استفاده از روش Sumt در بررسی مسأله توزیع بار اقتصادی ED بین نیروگاههای بخاری

دکتر مهرداد عابدی
استادیار دانشکده مهندسی برق ـ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیـده :
در این مقاله مدل ریاضی واحدهای بخاری جهت اپتیم کردن هزینه سوخت(۱) معرفی شده است و چون این مدل ریاضی یک مدل غیرخطی است ، لذا جهت اپتیم کردن هزینه سوخت در واحدهای بخاری باید از برنامه‌ریزی غیرخطی(۲) (NLP) استفاده شود . در این مقاله از الگوریتم SUMT(۳) که یکی از الگوریتم‌های معروف جهت برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشد ، برای انجام این امر استفاده شده است .

۱. مقدمـه :

بررسی و طراحی مسائل فنی همواره باید با رعایت جنبه‌های اقتصادی مورد توجه قرار گیرد تا بتوان از امکانات موجود به‌نحو احسن استفـاده نمود. از این رو مهندسین باید مسائل خود را در غالب مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی کنند و سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بخصوصی، آنها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند و مدل خود را هرچه ممکن است اپتیم نمایند. در اغلب موارد مهندسین با مدل‌های ریاضی پیچیده و غیرخطی روبـرو می‌شوند و لـذا بایـد از الگوریتم‌های خاصـی جهت بهینه‌سازی این توابع هدف غیرخطی استفاده شود.

هدف اصلی از ایجاد سیستم‌های قدرت مدرن، تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها می‌باشد. البته ضمن انجام این مهم باید بـه مساله مینیمم کردن هزینـه تولید کـه بخش اعظم آن را هزینه سوخت تشکیل می‌دهد توجه کرد. مدل هزینه سوخت یک مدل غیرخطی است و لذا باید از الگوریتم‌های مربوط‌به برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شود.

در این مقاله از الگوریتم SUMT که اخیرا" پیشرفته‌ترین نوع آن به‌صورت سابروتین بر روی دیسک مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر قـرار گرفته است، جهت این بـهینه‌سازی(۴) غیرخطی استفاده شده است. همچنین با این الگوریتم چند سیستم نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج جالبی حاصل شده است.

۲. مدل ریاضی هزینه سوخت :

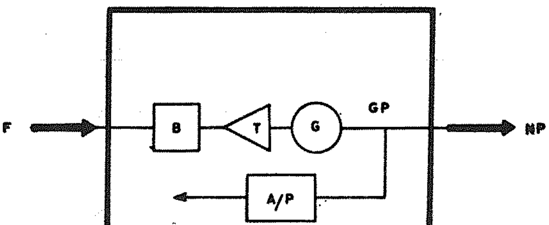
برای به‌دست آوردن مدل ریاضی هزینه سوخت در واحدهای بخاری باید به مشخصه "ورودی ـ خروجی" این واحدها دست یافت. شکل (۱) شمای ساده یک واحد بخاری را نشان می‌دهد و همان‌طوری که مشاهـده می‌شود، ورودی این سیستم سوخت بوده و خروجی آن کل توان خروجی از ژنراتور است. البته بین ۳ تا ۶ درصد از کل توان خروجی صرف مصرف داخلی (سیستم قـدرت کمکی(۵)) آن واحـد ازقبیل تغذیـه پمپ‌های بویلر(۶)، پنکه‌ها(۷)، پمپ‌های آب کندانسور و غیره می‌شود. هدف از مدل ریاضی مشخصه "ورودی ـ خروجی" واحدهای بخاری پیدا کردن توابع زیر است :

$$H=f(P) \qquad (۱)$$

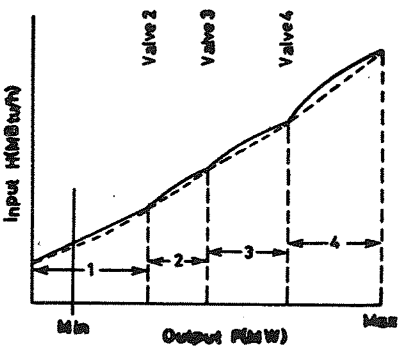
$$F=RH=Rf(P) \qquad (۲)$$

در این رابطه داریم :

H	ورودی به بویلر برحسب	MBTU/hr
R	هزینه سوخت برحسب	$/ MBTU
F	تابع هزینه سوخت برحسب	$/hr
P	توان خالص خروجی (تحویلی به شبکه) برحسب	MW



F=FUEL G=GENERATOR
B=BOILER GP=GROSS-POWER
T=TURBINE NP=NET - POWER
A/P AUXILIARY-POWER



شکل (۲)

در واحدهای بخاری نسبتاً بزرگ به‌علت عملکرد چندین مرحله‌ای شیرهای بخار(۸) که به‌خاطر افزایش میزان توان خروجی یکی پس از دیگری باز می‌شوند تا بخار بیشتری وارد توربین گردد، منحنی $H=f(P)$ مطابق شکل (۲) خواهد بود (منحنی توپر). در بررسی مساله توزیع بار اقتصادی بین واحدهای بخاری (ED) (۹) معمولا از منحنی خط چین استفاده می‌کنند (شکل ۲) و برای مقاصد عملی آن را به‌صورت تابع درجه دومی درنظر می‌گیرند.

$$H=ap^2+bp+c \quad \text{MBTU/hr} \qquad (۳)$$

طرز پیدا کردن منحنی درجه‌دوم اخیر با استفاده از روش منحنی‌یابی و دانستن داده‌های لازم از طرف کارخانه سازنده عملی خواهد بود. با توجه به تعاریف فوق تابع هزینه سوخت واحد به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$F=RH=aRp^2+bpR+cR \quad \$/hr \qquad (۴)$$

$$F=AP^2+BP+C \quad \$/hr \qquad (۵)$$

البته همان‌طوری که از شکل (۲) پیداست هر واحد همواره با محدودیت زیر روبروست:

$$P_{min} \leqslant P \leqslant P_{max} \qquad (۶)$$

۳. فرموله کردن مساله توزیع بار اقتصادی (ED):

فرض می‌کنیم در یک سیستم قدرت n واحد بخاری وجود داشته باشد. لذا تابع هزینه هر واحد این چنین است:

$$Fi=AiPi^2+BiPi+Ci \qquad (۷)$$
$$i=1,\ldots\ldots n$$

هر واحد تولید با محدودیت‌ها و قیود زیر روبروست:

$$Pi_{min} \leqslant Pi \leqslant Pi_{max} \quad (i=1,\ldots\ldots n) \qquad (۸)$$

اگر تلفات سیستم را با P_L و بار شبکه را با P_d نشان دهیم، لذا:

$$\sum_{i=1}^{n} Pi=P_L+P_d \qquad (۹)$$

بنابراین برای مینیمم کردن هزینه سوخت باید تابع هدف(۱۰) زیر را باتوجه به قیود معادله‌ای(۱۱) و نامعادله‌ای(۱۲) که در زیر آن آمده است مینیمم سازیم و برای این منظور باید از برنامه‌ریزی غیرخطی NLP کمک گرفت:

$$\min Z=\sum_{i=1}^{n} Fi=\sum_{i=1}^{n}(AiPi^2+BiPi+Ci) \qquad (۱۰)$$
St:
$$Pimin \leqslant Pi \leqslant Pimax \quad (i=1,\ldots n) \qquad (۱۱)$$
$$\sum_{j=1}^{n} Pi=PL+Pd \qquad (۱۲)$$

الگوریتم فوق را می‌توان به‌فرم ماتریسی درآورد:

$$\min_{st:} Z=[A]\,[P2]+[B]\,[P1]+[C]\,[I] \qquad (۱۳)$$
$$Pimin \leqslant Pi \leqslant Pimax \quad (i=1,\ldots n) \qquad (۱۴)$$
$$\sum_{i=1}^{n} Pi=Pl+Pd \qquad (۱۵)$$

در روابط اخیر داریم:

(۱۶) بردار (1xn) $[A]=[A_1, A_2,\ldots An]$

(۱۷) بردار (n x1) $[P2]=[P1^2, P2^2,\ldots Pn^2]^t$

(۱۸) بردار (1xn) $[B]=[B1, B2,\ldots Bn]$

(۱۹) برداری که (1xn) $[P1]=[P1, P2,\ldots Pn]^t$

(۲۰) بردار (1xn) $[C]=[C1, C2,\ldots Cn]$

(۲۰-۱) بردار (n x1) $[I]=[1, 1,\ldots 1]^t$

لذا با یک برنامه‌ریزی غیرخطی با 2n قید نامعادله‌ای و یک قید معادله‌ای روبرو هستیم و برای این منظور از روش SUMT (ضمیمه ۱) استفاده شده است.

۴. پیدا کردن تابع تلفات سیستم

سیستمی را در حالت کلی مورد بررسی قرار می‌دهیم که شامل n واحد بخاری باشد. معمولا از رابطه KRON استفاده می‌شود و تابع تلفات را مطابق زیر درنظر می‌گیریم:

$$Pl=[P1]\,[D]\,[P1]^t \qquad (۲۱)$$

در رابطه اخیر داریم:

$$[P1]=[P1, P2,\ldots Pn]^t \qquad (۲۲)$$

$$[D]=\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \ldots D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \ldots D_{2n} \\ D_{n1} & D_{n2} & \ldots D_{nn} \end{bmatrix} \qquad (۲۳)$$

که Dij ضرایب تلفات سیستم بوده و هرسیستم مقادیر خاص خود را دارد.

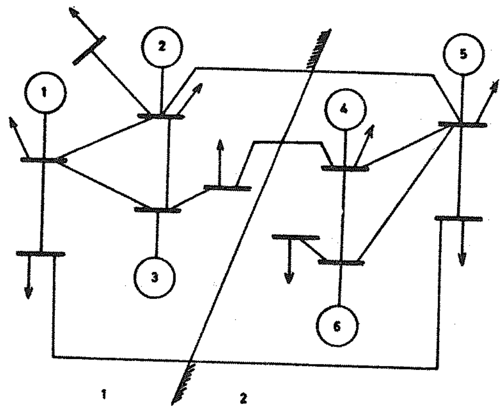
۵. نتیجه عددی:

سیستمی مطابق شکل (۳) درنظر می‌گیریم که درآن دو سیستم قدرت (دو ناحیه مجزا) بوسیله خطوط انتقال انرژی رابط(۱۳) وصل شده‌اند. توابع هزینه(۱۴) هر واحد و محدودیت‌های مربوطه در ضمیمه ۲ آمده است. بار ناحیه شماره ۱ را ۷۰۰ مگاوات و بار ناحیه شماره ۲ را ۱۱۰۰ مگاوات در نظر می‌گیریم و از تلفات سیستم (۱۵) صرف‌نظر می‌کنیم. (Pl=0). به‌عبارت ساده‌تر دو ناحیه خیلی بهم نزدیک‌اند و مساحت تحت پوشش هر ناحیه خیلی زیاد نمی‌باشد. حال از الگوریتم SUMT استفاده کرده و سه وضعیت را مورد بررسی قرار می‌دهیم:

الف. وضعیت شماره ۱:

در این حالت فرض می‌شود که ناحیه شماره ۱ به‌صورت ایزوله عمل می‌کند و توانی از ناحیه ۲ دریافت نمی‌کند. لذا الگوریتم مینیمم‌سازی غیرخطی این چنین می‌شود:

$$\min_{st:} Z_1=[A]\,[P2]+[B]\,[P1]+[C]\,[I]$$
$$150 \leqslant P1 \leqslant 600 \quad 100 \leqslant P2 \leqslant 400 \quad 50 \leqslant P3 \leqslant 200$$
$$\sum_{i=1}^{3} Pi=700$$



شکل (۳)

در روابط اخیر داریم :

$[A]=[A1, A2, A3]$

$[P2]=[P1^2, P2^2, P3^2]^t$

$[B]=[B1, B2, B3]$

$[P1]=[P1, P2, P3]^t$

$[C]=[C1, C2, C3]$

$[I]=[1, 1, 1]^t$

با استفاده از سابروتین SUMT نتایج مربوط به اپتیم تولید مطابق جدول (۱) خواهد بود .

ب . وضعیت شماره ۲ :

فرض می‌کنیم ناحیه شماره ۲ به‌صورت ایزوله عمل کند و توانی از ناحیه ۱ اخذ نکند . لذا مساله مینیمم کردن هزینه این‌چنین فرموله می‌شود :

$$\min Z_2=[A]\,[P2]+[B]\,[P1]+[C]\,[I]$$
$$\text{st:}$$
$$140\leqslant P4\leqslant 590 \qquad 110\leqslant P5\leqslant 440 \qquad 110\leqslant P6\leqslant 440$$
$$\sum_{i=4}^{6} Pi=1100$$

در روابط اخیر داریم :

$[A]=[A4, A5, A6]$

$[P2]=[P4^2, P5^2, P6^2]^t$

$[B]=[B4, B5, B6]$

$[P1]=[P4, P5, P6]^t$

$[C]=[C4, C5, C6]$

$[I]=[1, 1, 1]^t$

با استفاده از سابروتین SUMT نتایج مربوط به اپتیم تولید مطابق جدول (۱) خواهد بود .

ج . وضعیت شماره ۳ :

در این حالت فرض می‌کنیم که از خطوط رابط نیز توان عبور می‌کند و دو ناحیه به صورت ایزوله عمل نکنند (دو ناحیه بهم پیوسته) لذا مساله مینیمم کردن هزینه این‌چنین فرموله می‌شود :

$$\min Z_3=[A]\,[P2]+[B]\,[P1]+[C]\,[I]$$
$$\text{st:}$$
$$150\leqslant P1\leqslant 600 \qquad 100\leqslant P2\leqslant 400 \qquad 50\leqslant P3\leqslant 200$$
$$140\leqslant P4\leqslant 590 \qquad 110\leqslant P5\leqslant 440 \qquad 110\leqslant P6\leqslant 440$$
$$\sum_{i=1}^{6} Pi=1800$$

در روابط اخیر داریم :

$[A]=[A1, A2, \dots A6]$, $[B]=[B1, B2, \dots B6]$

$[C]=[C1, C2, \dots C6]$, $[I]=[1, 1, 1, 1, 1, 1]^t$

$[P2]=[P1^2, P2^2, \dots P6^2]^t$, $[P1]=[P1, P2, \dots P6]^t$

با استفاده از الگوریتم SUMT نتایج مربوط به تولید اپتیم در جدول (۱) ذکر شده است . با توجه به نتایج سه وضعیت فوق داریم :

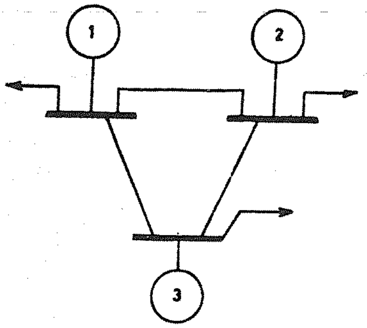
$$Z3<Z1+Z2$$

لذا این نکته روشن می‌گردد که در برخی از شرایط ممکن است اقتصادی‌تر آن باشد که در یک ناحیه انرژی تولید نمائیم و به ناحیه دیگر جهت مصرف منتقل کنیم و این خود در برخی از شرایط یکی از مزایای سیستم‌های بهم پیوسته محسوب می‌شود .

جدول (۱) : تمامی توانها برحسب مگاوات و Z برحسب $/hr می‌باشد .

شماره وضعیت	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Z
۱	۳۲۲/۷	۲۷۷/۹	۹۹/۴	—	—	—	۱۳۶۷۷/۲۱
۲	—	—	—	۵۲۴/۷	۲۸۷/۷	۲۸۷/۷	۱۸۵۶۹/۲۳
۳	۱۸۴	۱۶۶/۲	۵۴/۴	۵۹۰	۴۰۲/۷	۴۰۲/۷	۳۱۹۸۴/۸۲

حال برای منظور نمودن تلفات سیستم در الگوریتم فوق‌الذکر سیستمی مطابق شکل (۴) درنظر می‌گیریم . مشخصات واحدهای تولید این سیستم در ضمیمه (۲) ذکر شده است. بار سیستم را ۸۵۰ مگاوات درنظر می‌گیریم :



شکل (۴)

الگوریتم کلی جهت برنامه‌ریزی‌خطی دراین سیستم این‌چنین است:

$$\min Z4 = [A]\,[P2] + [B]\,[P1] + [C]\,[I]$$

st:

$$150 \leqslant P1 \leqslant 600 \qquad 100 \leqslant P2 \leqslant 400 \qquad 50 \leqslant P3 \leqslant 200$$

$$\sum_{i=1}^{3} Pi = 850 + [P1]\,[D]\,[P1]^t$$

در روابط اخیر داریم :

$$[A] = [A1, A2, A3]$$

$$[P2] = [P1^2, P2^2, P3^2]^t$$

$$[B] = [B1, B2, B3]$$

$$[P1] = [P1, P2, P3]^t$$

$$[C] = [C1, C2, C3]$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D11 & D12 & D13 \\ D21 & D22 & D23 \\ D31 & D32 & D33 \end{bmatrix}$$

$$[I] = [1, 1, 1]^t$$

عناصر ماتریس [D] مربوط به این سیستم در ضمیمه (۲) داده شده است. نتایج این بهینه‌سازی غیر خطی بقرار زیر است :

$$P_1 = 435, \quad P_2 = 299, \quad P_3 = 131$$

۶. نتیجه :

در این مقاله الگوریتم نسبتا" ساده‌ای جهت مینیمم کردن هزینهٔ سوخت در بررسی مساله توزیع بار اقتصادی (ED) ارائه گردیده است. این الگوریتم بیشتر مبتنی بر عملیات ماتریسی است. زیرا تشکیل ماتریس‌های A ، B ، P_2 ، P_1 ، C ، D و I بسیار ساده بوده و از نظر عملیات ضرب و جمع ماتریس‌ها نیز سابروتین‌های متنوعی وجود دارد. سپس این الگوریتم بوسیله روشSUMT که یک روش برنامه‌ریزی غیرخطی است مینیمم‌سازی شده و نتایج جالب توجهی به‌دست آمده است. با استفاده از نتایج این برنامه مراکز دیسپاچینگ قادر خواهند بود مقدار تولید اپتیم واحدهای بخاری را درمراحل مختلف بار تخمین بزنند.

۷. قدردانی :

بدین وسیله از افراد زیر که مرا در انجام این پروژه یاری داده‌اند کمال تشکر را دارم :

۱. آقایان مهندس قاضی و تقوی از دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌خاطر استفاده از سابروتین پیشرفته SUMT و زحماتی که نامبردگان جهت تطبیق آن با سیستم کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر متحمل شده‌اند.

۲. آقای علیرضا مه‌آبادی از آزمایشگاه‌های ماشین‌های الکتریکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌خاطر رسم شکل‌ها.

۳. مسئولین مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌خاطر سرویس بسیار ممتاز.

ضمیمه (۱) :

در این ضمیمه قدری درباره الگوریتم SUMT که در برنامه‌ریزی غیر خطی (NLP) به‌کار می‌رود توضیح می‌دهیم. ایدهٔ اصلی روش مذکور توسط شخصی به‌نام Carrol مطرح شد. او به این نکته اشاره می‌کند که امکان این وجود دارد که مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی همراه با قیود(۱۶) را به‌شکلی به مسائل بدون قیود(۱۷) تبدیل نمود و سپس با حل مساله اخیر به جواب اصلی مساله رسید. در سال ۱۹۶۸ دو نفر به‌نام‌های Fiacoo و Mccornic با انتشار کتابی که برنده جایزه بهترین کتاب آمریکا شد، پیشنهاد Carrol را به صورت تئوریک و برمبنای ریاضی بیان کردند. بعدها برنامه‌های کامپیوتری برای این روش تهیه شد و به صورت مستمر در حل مسائل به‌کار گرفته شد. یکی از این برنامه‌ها اخیرا" از دانشگاه جورج واشنگتن آمریکا به ایران آورده شده و بر روی دیسک مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر قرار گرفته است و در این مقاله نیز از همین برنامه استفاده شده است.

حال مدل غیرخطی اولیه خود را به‌صورت زیر درنظر می‌گیریم :

$$\min Z = f(X1, X2, \ldots Xn) \qquad (۱-۱)$$

St:

$$g1(X1, X2, Xn) \geqslant 0 \qquad (۱-۲)$$

$$g2(X1, X2, \ldots Xn) \geqslant 0 \qquad (۱-۳)$$

$$gm(X1, X2, \ldots Xn) \geqslant 0 \qquad (۱-m)$$

$$h1(X1, X2, \ldots Xn) = 0 \qquad (۱-m-۱)$$

$$h2(X1, X2, \ldots Xn) = 0 \qquad (۱-m-۲)$$

$$hp(X1, X2, \ldots Xn) = 0 \qquad (۱-m-P)$$

$$(۱-m-p-۱)$$

$$X1 \geqslant 0 \qquad X2 \geqslant 0 \; \ldots\ldots \; Xn \geqslant 0$$

روشSUMT که برای تبدیل مساله فوق به یک مساله بدون محدودیت از تابعی به نام تابع جریمه(۱۸) استفاده می‌کند و فرم غیرخطی فوق را به‌صورت زیر تبدیل می‌کند :

$$Q(X1, X2, \ldots Xn, r) = f(X1, X2, \ldots Xn) - r\left[\sum_{i=1}^{m} Lm(gi(X1, X2, \ldots Xn))\right] + \frac{1}{2r}\left[\sum_{j=1}^{p} (hg(X1, X2, \ldots Xn))^2\right] \qquad (۲-۱)$$

از نظر ریاضی می‌توان اثبات کرد که مینیمم کردن تابع Q منجر به مینیمم‌سازی تابع f و نیز ارضای تقریبی قیود g و h در مدل اولیه می‌گردد. r یک اسکالر مثبت است و در ابتدا به‌صورت تخمینی اختیاری تعیین می‌گردد. حال تابع Q فوق که یک تابع غیرخطی بدون قیود می‌باشد را می‌توان با روشهای کلاسیک و متنوعی برنامه‌ریزی غیرخطی بدون قیود مینیمم‌سازی نمود. مهمترین این روش‌ها همان روش گرادیان(۱۹) یا روش برش طلائی(۲۰) می‌باشد.

ضمیمه شماره ۲

جدول ۱ـ۲ : داده‌های مربوط به شکل ۳

شماره واحد	C	B	A	Pmax MW	Pmin MW
۱	۱۱۱۲	۱۵/۸۶	۰/۰۰۳۲۲۴	۶۰۰	۱۵۰
۲	۶۲۰	۱۵/۱۶	۰/۰۰۳۸۸	۴۰۰	۱۰۰
۳	۱۵۶	۱۵/۹۴	۰/۰۰۹۶۴	۲۰۰	۵۰
۴	۹۵۰	۱۳/۴۱۴	۰/۰۰۲۶۴۱	۵۹۰	۱۴۰
۵	۵۶۰/۵	۱۴/۱۷۴	۰/۰۰۳۴۹۶	۴۴۰	۱۱۰
۶	۵۶۰/۵	۱۴/۱۷۴	۰/۰۰۳۴۹۶	۴۴۰	۱۱۰

جدول ۲ـ۲ : داده‌های مربوط به‌شکل ۴

شماره واحد	C	B	A	Pmax MW	Pmin MW
۱	۵۶۱	۷/۹۲	۰/۰۰۱۵۶۲	۶۰۰	۱۵۰
۲	۳۱۰	۷/۸۵	۰/۰۰۱۹۴	۴۰۰	۱۰۰
۳	۷۸	۷/۹۷	۰/۰۰۴۸۲	۲۰۰	۵۰

$$[D] = \begin{bmatrix} ۰/۰۰۰۰۳ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰/۰۰۰۰۹ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۰/۰۰۰۱۲ \end{bmatrix}$$

پاورقی

1. Fuel cost
2. Non - Linear - Programming
3. Sequential - Unconstrained minimization - Technique
4. Optimization
5. Auxilary Power system
6. Boiler - feed - pump
7. Fans
8. Steam Valve
9. Economic - Dispatch
10. Objectine funclion
11. Equality Constraints
12. Inequality - Constraints
13. Tie - line
14. Cost - function
15. System losses
16. Constrained Non linear, Programming
17. Unconstrained Non linear Programming
18. Penalty, function
19. Gradient Method
20. Golden Section - Method

منابع

1. Elgerd: *Electric Energy System*, McGraw - Hill 1982.
2. J. Wood: *Power Generation, operation and Control*, John Wiley, 1984.
3. El-Hawary: *Electric Power Systems*, Printice hall, 1983.
4. SUMT-Manual: George Washington University, U. S. A. 1980, T-434.

۵ـ عابدی/مهرداد (و) تقوی/وحید.کاربرد برنامه‌ریزی غیرخطی و مینی کامپیوتر در توزیع بار اقتصادی نیروگاهها ـ تهران ـ توانیر "دومین کنفرانس کاربرد کامپیوتر در کنترل و نظارت نیروگاهها و شبکه‌های برق ۱۳۶۵".