

وزارت علوم تحقیقات و فناوری



دانشگاه صنعتی سجاد
غیردولتی - غیررئسالی

دستور کار آزمایشگاه تحلیل سیستم‌های قدرت

(آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت (۱))



تابستان ۱۳۹۵

صفحه	فهرست مطالب
۱	پیشگفتار
	بخش اول - ماتریس Y_{Bus}
۲	- مقدمه
۳	- آزمایش ۱: محاسبه ماتریس Y_{Bus}
	بخش دوم - پخش بار (<i>Power Flow</i>)
۶	- مقدمه
۷	- آزمایش ۲: پخش بار گوس-سایدل
۱۰	- آزمایش ۳: پخش بار نیوتن-رافسون
۱۳	- آزمایش ۴: پخش بار <i>DC</i>
۱۵	- آزمایش ۵: پخش بار شبکه‌های توزیع (*)
	بخش سوم - پخش بار اقتصادی (<i>Economic Power Flow</i>)
۱۷	- مقدمه
۱۸	- آزمایش ۶: پخش بار اقتصادی با روش تکرار λ
۲۱	- آزمایش ۷: پخش بار اقتصادی با روش اصلاح توان (*)
۲۴	- آزمایش ۸: پخش بار اقتصادی با استفاده از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب
	بخش چهارم - پخش بار بهینه (<i>Optimal Power Flow</i>)
۲۶	- مقدمه
۲۷	- آزمایش ۹: پخش بار بهینه (*)
	بخش پنجم - جبران‌سازی
۲۹	- مقدمه
۳۰	- آزمایش ۱۰: جبران‌سازی با راکتور موازی
	پیوست
۳۶	- نرم‌افزار <i>DigSILENT</i>
۴۸	مراجع

پیشگفتار:

یکی از واحدهای درسی رشته مهندسی برق آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت می‌باشد. که در آن دانشجویان با نحوه مدل‌سازی سیستم‌های قدرت، انواع روش‌های پخش بار، پخش بار اقتصادی، پخش بار بهینه و جبران‌سازی آشنا می‌شود.

دستور کار فوق، بر اساس نرم‌افزارهای *MATLAB*، *MatPow* و *DigSILENT* بنا نهاده شده است. سعی نویسندگان بر آن بوده است تا کلیه مباحث الگوریتمی مطرح شده در درس بررسی سیستم‌های قدرت ۱ (تحلیل سیستم‌های انرژی ۱) در این دستور کار گنجانده شود.

نرم‌افزار *MATLAB* به عنوان یک نرم‌افزار محاسباتی مهم با قابلیت کدنویسی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های متفاوت، نرم‌افزار *MatPower* یک جعبه‌ابزار مهم و کلیدی در زمینه آنالیز سیستم‌های قدرت و نرم‌افزار *DigSILENT* به عنوان یکی از نرم‌افزارهای کاربردی مهندسی برق در صنعت با امکانات فراوان، باعث شد تا توجه گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی سجاد را در تهیه دستور کاری جامع و کامل برای آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت بر اساس نرم‌افزارهای اشاره شده، جلب کند.

آموزش نرم‌افزار *DigSILENT* (نوشته شده توسط آقای مهندس پوریا سروقدی) در قسمت پیوست دستور کار موجود است. با توجه به گستردگی نرم‌افزار متلب اکیداً توصیه می‌شود برای آموزش و آشنایی با نرم‌افزار متلب، دستور کار آزمایشگاه نرم‌افزارهای کاربردی نوشته شده توسط آقای مهندس معین منعمی مطالعه شود.

اولین و دومین نسخه دستور کار آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت ۱ به ترتیب توسط آقایان مهندس رسول حیدری و مهندس پوریا سروقدی تنظیم گردید. بروزترین نسخه با هدف افزایش کارایی و اثربخشی این واحد آزمایشگاهی، با صرف وقت و انرژی فراوان توسط آقایان به ترتیب حروف الفبا مهندس مهران صفدری، مهندس معین منعمی از مدرسین آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت دانشگاه صنعتی سجاد تهیه و تنظیم شده است. امید است این دستور کار باعث فهم عمیق‌تر مباحث مطرح شده در درس تحلیل سیستم‌های انرژی الکتریکی ۱ (بررسی سیستم‌های قدرت ۱) گردیده و همچنین باعث آشنایی دانشجویان مهندسی برق با الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مهم و کاربردی مطرح شده، گردد.

صمیمانه از مدرسین آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت و دانشجویان تقاضا داریم در صورت وجود هر گونه اشکال، انتقاد و پیشنهاد برای هر چه بهتر شدن این دستور کار، ما را از نظرات خود مطلع کنند.

مقررات آزمایشگاه بررسی سیستم‌های قدرت:

۱. حضور به موقع و رعایت نظم در آزمایشگاه
 ۲. قبل از حضور در آزمایشگاه، تئوری آزمایش‌ها را از دستور کار و سایر مراجع به دقت مطالعه نمایید.
 ۳. پس از اتمام آزمایش‌ها، از برنامه‌های نوشته شده فایل پشتیبانی تهیه کرده و در فلش خود ذخیره نمایید.
 ۴. قبل از خروج از آزمایشگاه صندلی و میز را مرتب کرده و سیستم‌ها را خاموش نمایید.
- توجه:** با توجه به *Freeze* بودن سیستم‌های آزمایشگاه، از ذخیره هر گونه فایل بر روی سیستم‌ها خودداری کرده و فایل‌های مورد نظر را بر روی فلش خود ذخیره نمایید.

دکتر سمیه حسن‌پور

(رئیس دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی سجاد)

S_hasanpour@sadjad.ac.ir

بخش اول: ماتریس Y_{BUS}

امروزه شبکه انتقال از حیث جغرافیایی سطح وسیعی را در بر می‌گیرد و از اجزای متعدد و متنوعی تشکیل شده است. سیستم قدرت متشکل از تعداد بسیار زیادی از ژنراتورها، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و شین‌ها می‌باشد و انجام محاسبات بصورت دستی مشکل و بسیار زمان‌بر است، از این رو استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری به منظور تسهیل و افزایش سرعت محاسبات مختلف شبکه، امری اجتناب ناپذیر است. برای مدل‌سازی و مطالعه بهتر شبکه با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری بایستی معادلات شبکه با توجه به عملکرد عناصر سیستم و مدار معادل آن‌ها بررسی و آماده گردد.

ماتریس‌های توصیف‌کننده شبکه قدرت بر اساس نوع تحلیل بکار رفته عبارتند از؛

۱. ماتریس ادمیتانس (Y_{BUS})

۲. ماتریس امپدانس (Z_{BUS})

مطابق رابطه زیر، اگر I بردار جریان‌های تزریق شده به شین‌ها و V نیز بردار ولتاژ شین باشد، ماتریس Y_{BUS} ارتباط دهنده بردار جریان شین و بردار ولتاژ شین می‌باشد که به ماتریس ادمیتانس شین معروف است.

$$I = Y_{BUS} \cdot V$$

ماتریس ادمیتانس شبکه بیشتر در تحلیل‌های پخش بار استفاده می‌شود و ماتریس امپدانس شبکه نیز بیشتر در محاسبات اتصال کوتاه شبکه قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایش ۱: محاسبه ماتریس Y_{bus}

هدف آزمایش: آشنا شدن با الگوریتم محاسبه ماتریس Y_{bus} در محیط نرم‌افزار $MATLAB$

تئوری آزمایش: همانطور که اشاره شد انجام محاسبات شبکه به منظور بررسی و مطالعات بر روی سیستم قدرت بصورت دستی مشکل و بسیار زمان‌بر می‌باشد از این رو استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری به منظور تسهیل و افزایش سرعت محاسبات مختلف شبکه پیشنهاد می‌گردد. روش‌های تحلیل مدار را می‌توان به دو طور کلی به دو دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. گره : ماتریس ادمیتانس شبکه

۲. مش : ماتریس امپدانس شبکه

برای تحلیل رفتار حالت ماندگار اجزای سیستم، از ماتریس گره‌ای ادمیتانس استفاده می‌شود. معمولاً این ماتریس بزرگ و تنگ می‌باشد و در سیستم‌های قدرت واقعی و در ابعاد وسیع از برنامه‌های کامپیوتری به منظور تسریع در محاسبه این ماتریس استفاده می‌شود.

روال محاسبه درآیه‌های ماتریس Y_{bus} به شکل زیر می‌باشد:

$$Y_{bus} = [y_{ij}]$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{اگر } i = j \text{ مجموع ادمیتانس‌های متصل به گره } i \text{ ام} \\ \text{اگر } i \neq j \text{ منفی مجموع ادمیتانس‌های المان‌های مشترک بین دو باس } i \text{ و } j \end{array} \right\} = y_{ij}$$

نکات:

* در ماتریس ادمیتانس پخش بار شبکه، فقط اطلاعات ترانس‌ها و خطوط شبکه لحاظ می‌گردد و اطلاعات مربوط به ژنراتورها و بارها در محاسبات پخش بار که در آزمایش‌های بعدی با آن‌ها آشنا خواهیم شد با استفاده از توان مدل می‌گردند.

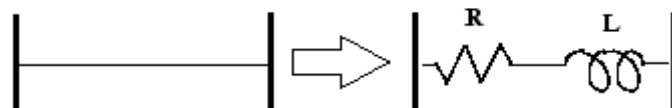
* ماتریس ادمیتانس، ماتریسی متقارن است بنابراین داریم:

$$y_{ij} = y_{ji}$$

* ابعاد ماتریس Y_{bus} ، $n \times n$ می‌باشد که n ، تعداد باس‌های سیستم مورد مطالعه می‌باشد.

یادآوری از مدل خطوط کوتاه و مدل Π خطوط متوسط:

در شکل شماره ۱ و ۲ به ترتیب مدل معادل خط کوتاه و متوسط مشاهده می‌شود. به عنوان مثال اگر بخواهیم برای شکل ۱ و ۲ درآیه‌های ماتریس Y_{bus} را محاسبه نماییم به شرح زیر عمل می‌کنیم:



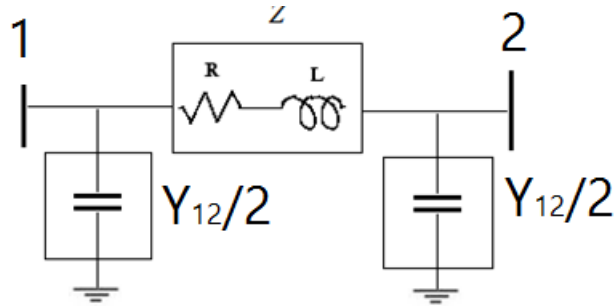
Transmission Line

شکل ۱ - مدل خط کوتاه

محاسبه درآیه‌های ماتریس برای شکل ۱:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{1}{R + jX} = Y_{22}$$

$$Y_{12} = -\frac{1}{Z_{12}} = Y_{21}$$

شکل ۲ - مدل Π خط متوسط

محاسبه درآیه‌های ماتریس برای شکل ۲:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{Y_{12}}{2}, Y_{22} = \frac{1}{Z_{21}} + \frac{Y_{12}}{2}$$

$$Y_{12} = -\frac{1}{Z_{12}} = Y_{21}$$

حال درآیه‌های بدست آمده را در ماتریس Y_{bus} قرار می‌دهیم:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

به طور کلی در یک شبکه n باس، ابعاد ماتریس Y_{bus} به شکل زیر می‌باشد:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n}$$

حالت کلی هر کدام از درآیه‌ها به صورت زیر می‌باشند:

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

مراحل انجام آزمایش:

الگوریتم محاسبه ماتریس Y_{bus} در محیط نرم‌افزار $MATLAB$ به ترتیب زیر می‌باشد:

(۱) شروع

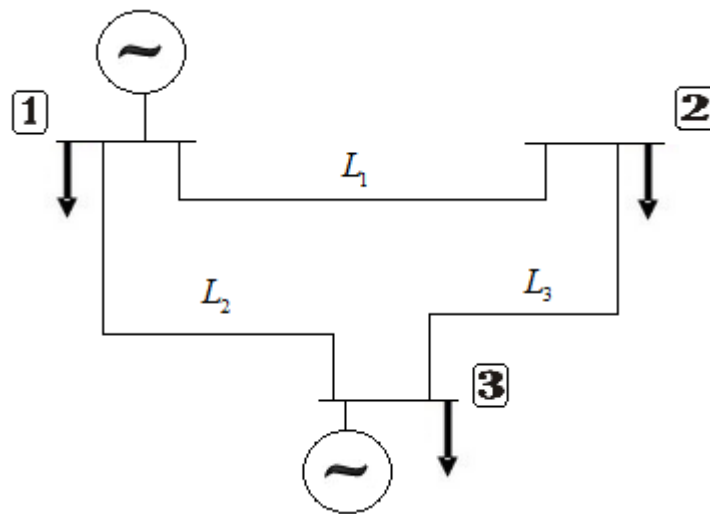
(۲) وارد نمودن اطلاعات شبکه با استفاده از $Matpower$ شامل R, X, B خطوط

- ۳) تعریف تعداد باس‌های شبکه و ایجاد چهارچوب کلی ماتریس Y_{bus}
- ۴) محاسبه المان‌های غیرقطری و قرار دادن در ماتریس اصلی
- ۵) محاسبه المان‌های قطری و قرار دادن در ماتریس اصلی
- ۶) نمایش ماتریس Y_{bus} و چاپ نتایج
- ۷) پایان

لازم به توضیح است که اطلاعات اولیه را می‌توان بصورت دستی یا با استفاده از نرم‌افزار *Matpower* به منظور تسهیل در روند کار، در ابتدای شروع برنامه‌نویسی فراخوانی نمود.

خواسته‌های آزمایش:

۱. برای شبکه زیر ماتریس Y_{bus} را با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* در دو حالت زیر محاسبه و شبیه‌سازی نمایید.



شکل ۳- شبکه مورد مطالعه برنامه Y_{bus}

الف) با فرض اطلاعات زیر: (خط کوتاه)

$$Z_{L_1} = Z_{L_2} = Z_{L_3} = 0.02 + j0.08^{P.U}$$

$$Y_{L_1} = Y_{L_2} = Y_{L_3} = 0$$

ب) با فرض خط متوسط و استفاده از مدل پی

$$Z_{L_1} = Z_{L_2} = Z_{L_3} = 0.02 + j0.08^{P.U}$$

$$Y_{L_1} = Y_{L_2} = Y_{L_3} = j5.0$$

۲. به کمک نرم‌افزار *Matpower* ماتریس ادمیتانس را برای شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه IEEE بدست آورید.

بخش دوم: پخش بار (Power Flow)

هدف از طراحی و بهره‌برداری از یک سیستم قدرت، تامین بارهای مورد نیاز شبکه است. مطالعه پخش بار به محاسبه کمیت‌های الکتریکی سیستم قدرت در حالت ماندگار به ازای بارهای مشخص و معلوم می‌پردازد. این کمیت‌ها شامل ولتاژ شین‌ها، توان راکتیو ژنراتورها و توان‌های اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال می‌باشد. بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت که محاسبه پخش بار، حل یک سیستم قدرت در حالت ماندگار و متعادل است.

در حقیقت طراحی و توسعه آینده سیستم با توجه به رشد بار و لزوم اضافه کردن ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط جدید در سیستم بدون مطالعه پخش بار امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین مطالعه پخش بار نقش اساسی در بررسی وضعیت فعلی یک سیستم و تصمیم‌گیری در مورد بهترین شرایط بهره‌برداری از آن به عهده دارد.

آزمایش ۲: پخش بار گوس-سایدل

هدف آزمایش: آشنایی با پخش بار گوس - سایدل

تئوری آزمایش: یکی از روش‌های عددی برای حل معادلات جبری غیر خطی روش گوس-سایدل (GS) است که یک الگوریتم مبتنی بر تکرار می‌باشد. معادلات پخش بار به صورت زیر می‌باشد:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = V_i^* \left[Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right] \quad (1)$$

توجه: در رابطه (۱)، P_i و Q_i به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو خالص باس‌ها می‌باشد. این توان‌ها از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} \quad (2)$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} \quad (3)$$

از رابطه (۱)، V_i به صورت زیر بدست می‌آید:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

توجه: در شین شماره ۱ ولتاژ $|V_1|$ و δ_1 معلوم هستند. بنابراین در رابطه فوق، محاسبه ولتاژها را از شین شماره ۲ شروع می‌کنیم. به ازای $i = 2, 3, \dots, n$ تعداد معادلات غیر خطی $n-1$ بوده و تعداد مجهولات نیز $n-1$ ولتاژ (مختلط) است.

مراحل انجام آزمایش:

۱. ابتدا ماتریس حاوی اطلاعات باس‌ها تشکیل شود. (این اطلاعات شامل نوع باس ($Slack, PV, PQ$))، اندازه و زاویه ولتاژ اولیه باس‌ها، توان مصرفی بارها (اکتیو و راکتیو) و توان تولیدی ژنراتورها (اکتیو) می‌باشد).
۲. بدست آوردن ماتریس Y_{BUS}
۳. با استفاده از مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای ولتاژ باس‌ها، به کمک رابطه (۴)، ولتاژ جدید باس‌ها محاسبه شود.
۴. برای باس‌های PV ، بعد از محاسبه ولتاژ، باید توان راکتیو ژنراتور متصل به باس محاسبه شود. (ولتاژ باس‌های PV ، زمانی می‌تواند توسط حلقه AVR در مقدار تعیین شده تثبیت شود که توان راکتیو ژنراتور متصل به باس در محدوده مجاز تعریف شده باشد. ($Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max}$))

توجه: توان راکتیو هر شین را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$Q_i = -\text{Imag} \left\{ V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right\}$$

بعد از محاسبه Q_i ، بایستی توان راکتیو ژنراتور را از رابطه (۳) محاسبه نمود.

۵. در صورتی که Q_{Gi} باس‌های PV ، در محدوده مجاز خود باشند باس مورد نظر همچنان PV باقی می‌ماند و در غیر این صورت باس از حالت PV خارج و به نوع PQ تغییر می‌کند.
۶. بررسی شرط خاتمه، در صورت برقرار بودن شرط خاتمه، برنامه پایان یافته و در صورت برقرار نبودن مراحل ۳ الی ۵ تکرار شود (برای تکرار $k + 1$ ام از ولتاژهای بدست آمده در انتهای تکرار k ام استفاده شود).

توجه: شرط خاتمه در این الگوریتم به صورت زیر قابل بیان می‌باشد؛

$$\forall i = 2:n, Error = \max |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

در رابطه فوق، k شمارنده تکرار، i شمارنده باس و ε حداکثر دقت مورد نظر می‌باشد.

توجه: بعد از محاسبه ولتاژ باس‌ها، می‌توان به کمک روابط معرفی شده در ابتدای آزمایش، کلیه مجهولات شبکه مورد مطالعه از جمله، توان تولیدی ژنراتور باس $Slack$ ، توان (اکتیو و راکتیو) جاری شده روی خطوط به همراه جهت آن، تلفات توان هر خط و تلفات توان کل شبکه و ... را محاسبه نمود.

برای سرعت بخشیدن به الگوریتم گوس-سایدل دو راهکار زیر پیشنهاد می‌شود؛

۱. گوس-سایدل تسریع یافته

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i^{(k)}}{V_i^{(k)*}} - \left(\sum_{j<i} Y_{ij} V_j^{(k+1)} + \sum_{j>i} Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \right]$$

۲. گوس-سایدل تسریع یافته با ضریب α

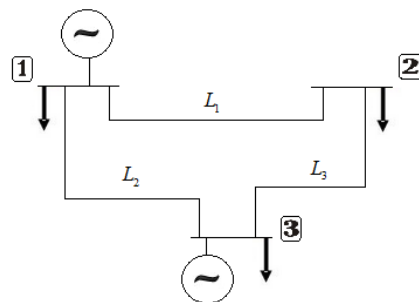
$$\Delta V_i^{(k)} = |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}|$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \Delta V_i^{(k)}$$

توجه: بایستی $1.5 < \alpha < 1.7$

خواسته‌های آزمایش:

۱. الگوریتم گوس-سایدل مطرح شده را بر روی شبکه زیر در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی کنید. (باس شماره یک به عنوان باس مرجع در نظر گرفته شده و تمامی خطوط متوسط می‌باشند. برای مدل‌سازی خطوط از مدل پی استفاده کنید.) ولتاژ باس مبنا را 1.0240 در نظر بگیرید.



شکل ۴- شبکه مورد مطالعه برنامه پخش بار

$$Z_{L_1} = Z_{L_2} = Z_{L_3} = 0.02 + j0.08^{P.U}$$

$$Y_{L_1} = Y_{L_2} = Y_{L_3} = j5.0$$

$$Load_1 = 0.2 + 0.08j$$

$$Load_2 = 0.3 + 0.04j$$

$$Load_3 = 0.6 + 0.033j$$

$$|V_3| = 1^{P.U} \quad Pg_3 = 1^{P.U}$$

۲. الگوریتم‌های گوس-سایدل تسریع یافته و تسریع یافته با ضریب α را بر روی شبکه مورد ۱ در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی کنید.

۳. تفاوت الگوریتم‌های گوس-سایدل (گوس-سایدل معمولی و تسریع یافته‌ها) در سرعت همگرایی بررسی کنید.

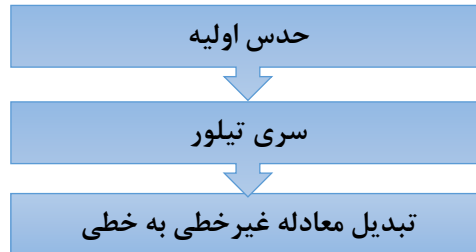
۴. تاثیر تغییر مقدار ضریب α در سرعت همگرایی الگوریتم بررسی کنید.

۵. تاثیر تغییر مقدار ϵ در سرعت همگرایی الگوریتم بررسی کنید.

آزمایش ۳: پخش بار Newton-Raphson

هدف آزمایش: آشنایی با روش پخش بار نیوتن-رافسون

تئوری آزمایش: نیوتن-رافسون مشهورترین روش شناخته شده برای حل معادلات غیر خطی است که با یک حدس اولیه شروع شده و سری تیلور برای معادلات نوشته می‌شود البته از ترم‌های درجه بالا صرف نظر می‌گردد تا سیستم غیرخطی به یک سیستم خطی تبدیل شود.



شکل ۵- ساختار الگوریتم نیوتن-رافسون

محاسبه پخش بار یکی از اساسی‌ترین مسائل در مهندسی برق است. عیب اصلی همه روش‌های پیشرفته حجم بالای محاسبات می‌باشد که این امر به خاطر عملیات تجزیه، ترکیب و محاسبات ماتریس ژاکوبین می‌باشد. از مقایسه روش‌های پخش بار گوس سایدل و نیوتن-رافسون نتایج زیر حاصل می‌شود:

روش نیوتن-رافسون	روش گوس سایدل
تعداد تکرار کم ولی زمان لازم برای هر تکرار از گوس سایدل بیشتر	تعداد تکرار برای همگرایی زیاد، ولی زمان مورد نیاز برای هر تکرار کم است.
همگرایی و تعداد تکرارها به اندازه سیستم بستگی ندارد.	هر چه اندازه سیستم بزرگ‌تر شود، تعداد تکرارها افزایش پیدا می‌کند و حدس اولیه در همگرایی موثر است.
برنامه‌های نوشته شده برای این روش آسان‌تر و حجم کمتری دارد.	برنامه‌های نوشته شده برای این روش آسان‌تر و حجم کمتری دارد.

برای اعمال روش نیوتن-رافسون معادلات پخش بار، ولتاژ شین‌ها و ادمیتانس‌های خط به فرم قطبی زیر می‌نویسیم:

$$\Delta P_i = -P_i + \sum_k |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$\Delta Q_i = -Q_i + \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik})$$

یا می‌توان از شکل ساده شده زیر استفاده نمود که جمله $n = i$ را جدا نموده‌ایم:

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

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

از این معادلات به سادگی می‌توان نسبت به اندازه و زاویه ولتاژ مشتق گرفت. جملات G_{ii} , B_{ii} که در روابط بالا به کار رفته‌اند از رابطه Y_{ij} در معادله زیر بدست آمده است که پیش از این در آزمایش محاسبه ماتریس Y_{bus} با آن آشنا شدیم:

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

مجهولات مسئله اندازه و زاویه ولتاژ است. رابطه مجهولات را با ماتریس ژاکوبین در زیر مشاهده می‌کنید:

$$D = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \cdot D$$

رابطه ماتریس ژاکوبین نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \Rightarrow J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}$$

با مشتق گرفتن از معادلات پخش بار نسبت به اندازه و زاویه ولتاژ می‌توان مجهولات را به شکل زیر محاسبه نمایید:

$$\delta^{m+1} = \delta^m + \Delta \delta$$

$$|V|^{m+1} = |V|^m + \Delta |V|$$

مراحل انجام آزمایش:

۱. تعیین تمامی پارامترهای معلوم و مجهول باس‌های شبکه مورد مطالعه و حدس اولیه برای مجهولات ولتاژی

$$|V_i| = 1, \delta_i = 0^\circ$$

راهنمایی: می‌توان جدولی مانند زیر شامل تمامی باس‌ها با ذکر نوع هر باس و معلوم و مجهول به منظور تسهیل در روند برنامه‌نویسی و فهم موضوع تنظیم نمود.

$$P_i = Pg_i - Pd_i$$

$$Q_i = Qg_i - Qd_i$$

شماره باس	نوع باس	$ V_i $	δ_i	P_i	Q_i
۱	Slack	معلوم	معلوم	؟	؟
۲	PV	معلوم	؟	معلوم	؟
۳	PQ	؟	؟	معلوم	معلوم

در جدول فوق توان (اکتیو و راکتیو) معلوم را با عبارت Specified به معنی مشخص و معلوم نشانه‌گذاری می‌نماییم.

$$P_i^{\text{Specified}}$$

$$Q_i^{\text{Specified}}$$

۲. محاسبه ماتریس ادمیتانس شبکه *Ybus* به فرم قطبی

$$Ybus = [|y_{ij}| \angle \theta_{ij}]$$

۳. نوشتن معادلات پخش بار و قرار دادن حدس اولیه مجهولات ولتاژی در روابط زیر به منظور محاسبه مجدد پارامترهای معلوم توانی. توان محاسبه شده در هر تکرار را با عبارت *Calculated* نشانه‌گذاری می‌نماییم.

$$P_i = |V_i| + \sum_{n=1}^N |V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$Q_i = -|V_i| + \sum_{n=1}^N |V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$\xrightarrow[\delta_i=0^\circ]{|V_i|=1} \begin{matrix} P_i^{\text{Calculated}^{(m)}} \\ Q_i^{\text{Calculated}^{(m)}} \end{matrix}$$

۴. محاسبه بردار \vec{D} در هر تکرار:

$$\vec{D}^{(m)} = \begin{bmatrix} P_i^{\text{Specified}} - P_i^{\text{Calculated}^{(m)}} \\ Q_i^{\text{Specified}} - Q_i^{\text{Calculated}^{(m)}} \end{bmatrix}$$

۵. محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار:

$$J^{(m)} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{(m)} \Rightarrow J^{(m)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}^{(m)}$$

۶. محاسبه تغییرات متغیرهای مجهول ولتاژی (ΔX)

$$\Delta X^{(m+1)} = J^{-1} \Big|_{X^{(m)}} \cdot \vec{D}^{X^{(m)}}$$

۷. بررسی شرط توقف (در صورت وجود)

$$|\Delta X| < \varepsilon \begin{cases} \text{Yes} \rightarrow \text{Next Step} \\ \text{No} \rightarrow \begin{cases} \delta^{m+1} = \delta^m + \Delta \delta \\ |V|^{m+1} = |V|^m + \Delta |V| \end{cases} \end{cases}$$

۸. محاسبه سایر مجهولات توانی شبکه

خواسته‌های آزمایش:

۱. برای شبکه آزمایش ۲، پخش بار را به روش نیوتن - رافسون محاسبه نمایید.
۲. به کمک نرم‌افزار *Matpower* پخش بار نیوتن-رافسون را بر روی شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه انجام دهید.
۳. به کمک نرم‌افزار *DigSILENT* پخش بار نیوتن-رافسون را بر روی شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه انجام دهید.
۴. بارهای شبکه استاندارد ۱۴ باس را افزایش داده به گونه‌ای که ولتاژ برخی از باس‌ها به کمتر از 0.95^{PU} برسد. (نقص قید امنیت ولتاژ). حال با نصب خازن مناسب در آن باس‌ها، ولتاژ باس‌ها را به گونه‌ای تغییر دهید تا مقدار ولتاژ در محدوده مجاز قرار گیرد. تاثیر نصب راکتور در این گونه باس‌ها را بررسی کنید.

آزمایش ۴: پخش بار DC

هدف آزمایش: آشنایی با روش پخش بار DC

تئوری آزمایش: اگر هدف از انجام پخش بار تعیین مقادیر تقریبی زاویه‌های ولتاژ (δ_i) و توان‌های اکتیو، شامل توان اکتیو باس اصلی و توان‌های اکتیو جاری در خطوط انتقال باشد از پخش بار DC استفاده می‌شود. در پخش بار DC نیازی به محاسبه اندازه ولتاژها و توان‌های راکتیو نمی‌باشد.

در این روش به علت کوچک بودن مولفه حقیقی امپدانس‌ها از آن‌ها صرف نظر شده و لذا داریم؛

$$\phi_{ij} \approx 90^\circ, \quad i \neq j$$

با جایگذاری رابطه بالا در رابطه $P_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij})$ خواهیم داشت؛

$$P_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - 90^\circ) = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j)$$

چون $\delta_i - \delta_j$ بسیار کوچک است لذا $\sin(\delta_i - \delta_j) \approx \delta_i - \delta_j$ بوده و لذا می‌توان نوشت؛

$$P_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right| |V_j| (\delta_i - \delta_j)$$

همچنین با توجه به اینکه اندازه ولتاژ باس‌ها تقریباً 1^{PU} بوده و هدف تعیین آن‌ها نیست، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت؛

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| (\delta_i - \delta_j) = \sum_{j=1}^n \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}} \quad i = 2, 3, \dots, n$$

در این معادله P_i ها معلوم بوده و δ_i ها مجهول هستند. بنابراین $n-1$ معادله خطی با $n-1$ مجهول در دسترس است که با حل این معادلات δ_i ها بدست خواهند آمد.

در اینجا با توجه به اینکه معادلات فوق خطی هستند، نیازی به استفاده از روش‌های مبتنی بر تکرار نمی‌باشد. با بدست آمدن زاویه ولتاژ باس‌ها، توان اکتیو خطوط از رابطه زیر محاسبه می‌شوند؛

$$P_{ij} = \text{Re} \left[V_i \left(\frac{V_i - V_j}{R_{ij} + jX_{ij}} \right)^* \right] = \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \approx \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}}$$

توجه: در معادلات فوق δ_i ها بر حسب رادیان می‌باشند.

مراحل انجام آزمایش:

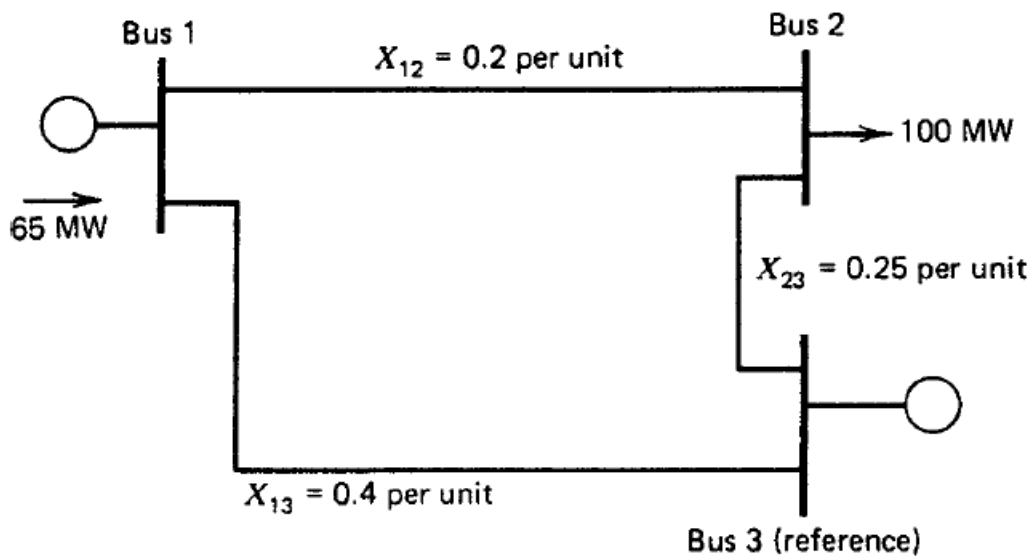
۱. برای تمامی باس‌ها بجز باس مرجع رابطه $P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| (\delta_i - \delta_j)$ را تشکیل دهید.

۲. با توجه به معلوم بودن P_i ها و مجهول بودن δ_i ها، دستگاه معادلات را تشکیل داده و معادلات حاصل را در جهت تعیین مجهولات حل کنید.

۳. پس از تعیین δ_i ها توان جاری شده روی خطوط توسط رابطه $P_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}}$ تعیین کنید.

خواسته‌های آزمایش:

۱. الگوریتم مطرح شده را بر روی شبکه آزمایش ۲، در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی کنید.
۲. الگوریتم مطرح شده را بر روی شبکه زیر در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی کرده و موارد زیر را بدست آورید؛
الف) ولتاژ باس‌ها و توان جاری شده روی خطوط بدست آورید.
ب) در صورتی که باس ۱، به عنوان باس مرجع باشد، مجدداً خواسته‌های شماره ۱ و ۲ را بدست آورید.



شکل ۶- شبکه مورد مطالعه برای پخش بار DC

۳. به کمک نرم‌افزار *Matpower* پخش بار *DC* را بر روی شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه انجام دهید.
۴. به کمک نرم‌افزار *DigSILENT* پخش بار *DC* را بر روی شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه انجام دهید.

آزمایش ۵: پخش بار شبکه توزیع

هدف آزمایش: آشنایی با پخش بار در شبکه‌های توزیع

تئوری آزمایش: روش‌های گوس-سایدل و نیوتن-رافسون دو روش متداولی هستند که در صنعت برای انجام پخش بار در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها به دلایل زیر عملکرد خود را در شبکه‌های توزیع از دست می‌دهند و برای استفاده در این نوع شبکه‌ها مناسب نیستند؛

۱. عدم تعادل بار در شبکه‌های توزیع
۲. ساختار شعاعی
۳. تعداد زیاد شاخه‌ها و باس‌ها
۴. نسبت مقاومت به راکتانس بالای خطوط
۵. رنج‌های گسترده‌تر مقاومت و راکتانس

به همین دلیل سعی شده است که با ایجاد تغییراتی در روش نیوتن-رافسون از این روش در شبکه‌ی توزیع استفاده شود. روش‌های نیوتن-رافسون بهبود یافته برای استفاده در شبکه‌های توزیع از قرار زیر است؛

1. *Decoupled Newton – Raphson*
2. *Fast Decoupled Newton – Raphson*
3. *Very Fast Decoupled Newton – Raphson*

قابل توجه است که روش‌های فوق برای اعمال پخش بار در شبکه‌های انتقال نیز کاربرد دارد.

روش‌های دیگری که برای انجام پخش بار در شبکه‌های توزیع به کار رفته است به عنوان روش‌های مستقیم شناخته می‌شوند. در این روش‌ها بارها به صورت امپدانس ثابت مدل می‌شوند و کل شبکه به صورت یک شبکه‌ی سلفی-مقاومتی در می‌آید که با تشکیل ماتریس امپدانس، اجرای پخش بار در مورد آن صورت می‌گیرد. روش‌های دیگری که به طور گسترده در شبکه‌های توزیع به کار گرفته می‌شوند، روش‌های پسر-پیشرو هستند.

اصول کار این روش مبتنی بر تکرار است که هر تکرار شامل دو مرحله است؛

۱. مرحله‌ی اول: جریان کلیه‌ی شاخه‌های شبکه محاسبه می‌شوند. (مرحله‌ی پسر)
۲. مرحله‌ی دوم: توسط جریان‌های بدست آمده و با مشخص بودن امپدانس شاخه‌ها، ولتاژ باس‌ها محاسبه می‌شوند. (مرحله‌ی پیشرو) و با مقادیر بدست آمده ولتاژ باس‌ها، جریان بارها و در نتیجه جریان شاخه‌ها بروزسانی می‌شوند.

مراحل انجام آزمایش:

۱. در ابتدا ولتاژ تمامی باس‌ها به صورت $1^{PU} \angle 0^\circ$ در نظر گرفته شود.
۲. در آخرین باس، جریان بار محاسبه شود. با توجه به ساختار شعاعی شبکه، جریان آخرین شاخه شبکه برابر با جریان بار آخرین باس می‌باشد.
۳. جریان هر شاخه برابر است با مجموع جریان شاخه بعدی و جریان بار در باس انتهایی شاخه مد نظر
۴. پس از تعیین جریان تمامی شاخه‌ها، ولتاژ باس‌ها به کمک رابطه $\Delta V_i = V_i - V_{i+1} = Z_{i,i+1} \times I_{i,i+1}$ تعیین می‌شود. (در این رابطه $Z_{i,i+1}$ و $I_{i,i+1}$ به ترتیب امپدانس و جریان شاخه میان باس i و $i+1$ ام)

۵. با توجه به ولتاژهای جدید بدست آمده برای باس‌ها، دوباره مرحله ۲ الی ۴ تکرار شود.

توجه: ولتاژ باس ۱ در تمامی تکرارها $1^{PU} \leq 0^\circ$ می‌باشد.

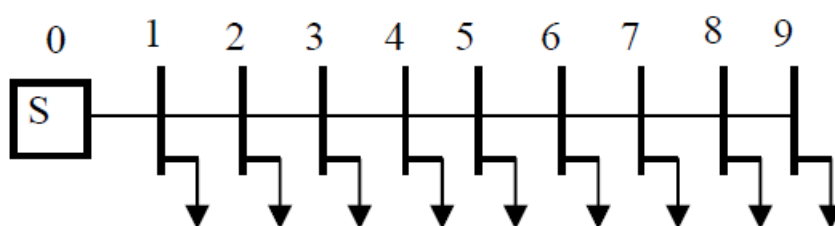
توجه: الگوریتم تکراری فوق تا زمانی ادامه می‌یابد که بزرگترین خطای موجود از ماکزیمم دقت مورد نظر کمتر باشد.

$$Max Error = \max(|V_i^{k+1}| - |V_i^k|) \leq \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, N_{Bus}$$

در رابطه فوق، k شمارنده تکرار، i شمارنده باس و ε حداکثر دقت مورد نظر می‌باشد.

خواسته‌های آزمایش:

۱. الگوریتم مطرح شده را بر روی شبکه ۹ باسه توزیع زیر در محیط نرم‌افزار متلب کد نویسی کنید.



شکل ۷- شبکه توزیع ۹ باسه

جدول ۱. اطلاعات شبکه توزیع مورد مطالعه

شماره خط	از باس (i)	به باس ($i+1$)	$R_{i,i+1} (\Omega)$	$X_{i,i+1} (\Omega)$	$P_{i+1}^{Load} (kW)$	$Q_{i+1}^{Load} (kVAR)$
۱	۰	۱	۰/۱۲۳۳	۰/۴۱۲۷	۱۸۴۰	۴۶۰
۲	۱	۲	۰/۰۱۴۰	۰/۶۰۵۷	۹۸۰	۳۴۰
۳	۲	۳	۰/۷۴۶۳	۱/۲۰۵۰	۱۷۹۰	۴۴۶
۴	۳	۴	۰/۶۹۸۴	۰/۶۰۸۴	۱۵۹۸	۱۸۴۰
۵	۴	۵	۱/۹۸۳۱	۱/۷۲۷۶	۱۶۱۰	۶۰۰
۶	۵	۶	۰/۹۰۵۳	۰/۷۸۸۶	۷۸۰	۱۱۰
۷	۶	۷	۲/۰۵۵۲	۱/۱۶۴۰	۱۱۵۰	۶۰
۸	۷	۸	۴/۷۹۵۳	۲/۷۱۶۰	۹۸۰	۱۳۰
۹	۸	۹	۵/۳۴۳۴	۳/۰۲۶۴	۱۶۴۰	۲۰۰

۲. ولتاژ باس‌ها، جریان شاخه‌ها و جریان بارها را محاسبه نمایید.

۳. تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب در دقت‌های متفاوت بدست آورید.

۴. منحنی پروفیل ولتاژ را در نرم‌افزار متلب رسم کنید.

بخش سوم: پخش بار اقتصادی (Economic Power Flow)

بهره‌برداری اقتصادی از نیروگاه‌ها همواره مورد توجه متولیان صنعت برق بوده زیرا صرفه‌جویی در هزینه تولید انرژی الکتریکی هزینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت را به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. واضح است باری که به نیروگاه‌ها تحمیل می‌شود از طرف شبکه انتقال انرژی بوده که توسط نیروگاه‌ها تغذیه می‌شوند. لذا در مقوله بهره‌برداری اقتصادی از نیروگاه‌ها، بار شبکه انتقال باید به نحوی بین نیروگاه‌ها پخش شود تا هزینه تولید انرژی الکتریکی حداقل یا بهینه گردد.

هزینه بهره‌برداری از سیستم قدرت از دو بخش زیر تشکیل می‌شود؛

۱. هزینه‌های ثابت

۲. هزینه‌های متغیر

هزینه‌های ثابت به بار شبکه بستگی نداشته و شامل موارد زیر است؛

۱. سرمایه‌گذاری اولیه

۲. نرخ بهره و استهلاک

۳. مالیات و بیمه

۴. دستمزدها

هزینه‌های متغیر به بار شبکه بستگی داشته و شامل موارد زیر است؛

۱. هزینه وابسته به میزان تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌ها جهت تامین بار و تلفات شبکه

۲. هزینه‌ای که تلفات شبکه به خاطر هدر دادن انرژی الکتریکی به سیستم تحمیل می‌کند.

۳. میزان خرید و فروش انرژی الکتریکی بخاطر تبادل انرژی با شرکت‌های برق مجاور و همسایه

هدف اصلی در این بخش در هنگام ارزیابی بهره‌برداری اقتصادی از سیستم‌های قدرت، پرداختن به حداقل‌سازی یا بهینه‌سازی هزینه تولید در نیروگاه‌ها جهت تامین بار و تلفات شبکه می‌باشد.

آزمایش ۶: پخش بار اقتصادی با تکرار لاندای (λ)

هدف آزمایش: محاسبه پخش بار اقتصادی به روش تکرار λ

تئوری آزمایش: با توجه به تعاریف مطرح شده در مقدمه بخش سوم، مساله پخش بار اقتصادی در واقع یک مساله بهینه‌سازی می‌باشد و بدون در نظر گرفتن تلفات به صورت ریاضی زیر قابل بیان می‌باشد؛

$$\text{Min } C_{total} = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} FC_i(P_{G_i})$$

$$\text{st} : \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} = P_{Load}$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max}$$

تابع هزینه سوخت یک واحد حرارتی بر حسب توان تولیدی آن را می‌توان در قالب یک تابع درجه دوم و به صورت زیر بیان کرد؛

$$FC_i = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i$$

که در آن:

a_i, b_i, c_i : ضرایب تابع هزینه سوخت

P_{G_i} : میزان توان تولیدی واحد i ام

برای حل مساله پخش بار اقتصادی روش‌های گوناگونی (روش‌های کلاسیک و الگوریتم‌های هوشمند) وجود دارد. یکی از این روش‌ها که از سرعت قابل قبولی برخوردار است روش تکرار λ می‌باشد.

مراحل انجام آزمایش:

الگوریتم حل پخش بار اقتصادی به روش تکرار λ بدون در نظر گرفتن قیود نامساوی به شرح زیر می‌باشد:

۱. شروع

۲. انتخاب لاندای اولیه $\lambda^{(0)}$ (عددی مثبت)

۳. محاسبه هزینه افزایشی یا *Incremental Cost* برای هر واحد (IC_i)

$$(IC)_i = \frac{d FC_i}{d P_{G_i}}$$

۴. مساوی قرار دادن IC_i با $\lambda^{(0)}$ و محاسبه میزان توان تولیدی هر واحد (P_{G_i})

$$IC_i = \lambda$$

$$i = 1, \dots, m$$

۵. تساوی $\sum_{i=1}^m P_{G_i} = \sum_{i=1}^m P_{D_i}$ یا قید تعادل توان را نوشته و بسته به حالات زیر تصمیم‌گیری می‌نماییم.

* اگر تساوی بالا برقرار باشد: پاسخ صحیح پیدا شده، لاندای انتخابی صحیح می‌باشد و نتایج چاپ شود.

* اگر تساوی بالا برقرار نباشد: دو حالت بوجود می‌آید؛

۱) میزان مصرف > میزان تولید < بایستی تولید کاهش یابد. $\lambda^{(1)} = \lambda^{(0)} - \Delta\lambda$ برو به مرحله ۳

۲) میزان تولید > میزان مصرف < بایستی تولید افزایش یابد. $\lambda^{(1)} = \lambda^{(0)} + \Delta\lambda$ برو به مرحله ۳

۶. اگر تساوی مرحله ۴ برقرار نباشد بسته به حالات ذکر شده بطور کلی داریم:

$$\lambda^{(m+1)} = \lambda^{(m)} \pm \Delta\lambda$$

۷. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا شرط تعادل توان $\sum_{i=1}^m P_{G_i} = \sum_{i=1}^m P_{D_i}$ برقرار باشد. اما به طور معمول در

برنامه‌نویسی رسیدن به تساوی‌ها و نقطه‌ای که در آن دقیقاً این تساوی برقرار باشد کمی دشوار است. از این رو با تعریف یک شرط توقف و در نظر گرفتن ضریب خطایی با نام ε تساوی را تبدیل به نامساوی می‌نماییم (مطابق رابطه زیر).

$$\left| \sum_{i=1}^m P_{G_i} - \sum_{i=1}^m P_{D_i} \right| < \varepsilon$$

۸. چاپ نتایج

۹. پایان

توجه: اگر بخواهیم قیود نامساوی مثل محدوده تولید واحدها را در نظر بگیریم بعد از مرحله ۴، هر کدام از P_{G_i} بررسی می‌شوند تا در محدوده مجاز خود باشند اگر واحدی از محدوده مجاز تولید خود عبور کند آن واحد را به حد خود رسانده و سپس با جایگذاری مقدار تولید آن واحد در رابطه هزینه افزایشی IC ، λ را محاسبه می‌نماییم و سایر محاسبات انجام می‌شود. اگر چند واحد از حد مجاز خود عبور کرده باشد پس از محاسبه λ برای هر واحد، آن واحدی که دارای λ کوچکتری است باید به حد برسد و دوباره برای سایر واحدها محاسبات انجام گردد.

نکات:

- ۱) بهتر است $\lambda^{(0)}$ ، عددی مثبت در نظر گرفته شود.
- ۲) ضریب b_i یا محدوده‌ای از آن به عنوان $\lambda^{(0)}$ انتخاب شود.
- ۳) بهتر آن است که ابتدا $\Delta\lambda$ بزرگ انتخاب شود سپس در هر مرحله یا طبق الگوریتم در مرحله‌ای که تغییر علامت می‌دهد به دلیل نزدیک شدن به پاسخ صحیح $\Delta\lambda$ کوچک شود تا همگرایی پاسخ بهبود یابد.
- ۴) بهتر است پیش از شروع محاسبات، قیود نامساوی را باهم جمع نموده و محدوده تولید کل واحدهای سیستم را بدست آورید و سپس شرط تعادل بار بررسی شود تا میزان تقاضا در محدوده تولید باشد.

خواسته‌های آزمایش:

۱. با استفاده از مثال زیر، پخش بار اقتصادی را با تکرار لاندرا در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی نمایید.

$C_i(P_{G_i}) = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i$					
واحد	a_i	b_i	c_i	$P_i^{\min} (MW)$	$P_i^{\max} (MW)$
1	0.001562	7.92	561	150	600
2	0.00194	7.85	310	100	400
3	0.00482	7.97	78	50	200
بار مورد تقاضا			850 MW		

۲. فرض کنید رابطه هزینه سوخت واحد اول به صورت زیر باشد. مورد ۱ را دوباره تکرار نمایید.

$$C_i(P_{G_i}) = 459 + 6.48P_{G_i} + 0.00128P_{G_i}^2$$

۳. آیا می‌توان برای $\Delta \lambda$ رابطه‌ای پیدا کرد؟ در صورت امکان، معرفی و راهکار پیشنهادی را کدنویسی نمایید.

آزمایش ۷: پخش بار اقتصادی به روش اصلاح توان

هدف آزمایش: آشنایی با پخش بار اقتصادی به روش اصلاح توان

تئوری آزمایش: در پخش بار اقتصادی توان، در حالت کلی از تلفات خطوط انتقال صرف نظر نمی‌شود. مساله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تلفات به صورت ریاضی زیر قابل بیان می‌باشد؛

$$\text{Min } C_{total} = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} C_i(P_{G_i})$$

$$\text{st} : \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} = P_{Load} + P_{Loss}$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max}$$

در حالت کلی در سیستم قدرتی با N_{Gen} ژنراتور، معادله تلفات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد؛

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} \sum_{j=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} B_{ij} P_{G_j}$$

روش تکرار لاند، برای حل مساله پخش بار اقتصادی توان با در نظر گرفتن تلفات کار آمد نبوده و بایستی از روش‌های دیگر بهره برد. یکی از این روش‌ها، روش اصلاح توان بوده که قبل از معرفی روش بایستی تابع لاگرانژ را معرفی و تشکیل داد. تابع لاگرانژ به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد؛

$$L = (\text{Objective Function}) + \lambda(\text{Constraint})$$

در رابطه فوق، به λ ضریب لاگرانژ گفته می‌شود. برای مساله پخش بار اقتصادی توان با در نظر گرفتن تلفات، تابع لاگرانژ به صورت زیر مطرح می‌شود.

$$L = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} C_i(P_{G_i}) + \lambda \left(\sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} - P_{Load} - P_{Loss} \right) = L(P_{G_1}, P_{G_2}, \dots, P_{G_N}, \lambda)$$

برای پیدا کردن نقطه اکسترمم تابع لاگرانژ (نقطه بهینه) بایستی از تابع لاگرانژ نسبت به متغیرهای آن، مشتق گرفت.

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G_i}} = 0 \Rightarrow \frac{dC_i(P_{G_i})}{dP_{G_i}} + \lambda(0 + \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G_i}} - 1) = 0 \Rightarrow IC_i = \lambda(1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G_i}}) \quad (I)$$

توجه: به $\frac{dC_i(P_{G_i})}{dP_{G_i}}$ هزینه افزایشی واحد i ام (Incremental Cost) گفته می‌شود.

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow 0 + \lambda \left(\sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} - P_{Load} - P_{Loss} \right) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} - P_{Load} - P_{Loss} = 0 \quad (II)$$

مراحل انجام آزمایش:

مراحل انجام آزمایش با ذکر یک مثال تشریح می‌گردد.

مثال: نقطه عملکرد بهینه اقتصادی سه واحد با مشخصات زیر بیابید.

$C_i(P_{G_i}) = a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2$					
واحد	a_i	b_i	c_i	$P_i^{\min} (MW)$	$P_i^{\max} (MW)$
1	561	7.92	0.001562	150	600
2	310	7.85	0.00194	100	400
3	78	7.97	0.00482	50	200
رابطه تلفات توان		$P_{Loss} = 0.00003P_1^2 + 0.00009P_2^2 + 0.00012P_3^2$			
بار مورد تقاضا		850 MW			

۱. در ابتدا سه مقدار توان برای واحدها (در محدوده مجاز آنها) بدون توجه به تلفات در نظر گرفته می‌شود به طوری که مجموع آنها پاسخگوی نیاز بار باشد. به طور نمونه مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شود؛

$$P_1 = 400^{MW}, P_2 = 300^{MW}, P_3 = 150^{MW}$$

۲. محاسبه تلفات و مشتق رابطه تلفات توان در توان‌های در نظر گرفته شده برای واحدها در مرحله ۱

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_1} = 2(0.00003)400 = 0.0240$$

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_2} = 2(0.00009)300 = 0.0540$$

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_3} = 2(0.00012)150 = 0.0360$$

مقدار تلفات توان نیز برابر است با؛

$$P_{Loss} = 0.00003(400^2) + 0.00009(300^2) + 0.00012(150^2) = 15.6^{MW}$$

۳. با توجه به مقادیر بدست آمده در مرحله ۲، معادله (I) را برای هر واحد و معادله (II) تشکیل داده می‌شود.

$$IC_1 = \lambda(1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_1}) \Rightarrow 7.92 + 0.003124P_1 = \lambda(1 - 0.0240) = \lambda(0.9760)$$

$$IC_2 = \lambda(1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_2}) \Rightarrow 7.85 + 0.00388P_2 = \lambda(1 - 0.0540) = \lambda(0.9460)$$

$$IC_3 = \lambda(1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_3}) \Rightarrow 7.97 + 0.00964P_3 = \lambda(1 - 0.0360) = \lambda(0.9640)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{G_i} - P_{Load} - P_{Loss} = 0 \Rightarrow P_1 + P_2 + P_3 - 850 - 15.6 = P_1 + P_2 + P_3 - 865.6 = 0$$

۴. دستگاه معادلات بدست آمده از معادله‌های مرحله ۳، برای تعیین P_{G_i} ها و λ حل می‌شود. نتیجه حل این دستگاه برای مثال فوق به صورت زیر می‌باشد؛

$$P_1 = 440.68^{MW}, P_2 = 299.12^{MW}, P_3 = 125.77^{MW}, \lambda = 9.5252 \$/MWh$$

۵. بررسی شرط خاتمه، که به صورت زیر می‌باشد؛

شرط خاتمه برای این الگوریتم بدین صورت مطرح می‌شود؛

$$\text{Max Error} = \text{Max} \left| P_{G_i}^{\text{First}} - P_{G_i}^{\text{End}} \right| \leq \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{Gen}}$$

که در رابطه فوق $P_{G_i}^{\text{First}}$ توان در نظر گرفته شده برای هر واحد در ابتدای تکرار، $P_{G_i}^{\text{End}}$ توان در نظر گرفته شده برای هر واحد در انتهای تکرار و ε ماکزیمم دقت مورد نظر برای رسیدن به پاسخ می‌باشد.

اگر بلی برنامه خاتمه یافته است و اگر خیر مقادیر بدست آمده از مرحله ۴ به عنوان مقادیر مرحله ۱ در نظر گرفته شود و دوباره مراحل ۲ الی ۵ تکرار گردد.

همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای هر تکرار یک مقدار برای توان واحدها در اختیار می‌باشد و در انتهای همان تکرار مقداری دیگر بدست می‌آید.

خواسته‌های آزمایش:

۱. الگوریتم مطرح شده را بر روی مثال متن آزمایش، در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی کنید.
۲. تاثیر مقدار ε را بر روی تعداد تکرارهای لازم جهت حصول همگرایی و سرعت رسیدن به پاسخ را بررسی کنید.

آزمایش ۸: پخش بار اقتصادی با استفاده از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب

هدف آزمایش: آشنایی با جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب و حل مساله پخش بار اقتصادی به کمک این جعبه‌ابزار

تئوری آزمایش: در نرم‌افزار متلب برای حل مسایل بهینه‌سازی، جعبه‌ابزارهای بهینه‌سازی گوناگونی قرار داده شده است که یکی از کامل‌ترین این جعبه‌ابزارها که با دستور `fmincon` فراخوانی می‌شود دارای جزئیاتی می‌باشد که در ادامه برخی از این جزئیات مورد نیاز برای حل اکثر مسایل بهینه‌سازی مطرح می‌گردد. قبل از تشریح جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب، بایستی با ساختار یک مساله بهینه‌سازی به طور کلی آشنا شد. هر مساله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت ریاضی مطرح و در دو قسمت عمده تابع هدف و قیود دسته‌بندی کرد. بیان یک مساله بهینه‌سازی به زبان ریاضی به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } f(x) \text{ subject to } \begin{cases} lb \leq x \leq ub \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ A \cdot x \leq b \\ c_{eq}(x) = 0 \\ c(x) \leq 0 \end{cases}$$

که در رابطه فوق؛

$f(x)$ تابع هدف، x متغیرهای تصمیم و عبارت‌های داخل پرانتز نیز قیود حاکم بر مساله بهینه‌سازی می‌باشد که جزئیات آن به شرح زیر می‌باشد؛

lb و ub به ترتیب حد پایین و حد بالای متغیرهای تصمیم می‌باشد.

$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$ و $A \cdot x \leq b$ به ترتیب بیان‌های ریاضی قید خطی مساوی و قید خطی نامساوی می‌باشد.

$c_{eq}(x) = 0$ و $c(x) \leq 0$ به ترتیب بیان‌های ریاضی قید غیر خطی مساوی و قید غیر خطی نامساوی می‌باشد.

این جعبه‌ابزار در محیط نرم‌افزار متلب به صورت زیر فراخوانی می‌شود؛

$$[x, fval, exitflag] = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, \text{nonlcon})$$

خروجی‌های برنامه به صورت زیر می‌باشد؛

x مقدار بهینه متغیرهای تصمیم، $fval$ مقدار بهینه تابع هدف و $exitflag$ یک مقدار عددی که نشان دهنده وضعیت خروجی می‌باشد. به عبارت دیگر هر مقداری که این خروجی به خود اختصاص دهد یک مفهوم خاصی را مطرح می‌کند. مفاهیمی همانند جواب بدست آمده جواب بهینه یا غیر قابل قبول می‌باشد و ...

سایر ورودی‌های برنامه که در بالا به آن‌ها اشاره نشده است، به صورت زیر می‌باشد؛

fun : تابع هدف بوده که معمولاً در یک فایل جداگانه و به صورت function معرفی می‌گردد.

x_0 : مقدار اولیه متغیرهای تصمیم برای شروع برنامه بهینه‌سازی می‌باشد.

nonlcon: بیان کننده قیدهای غیر خطی (c, c_{eq}) بوده که در یک m فایل جداگانه و به صورت *function* معرفی می‌گردد.

توجه: در صورت بیان fun و *nonlcon* در یک m فایل جداگانه و به صورت *function*، بایستی دستور *fmincon* به صورت زیر تغییر کند.

$$[x, fval, exitflag] = \text{fmincon}(@fun, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, @nonlcon)$$

توجه: محل ذخیره m فایل‌های fun و *nonlcon* بایستی در محل ذخیره m فایل برنامه فراخوانی دستور *fmincon* باشد.

خواسته‌های آزمایش:

۱. مثال آزمایش (آزمایش تکرار لاند) به کمک دستور *fmincon* حل کنید.
۲. مثال آزمایش (آزمایش اصلاح توان) به کمک دستور *fmincon* حل کنید.
۳. مقدار بهینه توان واحدهای مورد شماره ۲ از خواسته‌های آزمایش را برای سه ساعت در صورتی که توان مورد نیاز بار برای هر ساعت به شرح زیر باشد، توسط دستور *fmincon* بدست آورید. (برنامه‌ریزی چند ساعته)

ساعت	1	2	3
توان مصرفی مورد نیاز (MW)	850	900	950

بخش چهارم: پخش بار بهینه (*Optimal Power Flow*)

حل مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌های مهندسی یکی از مهمترین بخش‌های پیشبرد طرح‌های عظیم و تحقیقات صنعتی می‌باشد. مسائل بهینه‌سازی در بسیاری از رشته‌های مهندسی و حتی در علوم انسانی نیز بسیار مشاهده می‌شود. حل مسائل بهینه‌سازی به یکی از عرصه‌های رقابتی بسیار شدید بین شرکت‌های مختلف دنیا تبدیل شده است. زیرا همان‌طور که گفته شد، جابجایی جواب مسئله حتی به میزان بسیار اندکی، می‌تواند هزینه پروژه را به اندازه میلیون‌ها دلار جابجا نماید. یکی از معروف‌ترین مسائل بهینه‌سازی در این زمینه بهینه‌سازی پخش بار در یک سیستم قدرت می‌باشد. این مسائل که به مسائل *OPF* معروفند برای اولین بار در اوایل دهه ۶۰ توسط کارپینتر مورد بررسی قرار گرفتند. در این گونه مسائل یک تابع هدف با توجه به یک سری قیود مساوی و نامساوی در ارتباط با سیستم‌های قدرت بهینه‌سازی می‌شود.

به طور کلی یک سیستم قدرت با عملکرد مناسب از ویژگی‌های زیر برخوردار است :

۱. دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها در حد معقولی قرار گیرد.
۲. توان منتقل شده در خطوط در حد مناسبی قرار گرفته و خطوط اضافه بار پیدا نکنند.
۳. تلفات شبکه در حد معقولی قرار گیرد.

در حل معادلات پخش بار به مقوله اقتصادی و هزینه تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها متصل به باس‌های مبنا و *PV* توجه نمی‌شد و فقط بر روی مسایل فنی (سه بند فوق الذکر) تمرکز شده است. اما در بخش سوم، در هنگام بهره‌برداری اقتصادی از شبکه و حل مساله پخش بار اقتصادی فقط به مقوله اقتصادی و حداقل‌سازی هزینه تولید در نیروگاه‌ها توجه شده و به مسایل فنی (سه بند فوق الذکر) دقت نشده است. به ویژه آن که در مساله پخش بار اقتصادی فقط توان اکتیو تولید شده در نیروگاه‌ها مورد توجه بوده و به توان راکتیو توجه نشد. در این بخش با ترکیب پخش بار سنتی و پخش بار اقتصادی روبرو هستیم که هر دو جنبه فنی و اقتصادی را پوشش می‌دهند، به عبارت دیگر هدف از *OPF* بهره‌برداری از شبکه با حداقل هزینه ممکن و رعایت معیارهای فنی می‌باشد.

آزمایش ۹: پخش توان بهینه (OPF)

هدف آزمایش: محاسبه پخش توان بهینه با هدف کاهش هزینه

تئوری آزمایش: در یک سیستم قدرت، هدف پیدا کردن توان اکتیو و راکتیو تولیدی هر نیروگاه به نحوی است که هزینه‌های عملیاتی و بهره‌برداری حداقل گردد. به این مسأله پخش توان بهینه *OPF* می‌گویند. در تعریفی دیگر در زمینه قدرت، *OPF* به هر مسأله بهینه‌سازی که متغیرهای آن اندازه و زاویه ولتاژ باشد گفته می‌شود.

تابع هدف در مسأله *OPF* می‌تواند هزینه تولید ژنراتورها، آلودگی، تلفات و یا ترکیبی از چند مورد مختلف باشد.

برای مثال حداقل‌سازی رابطه هزینه تولید ژنراتورها طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{ng} (a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i)$$

قیود مسأله عبارتند از دو دسته قیود مساوی و نامساوی

قیود تساوی:

قیود تعادل توان

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{g_{i,t}} = P_{D_t}$$

که در آن:

P_{D_t} : میزان تقاضای بار در ساعت t ام می‌باشد.

قیود نامساوی:

محدوده تولید واحدها

$$P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_{i,t}} \leq P_{g_i}^{\max}$$

که در آن:

$P_{g_i}^{\min}$: حداقل میزان توان تولیدی واحد i ام

$P_{g_i}^{\max}$: حداکثر میزان توان تولیدی واحد i ام

قیود امنیت ولتاژ

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max}$$

قیود تراکم خطوط انتقال

$$|P_{line}| < P_{L}^{\max}$$

روش‌های حل مسأله *OPF*، متشکل از روش‌های ریاضی و هوشمند می‌باشد و الگوریتم‌های مختلفی برای حل مسأله تا کنون ارائه شده است. یکی از روش‌های حل مسأله استفاده از تابع *fmincon* در محیط نرم‌افزار متلب می‌باشد.

خواسته‌های آزمایش:

۱. به کمک نرم‌افزار *Matpower* پخش توان بهینه را بر روی شبکه‌های ۹ و ۱۴ باسه انجام دهید.
۲. نتایج بدست آمده را با استفاده از پخش بار نیوتن-رافسون در شبکه‌های ۹ و ۱۴ مقایسه نمایید.

بخش پنجم: جبران‌سازی

توان راکتیو یکی از مهمترین عواملی است که در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت AC منظور می‌گردد. علاوه بر بارها، اغلب عناصر یک شبکه مصرف کننده توان راکتیو هستند. بنابراین باید توان راکتیو در بعضی نقاط مختلف سیستم تولید و سپس به محل‌های مورد نیاز منتقل شود.

قدرت راکتیو انتقالی یک خط انتقال، به اختلاف ولتاژ ابتدا و انتهای خط بستگی دارد. همچنین با افزایش دامنه ولتاژ شین ابتدایی، قدرت راکتیو جدا شده از این شین افزایش می‌یابد. قدرت راکتیو یک ژنراتور به تحریک آن بستگی داشته و با تغییر نیروی محرکه ژنراتور می‌توان میزان قدرت راکتیو تولیدی و یا مصرفی آن را تنظیم نمود. در یک سیستم بهم پیوسته نیز با انجام پخش بار در وضعیت‌های مختلف می‌توان دید که تزریق قدرت راکتیو به یک شین، ولتاژ همه شین‌ها را بالا می‌برد و بیش از همه روی ولتاژ همان شین تاثیر می‌گذارد، لیکن تاثیر زیادی بر زاویه ولتاژ شین‌ها و فرکانس سیستم ندارد. بنابراین قدرت راکتیو و ولتاژ در یک کانال کنترل می‌شوند.

از لحاظ اقتصادی طرح یک سیستم قدرت باید طوری باشد که بتوان از خطوط انتقال بیشترین قدرت ممکن را انتقال داد. نصب جبران کننده، قدرت قابل انتقال خطوط را بالا برده و در حفظ پایداری سیستم کمک شایانی می‌نماید. از طرف دیگر جبران کننده‌ها در کنترل ولتاژ نقاط مختلف یک خط انتقال نقش اساسی را بازی می‌کنند. در خطوط انتقال بسیار بلندی که قدرت‌های زیادی را منتقل می‌نمایند، کار انتقال قدرت بدون نصب جبران کننده‌ها عملاً امکان‌پذیر نیست.

انواع جبران‌سازی عبارتند از؛

۱. جبران‌سازی با راکتور موازی
۲. جبران‌سازی با خازن موازی
۳. جبران‌سازی با خازن سری

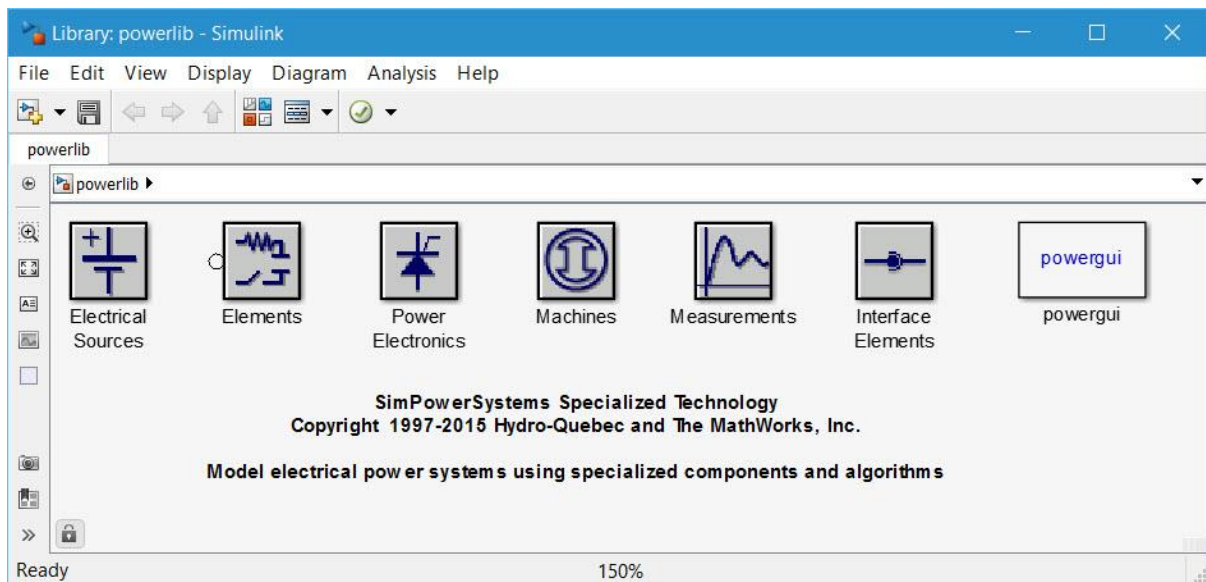
جبران‌سازی با راکتور موازی با هدف‌های مقابله با اثر فرانتی و بهبود پروفایل ولتاژ، جبران‌سازی با خازن موازی با هدف‌های بهبود پروفایل ولتاژ، آزاد کردن ظرفیت توان واحدها و بهبود پایداری و جبران‌سازی با خازن سری با هدف‌های افزایش پایداری حالت گذرا و ماندگار، افزایش ماکزیمم توان قابل انتقال و کاهش تلفات خط صورت می‌گیرد.

آزمایش ۱۰: جبران‌سازی با راکتور موازی

هدف آزمایش: آشنایی با اثر فرانتی و شبیه‌سازی سیستم‌قدرت در محیط *Sim Power System* نرم‌افزار متلب

تئوری آزمایش: بسته نرم‌افزاری *Sim Power System* یک مجموعه کتابخانه‌ای و تحلیلی مناسب را برای مهندسين برق فراهم می‌کند که با استفاده از آن می‌توان سیستم‌های قدرت را مدل‌سازی و تحلیل کرد. مجموعه فراهم شده شامل عناصر مختلف سیستم مانند: ماشین‌های الکتریکی سه فاز، تجهیزات شبکه قدرت، درایوهای الکتریکی، ادوات *FACTS* و تجهیزات مرتبط با انرژی‌های نو می‌باشد. تنوع تحلیل‌ها نیز از مهمترین مزیت‌های این بسته نرم‌افزاری است. تحلیل‌های هارمونیکی، پخش بار و کلیدزنی تنها بخشی از این نوع پردازش‌ها هستند که در نظر گرفته شده‌اند.

برای فراخوانی این کتابخانه می‌توان از طریق تایپ دستور *powerlib* در محیط *command window* نرم‌افزار *Matlab* استفاده کنید. بعد از تایپ دستور فوق، پنجره‌ی مطابق شکل (۸) ظاهر خواهد شد.



شکل ۸- پنجره برنامه *powerlib*

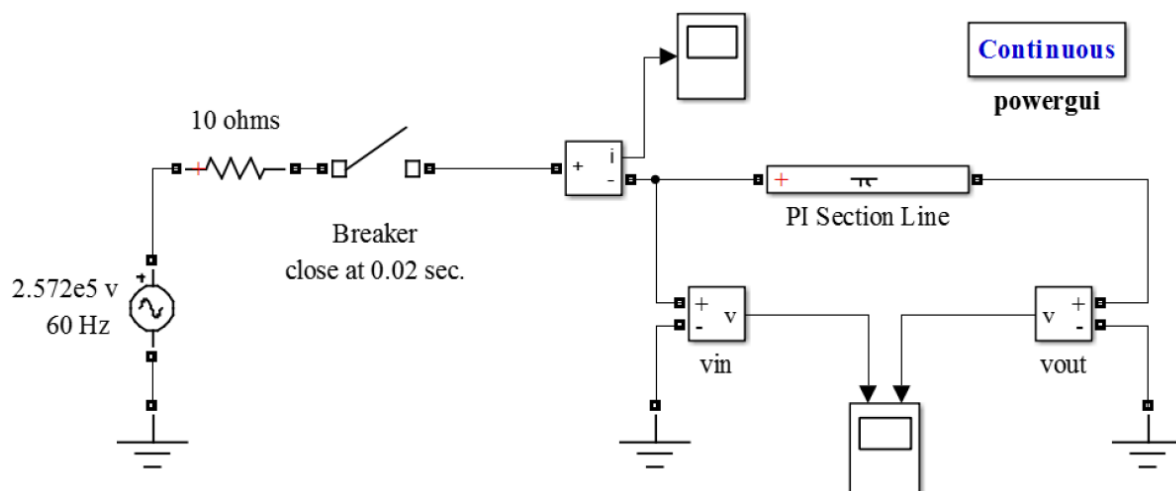
در شکل (۸)، مهمترین بخش، بلوک *powergui* بوده که یک ارتباط گرافیکی را برای تحلیل مدارهای الکتریکی ایجاد می‌کند.

توجه: بلوک *powergui* باید در تمامی مدارهای شبیه‌سازی شده قرار داده شود.

توضیحات سایر بخش‌های کتابخانه *Sim Power System* در قالب شبیه‌سازی اثر فرانتی در شبکه قدرت بیان می‌شود.

اثر فرانتی به پدیده‌ای گفته می‌شود که در طی آن در صورت بی‌باری، کم‌باری یا باز شدن انتهای خطوط انتقال، بار سلفی کاهش یافته و به دلیل وجود خازن موازی در مدل خطوط انتقال نیرو، توان راکتیو وارد خط شده و ولتاژ انتهایی آن افزایش می‌یابد. هر چه طول خط بیشتر باشد به میزان اضافه ولتاژ در انتهای خط افزوده می‌شود. ولتاژ افزایش یافته در انتهای خط با مجذور طول خط متناسب است. اثر فرانتی معمولاً در ساعات‌های بار کم مثلاً در نیمه شب و یا در زمان خارج شدن یک بار بزرگ از یک خط طولانی رخ می‌دهد. برای کاهش عوارض اثر فرانتی معمولاً از جبران‌سازهای سلفی در خط انتقال استفاده می‌شود.

مثال: شبکه قدرت زیر را ترسیم و اثر فرانتی را در این شبکه توسط کتابخانه *Sim Power System* بررسی کنید.



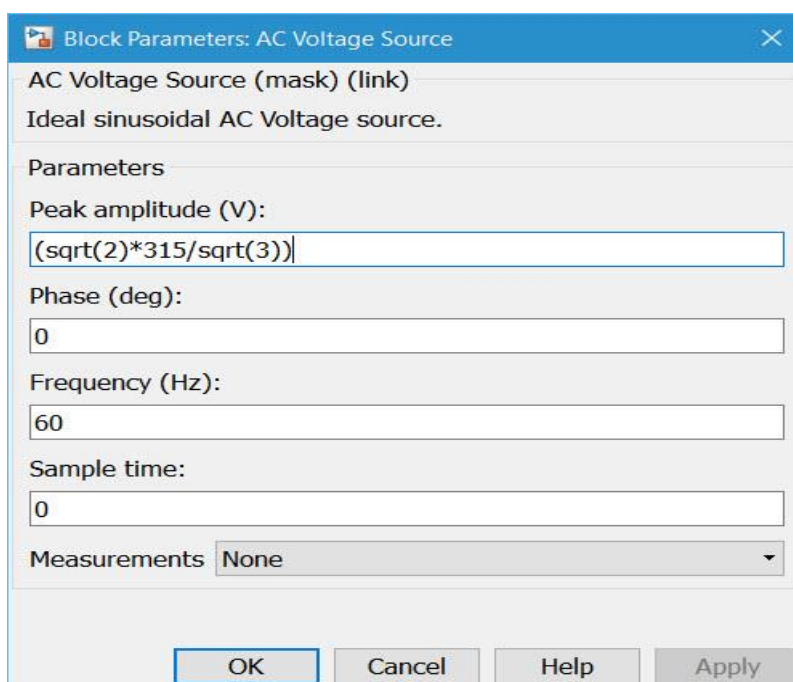
شکل ۹- شبکه قدرت مورد مطالعه اثر فرانتی

ابتدا در محیط پنجره شکل (۸) با فشردن کلیدهای $Ctrl + N$ یک صفحه خام برای رسم شبکه قدرت باز کنید. در این صورت صفحه‌ی خامی با نام *untitled* باز می‌شود.

منبع ولتاژ *AC*: این منبع را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

powerlib > Electrical Source > AC Voltage Source

با دوبار کلیک بر روی نماد این منبع، صفحه تنظیمات آن به صورت شکل (۱۰) ظاهر می‌شود. تنظیمات این منبع را مطابق شکل (۱۰) اعمال کنید. (مقدار دامنه منبع ولتاژ 315^{KV} بوده که این مقدار *RMS* می‌باشد).

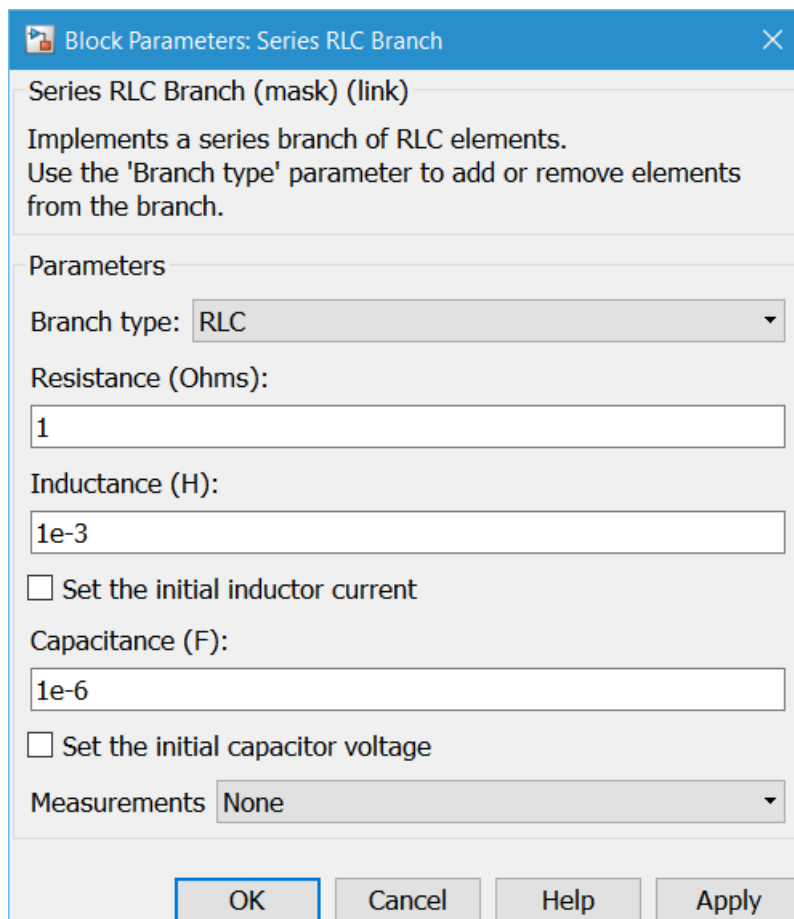


شکل ۱۰- تنظیمات منبع ولتاژ *AC*

مقاومت: این المان را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

powerlib > Elements > Series RLC Branch

با دوبار کلیک بر روی نماد این المان، صفحه تنظیمات آن به صورت شکل (۱۱) ظاهر می‌شود. تنظیمات این المان را مطابق شکل (۱۱) اعمال کنید.



شکل ۱۱- تنظیمات المان *Series RLC Branch*

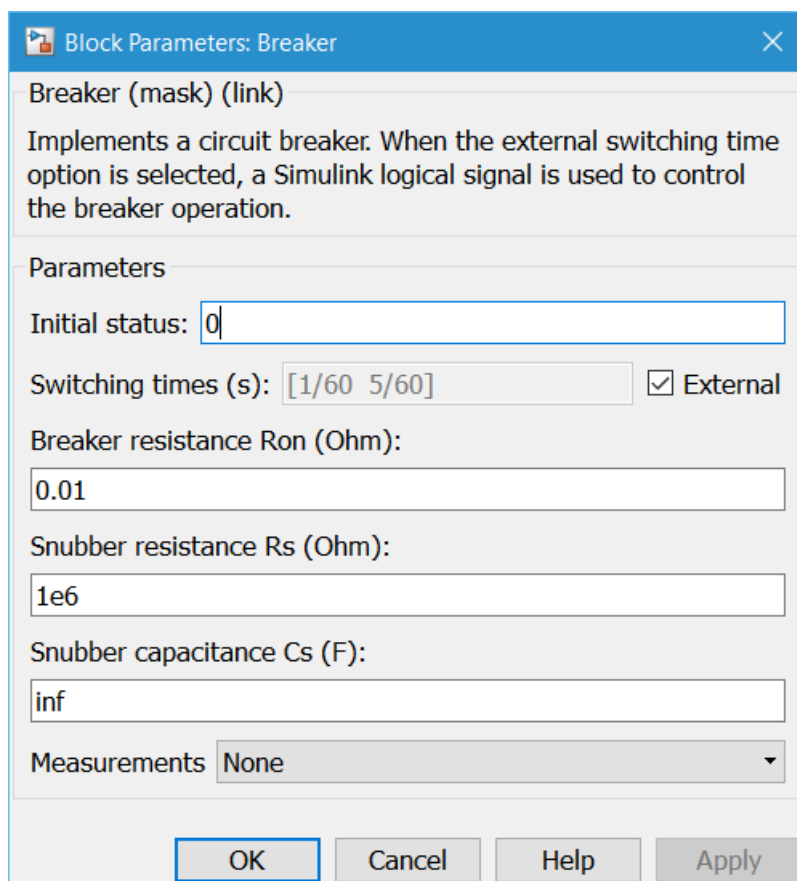
منوی *BranchType* را روی *R* تنظیم کرده و سپس مقدار مقاومت را بر روی 10^{Ω} قرار دهید.

کلید قدرت *Breaker*: این المان را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

powerlib > Elements > Breaker

با دوبار کلیک بر روی نماد این المان، صفحه تنظیمات آن به صورت شکل (۱۲) ظاهر می‌شود. تنظیمات این المان را مطابق شکل (۱۲) اعمال کنید.

گزینه *External* از قسمت *switching times* غیر فعال کرده و سایر تنظیمات این المان را مطابق جدول زیر اعمال کنید.



شکل ۱۲- تنظیمات المان Breaker

<i>switching times</i>	C_s	R_s	<i>Initial State</i>	R_{on}
0.02	0	inf	0	0.1

ولت‌متر و آمپر‌متر: این المان‌ها را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.


powerlib > Measurements > Voltage Measurement

powerlib > Measurements > Current Measurement

توجه: ولت‌متر به صورت موازی و آمپر‌متر به صورت سری در مدار قرار می‌گیرد.

اسلیسکوپ *Scope*: این المان را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

simulink > Commonly Used Blocks > Scope

توجه: جهت افزایش تعداد ورودی‌های *Scope*، بر روی آن کلیک و گزینه  (*parameters*) را انتخاب کرده و در قسمت *Number of axes* عدد ۲ را وارد کنید.

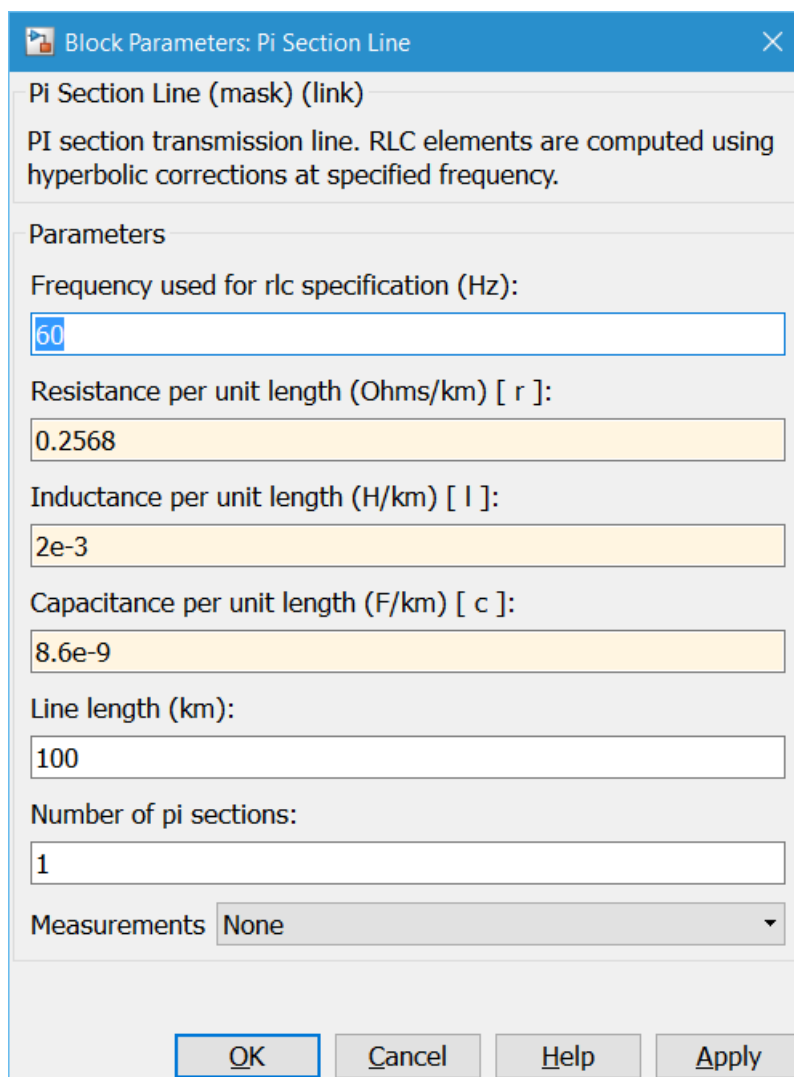
گره زمین: این المان را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

powerlib > Elements > Ground

خط انتقال: این المان را از طریق آدرس زیر پیدا کرده و به صفحه *untitled* انتقال دهید.

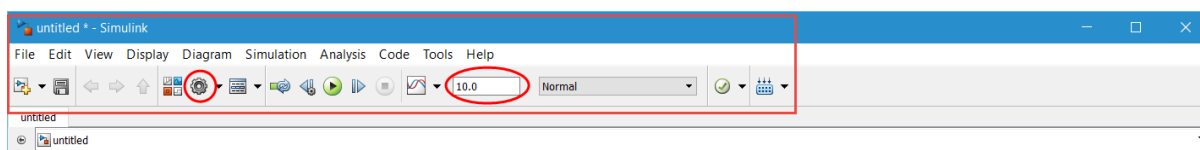
powerlib > *Elements* > *Pi Section Line*

با دوبار کلیک بر روی نماد این المان، صفحه تنظیمات آن به صورت شکل (۱۳) ظاهر می‌شود. تنظیمات این المان را مطابق شکل (۱۳) اعمال کنید.

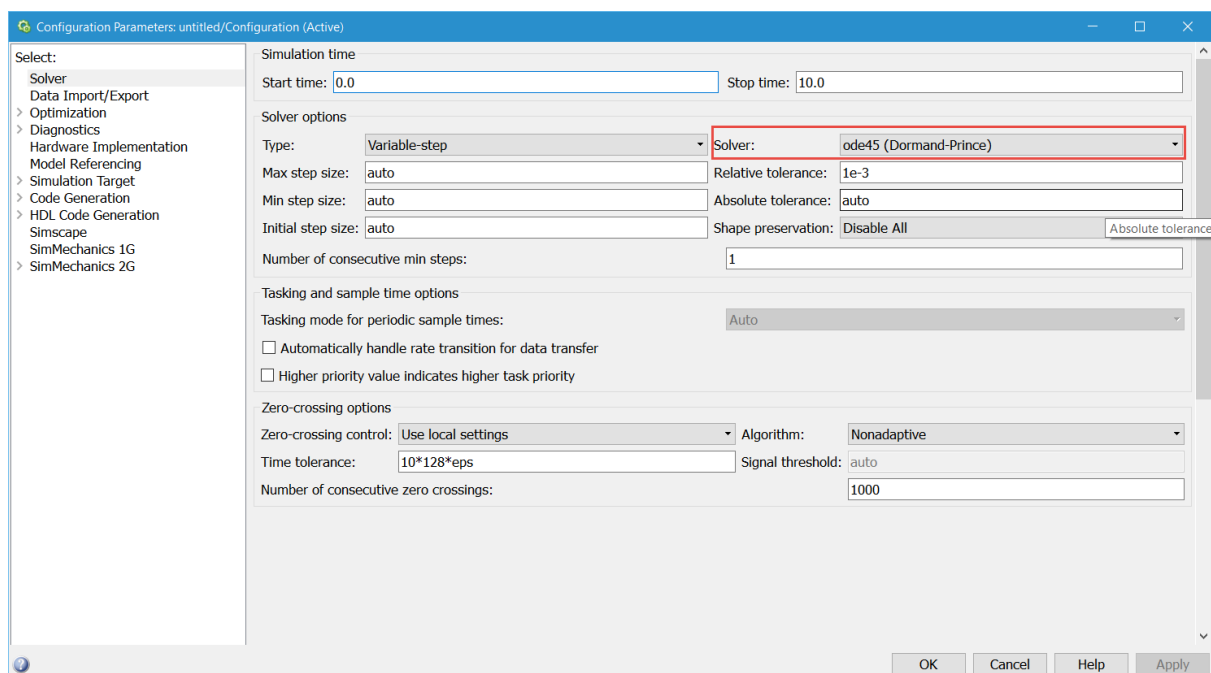


شکل ۱۳- تنظیمات خط انتقال

در صفحه *untitled* در نوار ابزار بالای صفحه (مطابق شکل (۱۴)) زمان اجرای برنامه 0.05 ثانیه تنظیم کرده و روش حل آن مدار توسط راهنمای مشخص شده در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) بر روی *ode23tb* قرار دهید.



شکل ۱۴- نوار ابزار بالای صفحه *untitled*



شکل ۱۵- پنجره تنظیمات صفحه *untitled*

بعد از ترسیم شبکه قدرت و اعمال تغییرات مطرح شده با فشردن دکمه *Run* در نوار ابزار بالای صفحه *untitled* شبیه‌سازی را اجرا کرده و منتظر اتمام شبیه‌سازی باشید. بعد از پایان شبیه‌سازی با کلیک کردن بر روی *Scope* ها می‌توان خروجی برنامه شبیه‌سازی را مشاهده کنید.

خواسته‌های آزمایش:

۱. مثال مطرح شده در متن آزمایش را در نرم‌افزار *Sim Power System* را پیاده سازی کرده و خروجی‌های بدست آمده را تحلیل کنید.
۲. برای رفع اثر فرانتی از راکتور موازی در انتهای خط استفاده می‌شود. با قرار دادن راکتور موازی مناسب در انتهای خط به رفع این اثر پردازید.
۳. تاثیر طول خط بر شدت اثر فرانتی را بررسی کنید.

پیوست

نرم‌افزار *DigSILENT*

نرم‌افزار *DigSILENT Power Factory* یک بسته نرم‌افزاری واحد می‌باشد، این بدین معنا است که تمام توابع و عملگرهای محاسباتی آن از یک منوی اصلی قابل دسترس و اجرا هستند. توابع و عملگرهای نرم‌افزار به‌طور جامع به‌شرح زیر می‌باشند:

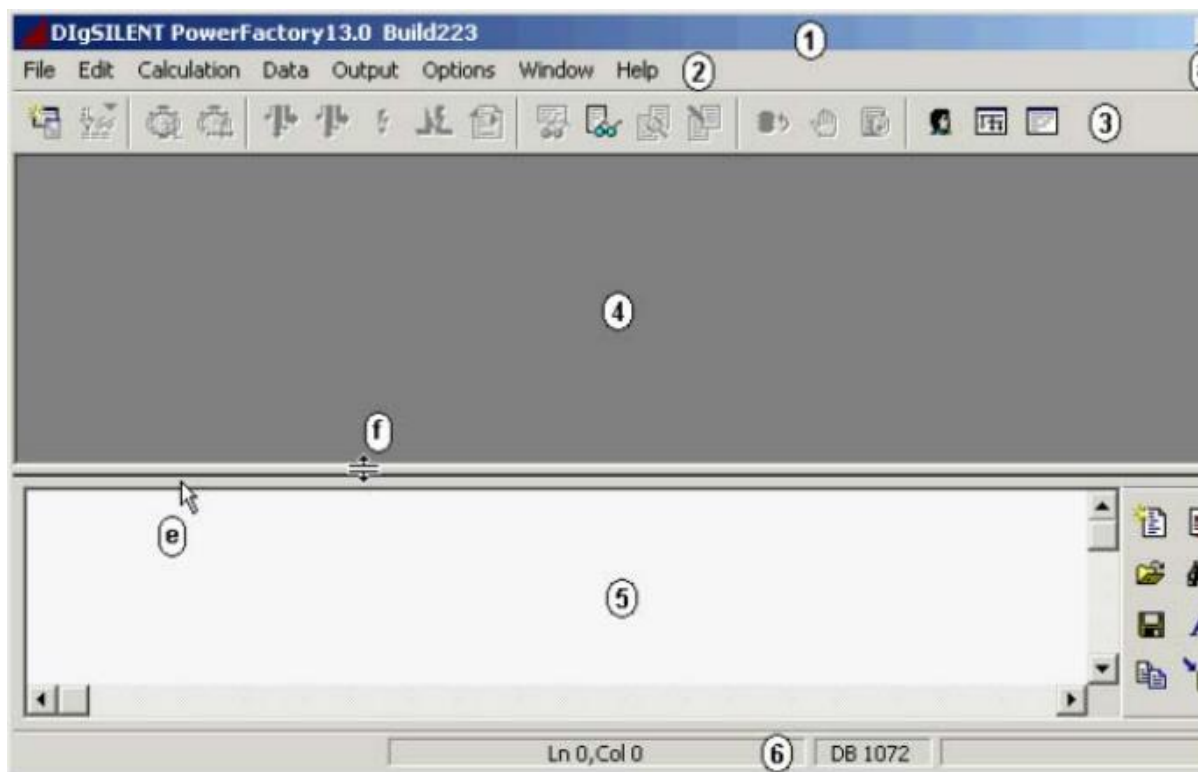
- وارد یا اصلاح کردن بخش‌هایی از سیستم قدرت بر اساس یک متن یا به روش گرافیکی.
- کار با دیاگرام‌های تک‌خطی.
- ویرایش مولفه‌های سیستم قدرت.
- مدیریت پایگاه داده.
- انتخاب گزینه‌های طراحی سیستم قدرت.
- اجرای محاسبات.
- گزارش‌گیری و چاپ نتایج.

۱-منوهای اصلی نرم‌افزار

بعد از فراخواندن برنامه *DigSILENT* اولین صفحه‌ای که ظاهر می‌شود، صفحه دیاگرام اصلی نرم‌افزار است، در این حالت چون هنوز پروژه‌های جدید ایجاد نشده و پروژه‌های از قبل ایجاد شده نیز فعال نشده‌اند، بنابراین صفحه ترسیم دیاگرام تک‌خطی شبکه و جعبه ابزار غیر فعال (به شکل تیره) می‌باشند.

مطابق شکل (پ ۱) صفحه دیاگرام اصلی دارای شش قسمت است، که عبارتند از:

۱. نوار عنوان: نشان دهنده نام نرم‌افزار، *DigSILENT* به همراه شماره نسخه آن.
۲. نوار منوی اصلی: نشان دهنده منوهای اصلی نرم‌افزار برای ایجاد، اصلاح، اجرای محاسبات، نمایش نتایج و بسیاری موارد دیگر برای پروژه‌ها.
۳. نوار ابزار: نشان دهنده دکمه‌های مختلف برای اجرا، ویرایش محاسبات، تحلیل‌های متفاوت در سیستم قدرت و همچنین دکمه‌هایی برای کار روی دیاگرام تک‌خطی.
۴. صفحه ترسیم: برای ترسیم دیاگرام تک‌خطی شبکه.
۵. پنجره خروجی: نشان دهنده پیغام‌های اجرای محاسبات و نتایج خروجی.
۶. نوار حالت: نشان دهنده موقعیت مکان نما در دیاگرام تک‌خطی.



شکل پ ۱- صفحه دیاگرام اصلی بعد از فعال کردن نرم‌افزار

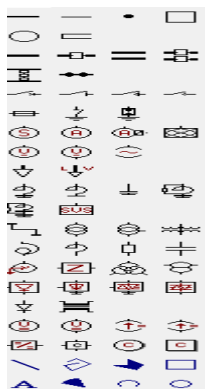
۲- جعبه ابزار ترسیم

مطابق شکل (پ ۲) جعبه ابزار گرافیکی نرم‌افزار که به منظور ترسیم عناصر در دیاگرام تک‌خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل دکمه‌های زیر است:

• دکمه‌های عناصر سیستم قدرت مانند انواع شین‌ها، ماشین سنکرون، انواع بار، ترانسفورماتور دو و سه سیم پیچه، خطوط، جبرانگرهای سری و موازی، بریکر، فیوز و ...

• دکمه‌هایی برای ویرایش دیاگرام تک‌خطی مانند دکمه افزودن متن یا اشکال مختلف در دیاگرام که در انتهای

جعبه ابزار و به رنگ آبی می‌باشند.



شکل پ ۲- جعبه ابزار گرافیکی

۳- ایجاد پروژه

در این بخش، چگونگی ایجاد یک سیستم قدرت جدید تحت عنوان پروژه تشریح و نحوه اجرای محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه برای آن بیان می‌شود.

اولین قدم برای کار با نرم‌افزار ایجاد پروژه می‌باشد. هر پروژه شامل اطلاعات زیر است :

- ساختار پایه برای تعریف و ذخیره اطلاعات شبکه به همراه دیاگرام تک خطی.

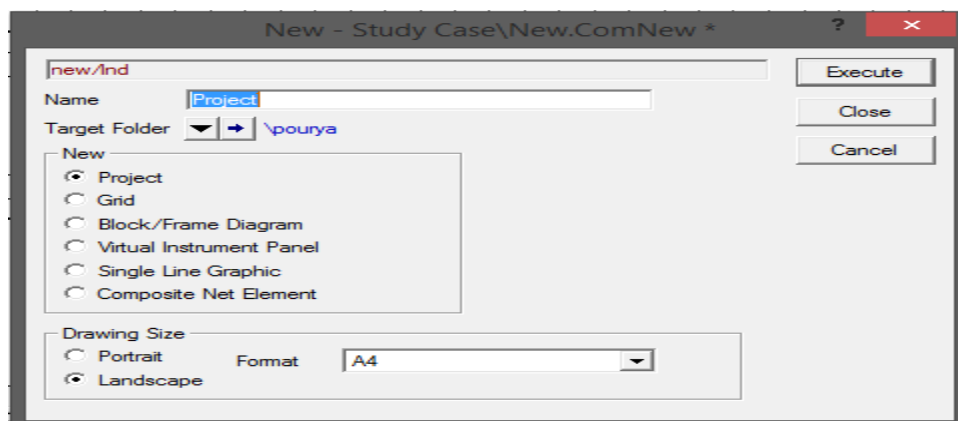
- مشخصات الکتریکی عناصر شبکه.

- توابع کتابخانه‌ای.

- دستوره‌های محاسباتی

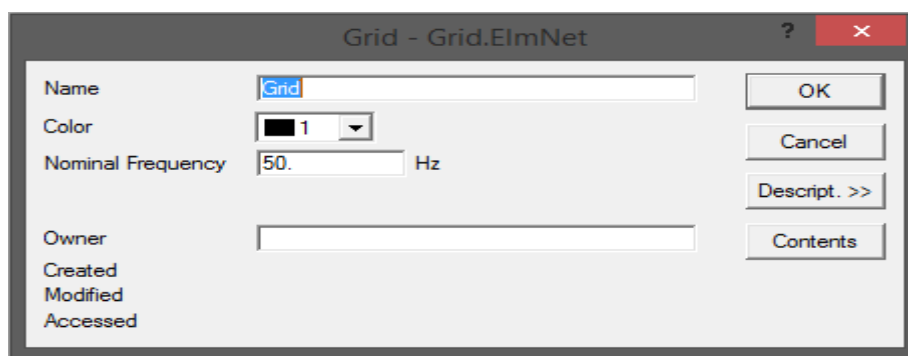
قدم اول: تعریف نام پروژه

از منوی اصلی گزینه *File > New* را انتخاب کنید. در نتیجه عمل مذکور کادری که در شکل (پ ۳) نشان داده شده است، نمایان می‌شود. در گزینه *New* گزینه *Project* را کلیک و نام پروژه مورد مطالعه را در فیلد *Name* تایپ نمایید.



شکل پ ۳- کادر ایجاد پروژه جدید

با کلیک نمودن دکمه *Execute* پروژه ایجاد شده فعال می‌گردد و کادر پوشه *Grid* به صورت خودکار باز می‌شود. شکل (پ ۴)



شکل پ ۴- کادر Grid

قدم دوم: ایجاد پوشه Grid

هر پروژه حداقل به یک پوشه *Grid* احتیاج دارد که مشخصات دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت در آن تعریف شود. این پوشه به صورت خودکار ایجاد می‌شود. در این کادر نام *Grid* فرکانس سیستم قدرت، شماره و رنگ آن را تعیین و دکمه *OK* را کلیک نمائید. فیلد *Owner* برای وارد نمودن نام شرکتی که پروژه متعلق به آن است می‌باشد. پس از اینکه در کادر *Grid* دکمه *OK* کلیک گردید، یک پوشه *Study Case* که برای فعال کردن *Grid* و اجرای محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت خودکار ایجاد می‌گردد، سپس به صفحه کادر اصلی نرم‌افزار باز می‌گردیم.

قدم سوم: رسم دیاگرام تک‌خطی شبکه جدید

در صفحه کادر اصلی، نرم‌افزار آماده ترسیم دیاگرام تک‌خطی شبکه جدید یا اصلاح دیاگرام تک‌خطی شبکه موجود برای پروژه تعریف شده می‌باشد. صفحه کادر اصلی نرم‌افزار، دارای امکانات زیر است. (شکل (پ۵))

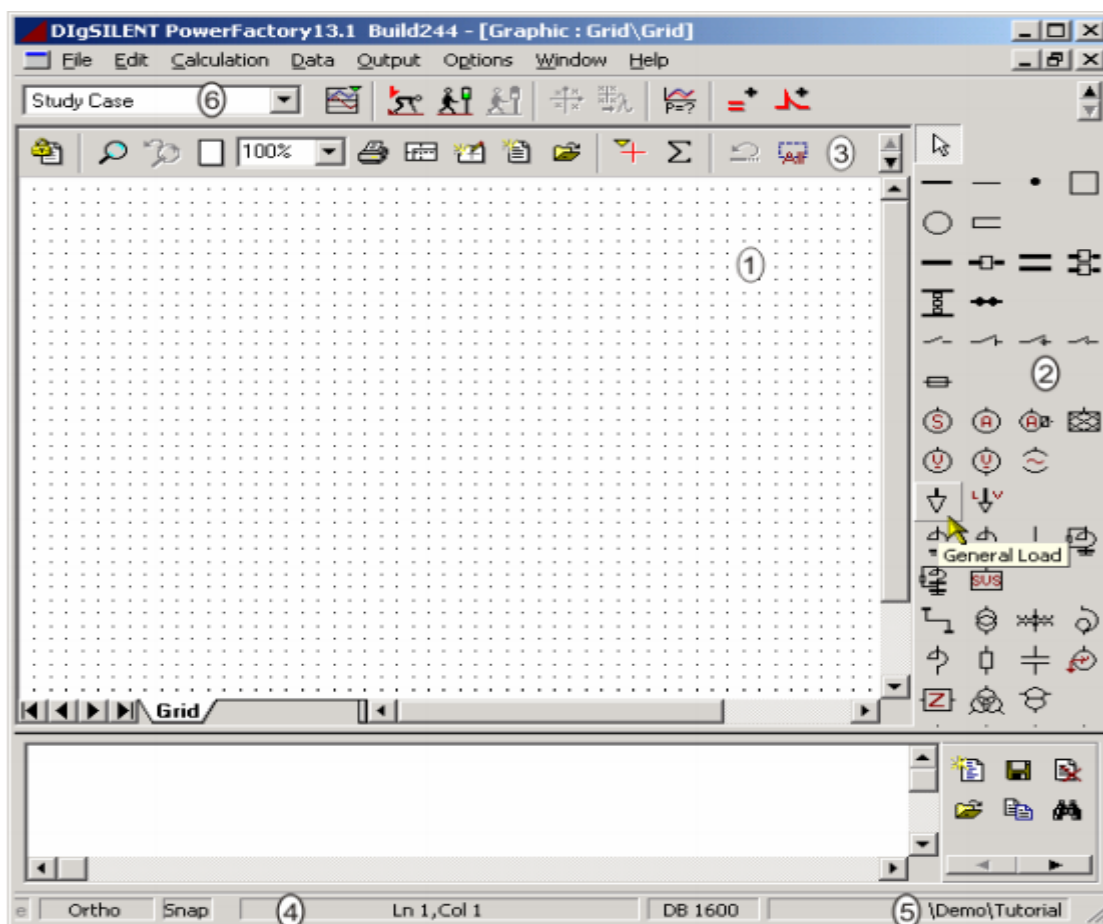
۱. صفحه مشبک برای ترسیم دیاگرام تک‌خطی.
۲. جعبه ابزار گرافیکی که در سمت راست صفحه قرار دارد.
۳. جعبه ابزار گرافیکی فرعی با دکمه‌های آن که برای دسترسی به سایر ابزارها به کار می‌روند.
۴. نمایش موقعیت (x, y) مکان‌نما در صفحه مشبک رسم دیاگرام تک‌خطی.
۵. نمایش نام پروژه جاری در جعبه پیغام.
۶. نمایش فهرست *Study Case* های پروژه که با انتخاب، می‌توان هر یک از آنها را برای نمایش، اصلاح و اجرای محاسبات فعال نمود.

تغییر نام Study Case

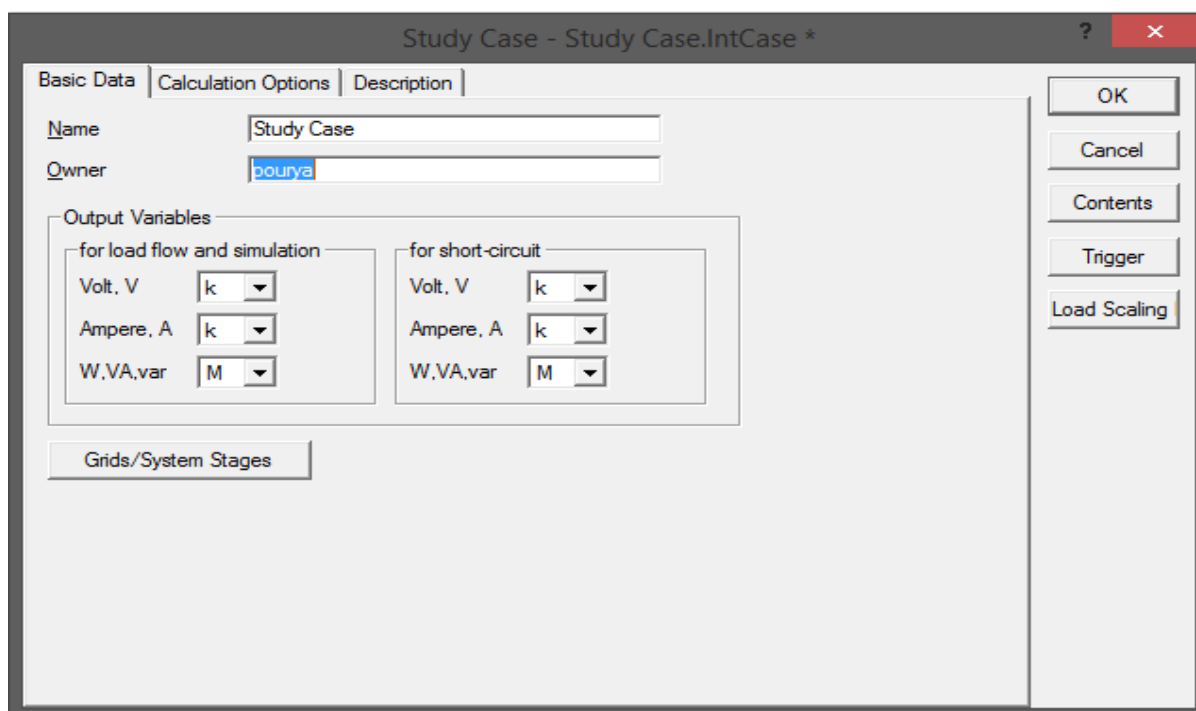
اگرچه ممکن است پروژه ایجاد شده بدون اعمال تغییراتی به کار رود، لکن به‌طور معمول نام حالت مورد مطالعه جدید به چیزی غیره از *Study Case* تغییر می‌کند. برای انجام این عمل از منوی اصلی گزینه *Edit > Study Case* را انتخاب کنید. در کادر حاصل که مانند شکل (پ۶) است، نام جدید را وارد نموده و در آخر دکمه *OK* را کلیک نمائید. همچنین در این کادر می‌توان واحد متغیرهای خروجی سیستم را برای شبیه‌سازی، محاسبات پخش‌بار و اتصال کوتاه تغییر داد.

۴- خارج شدن و فراخوانی مجدد برنامه DigSILENT

نرم‌افزار *DigSILENT* دارای دکمه *Save* نمی‌باشد و تغییرات اعمالی به سیستم پایگاه داده فوراً در حافظه پایگاه داده ذخیره می‌گردند. به این معنا که کاربر ممکن است در هر زمانی بدون انجام عمل ذخیره تغییرات اعمالی، از برنامه خارج شود. آخرین پروژه فعال، در شروع دوباره، فعال نخواهد شد. به‌طور کلی آخرین پروژه‌های فعال در منوی اصلی *File* قرار دارند و برای دوباره فعال نمودن آنها می‌بایست کلیک چپ شوند.



شکل پ ۵- صفحه کادر اصلی نرم‌افزار بعد از ایجاد پروژه جدید



شکل پ ۶- کادر مشخصات Study Case

ایجاد عناصر سیستم قدرت در نرم‌افزار DigSILENT

ایجاد هر سیستم قدرتی شامل بر دو نوع عملیات است: الف- رسم عناصر سیستم ب- ورود اطلاعات عناصر


۱- رسم عناصر سیستم قدرت

نرم‌افزار DigSILENT امکان ایجاد سیستم‌های قدرت جدید توسط کاربر را فراهم کرده است. به‌طور کلی روش مناسب و آسان، استفاده از دیاگرام‌های تک‌خطی، ایجاد مولفه‌ها در یک محیط پایگاه داده متنی، اتصال دستی عناصر به یکدیگر و سپس تعریف توپولوژی می‌باشد.

به‌طور کلی روند ایجاد عناصر سیستم قدرت در دیاگرام تک‌خطی شامل مراحل ذیل است:

۱. انتخاب دکمه عنصر موردنظر، با کلیک چپ از جعبه ابزار گرافیکی.
۲. با کلیک چپ مجدد در دیاگرام تک‌خطی، سمبل عنصر ایجاد می‌شود.

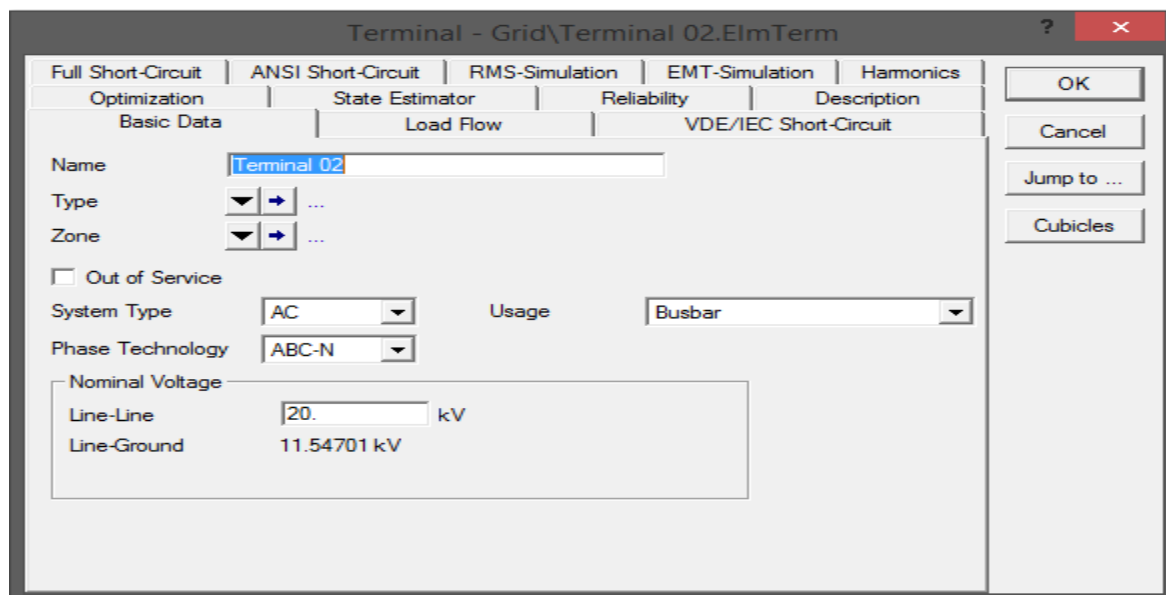
۱-۱ ایجاد شین‌ها

در جعبه ابزار گرافیکی، دکمه ()، *busbar* را کلیک چپ نمائید. بعد از فشردن دکمه مذکور مکان‌نما سمبل شین در صفحه مشبک را نشان خواهد داد. با کلیک چپ در محل مورد نظر شین ترسیم خواهد شد، که در حالت پیشفرض دارای نام *b1* است.

۱-۱-۱ ورود اطلاعات شین‌ها

روی سمبل شین دوبار کلیک نمائید. در نتیجه کادر ورود اطلاعات و ویرایش شین مطابق شکل (پ ۷) نمایان می‌شود. این کادر امکانات ذیل را شامل می‌شود:

- در کادر تب‌های مختلفی به منظور وارد کردن پارامترهای محاسبات وجود دارد. از جمله *Basic Data* ، *Load Flow* و غیره.
- در کادر پست (*Station*) و ناحیه (*Zone*) که شین به آنها تعلق دارد و دکمه‌هایی برای باز کردن کادر ویرایش آنها وجود دارد.
- پارامترهای نام، نوع و سطح ولتاژ نامی شین را در کادر گزینه‌های (*Basic Data*) می‌توان وارد نمود.
- با کلیک چپ نمودن دکمه () و انتخاب گزینه، *Select Project Type* کتابخانه شین در شاخه پایگاه داده باز شده و فهرست شین‌ها نشان داده می‌شود. می‌توان نوع شین را با کلیک چپ نمودن آیکن مربوطه انتخاب و دکمه *OK* را کلیک نمود.
- در مورد فوق، در صورت انتخاب گزینه *New Project Type* می‌توان نوع شینی که دارای مشخصات متفاوت با شین‌های موجود در کتابخانه مدل باشد، را مدل نمود.
- ولتاژ نامی نیز یکی از گزینه‌های (*Basic Data*) می‌باشد که ممکن است با سطح ولتاژ نوع آن متفاوت باشد و برای سطوح ولتاژ پایینتری مورد استفاده قرار گیرد.



شکل پ ۷- کادر شین

۱-۲ ایجاد عناصر شاخه

شین‌ها توسط عناصری همچون خطوط انتقال یا ترانسفورماتورها به همدیگر اتصال می‌یابند. برای ایجاد عناصر شاخه در دیاگرام تک خطی مطابق موارد ذیل عمل کنید:

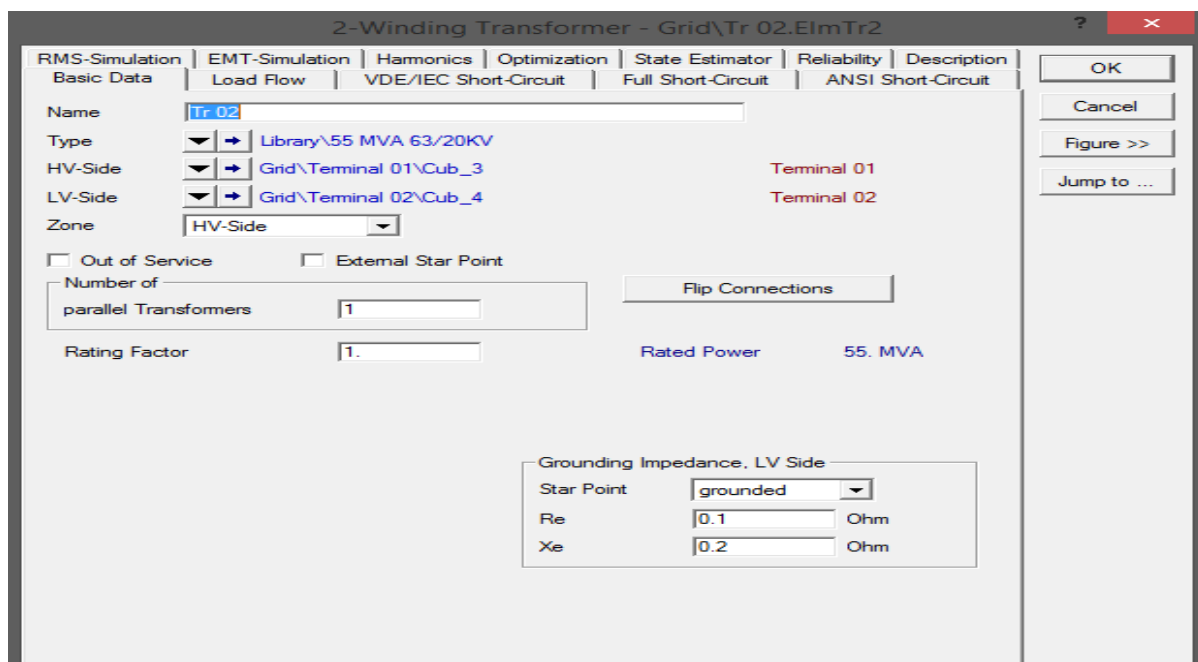
۱-۲-۱ ایجاد ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه

از جعبه ابزار دکمه (Winding Transformer) را کلیک چپ نمایید. برای ترسیم ترانسفورماتور با کلیک چپ روی شین اول یک اتصال ناقص بوجود آمده، سپس روی شین دوم نیز کلیک چپ نمایید. در نتیجه اتصال کامل و ترانسفورماتور دو سیم پیچه میان دو شین قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱-۱ ورود اطلاعات ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه

با دوبار کلیک کردن سمبل ترانسفورماتور دو سیم پیچه کادر ورود اطلاعات و ویرایش آن که در شکل (پ ۸) نمایان شده است، باز می‌شود. در این کادر امکانات ذیل وجود دارند:


- کادر مشخصات شین‌هایی که ترانسفورماتور آنها را به هم اتصال داده است، را نشان می‌دهد. این فیلدها زمانی که ترانسفورماتور در دیاگرام تک خطی قرار می‌گیرد، به صورت خودکار تنظیم می‌شوند.
- با فشردن دکمه (Type) می‌توان با انتخاب یکی از سه گزینه فعال منوی حاصل، نوع ترانسفورماتور را انتخاب نمود. البته در صورت انتخاب گزینه سوم، باید مشخصات پارامترهای الکتریکی مربوطه را وارد نمود.
- موقعیت تپ چنجر ترانسفورماتور را میتوان در کادر Load Flow تنظیم نمود.
- در صورتیکه طرفهای HV و LV ترانسفورماتور به صورت اشتباه متصل شده باشند، با فشردن دکمه Flip Connections در Basic Data اتصال صحیح را برقرار و دکمه OK را کلیک کنید.



شکل پ ۸- کادر ترانسفورماتور دو سیم پیچه


۱-۲-۲ ایجاد خطوط

برای افزودن خطوط در دیاگرام تک خطی مراحل ذیل را انجام دهید :


همانند افزودن ترانسفورماتور، ابتدا از جعبه ابزار دکمه خط () را کلیک چپ نمائید.

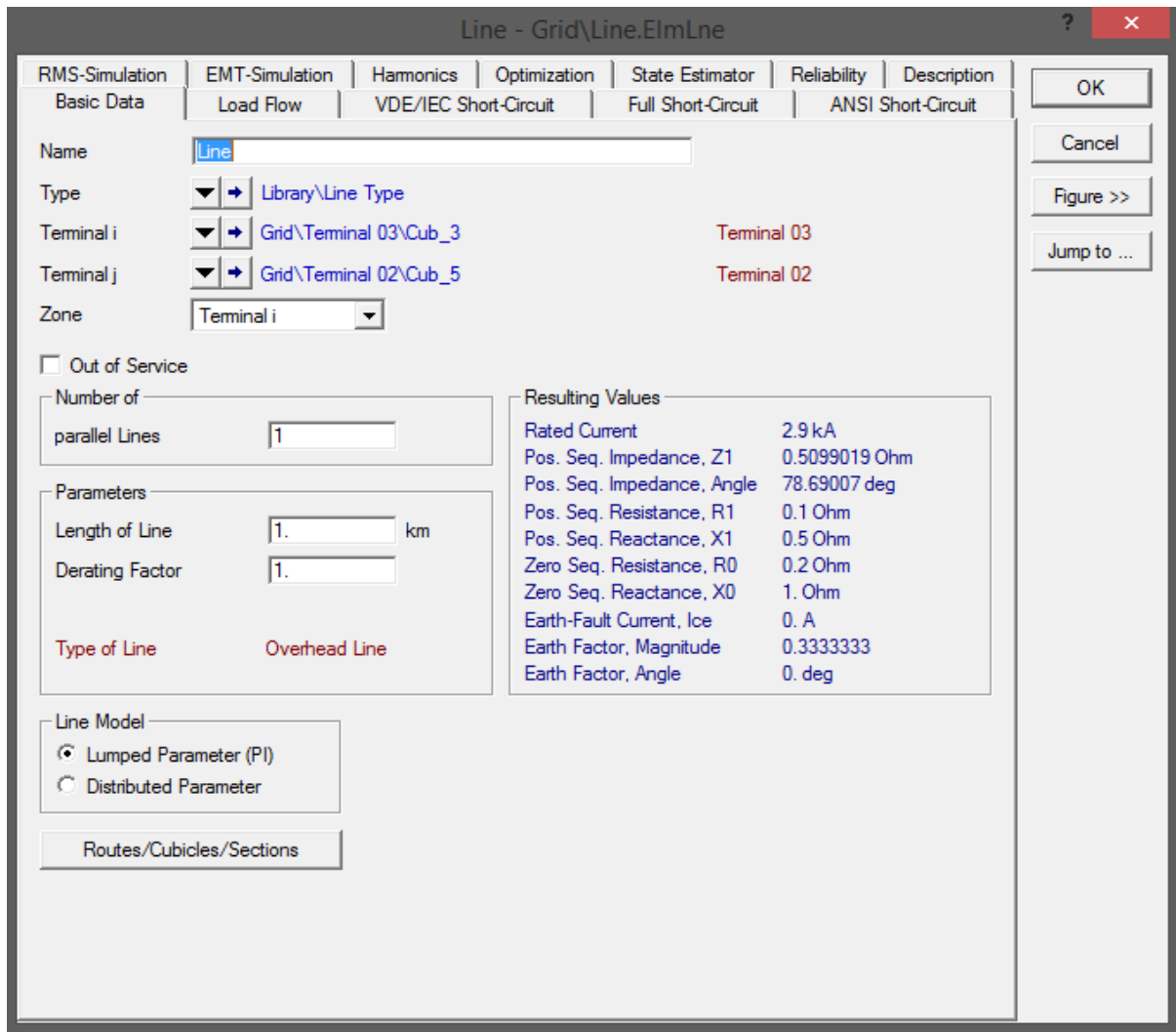
میان دو شین مورد نظر، با کلیک چپ روی شین ابتدائی اتصال ناقصی به وجود می‌آید. به دفعات مورد نیاز جهت ترسیم شکست‌های خط در دیاگرام تک خطی کلیک چپ نمائید. با کلیک چپ نهائی روی شین دوم، سمبل خط در دیاگرام تک خطی جای می‌گیرد.

۱-۳-۱ ایجاد بار

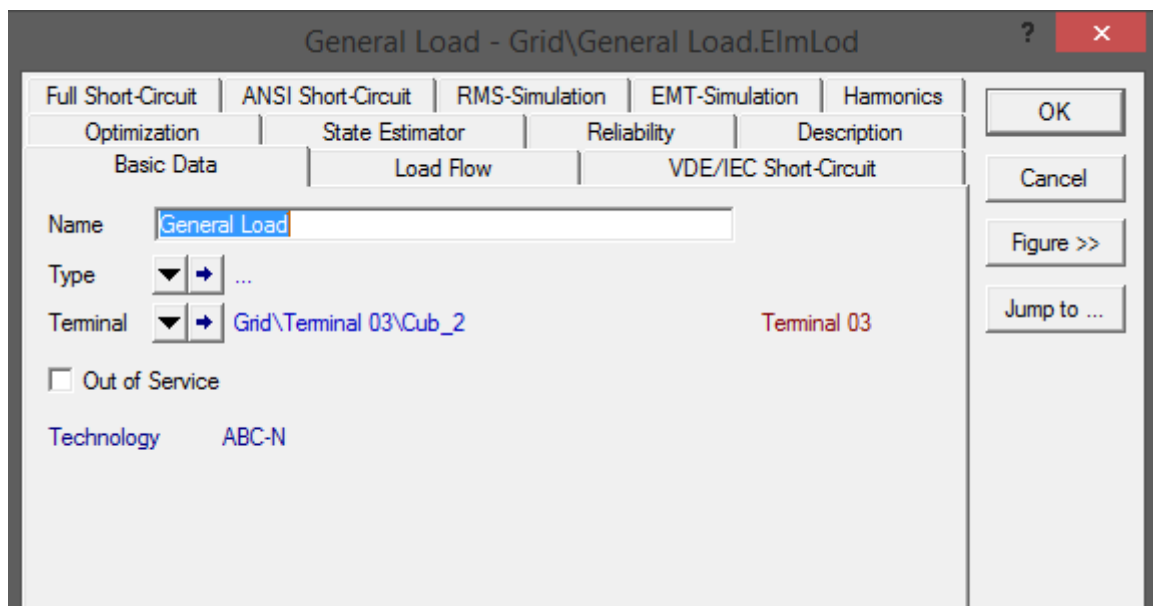
دکمه () *General Load* را از جعبه ابزار کلیک و برای افزودن در دیاگرام تک خطی، روی شین مورد نظر کلیک چپ کنید.

۱-۳-۱-۱ ورود اطلاعات بار

- با دوبار کلیک نمودن سمبل عنصر بار در دیاگرام تک خطی، کادر آنرا مطابق شکل (پ ۱۰) باز و با استفاده از گزینه‌های دو تب *Basic Data* و *Load Flow* مشخصات پارامترهای الکتریکی بار را وارد نمائید.
- می‌توان بارهای استاتیک و دینامیک را با کلیک کردن دکمه () *Type* و انتخاب گزینه *New Project Type* از منوی حاصل و سپس به ترتیب با کلیک روی یکی از دو گزینه منو، مدل نمود.

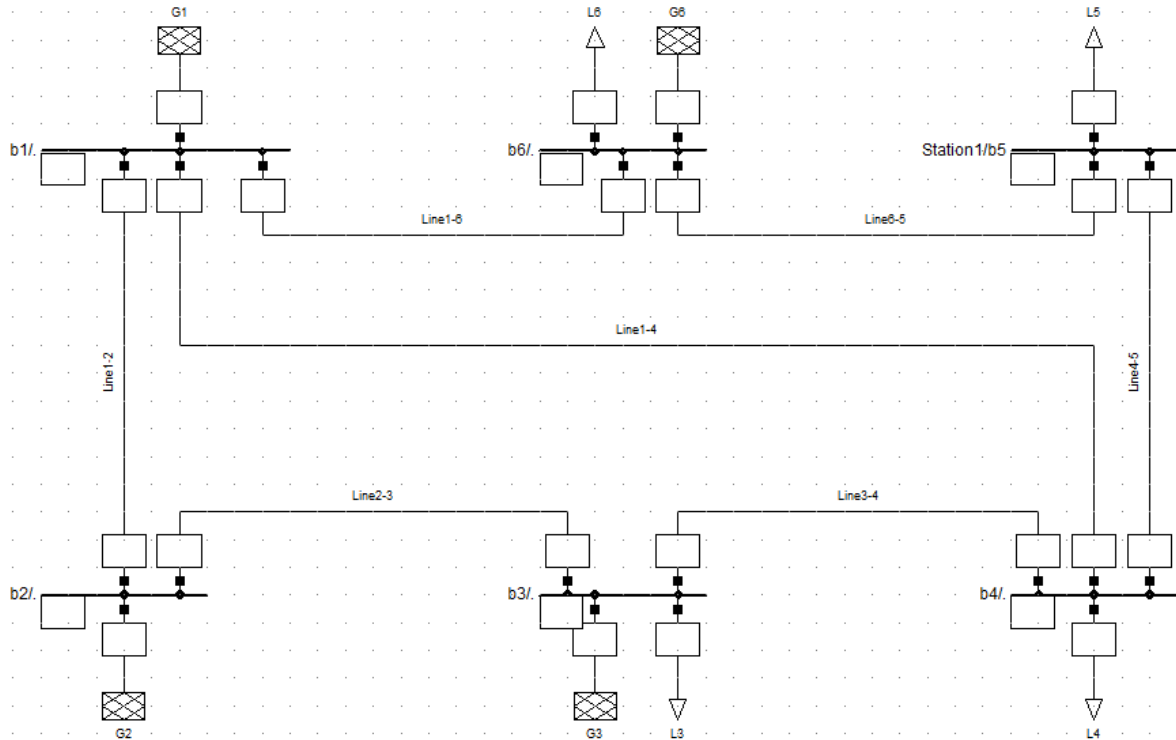


شکل پ ۹- کادر خط



شکل پ ۱۰- کادر بار

حال با توجه به مطالب گفته شده سیستم ۶شینه شکل (پ۱۱) را در محیط *DigSILENT* شبیه‌سازی کرده و مقادیر المان‌ها را مطابق نمونه قرار دهید.



شکل پ ۱۱- شبکه ۶باس

Name	Grid	Terminal i StaCubic	Terminal i Busbar	Terminal j StaCubic	Terminal j Busbar	Type TypLine, TypTow, TypGeo	Length km
Line1-2	Grid	b1	.	b2	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	45.
Line1-4	Grid	b1	.	b4	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	38.
Line1-6	Grid	b1	.	b6	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	8.
Line2-3	Grid	b3	.	b2	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	21.
Line3-4	Grid	b3	.	b4	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	87.
Line4-5	Grid	Station1	b5	b4	.	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	45.
Line6-5	Grid	b6	.	Station1	b5	N2XS(FL)2Y 1x1000RM/50 64/110kV.it	25.

شکل پ ۱۲- اطلاعات خطوط

Name	Grid	Terminal StaCubic	Terminal Busbar	Sk*max MVA	R/X max.	Act.Pow. MW	Voltage Setpoint p.u.
G1	Grid	b1	.	10000.	0.1	0.	1.
G2	Grid	b2	.	10000.	0.1	70.	1.
G3	Grid	b3	.	10000.	0.1	65.	1.
G6	Grid	b6	.	10000.	0.1	80.	1.

شکل پ ۱۳- اطلاعات ژنراتورها


Name	Grid	Terminal StaCubic	Terminal Busbar	Act.Pow. MW	React.Pow. Mvar	App.Pow. MVA	Pow.Fact.	Out of Service
L3	Grid	b3	.	40.	0.	40.	1.	<input type="checkbox"/>
L4	Grid	b4	.	45.	33.75	56.25	0.8	<input type="checkbox"/>
L5	Grid	Station1	b5	75.	35.	82.76472	0.90618	<input type="checkbox"/>
L6	Grid	b6	.	25.	9.	26.57066	0.94088	<input type="checkbox"/>

شکل پ ۱۴- اطلاعات بارها

پخش بار در نرم‌افزار DigSILENT

۱- محاسبات پخش بار را می‌توان با انجام یکی از اعمال زیر، اجراء نمود:

۱. انتخاب گزینه *Calculation – Load Flow* از منوی اصلی.

۲. کلیک نمودن دکمه () از نوار ابزار اصلی.

با انجام یکی از اعمال مذکور کادر محاسبات پخش بار که در شکل (پ ۱۵) نشان داده شده است، باز می‌شود. کادر پخش بار دارای هفت امکان و گزینه کنترلی بوده که *Basic Option* دارای امکانات زیر می‌باشد:

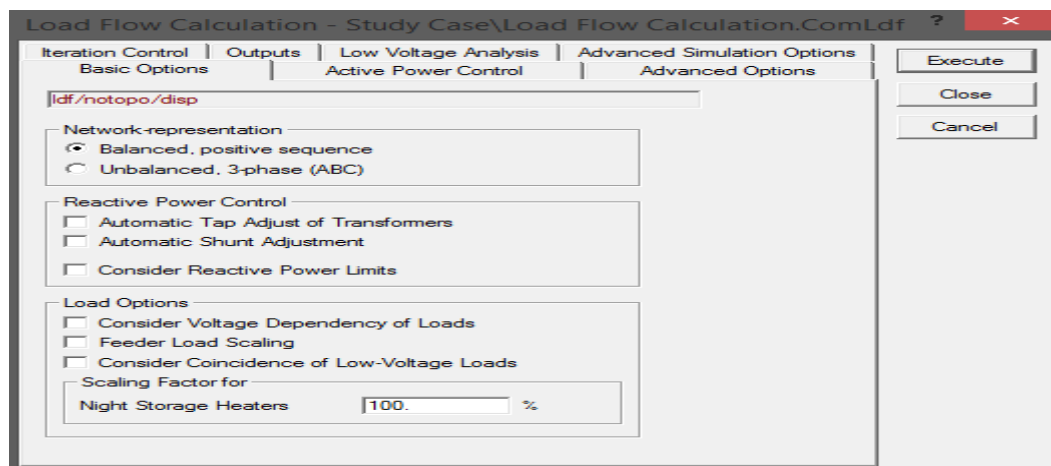
• در قسمت *Network Representation* می‌توان نوع پخش بار متعادل مولفه مثبت یا نامتعادل سه فاز را انتخاب نمود.

• سایر گزینه‌های *Basic Option* به منظور کنترل توان راکتیو و تنظیمات مربوط به بار می‌باشند.

• در صورت غیرفعال نمودن سایر گزینه‌های، *Basic Option* خط دستور کادر باید دارای دستور " *Idf / Iev / secc* " باشد.

• سایر امکانات کادر پخش بار شامل عملیات تنظیم کنترل توان اکتیو، آنالیز فشار ضعیف، خروجی‌ها، کنترل تکرار محاسبات و شبیه‌سازی پیشرفته می‌باشد.

• بعد از انجام تنظیمات کادر پخش بار، با فشردن دکمه *Execute* اجرای محاسبات پخش بار شروع می‌شود.



شکل پ ۱۵- کادر محاسبات پخش بار

اکنون محاسبه پخش بار آغاز شده است و در صورتیکه سیستم قدرت بدرستی مدل شده باشد در انتهای پیغام ظاهر شده در پنجره خروجی، تعداد تکرار منجر به همگرایی محاسبات پخش بار مشخص خواهد شد.

۲- نمایش نتایج محاسبات

نتایج محاسبات اجرا شده، مانند محاسبات پخش بار یا اتصال کوتاه را می‌توان از طریق یکی از دو روش زیر تهیه و مشاهده نمود:

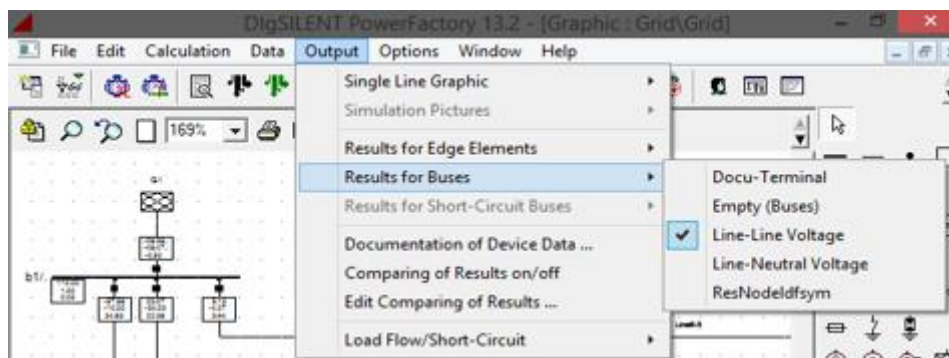
۱. گزارش کامل نتایج محاسبات با استفاده از فایل نتایج، پنجره خروجی نرم‌افزار.
۲. گزارش نتایج با استفاده از جعبه‌های نتایج عناصر در دیاگرام تک‌خطی.

در روش اول به دو طریق می‌توان گزارش کاملی از نتایج محاسبات را تهیه و مشاهده نمود، که عبارتند از:


۱. با انتخاب گزینه *Output* از منوی اصلی نرم افزار و سپس انتخاب گزینه مورد نظر از منوی حاصل مطابق شکل (پ ۱۶) می‌توان گزارش نتایج محاسبات برای عناصری خاص، مانند عناصر قابل اتصال به شین، شین‌ها یا گزارش کامل نتایج محاسبات پخش بار یا اتصال کوتاه را مشاهده نمود.


نکته قابل توجه اینکه:

- در صورت انتخاب گزینه آخر منوی شکل (پ ۱۶) یعنی، *Load Flow / Short -Circuit Analysis* کادر نتایج باز شده، با تنظیم گزینه‌های آن می‌توان نتایج مورد نظر را در پنجره خروجی نرم‌افزار مشاهده نمود. امکانات کادر مذکور در ادامه تشریح خواهند شد.
- در صورت انتخاب سایر گزینه‌ها، نتایج مورد نظر در جعبه‌های نتایج عناصر نمایان خواهند شد.



شکل پ ۱۶- منوی حاصل از انتخاب گزینه *Output*

۲. با فشردن دکمه () *Output Calculation Analysis* از نوار ابزار اصلی، کادر نتایج محاسبات باز شده، می‌توان بوسیله تنظیمات اعمالی، نتایج دلخواه را در پنجره خروجی مشاهده نمود.

- با فشردن دکمه () *Maximize Output Window* از نوار ابزار اصلی می‌توان نتایج خروجی را به صورت واضح تر مشاهده نمود.

مراجع

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheble, "*POWER GENERATION, OPERATION AND CONTROL*", Third Edition, John Wiley, IEEE, 2013.
- [2] Berg S., Hawkins E. S., Pleines W. W., "*Mechanized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits*", IEEE Transactions on Power apparatus and systems, Vol. PAS-86, No. 4, April 1967, pp 415-421.
- [۳] مهرداد عبادی، "سیستم‌های قدرت الکتریکی (جلد سوم-تحلیل، بهره‌برداری و کنترل)"، انتشارات نشر دانش، ۱۳۹۴.
- [۴] احد کاظمی، "سیستم‌های قدرت الکتریکی (جلد اول)"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۲.
- [۵] احد کاظمی، "سیستم‌های قدرت الکتریکی (جلد دوم)"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۱.
- [۶] ویلیام دی. استیونسون، جی. آر. گرنجر، "بررسی سیستم‌های قدرت"، ترجمه محمود دیانی، انتشارات موسسه علمی فرهنگی نص، چاپ پنجم، بهار ۱۳۹۱.
- [۷] جی. دی. گلاور، م. سارما، "بررسی و طراحی سیستم‌های قدرت"، ترجمه م. حقی فام، ک. روزبهی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ هفتم، ۱۳۹۱.
- [۸] وحید عباسی، "آموزش مقدماتی *Sim Power System*"، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.