیت تغییر را دارد. در اینجا ابتدا یک آزمایشی بر روی این مقادیر داده شده انجام می دهیم تا با کمک روش فضای حالت برای AVR و مدل مدار باز برای sun sance #3 به مقادیری معین دست یابیم تا در آن شرایط سیستم به حالت مانای نهایی و پایدار برسد. برای اینکه

بتوان پارامترهای AVR و جبران سازه‌های سری شده با آن را با هم قیاس کرد لازم است که gain AVR تقریباً با هم یکسان باشند. تا بتوان خطای حالت مانا را بین ولتاژ refrence ، AVR و ولتاژ واقعی ترمینال آن اندازه گرفت. به طور قراردادی یک مقدار مینیمم برای AVR ، garn در نظر می‌گیرند تا بتوان ولتاژ Excitor (محرک) را از مقدار نامی به حداکثر خود برسانیم با در نظر گرفتن ۰/۰۵ P.V خطا برای AVR. مطالعه مقادیر ویژه‌ها و مکان ریشه‌ها ما را به مقادیری برای پارامترهای AVR رهنمون می‌شود که بسیار شبیه به آن چیزی است که کارخانه سازنده ارائه کرده است. که این مقادیر در شکل ۲، لیست شده اند در نظر داشته باشد که جبران ساز به صورت پس فاز عمل می‌کند.

حالت گذرای نشان داده شده در منحنی a در شکل ۵ ولتاژ ترمینال SD#3 بوده که در نتیجه اعمال که تابع پله به عنوان به ورودی سیستم و با کمک شبیه‌سازی کامپیوتری بدست آمده است.



شکل ۵

منحنی (a) : AVR برای حالت مدار باز و در حالت استفاده از جبران ساز پس فاز میزان می شود.

منحنی (b) : AVR برای حالت درون خطی و در حالت استفاده از جبران ساز پیش فاز - پس فاز میزان می شود.

منحنی (c) : AVR برای حالت مدار باز و در حالت استفاده از جبران ساز مختلط (مرکب) نوع اول میزان می شود.

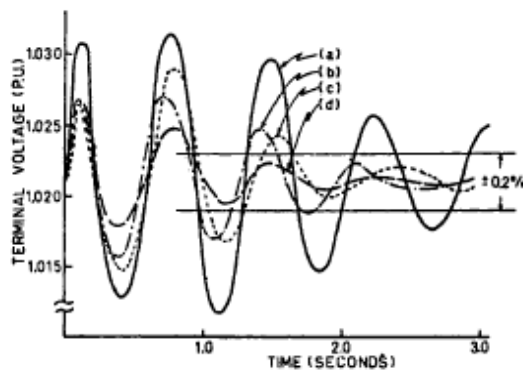
منحنی (d) : AVR برای حالت مدار باز و در حالت استفاده از جبران ساز مختلط (مرکب) نوع دوم میزان می شود.

که در اینجا AVR در حالت مدار باز عمل می کند. در این حالت AVR به

گونه ای تنظیم می شود که بتواند ضریب میرائی در حدود  $0.7/0.7$  داشته باشد و

بنابراین حالت گذرای (a) با توجه به زمان صعود کند و یک فراجهس مشخص می شود.

سایر ولتاژ ترمینال ها توسط شبیه سازی بدست آمده اند در شرایطی که پالس ورودی همچنان یکسان بوده و AVR تحت شرایط درون خطی عمل کرده که در شکل ۵ همگی آنها رسم شده اند. و در ادامه راجع به آنها صحبت خواهیم کرد؛



شکل ۶

حالت گذرای نشان داده شده در شکل ۶ برای منحنی (a) مربوط به نیروگاه SD#3 برای ولتاژ ترمینال  $V_t$  بوده که توسط برنامه شبیه سازی بدست آمده اند. که در آن نیروگاه Calgary با تمامی جزئیات شبیه سازی شده و خطوط انتقال به منظور شبیه سازی پاسخ حالت ورودی (disturbance) حذف شده اند. و پارامترهای AVR در این حالت مشابه آن چیزی است که در حالت مدار باز بدست آورده بودیم و در شکل ۵ نشان دادیم. سایر منحنی های نشان داده شده در

شکل ۶ نیز با اعمال پالس مشابه منحنی (a) ولی در حالت درون خطی بدست آمده اند. که بعداً راجع به آنها بحث خواهیم کرد. پارامترهای مختلفی من جمله زمان نشست را می توان به عنوان معیار مناسبی برای مقایسه تمامی این تکنیک ها بکار گرفت. زمان نشست را ما در اینجا به صورت زمان لازم برای اینکه سیگنال گذرا به ۰.۲٪ مقدار نامی خود برسد تعریف می کنیم.

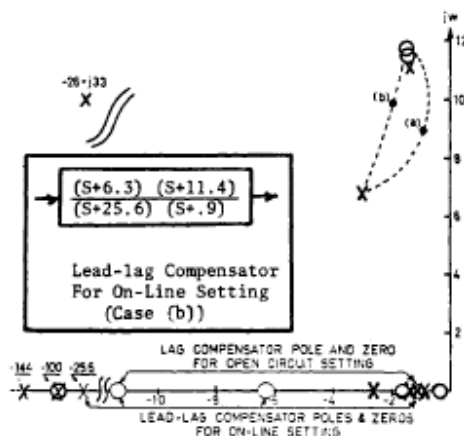
تفاوت چشم گیری بین میرایی حالت گذرا منحنی (a) در شکل ۵ و ۶ وجود دارد که نشان دهنده ناسازگاری و عدم انطباق تنظیم AVR برای حالت مدار باز و اعمال آن به حالت درون خطی می باشد و این تقریب ، تقریب مناسبی نبوده است.

سه منحنی دیگر بیان گر حالتی هستند که در آنها "AVR" برای حالت درون خطی تنظیم شده و از مدل درون خطی ژنراتور نیز استفاده می کند: در هر یک از این سه حالت ولتاژ ترمینال با منحنی (a) برای حالت مدار باز و شرایط کامل مقایسه می گردد: در هر یک از این سه حالت جبران سازه های زیر را به سیستم اعمال کرده ایم: منحنی (b): جبران ساز پس فاز - پیش فاز original ارائه شده توسط کارخانه سازنده که برای حالت درون خطی تنظیم شده است.

منحنی (C): جبران سازی مرکب از یک جبران ساز با صفرهای مختلف و قطب های حقیقی (که موسوم به نوع ابود) و با یک جبران ساز lag-lead سری شده است. و این مجموعه برای حالت درون خطی تنظیم شده اند.

منحنی (B) در شکل ۶ نشان دهنده حالت گذاری ولتاژ است که هنگامی که "AVR" SDAB توسط مدل دوره خطی ژنراتور همانند شکل ۳ تنظیم شده است. مشخصات جبران شده است. مشخصات جبران شده AVR همانند جبران ساز به کار رفته در منحنی (a) می باشد. و مقادیر آن نیز توسط تولید کننده تعیین می شود پارامترهای AVR برای این حالت در ابتدا توسط جایگزین کردن تابع تبدیل درون خطی سیستم تعیین می شود در حین مطالعه سیستم متوجه شدیم که مقادیر تعیین شده توسط کارخانه سازنده برای مفید یک جریان میدان هیچ فایده ای نداشته و بنابراین در این بخش از شیوه تنظیم تنها پارامترهای مربوط به جبران سازی  $lead - lag$  را تنظیم می کنیم. توازن تابع تبدیل جلو از AVR درون خطی در این مدل توسط قطب های و صفرهای ثابت تعیین می شود. این قطب ها و صفرهای ثابت در شکل ۷ توسط  $0$  و  $X$  های پرننگ نمایش داده شده اند؛ در اینجا از یک برنامه کامپیوتری برای بدست آوردن مقادیر ویژه ای برای ترکیب متفاوت از پارامترهای جبران ساز  $lead - lag$  ثابت AVR استفاده شده است بسیاری از حالات لحاظ شده است. و مکان ریشه ها را در نزدیکی مقادیر ویژه غالب برای ایجاد بهترین ترکیب ممکن از پارامترهای پس فازی و پیش فازی نشان داده شده است. با تعیین و تنظیم مقادیر ویژه ها در هر دو کنترلر پس فاز و پیش فاز می توان به میرائی مطلوب دست یافت، صفر و قطب های جبران ساز مکان ریشه غالب برای تنظیم AVR در شرایط درون خطی

می باشد و یا گینی برابر با gain سیستم در حالت (a) مکان ریشه غالب هنگامی که AVR برای حالت مدار باز تنظیم شده در نقطه (a) نشان داده شده است. قطبها و صفرهای پس خازن نیز نشان داده شده اند. میرائی حالت گذرای نشان داده شده است در منحنی (b) به مراتب نسبت به منحنی (a) بهبود یافته است در منحنی b زمان نشست برای میرائی سیگنال گذرا در حدود 8 را ثانیه می باشد که به  $\pm 0.2\%$  ولتاژ نامی خود می رسد. لازم است که AVR که برای حالت درون خطی تنظیم شده برای حالت مدار باز نیز به خوبی سازگار باشد. حالت گذرا نشان داده شده برای حالت (b) در شکل ۵ این وضعیت را نشان می دهد و همانطور که دیده می شود به مراتب نوسانی تر از حالت (a) می باشد.



شکل ۷

در منحنی (b) جبران سازی در AVR که در آن از همان سخت افزارهای تولید کننده استفاده شده است. براساس مدل درون خطی ژنراتور تنظیم شده است. بهتر است که در تنظیم جبران سازی سری برخی از ملاحظات عملی را به کار بیندیم تا سبب شویم تا کارآیی ژنراتور درون خطی بهبود یابد کاربرد جبران سازهای مختلط (مرکب) در یک AVR در نشریه قبلی توسط Raczkwoski ارائه شد. که این نوع از کنترل برای بالابردن ظرفیت توان خروجی به کاربرد، و هم چنین برای محدود کردن پایداری دینامیک ژنراتور در این جبران ساز صفر جبران ساز در نزدیکی قطب مختلط غالب در مدل AVR درون خطی تنظیم شده است. که در شکل ۹ نیز نمایش داده شده است. قطب های جبران ساز برو روی محور حقیقی قرار داشته و مقدار آن به گونه ای تنظیم می شود که میزان *nosie* سیستم را کاهش دهد. پارامترهای *lead - lag* به گونه ای تنظیم می شود که بهترین موقعیت ممکن را برای ریشه های غالب سیستم ارائه کند.

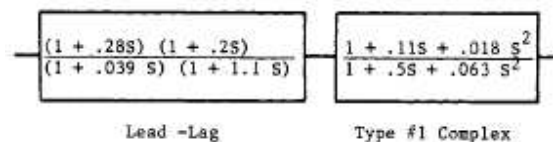


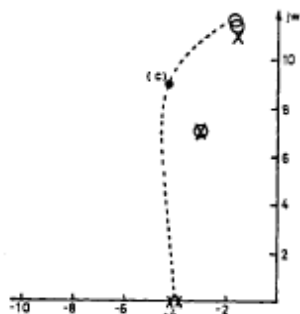
Figure 8. Block diagram of lead-lag and Type #1 complex compensators.

شکل ۸



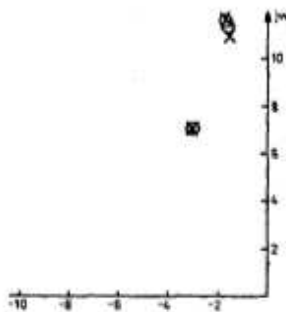
مکان رشدهای غالب برای حالت (c) نیز در شکل توسط نقطه (c) نشان داده شده است حالت گذاری مشابه در شکل ۶ (حالت C) زمان نشستی در حدود ۱/۶ ثانیه دارد.

آخرین حالت به منظور تنظیم جبرانسازهای مختلط نوع ۲ ارائه شده است (برای حالت درون خطی) در این روش صفرها و قطب های جبرانساز صفرها و قطب های ثابت ژنراتور AVR را ساده می کند. (در شکل ۱a نشان داده شده).



شکل ۹

جبران ساز نوع ۲ نشان داده شده در شکل ۱۱ به صورت سری با جبرانساز پس فاز به کار می رود. و خود جبران ساز پس فاز نیز به منظور بهبود مکان سایر ریشه های سیستم به کار رفته است. ولتاژ حالت گذرای این حالت را نیز در شکل ۶ رسم کرده ایم که اگر دقت کنیم می بینیم که نسبت به حالات قبلی به طرز چشمگیری حالت گذرای و حالت گذرای مشابه مدار باز مربوط به حالت d نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰

به طور خلاصه می توان گفت که با توجه به شکل ۶ حالت گذرای ولتاژ

AVR در تمامی حالات در تنظیم AVR در حالت درون خطی نسبت به حالت a

که در آن AVR در حالت مدار باز تنظیم می شد به مراتب بهبود یافته است.

مدل درون خطی ژنراتور تابعی از بار ژنراتور و خطوط متصل به آن و توازن

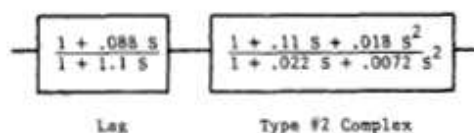
سیستم دارد. بنابراین یک مطالعه کامل می بایست شامل مطالعه تک تک حالت

گذرا باشد. به عنوان یک نمونه آزمایشی یک AVR تنظیم شده تحت بار کامل را

در نیمی از بار کامل مورد آزمایش قرار دادیم و به جواب قابل قبولی نیز دست

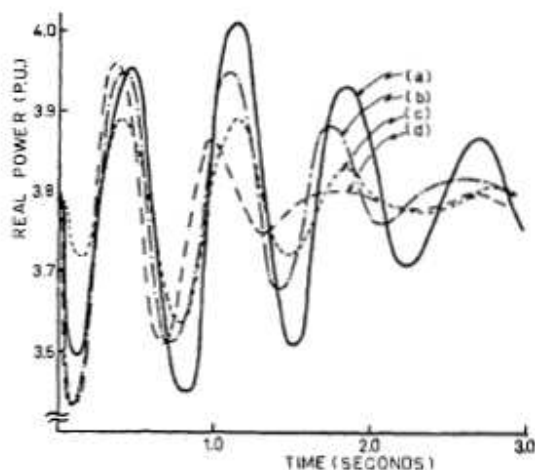
یافتیم اما همین یک آزمایش برای رسیدن به یک حکم کلی کافی نیست و لازم

است تحقیقات وسیعتری نیز در ارتباط با آن صورت بگیرد.



شکل ۱۱

آزمایش دیگری نیز صورت گرفت تا نشان دهد که آیارگولاتوری که بر مبنای مدل درون خطی تنظیم شده است نسبت به رگولاتوری که بر مبنای مدل مدار باز تنظیم شده، می تواند حالت میرایی بهتری را برای حالت گذاری توان ارائه کند یا خیر. به عنوان نمونه نیروگاه #3 sun dance را آزمایش کردیم و نتایج را در شکل ۱۲ نمایش داده ایم، در این شکل منحنی a برای مبنای مدل مدار باز ترسیم شده در حالی که سایر منحنی ها بر مبنای مدل درون خطی ترسیم شده اند و همانطور که می بینید میرایی حالت گذرا به مراتب بهتر شده است.



شکل ۱۲

۴. نتیجه گیری

تنظیم، رگولاتورهای ولتاژ اتوماتیک برای کنترل ولتاژ ژنراتورهای یک سیستم قدرت در بسیاری وضعیت ها برای حالت مدار باز یک ژنراتور سنکرون

انجام شده است. معادلات اساسی ماشین های الکتریکی و همچنین اندازه گیری های دقیق نشان داده است که AVR ها در حالتی که به شبکه متصل هستند و تحت بار نامی کار می کنند بکلی رفتار متفاوتی نسبت به حالتی که مدار باز هستند از خود نشان می دهند. این مقاله روشی را برای تنظیم یک AVR تحت بار نامی ارائه کرده و سپس مقایسه حالت گذرا را در ولتاژ ترمینال در حالت متصل به شبکه و open-circuit می پردازد.

موضوع مورد مطالعه نصب یک ژنراتور در Canada ، calgoreg بود و در آن مشاهده کردیم که هنگامی که یک AVR را در حالتی که به شبکه متصل است تنظیم می کنیم بهبودی بیشتری در میرایی حالت گذرا حاصل می شود. همچنین در این حالت در انتقال توان نیزف میرایی بیشتری در در حالت گذرا حاصل می شود.