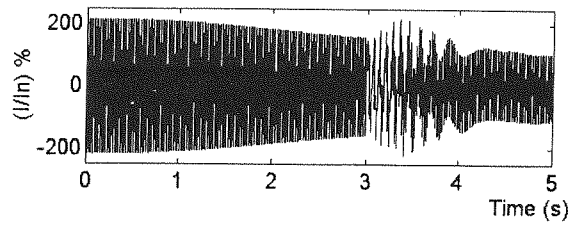
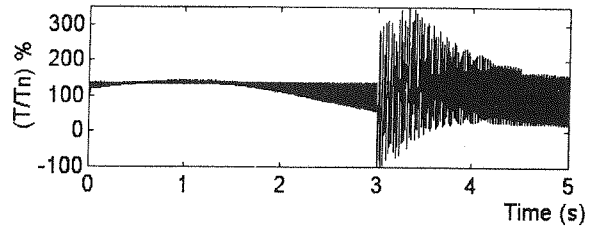


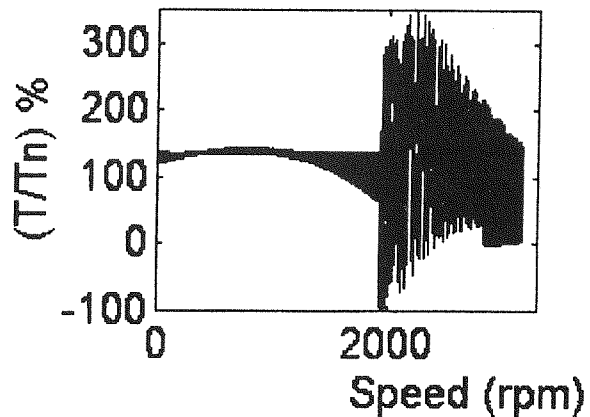
سنکرون روی سرعت ۳۰۰۰ rpm ثابت می ماند.



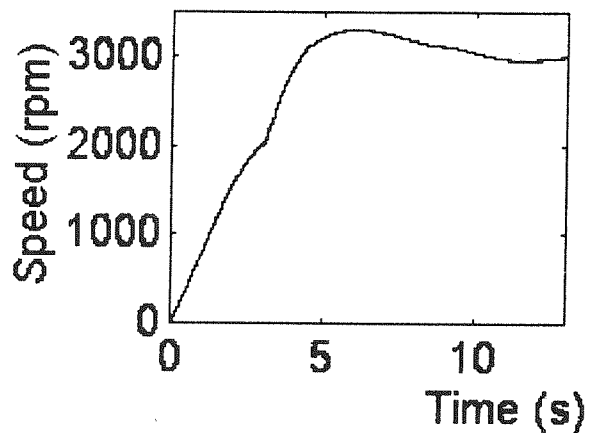
شکل (۴) مشخصه جریان بر حسب زمان.



شکل (۵) مشخصه گشتاور بر حسب زمان.

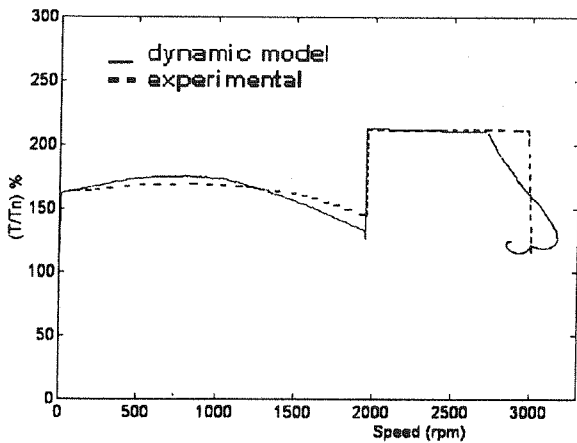


شکل (۶) مشخصه گشتاور بر حسب سرعت.

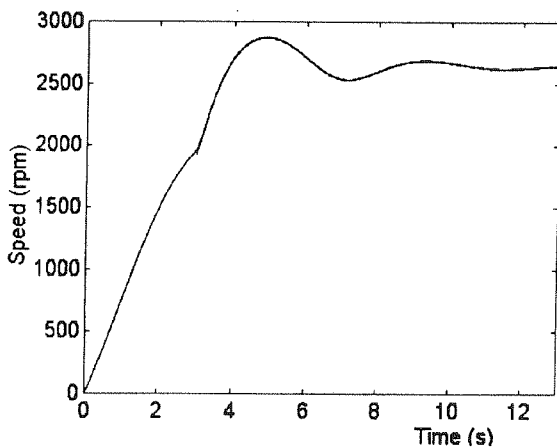


شکل (۷) مشخصه سرعت بر حسب زمان.

در شکل (۸) نیز مشخصه های گشتاور-سرعت حالت دایمی همراه با نتیجه آزمایشگاهی آن [۵] جهت مقایسه ترسیم شده است. در این شکل ملاحظه می گردد که نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی تفاوت چندانی ندارد و این امر دقت خوب مدل را نشان می دهد. با افزایش ψ_m^2 یعنی فوران دور ناشی از نگاشت قطب بر روی لایه نیمه مغناطیسی رتور می توان سرعت نهایی موتور را کنترل کرد. شکل (۹) نشان می دهد که سرعت موتور در ۲۷۰۰ rpm تثبیت شده است.



شکل (۸) مشخصه گشتاور-سرعت حالت دایمی، نتیجه آزمایشگاهی توسط منحنی خط چین و نتیجه مدل سازی توسط خط پر مشخص شده است.



شکل (۹) تنظیم سرعت نهایی موتور توسط نگاشت قطب بر روی لایه نیمه مغناطیسی رتور.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله مدلی برای مطالعه رفتار دینامیکی موتورهای تک فاز «قطب نگاشته» با توان بالا ارائه شد که اساس آن تئوری جامع ماشین های الکتریکی بود. در این مدل ابتدا

مشاهده شد که با کنترل جریان تحریک سیم پیچی مخصوص نگاشت قطب و کنترل فوران مغناطیسی لایه نیمه مغناطیسی رتور، می توان سرعت نهایی موتور را از ۷۰ تا ۱۰۰ درصد سرعت سنکرون کنترل نمود.

دستگاه های مرجع ویژه ای متناسب با خصوصیات منحصر به فرد این نوع موتورها انتخاب گردید. سپس معادلات حاکم بر آنها قبل و بعد از راه اندازی بدست آمد. با حل معادلات حاکم، رفتار این گونه موتورها مورد بررسی قرار گرفت و

مراجع

- [1] Banerjee - B; Singh - Tp, "EPRI's Program with Large Horespower Single - Phase Written Pole Motors", IEEE Technical Applications Conference and Workshops. Northcon/95, IEEE, New York, NY, USA, 1995.
- [2] Lawerence - R, "Applications and Markets for Written Pole Single - Phase Motors to 100 Horsepower", IEEE Technical Applications Conference and Workshops. Northcon/95, IEEE, New York, NY, USA, 1995.
- [3] Richard T. Morash, "Large Horsepower Single - Phase Written Pole Motors For Oil and Gas Well Operations", Precise Power Corporation, Bradenton, FL, USA, 1996.
- [4] Alan Hanna, "Electrical Field Measurements on an EPRI Two - Pole, 20-HP Written Pole Motor", IEEE. Transaction on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March/April, 1997.
- [5] Large Horsepower Single-Phase Written-Pole Motors, Final Report, Prepared by: Precise Power Corpration, October 1997.
- [6] Acar - HG; Landy - CF, "Modelling of a Written-Pole Synchronous Motor", SAUPEC- 96, Southern African Universities Power Engineering Conference, Johannesburg, South Africa, 1996.
- [7] Chis - L; Wiedenbrug - E; Banerjee - B; "Testing and Modelling of the Written - Pole Machine", Symposium on Power Electronics Electrical Drives Advanced Machines, Proceedings, Univ. 'Federico II', Napoli, Italy, 1998.
- [8] Paul C. Krause, Analysis of Electrical Machinery, McGraw-Hill Book Co., New York, 1986.

جایابی بهینه منابع توان راکتیو با هدف بهبود توام پروفیل و پایداری ولتاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حسین سیفی
استاد

بخش مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس

محمد صادق سپاسیان
استادیار

دانشکده صنعت آب و برق

عزیزا... معماریانی
دانشیار

بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

محمود رضا حقی فام
استادیار

بخش مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

امروزه سیستم های قدرت از پیچیدگی روز افزونی برخوردار شده اند و در این میان پدیده پایداری ولتاژ با پاسخ زمانی نسبتاً کند و عواقب بسیار خطرناک آن، محققان و شرکت های بزرگ تولید کننده و پشتیبان را بر آن داشته که آن را بطور جدی مورد بررسی قرار دهند. یکی از روشهای بهبود پدیده فوق استفاده از منابع قدرت راکتیو می باشد که علاوه بر این که بر پایداری ولتاژ اثر می گذارند مستقیماً پروفیل ولتاژ را نیز تحت تأثیر قرار می دهند. در این مقاله مسئله جایابی بهینه منابع قدرت راکتیو با هدف بهبود توام پروفیل و پایداری ولتاژ و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه می گردد. از طرفی با توجه به تأثیر مهم محل های نصب ترانسفورماتورهای مجهز به تغییر دهنده تپ زیر بار بر پایداری و پروفیل ولتاژ، در مدل ارائه شده، جایابی بهینه این تجهیزات نیز مورد توجه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

پایداری ولتاژ، جایابی بهینه منابع توان راکتیو، الگوریتم ژنتیک، تغییر دهنده تپ زیر بار

Optimum Location of VAR Sources for Enhancing the Voltage Profile Using Genetic Algorithm

M. S. Sepasian
Assistant Professor

University of Ministry of Engineering

H. Seifi
Professor

Tarbiat Modarres University

M. R. Haghifam
Assistant Professor

Tarbiat Modarres University

A. Memariani
Assistant Professor
Tarbiat Modarres University

Abstract

Daring recent years, voltage stability has received attention in literature. Reactive power resources while influencing voltage stability, affect voltage profile at the grid. In this paper, a new approach based on Genetic Algorithm is proposed in which proper reactive resources are allocated throughout the system so that both voltage profile and stability are optimized. Due to their important effects, optimal allocation of ULTC'S are also considered.

Keyword

Voltage Stability, Optimal Reactive Power Planning, Genetic Algorithm, Under Load Tap Changer

بهینه سازی لحاظ شده است. ساختار مقاله به شرح زیر است.

پس از مقدمه، در بخش ۱ مسئله مورد نظر به همراه توابع هدف و قیود و محدودیت های مربوطه توضیح داده می شوند. در بخش ۲ روش انتخابی جهت بهینه سازی چند هدفی و در بخش ۳ روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک توضیح داده می شود. در بخش آخر به بیان نتایج عددی پرداخته شده و در نهایت نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار ارائه می گردد.

۱- فرموله کردن مسئله

در این قسمت تعریف جدیدی از مسئله طراحی بهینه منابع قدرت راکتیو به عنوان یک مسئله بهینه سازی چند هدفی و غیر خطی ارائه می گردد.

۱-۱- توابع هدف

سه تابع هدف که در مراحل طراحی مورد توجه می باشند در این مقاله در نظر گرفته شده اند. اولی مربوط به اندیس پایداری ولتاژ، دومین اندیس مربوط به پروفیل و سومی مربوط به هزینه سرمایه گذاری و تعمیر و نگهداری خازن ها، راکتورها و ترانسفورماتور می باشد که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می شود.

۱-۱-۱- تابع هدف اندیس پایداری ولتاژ، PI_{vt}

اندیس های مختلفی برای بررسی پایداری ولتاژ ارائه گردیده و برای محاسبه هر یک نیز روش های مختلفی وجود دارد [۴]. یکی از اندیسهای رایج، فاصله نقطه کار سیستم تا ناپایداری استاتیکی ولتاژ بر حسب توان مصرفی می باشد. در این اندیس فرض بر این است که بار شبکه آنقدر افزایش پیدا می کند تا سیستم به نقطه بحرانی^۴ برسد.

برای محاسبه مقدار فوق روش های مختلفی وجود دارد که معروفترین آنها روش تداومی می باشد^۵ [۱۷]. این روش دارای دو مرحله پیش بینی نقطه جدید با توجه به تغییر بار و سپس تصحیح پاسخ فوق و یافتن پاسخ واقعی شبکه می باشد. تفاوت روش های تداومی بر پایه نحوه عمل تصحیح جهت حفظ همگرایی می باشد. در روش ضرایب حساسیت که در مرجع [۱۳] ارائه شده، پروسه تصحیح حذف شده است و عمل پیش بینی در هر مرحله از نقطه پیش بینی شده قبلی انجام می گیرد. این موضوع باعث افزایش سرعت و حذف عدم همگرایی و در عین حال کاهش دقت می گردد. البته بررسی های انجام گرفته نشان می دهد که این روش در نزدیکی نقطه بحرانی از دقت مناسبی برخوردار است. در روش

در سالهای اخیر، مسئله پایداری ولتاژ مورد توجه وسیع محققین و دست اندرکاران صنعت برق قرار گرفته است. اولین تحقیق در این زمینه به سال ۱۹۶۸ باز می گردد [۱] در حالی که مرجع [۲]، مروری بر مقالات منتشره تا مقطع سال ۱۹۹۸ را ارائه کرده است. گزارشات متعددی در خصوص رخداد این پدیده [نمونه ۳]، روشهای بررسی [نمونه ۴] و روشهای بهبود و تقویت [نمونه ۵] چاپ شده است.

تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که مسئله ناپایداری و فروپاشی ولتاژ عمدتاً از عدم امکان تأمین توان راکتیو ناشی می گردد [۶، ۷]. از این رو، طراحی بهینه منابع توان راکتیو مورد توجه طراحان سیستمهای قدرت قرار گرفته است. تحقیقات اولیه بیشتر در خصوص تعیین محل نصب و مقدار منابع به منظور کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و حداقل سازی هزینه سرمایه گذاری بوده است [۸ و ۹] در حالی که برخی دیگر [نمونه ۱۰]، جایابی منابع مزبور را با هدف بهینه سازی پایداری ولتاژ مدنظر قرار داده اند.

جایابی و تنظیم منابع توان راکتیو به گونه ای که پروفیل و پایداری ولتاژ توأمآمدنظر قرارگیرد در برخی مراجع مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. ولی اندیس انتخابی جهت پایداری ولتاژ و روش حل مناسب نبوده چرا که اکثر روشهای سنتی همچون LP^1 ، NLP^2 و روشهای نیوتن، الگوریتم های تک مسیره می باشند و چنانچه در یک بهینه محلی گرفتار شوند به سختی امکان خروج از آن را دارند. از طرفی مسئله طراحی بهینه منابع قدرت راکتیو ذاتاً دارای نقاط محلی فراوانی است [۱۲] و امکان این که یکی از این روشها در بهینه محلی گرفتار شوند بسیار است. ضمناً توابع هدف و محدودیت ها در این گونه مسائل معمولاً غیر خطی هستند و استفاده از روشهای خطی سازی باعث ایجاد خطا در محاسبات و حذف نقاط مناسب می گردد.

در این مقاله هدف این است که جایابی خازن و راکتور شنت در یک شبکه اولاً به منظور حفظ و بهبود پروفیل ولتاژ صورت گیرد و ثانیاً پایداری ولتاژ به صورت فاصله نقطه کار سیستم تا نقطه بحرانی حداکثر گردد. بعلاوه، از روش حل جدیدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک که یک الگوریتم چند مسیره است و امکان یافتن بهینه عمومی در آن زیاد است و همچنین در آن نگرانی از غیر خطی بودن توابع هدف و قیود ندارد، استفاده شده است. ضمناً از آنجا که ترانسفورماتورهای مجهز به تغییر دهنده های تپ زیر بار تاثیر به سزایی در دو مورد فوق (پایداری و پروفیل ولتاژ) دارند، در حل مسئله، محل های مناسب نصب سیستم های ULTC^۳ نیز مشخص می شوند. به علاوه، هزینه های خازن و ULTC نیز در مسئله

مطروحه در مرجع [۱۳]، ترانسفورماتورهای مجهز به تغییر دهنده تپ زیر بار (ULTC) مدل نشده اند. در این مقاله به علت وجود این نوع ترانسفورماتور، روش فوق جهت لحاظ کردن تاثیر ULTC اصلاح شده است.

در این روش جهت محاسبه فاصله نقطه کار سیستم تا ناپایداری استاتیکی ولتاژ، بار سیستم را به تدریج زیاد کرده و در هر مرحله به جای حل کامل معادلات پخش بار، از ضرایب حساسیت $\Delta\theta/\Delta Q$ ، $\Delta V/\Delta Q$ و $\Delta t/\Delta Q$ جهت یافتن نقطه کار جدید استفاده می شود و این عمل آنقدر ادامه پیدا می کند تا سیستم به نقطه بحرانی برسد. در این نقطه ضریب حساسیت $\Delta V/\Delta Q$ تغییر علامت می دهد که معیار خوبی جهت پایان الگوریتم می باشد.

این روش به شرح زیر است:

الف - حل معادلات پخش بار و محاسبه مقادیر اولیه ولتاژها، زوایای شین ها و مقدار تپ ترانسفورماتورها با استفاده از روابط زیر

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{Pt} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{Qt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

J : ماتریس جاکوبین سیستم

$\Delta\theta$: تغییرات زاویه ولتاژ شین ها

ΔV : تغییرات اندازه ولتاژ شین ها

Δt : تغییرات تپ ترانسفورماتورهای تغییر دهنده تپ زیر بار

ΔQ : تغییرات توان راکتیو شین های مصرف

ΔP : تغییرات توان اکتیو شین های مصرف

ب - محاسبه ضرایب حساسیت $\Delta\theta/\Delta Q$ ، $\Delta V/\Delta Q$ و

$\Delta t/\Delta Q$. روش کار به این صورت است که برای شین تحت

مطالعه، $\Delta P=0$ و $\Delta Q=1$ انتخاب می شود. با حل دستگاه

معادلات (۱) برای مجهولات $\Delta\theta$ ، $\Delta|V|$ ، Δt و در

نتیجه نسبت آنها به ΔQ (با توجه به این که $\Delta Q=1.0$)

است) مستقیماً محاسبه می شود.

پ - اگر $\Delta V/\Delta Q$ تغییر علامت داد الگوریتم پایان می پذیرد.

ت - انتخاب طول گام ΔQ (حداکثر افزایش بار در یک مرحله)

با توجه به حدود مجاز توان راکتیو ژنراتورها و تپ

ترانسفورماتورها.

ث - محاسبه ولتاژ و زوایای شین ها به همراه وضعیت جدید

تپ ترانسفورماتورهای تغییر دهنده تپ زیر بار با

استفاده از ضرایب محاسبه شده در بند (ب).

ج - تکرار مرحله (ب) به بعد.

لازم به ذکر است که الگوریتم فوق برای محاسبه فاصله

نقطه کار سیستم تا نقطه ناپایداری بر حسب توان راکتیو به

کار گرفته شده است. چنانچه این اندیس بر حسب توان اکتیو

مصرفی شین های مصرف مدنظر باشد از ضرایب $\Delta\theta/\Delta P$ ، $\Delta V/\Delta P$ و $\Delta t/\Delta P$ در روند محاسبه استفاده می گردد و چنانچه اندیس پایداری بر حسب توان ظاهری مورد نظر باشد ترکیبی از این دو ضریب با توجه به ثابت ماندن ضریب قدرت بار استفاده خواهد گردید. همچنین، چنانچه اندیس فوق بر حسب تغییر بار کل سیستم مدنظر باشد (که در این مقاله از آن استفاده شده است) با فرض همسان بودن بارها، افزایش توان اکتیو کل شبکه به نسبت بارهای پایه بین شین های مصرف تقسیم شده و نقطه کار بعدی تخمین زده می شود. زمانی که فاصله نقطه کار سیستم تا ناپایداری بر حسب توان مصرفی، حداکثر شود فرض می شود که تابع هدف (اندیس پایداری ولتاژ، PI_{pr}) بهینه شده است.

۱-۱-۲ - تابع هدف پروفیل ولتاژ، PI_{pr}

ولتاژ شین ها یکی از مهمترین اندیس های کیفیت سیستم می باشد. در این مقاله حدود ولتاژ شین ها به عنوان قید در بهینه سازی استفاده شده است ولی برای تامین بهترین شرایط، لازم است که ولتاژها هر چه بیشتر به مقادیر از پیش تعیین شده نزدیک باشند. به همین دلیل اندیس پروفیل ولتاژ به صورت مجموع مجذور اختلاف ولتاژ شین های سیستم با مقادیر مرجع انتخاب شده است و هدف حداقل سازی این اندیس می باشد.

در این مقاله، مقادیر مرجع برای شین های مصرف $V_i/0$ در مبنای واحد و برای شین های تولید و دارای ترانسفورماتور (از نوع تغییر دهنده تپ زیر بار)، ولتاژ تنظیمی انتخاب شده است.

$$PI_{pr} = \sum_{i=1}^{ns} (V_i - V_{refi})^2 \quad (2)$$

V_i : ولتاژ شین i

V_{refi} : ولتاژ مطلوب شین i

ns: تعداد شین سیستم

۱-۱-۳ - تابع هدف هزینه خازن، راکتور و

ترانسفورماتور، PI_{cp} و PI_{ut}

از آنجا که در هر عمل اصلاحی باید مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته شود لذا هزینه نصب خازن، راکتور و ULTC، به صورت یک هدف در مسئله بهینه سازی وارد شده است. این تابع برای خازن و راکتور به صورت زیر می باشد:

$$PI_{cp} = \sum_{i=1}^{nb} (C_{fi}^c + C_{vi}^c (ZC_i)) \quad (3)$$

و اندازه تپ ترانسفورماتور از جمله قیودی هستند که باید در محدوده مجاز قرار گیرند. از این رو:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, \dots, ns$$

$$Pg_j^{\min} \leq Pg_j \leq Pg_j^{\max} \quad j = 1, \dots, ng$$

$$Qg_k^{\min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{\max} \quad k = 1, \dots, ng$$

$$t_l^{\min} \leq t_l \leq t_l^{\max} \quad l=1, \dots, nt$$

این قیود به شکل بسته زیر می باشند:

$$G(X, U, Zc, Zu) \leq 0 \quad (7)$$

۱-۳ - شکل کلی مسئله

به طور خلاصه، مسئله بهینه سازی چند هدفی به صورت زیر شکل می گیرد.

$$\text{Max } PI_{st}$$

and

$$\text{Min } PI_{pr} = \sum_{i=1}^{ns} (V_i - V_{ref})^2$$

and

$$\text{Min } PI_{cp} = \sum_{i=1}^{nb} (C_{fi}^c + C_{vi}^c(Zc_i))$$

and

$$\text{Min } PI_{ut} = \sum_{i=1}^{nt} C_{fi}^u \quad (8)$$

مشروط به:

$$F(X, U, Zc, Zu) \leq 0 \quad (\text{قیود پخش بار})$$

$$G(X, U, Zc, Zu) \leq 0 \quad (\text{قیود عملیاتی})$$

این یک مسئله بهینه سازی چند هدفی غیر خطی با قیود برابری و نابرابری می باشد. اکثر روشهای بهینه سازی موجود برای حل این نوع مسائل مناسب نیستند. در ادامه پس از توضیح روش انتخابی جهت حل مسئله چند تابع هدفی، به توضیح روش بهینه سازی انتخابی می پردازیم.

۲- حل مسئله بهینه سازی چند هدفی

C_{fi}^c اندیس متناظر با هزینه نصب خازن یا راکتور و سرمایه گذاری های مربوط در شین i ام می باشد، که تابعی از سطح ولتاژ بوده و معمولاً یک تابع پله ای می باشد، C_{vi}^c اندیس متناظر با هزینه خازن یا راکتور و هزینه های بهره برداری و نگهداری در شین i ام بوده معمولاً تابعی از مقدار خازن یا راکتور نصب شده (Zc_i) می باشد و nb تعداد شین هایی است که در آنها خازن یا راکتور نصب شده است. در مورد تابع هزینه ترانسفورماتورها، فرض بر این است که آنها در سیستم نصب شده اند و تنها در مورد نصب تجهیزات ULTC بر روی آنها تصمیم گیری می شود. لذا تابع هزینه مربوط به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$PI_{ut} = \sum_{i=1}^{nt} C_{fi}^u \quad (4)$$

C_{fi}^u اندیس متناظر با هزینه نصب و سرمایه گذاری های مربوط جهت تجهیز ترانسفورماتور i ام به ULTC بوده و معمولاً تابعی از توان انتقالی و ولتاژ ترانسفورماتور می باشد و nt تعداد ترانسفورماتورهای است که در آنها تجهیزات ULTC نصب شده است.

۱-۲ - قیود

در سیستم قدرت قیودی وجود دارند که لازم است برای حفظ مسائل حفاظتی، اقتصادی و ایمنی رعایت شوند. این قیود به صورت زیر هستند.

۱-۲-۱ - قیود تامین بار (معادلات پخش بار)

تعادل بین قدرت اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرف باید همواره تامین گردد که این تعادل توسط معادلات پخش بار توضیح داده می شود. شکل بسته معادلات فوق به صورت زیر می باشند.

$$F(X, U, Zc, Zu) = 0 \quad (5)$$

X : متغیرهای حالت (ولتاژ شین ها، زوایای شین ها، تپ ترانسفورماتورها و ...)

U : متغیرهای کنترلی (ولتاژ شین های تولید، ولتاژ شین های مجهز به ULTC و ...)

Zc : مقدار توان راکتیو نصب شده

Zu : صفر یا یک به معنی وجود یا عدم وجود ULTC

۱-۲-۲ - قیود محدوده های مجاز

اندازه ولتاژ شین ها، توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها

یک مسئله بهینه سازی چند هدفی را می توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\begin{aligned} \text{Min } & f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X) \\ G_j(X) & \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (9)$$

m و k به ترتیب نشان دهنده تعداد قیود و توابع هدفی است که باید کمینه شوند.

برای حل مسئله بهینه سازی چند هدفی روشهای مختلفی ارائه شده است [۱۴] که در آنها نیاز به یک سری اطلاعات اضافی از توابع هدف و مسئله بهینه سازی است و در تمام آنها نظر طراح در پاسخ نهائی قابل ملاحظه می باشد. در میان روشهای موجود روش معیار سراسری تاثیر کمتری از نظرات طراح می گیرد و اساساً بر پایه نرمالیزه کردن توابع هدف حول نقطه کار بهینه استوار است که در این مقاله نیز از این روش استفاده گردیده است.

در این روش، جواب بهینه با حداقل سازی یک معیار سراسری از پیش انتخاب شده $F(X)$ ، پیدا می شود. چنین معیاری در این مقاله، مجموع مربعات انحرافهای نسبی توابع هدف از جوابهای ایده ال امکان پذیر، در نظر گرفته شده است یعنی:

$$\begin{aligned} \text{Min } F(X) &= \sum_{i=1}^k \left[\frac{f_i(X_i) - f_i(X_i^*)}{f_i(X_i^*)} \right]^2 \\ \text{s.t.} \\ G_j(X) &\leq 0 \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

X_i^* جواب مسئله زیر می باشد.

$$\begin{aligned} \text{Min } & f_i(X_i^*) \\ \text{s.t.} \\ G_j(X_i^*) &\leq 0 \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

۳- روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک GA

اکثر روشهای سنتی همچون برنامه ریزی خطی و برنامه ریزی غیر خطی و روشهای نیوتن، الگوریتم های تک مسیره می باشند. این الگوریتم ها از یک نقطه شروع کرده و در هر مرحله اقدام به بهبود جواب ها کرده و از یک مسیر به نقطه بهینه نزدیک می شوند. این روش ها چنانچه در یک بهینه محلی گرفتار شوند به سختی امکان تشخیص و عبور از آن را

دارند. از آنجا که مسئله مورد نظر در این مقاله دارای نقاط بهینه محلی فراوانی است لذا امکان این که این روش ها در یکی از آنها گرفتار شوند بسیار زیاد است. ولی روش GA به جای یک نقطه، از یک جمعیت^۷ (تعداد n نقطه) شروع کرده و از n مسیر به سمت پاسخ بهینه حرکت می کند.

از اینروست که این روش در حل مسئله پیچیده مزبور به عنوان روش حل اختیار شده است. اصول GA در مرجع [۱۵] بیان شده است. در زیر بخش های دیگر، نحوه انطباق الگوریتم GA با مسئله بهینه سازی بخش ۲، بیان می شود.

۳-۱- متغیرهای تصمیم گیری^۸

هدف، تعیین محل نصب خازن یا راکتور و مقدار آن و تصمیم به تجهیز ترانسفورماتورهای سیستم به ULTC می باشد. این متغیرها توسط رشته Z به صورت زیر تعریف می شوند. رشته Z حاوی دو زیر رشته X و Y می باشد. ژن های زیر رشته X معرف نصب یا عدم نصب ULTC بر روی ترانسفورماتورهای مربوطه بوده و ژن های زیر رشته Y نیز تعداد بانک های خازنی یا راکتوری نصب شده بر شین های متناظر را نشان می دهد. ژن های با علامت منفی نشان دهنده خازن می باشند.

$$\begin{aligned} Z_i &= [X_i, Y_i] \\ X_j &= [T_1^i, T_2^i, \dots, T_n^i] \end{aligned} \quad (12)$$

$$Y_j = [C_1^i, C_2^i, \dots, C_m^i]$$

Z_i : رشته i ام از جمعیت

T_k^i : برابر ۱ یعنی ترانسفورماتور k ام مجهز به ULTC است

C_j^i : تعداد بانک های خازنی یا راکتوری نصب شده در شین j ام

n : تعداد ترانسفورماتورهای مجاز جهت نصب ULTC

m : تعداد شین های مجاز جهت نصب خازن و راکتور

۳-۲- توابع ژنتیک^۹

توابع ژنتیک اعمالی هستند که بر جمعیت اولیه اثر کرده و جمعیت جدید را می سازند. توابعی که معمولاً در ژنتیک استفاده می شود عبارتند از تابع جابجایی^{۱۰} و تابع پرش^{۱۱} که در ادامه به توضیح هر یک می پردازیم.

۳-۲-۱- تابع جابجایی

از دو نوع تابع، ریاضی و معمولی در این مقاله استفاده شده است. برای مراحل اولیه از روش جابجایی معمولی

استفاده می شود. در روش فوق دو رشته انتخابی از جمعیت اولیه از یک نقطه تصادفی اطلاعات خود را مبادله می کنند. در این مقاله به دلیل این که متغیر تصمیم گیری از دو قسمت مجزا تشکیل شده است، عمل جابجایی برای هر قسمت جداگانه اعمال می شود. این روش برای یک رشته نمونه V عضوی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} Z_1 &= [T_1^1, T_2^1, T_3^1, C_1^1, C_2^1, C_3^1, C_4^1] \\ Z_2 &= [T_1^2, T_2^2, T_3^2, C_1^2, C_2^2, C_3^2, C_4^2] \\ Z'_1 &= [T_1^1, T_2^1, T_3^1, C_1^1, C_2^2, C_3^2, C_4^2] \\ Z'_2 &= [T_1^2, T_2^2, T_3^2, C_1^2, C_2^1, C_3^1, C_4^1] \end{aligned} \quad (13)$$

i : یک عدد تصادفی بین ۱ و n

j : یک عدد تصادفی بین ۱ و m

Z_i : والدین A_m از جمعیت اولیه

Z'_i : فرزندان تولیدی توسط والدین A_m

روش جابجایی معمولی این خاصیت را دارد که پرش های بلندتری در مجموعه جواب ایجاد می کند و برای مراحل اولیه که می خواهیم جمعیت اولیه را بسط دهیم، مناسب است. ولی در مراحل نهایی کار که الگوریتم به سمت جواب همگرا می شود از روش جابجایی ریاضی استفاده می شود. فرزندان تولیدی توسط این روش در مورد ژن های مربوط به منابع توان راکتیو در میان جمعیت اولیه باقی می ماند و پاسخ را به سمت همگرایی بیشتر میل می دهند. این روش به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} Z_1 &= [X_1, Y_1] & Z'_1 &= [X'_1, Y'_1] \\ Z_2 &= [X_2, Y_2] & Z'_2 &= [X'_2, Y'_2] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} X_1^i &= C_1^i \times X_1^i + (1 - C_1^i) \times X_2^i & Y_1^i &= C_2^i \times Y_1^i + (1 - C_2^i) \times Y_2^i \\ X_2^i &= (1 - C_1^i) \times X_1^i + C_1^i \times X_2^i & Y_2^i &= (1 - C_2^i) \times Y_1^i + C_2^i \times Y_2^i \end{aligned}$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

C_1^i : یک عدد تصادفی (۰ یا ۱)

C_2^i : یک عدد تصادفی (بین ۰ و ۱)

احتمال P_m یک عنصر از رشته انتخابی از جمعیت اولیه با یک مقدار تصادفی در محدوده مجاز تعویض گشته و رشته جدید تولید می گردد. این تابع برای یک رشته نمونه به شرح زیر می باشد:

$$Z_k = [T_1^k, T_2^k, T_3^k, C_1^k, C_2^k, C_3^k, C_4^k] \quad (15)$$

$$Z'_k = [T_1^k, t_2^k, T_3^k, C_1^k, C_2^k, c_3^k, C_4^k]$$

t_2^k : یک عدد تصادفی (۰ یا ۱)

c_3^k : یک عدد تصادفی (بین ۰ و M) (حداکثر تعداد بانک های خزانی قابل نصب)

۳-۲-۳- تابع ارزیابی^{۱۲} و انتخاب

به تمام متغیر های تصمیم گیری یک مقدار شایستگی^{۱۳} نسبت داده می شود. در این مقاله از تابع هدف برای نسبت دادن یک مقدار شایستگی به تمام رشته ها استفاده می شود. جمعیت جدید از میان جمعیت قدیم و فرزندان تولیدی، بر اساس کمترین مقدار شایستگی انتخاب می شود.

شکل تابع ارزیابی به شرح زیر است:

اگر Z_k در ناحیه قابل قبول قرار دارد

$$\text{eval}(Z_k) = \frac{PI(Z_k)}{A} \quad (16)$$

اگر Z_k در ناحیه قابل قبول قرار ندارد

A : یک عدد بسیار بزرگ

۴- نتایج عددی

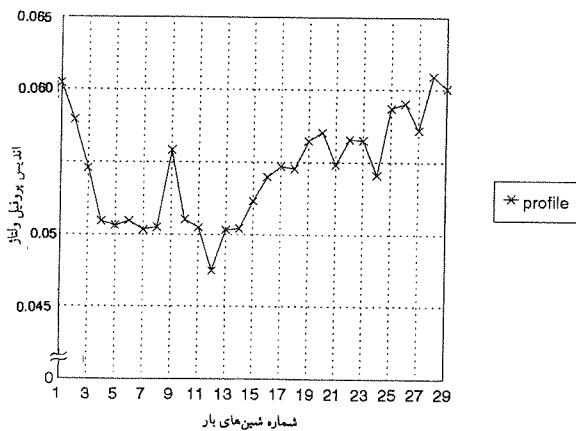
جهت نمایش قابلیت های روش پیشنهادی، آزمایشاتی بر روی دو شبکه نمونه انجام گرفت. شبکه اول، شبکه نمونه New England با ۲۹ شین و ۴۶ خط انتقال می باشد که معمولاً در مقالات مختلف جهت بررسی پایداری و لتاژ مورد استفاده قرار گرفته است. جهت نمایش قابلیت روش در سیستم های بزرگتر نیز آزمایشاتی بر روی شبکه ۱۱۸ شینه IEEE انجام گرفته است.

۴-۱- شبکه ۳۹ شینه New England

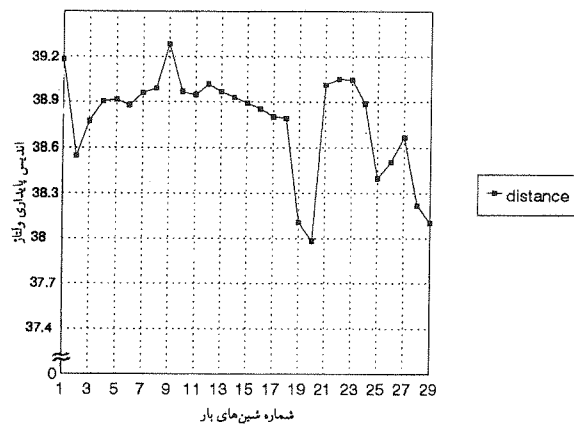
جزئیات شبکه [۱۶] و پارامترهای الگوریتم در جدول (۱) آورده شده است. برای نمایش قابلیت های روش پیشنهادی و همچنین قابلیت های الگوریتم ژنتیک دریافتن بهینه عمومی

۳-۲-۲- پرش

پدیده پرش های ژنتیکی در دنیای واقعی در این الگوریتم با استفاده از تابع پرش مدل شده است. در این روش با



شکل (۲) اندیس پروفیل ولتاژ بر حسب شماره شینی که خازن در آن نصب شده است.



شکل (۱) اندیس پایداری ولتاژ بر حسب شماره شینی که خازن در آن نصب شده است.

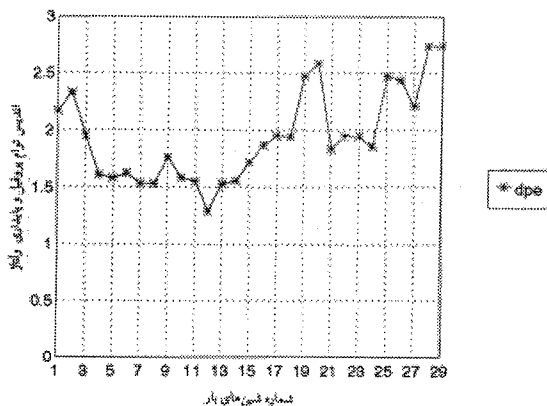
۴-۱-۱- روش جستجوی مستقیم

جهت انتخاب بهترین محل نصب خازن، ابتدا خازنی با ظرفیت 1 Pu را به ترتیب در هر یک از شین های شبکه نمونه قرار می دهیم. منحنی تغییرات پایداری و پروفیل ولتاژ به ترتیب در اشکال (۱) و (۲) نمایش داده شده اند.

مشاهده می شود که افزودن خازن در تمام شین های مصرف باعث بهبود پایداری ولتاژ می گردد و این تأثیر در شین شماره ۹ حداکثر می باشد. از دیدگاه پروفیل ولتاژ مطابق شکل (۲) شین شماره ۱۲ بهترین شین، جهت نصب خازن خواهد بود.

شکل (۳) اندیس توام پروفیل و پایداری ولتاژ بر حسب شماره شینی که خازن در آن نصب شده است را نشان می دهد.

با توجه به این شکل، ۵ شین با کمترین اندیس تابع هدف توام را جهت نصب خازن انتخاب می کنیم. اکنون برای تعیین بهترین مقدار خازن، فرض می کنیم که بانکهای خازنی 1 Pu بوده و حداکثر ۳ بانک خازنی را می توان در هر شین نصب نمود و تمام حالات نصب که 4^5 حالت می گردد را بررسی می کنیم. نتایج در اشکال (۴) و (۵) و (۶) به ترتیب جهت اندیس های پروفیل، پایداری و تابع هدف توام نشان داده شده

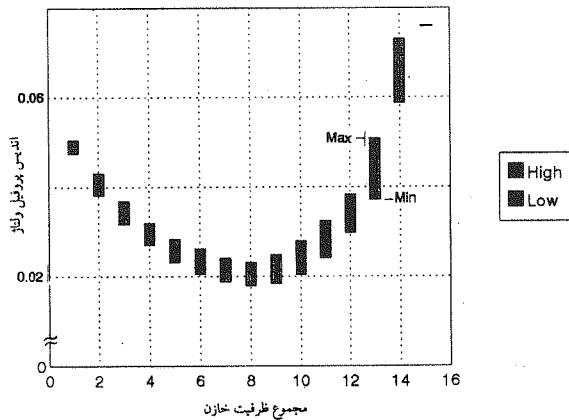


شکل (۳) اندیس توام پروفیل و پایداری بر حسب شماره شینی که خازن در آن نصب شده است.

ابتدا از یک روش جستجوی مستقیم تمام فضای پاسخ برای حل مسئله جایابی خازن در شبکه نمونه استفاده کرده و سپس با نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک مقایسه می کنیم. در ادامه تأثیر ترانسفورماتورهای مجهز به ULTC را بر پاسخ بهینه بررسی کرده و در آخر همگرایی الگوریتم ژنتیک را بررسی خواهیم کرد.

جدول (۱) جزئیات شبکه New England و پارامترهای مسئله بهینه سازی.

پارامترهای بهینه سازی	محدودیت های طراحی	مشخصات شبکه New England
جمعیت الگوریتم ژنتیک : ۳۰	تعداد شین های مجاز جهت نصب خازن : ۵	تعداد شین های تولید : ۱۰
احتمال جایابی (Pm) : ۰/۸	تعداد ULTC مجاز جهت نصب : ۳	تعداد شین های مصرف : ۱۹
احتمال پرش (Pc) : ۰/۲	محدوده مجاز ولتاژ : $0.9 < V < 1.1$	تعداد خطوط : ۴۶
تعداد تکرار : ۵۰	محدوده مجاز تب : $0.9 < T < 1.1$	تعداد ترانسفورماتور : ۱۲



شکل (۶) اندیس توام پروفیل و پایداری بر حسب مجموع ظرفیت خازنی نصب شده در سیستم.

همانگونه که در جدول (۲) دیده می شود بهترین مقدار اندیس پایداری با استفاده از مجموع ۱۵ pu خازن تامین می گردد در حالی که بهترین اندیس پروفیل با نصب ۸ pu خازن بدست می آید.

با اعمال تابع هدف توام، بهترین نتیجه در نصب ۸ pu ظرفیت خازنی جدول (۲) می باشد.

همانگونه که مشاهده شد برای یک شبکه کوچک و تعداد اندک شین های مجاز جهت نصب خازن، مسئله پیچیده و دشوار است. فضای جستجو با افزایش تعداد شین های مجاز و تعداد بانکهای خازنی به صورت نمایی افزایش می یابد. به طوری که به عنوان مثال، برای ۲۰ شین مجاز و ۵ بانک خازنی، تعداد ۲۰^۵ حالت خواهیم داشت و چنانکه مسئله سطوح بار و ترانسفورماتورهای مجهز به ULTC را نیز در نظر بگیریم این تعداد به مراتب بیشتر خواهد گردید.

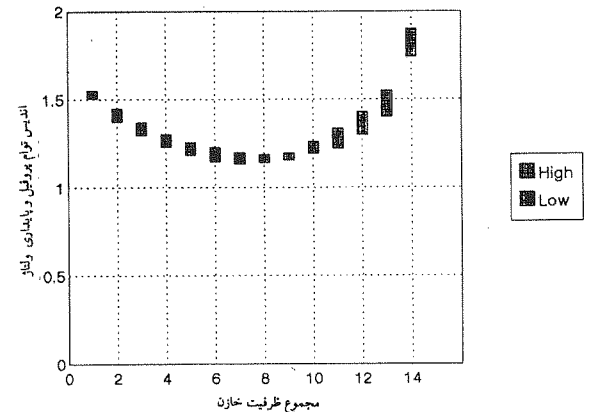
۴-۱-۲- روش الگوریتم ژنتیک

در بخش قبل دیدیم که حل مسئله جایابی خازن با روش جستجوی مستقیم بسیار زمان بر و تقریباً غیر ممکن است. در این بخش چهار آزمایش انجام می شود. در ابتدا همان مسئله قبلی را با روش الگوریتم ژنتیک حل می کنیم تا قابلیت

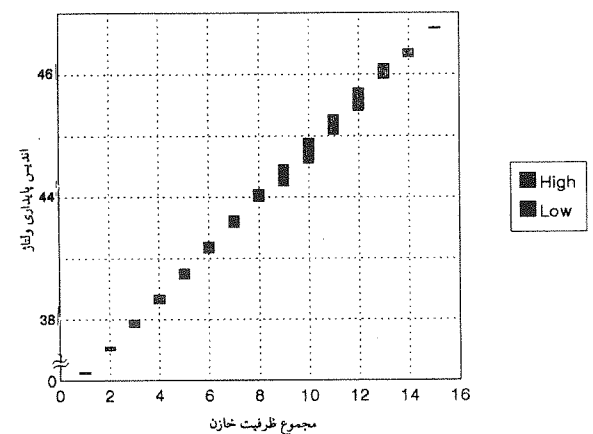
جدول (۲) ظرفیت خازنی نصب شده در شین های انتخابی با روش جستجوی مستقیم.

شین های انتخابی	۷	۸	۱۱	۱۲	۱۳
ظرفیت خازن (pu) جهت تامین بهترین اندیس پروفیل	۲	۰	۲	۱	۳
ظرفیت خازن (pu) جهت تامین بهترین اندیس پایداری	۳	۳	۳	۳	۳
ظرفیت خازن (pu) جهت بهترین اندیس توام پروفیل و پایداری	۰	۱	۳	۱	۳

است. در اشکال فوق تغییرات اندیس های مورد نظر بر حسب مجموع ظرفیت خازن نصب شده رسم شده اند. مثلاً همانگونه که در شکل (۴) دیده می شود به ازای نصب ۱۳ pu خازن در شبکه، اندیس پروفیل بین دو مقدار Max و Min بر حسب توزیع این مقدار خازن بین شین های انتخابی تغییر می کند.



شکل (۴) اندیس پروفیل و نتاژ بر حسب مجموع ظرفیت خازنی نصب شده در سیستم.

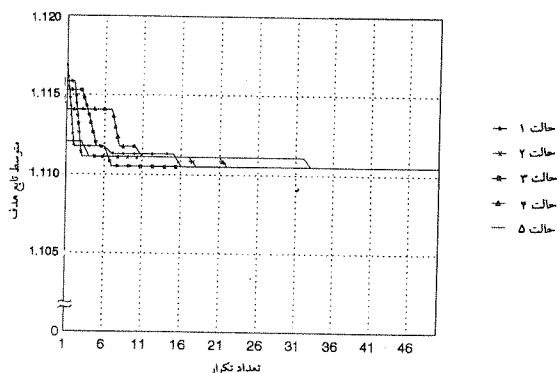


شکل (۵) اندیس پایداری و نتاژ بر حسب مجموع ظرفیت خازنی نصب شده در سیستم.

پروفیل و پایداری ولتاژ دارند، لذا محلهای نصب آنها در شبکه بسیار مهم است. در این آزمایش فرض می‌کنیم که ترانسفورماتورهای ۳۵، ۴۴ و ۴۶ از سیستم مورد نظر قابلیت نصب تجهیزات ULTC را دارا باشند و مسئله بهینه‌سازی را با در نظر گرفتن امکان نصب تجهیزات ULTC بر روی آنها انجام می‌دهیم. نتایج در جدول (۴) آورده شده است. تابع هدف توام در این حالت مقدار $1/0.75813$ بدست می‌آید.

آزمایش چهارم

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم تصادفی بوده و اثبات می‌شود که وقتی تعداد تکرارها به سمت بینهایت می‌رود الگوریتم به سمت بهینه عمومی نزدیک می‌گردد [۱۵]. برای نمایش شدت همگرایی الگوریتم ژنتیک، آزمایش اول برای تعداد تکرارهای مختلف به دفعات انجام شد و متوسط تابع هدف بر حسب تعداد تکرارها در شکل (۷) رسم شده است.



شکل (۷) متوسط تابع هدف بر حسب تعداد تکرارهای الگوریتم ژنتیک.

روش نشان داده شود. سپس مسئله فوق را با روش ژنتیک و بانکهای خازنی کوچکتر ($0/2 pu$) حل کرده و سپس بهینه‌سازی محل نصب تجهیزات ULTC را نیز وارد کرده و در آخر آزمایشاتی جهت نمایش شدت همگرایی روش ژنتیک ارائه می‌دهیم.

آزمایش اول

مسئله قبل با استفاده از روش ژنتیک حل گردید و مشاهده شد که در 75% موارد الگوریتم به طور متوسط پس از ۱۵ تکرار به پاسخ بهینه می‌رسد. در روش جستجوی مستقیم 1024 حالت مختلف بررسی گردید ولی روش فوق به طور متوسط با بررسی 450 حالت مختلف به پاسخ بهینه رسید یعنی با زمانی در حدود 42% روش جستجوی مستقیم، پاسخ بهینه بدست آمد که این اختلاف با افزایش حجم مسئله شدیداً افزایش می‌یابد.

آزمایش دوم

برای شبکه قبل و همان شین‌های مجاز جهت نصب خازن، عمل بهینه‌سازی با نصب بانکهای خازنی $0/2 pu$ و حداکثر ۱۵ بانک در هر شین، حل شده است نتایج در جدول (۳) آورده شده است. تابع هدف توام در روش جستجوی مستقیم $1/110522$ بود که در این حالت، مقدار $1/110317$ بدست می‌آید.

آزمایش سوم

ترانسفورماتورهای مجهز به ULTC تاثیر مستقیم بر

جدول (۳) نقطه بهینه با استفاده از روش ژنتیک.

شین‌های انتخابی	۷	۸	۱۱	۱۲	۱۳
مقدار خازن (pu) در روش جستجوی مستقیم	۰	۱	۳	۱	۳
مقدار خازن (pu) در روش الگوریتم ژنتیک	$0/2$	$1/4$	$2/2$	$1/2$	۳

جدول (۴) نقطه بهینه با در نظر گرفتن ترانسفورماتورهای مجهز به ULTC.

شین‌های انتخابی	۷	۸	۱۱	۱۲	۱۳
مقدار خازن (pu)	$0/8$	$0/6$	$1/4$	۳	$2/8$
خطوط مجاز جهت نصب ULTC	۲۵	۴۴	۴۵		
تجهیزات ULTC نصب شود	بله	خیر	خیر		

۵- نتیجه گیری

در این مقاله پس از فرموله کردن مسئله جایابی بهینه منابع توان راکتیو، با معرفی دو اندیس پروفیل و پایداری ولتاژ، روش حل مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه گردید. سپس جایابی خازن و راکتور شنت در شبکه نمونه New England با روش جستجوی مستقیم و روش فوق الذکر انجام گرفته و آزمایشاتی جهت نمایش قابلیت این روش ارائه شد. در ادامه جهت نمایش قابلیت اعمال این روش بر شبکه های بزرگتر، مسئله جایابی منابع توان راکتیو در شبکه ۱۱۸ شینه IEEE نیز حل گردید.

از آنجا که برخی مسائل سیستم قدرت از جمله سطوح مختلف بار در مدل سازی فوق مورد توجه قرار نگرفته اند، مؤلفین علاوه بر بررسی بهبود روش ژنتیک، بهبود مدل سازی مسئله (از قبیل بهبود توابع هدف، ضرایب وزنی، سطوح بار و ...) را در دست بررسی و مطالعه دارند.

زیر نویس ها

- 1-Linear Programming
- 2- Nonlinear Programming
- 3-Under Load Tap Changer
- 4-Critical Point
- 5- Continuation
- 6-Genetic Algorithm
- 7- Population
- 8- Chromosomes
- 9-Genetic Operations
- 10-Crossover
- 11-Mutation
- 12- Evaluation Function
- 13- Fitness

همانگونه که در شکل (۷) دیده می شود در ۲۰٪ موارد ۸ تکرار، در ۶۰٪ موارد در ۲۰ تکرار و بالاخره در ۱۰۰٪ موارد بعد از ۳۵ تکرار مسئله به پاسخ بهینه خود می رسد.

۴-۲- شبکه ۱۱۸ شینه IEEE

جزئیات شبکه و پارامترهای الگوریتم در جدول (۵) آورده شده است. مسئله جایابی خازن، راکتور و ULTC با ۲۰ شین مجاز جهت نصب خازن و راکتور با حداکثر ۶ بانک خازنی و ۴ بانک راکتوری ۰/۱ پریونیتی به همراه ۳ ترانسفورماتور مجاز جهت نصب ULTC، برای شبکه ۱۱۸ شینه IEEE با الگوریتم فوق حل شده که نتایج در جدول (۶) آورده شده است. اندیس پایداری و پروفیل برای شبکه فوق قبل از اعمال الگوریتم به ترتیب ۴۴/۴۹۹۳ و ۰/۵۲۹ بوده است.

بعد از اعمال الگوریتم بهینه سازی جهت یافتن بهترین اندیس پایداری، همانگونه که از جدول فوق دیده می شود با نصب ۸/۷ pu ظرفیت خازنی و نصب تجهیزات ULTC بر روی خطوط ۱۰ و ۲۹، اندیس پایداری به مقدار ۵۲/۷۳۸۵ افزایش می یابد در حالی که اندیس پروفیل برابر ۰/۱۵۸۲۳ شده که مناسب نیست و چنانچه مسئله برای یافتن بهترین اندیس پروفیل حل شود با نصب ۴/۶ pu خازن شنت، ۰/۶ pu راکتور و نصب تجهیزات ULTC بر خطوط ۱۰ و ۲۹ و ۴۲، اندیس پروفیل برابر ۰/۰۲۸ شده ولی اندیس پایداری به رقم ۴۷/۷۹۱۹ کاهش می یابد. حال چنانچه از اندیس توأم پایداری و پروفیل استفاده شود از جدول فوق دیده می شود که با نصب ۵/۳ pu ظرفیت خازنی، ۱/۷ pu راکتور در شین های مجاز و عدم نصب ULTC، اندیس پروفیل و پایداری، هر دو به مقدار ۰/۱۱۶۲ و ۵۱/۸۴۹۹ بهبود پیدا می کنند.

جدول (۵) جزئیات شبکه ۱۱۸ شینه IEEE و پارامترهای مسئله بهینه سازی.

پارامترهای بهینه سازی	محدودیت های طراحی	مشخصات شبکه ۱۱۸ شینه IEEE
جمعیت الگوریتم ژنتیک : ۵۰	تعداد شین های مجاز جهت نصب خازن : ۲۰	تعداد شین های تولید : ۲۵
احتمال جایجایی (Pm) : ۰/۸	تعداد ULTC مجاز جهت نصب : ۳	تعداد شین های مصرف : ۹۱
احتمال پرش (Pc) : ۰/۲	محدوده مجاز ولتاژ : $0.9 < V < 1.1$	تعداد خطوط : ۱۷۹
تعداد تکرار : ۱۰۰	محدوده مجاز تپ : $0.7 < T < 1.1$	تعداد ترانسفورماتور : ۲۲
		تعداد خازن شنت : ۱۴

C_F^C : ۱۰۰۰ واحد پول
 C_V^C : ۳۰ واحد پول
 C_F^V : ۱۰۰۰ واحد پول