آموزش مقدماتی SimPowerSystems

MATLAB

دانشگاه صنعتی کرمانشاه

دکتر وحید عباسی

مقدمه

بسته نرم‌افزاری SimPowerSystems یک مجموعه کتابخانه‌ای و تحلیلی مناسب را برای مهندسین 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.

از SimPowerSystems در راستای بهبود و گسترش سیستم‌های کنترلی و تست شبکه می‌توان سود برد. شما قادر به استفاده از متغیرها و تعریف‌های موجود در MATLAB و طراحی کنترل‌کننده با استفاده از ابزارهای موجود در Simulink برای سیستم مورد مطالعه هستید. از طرفی می‌توان ترکیبات مکانیکی، هیدرولیکی و پنوماتیکی را نیز با توجه به ابزارهای موجود در Simscape به مدل اضافه کرد و از یک پردازش یکپارچه برای کل مدل بهره برد. یکی از موارد جذاب در کاربردهای عملی قابلیت ارتباط نرم‌افزار MATLAB با بعضی از نرم‌افزارهای دیگر و یا تجهیزات سخت‌افزاری از طریق مدارهای واسط می‌باشد. این ارتباط از طریق خروجی‌های مدار تحلیل شده و یا دریافت اطلاعات به عنوان ورودی SimPowerSystems نیز امکان‌پذیر است که بر توانایی‌های آن می‌افزاید.

SimPowerSystems

SimPowerSystems و دیگر ابزارهای موجود در نرم‌افزار MATLAB مانند Simulink جهت مدل‌سازی سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و کنترلی استفاده می‌شوند. SimPowerSystems زیر مجموعه Simulink در مجموعه کتابخانه‌ای تعریف شده است. لذا قبل از شروع باید تاحدودی با مجموعه ابزارهای Simulink آشنا شوید.

امروزه نقش شبیه‌سازی در طراحی‌ها بسیار مهم است. شبکه‌های قدرت ترکیبی از مدارهای الکتریکی و تجهیزات الکترومکانیکی مانند موتورها و ژنراتورها هستند. مهندسین این حوزه به صورت مداوم در حال بررسی

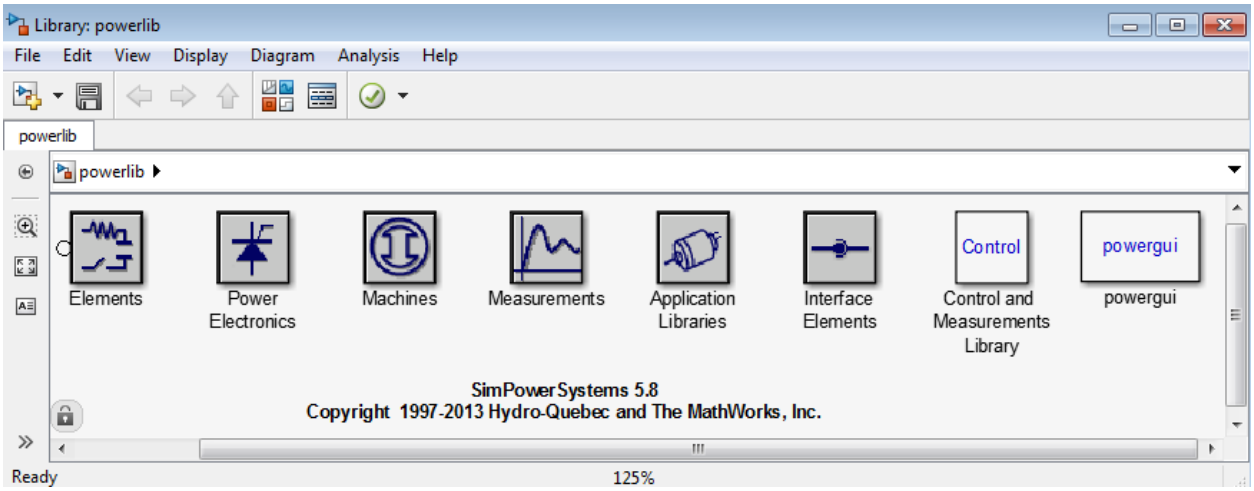
و تحقیق جهت بهبود عملکرد کلیه بخش‌های شبکه می‌باشند. از آنجا که هر روزه تجهیزاتی مانند ادوات FACTS، ادوات الکترونیک قدرت و سیستم‌های کنترلی جدید به شبکه اضافه می‌شوند و این تجیهزات دارای مشخصه‌های غیرخطی هستند، تحلیل را جهت بهبود و طراحی بسیار مشکل نموده است. بعلاوه بیشتر این تجهیزات دارای مؤلفه‌های غیرخطی هستند که تحلیل‌های کلاسیک را با مشکل مواجه کرده‌اند. لذا استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی که قادر به حل معادلات غیرخطی در سطح وسیع می‌باشند بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

نرم‌افزار SimPowerSystems یک ابزار پیشرفته طراحی است که به محققین و مهندسین اجازه ساخت سریع و آسان مدل سیستم‌های قدرت را می‌دهد. با استفاده از چند کلیک مدل ساخته می‌شود و طرح مدار قابل پیاده‌سازی است. بعلاوه بین مدار الکتریکی با مدل‌های مکانیکی، حرارتی و کنترلی به آسانی می‌شود ارتباط برقرار کرد. این ارتباط به علت امکان تبادل اطلاعات با ابزارهای Simulink امکان‌پذیر است. از طرفی Simulink قابلیت استفاده از ابزارها و مدل‌های محاسباتی MATLAB را دارد. این مسئله موجبات تنوع را در مباحث مختلف ایجاد می‌کند و توانایی SimPowerSystems را افزایش می‌دهد.

کتابخانه SimPowerSystems

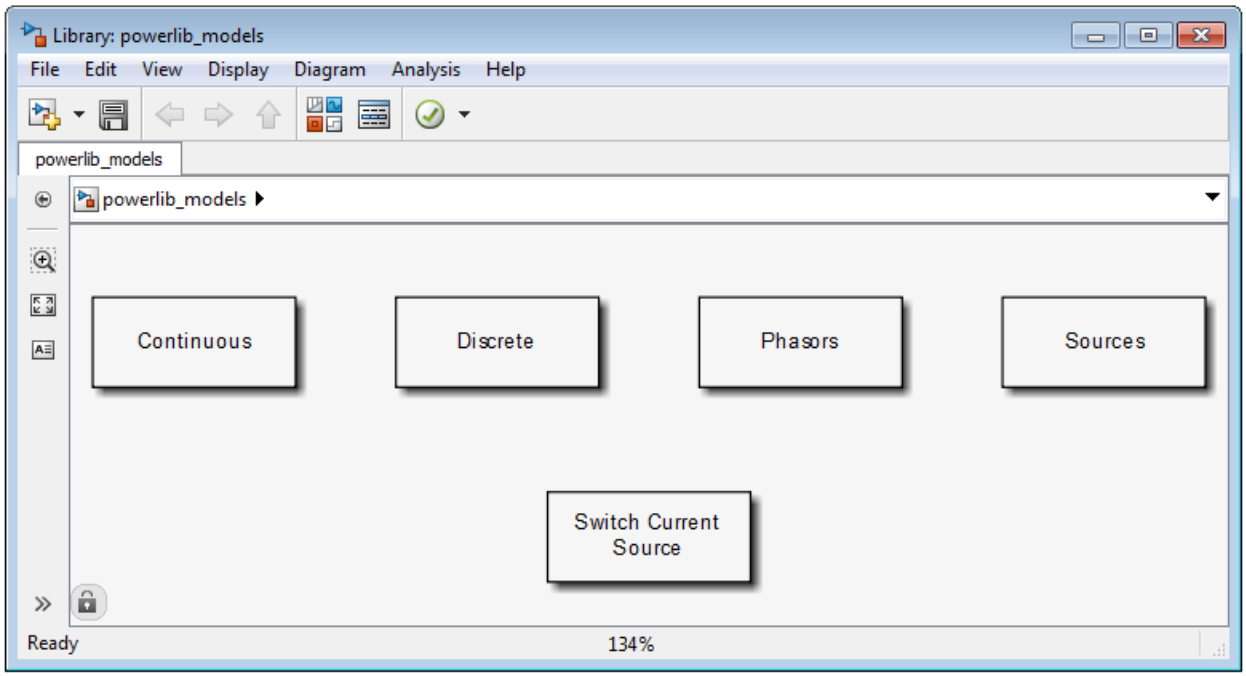
SimPowerSystems دارای کتابخانه‌ای شامل مدل‌های معمول تجهیزاتی مانند: ترانسفورماتورها، مدل‌های خط، ماشین‌ها و ادوات الکترونیک قدرت است. این مدل‌ها براساس تست‌ها و تحلیل‌های واقعی ساخته شده‌اند و قابلیت بالایی را در تحلیل‌ها ایجاد می‌کنند.

کتابخانه اصلی SimPowerSystems با عنوان powerlib در محیط مطلب شناخته می‌شود. برای مشاهده آن کافی است تا در صفحه اصلی فرمان‌های مطلب (Command Window) کلمه powerlib را بنویسید و دکمه Enter را بزنید. بعد از باز شدن صفحه powerlib بلوک‌هایی شامل تجهیزات مختلف قابل رؤیت است. بلوک‌ها با عناوین تجهیزات (Elements)، ادوات الکترونیک قدرت (Power Electronics)، ماشین‌های الکتریکی (Machines)، اندازه‌گیرها (Msuarments) و ... معرفی شده‌اند و با دوبار کلیک کردن بر روی هر بلوک ادوات داخل هر یک را می‌توان مشاهده کرد.



پنجره اصلی powerlib شامل بلوک Powergui است که یک ارتباط گرافیکی را برای تحلیل مدارهای الکتریکی ایجاد می‌کند. بلوک مذکور مهمترین بلوک از کتابخانه مورد استفاده است و باید در تمامی مدارها قرار داده شود. از طریق Powergui امکانات بیشتری را می‌توان به تحلیل‌ها اضافه کرد، لذا در یک بخش مجزا مورد بحث قرار خواهد گرفت.

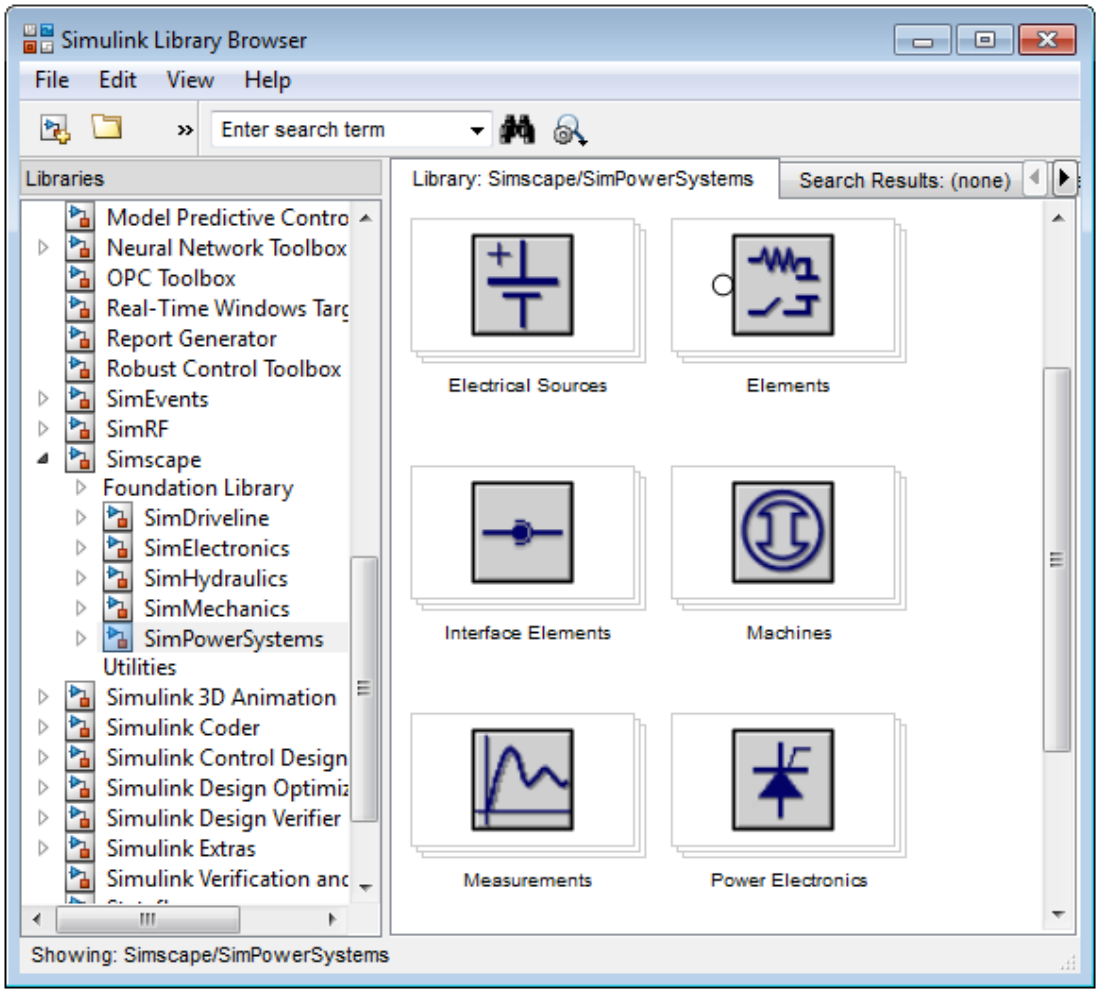
در بخش دیگری از کتابخانه با عنوان powerlib_models می‌توان بلوک‌اهی اجزاء غیرخطی مدار را پیدا کرد و در مدارهای مورد نظر استفاده نمود. جهت مشاهده این کتابخانه powerlib_models را در صفحه اصلی و قسمت Command Window تایپ کنید و دکمه Enter را بزنید.



جهت دست‌یابی به بلوک‌های SimPowerSystems ابتدا باید بر روی منوی Simulink در صفحه اصلی کلیک کنید. آیکون Simulink در بالای صفحه اصلی و به صورت زیر نشان داده می‌شود.

در صورتی که منوی Simulink فعال نبود روی منوی Preferences

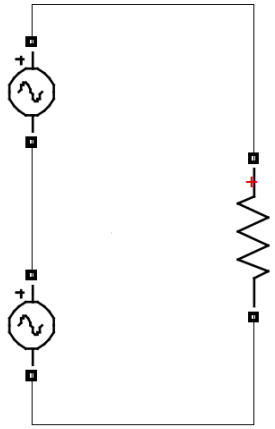
کلیک کنید تا صفحه فعال‌سازی آیکون‌ها نمایان شود. در صفحه مذکور منوی Simulink را در ستون سمت چپ انتخاب کرده و بعد دکمه Apply را بزنید تا Simulink بارگذاری شود. حال با کلیک کردن بر روی آیکون Simulink مجموعه کتابخانه‌های این بخش در یک صفحه مجزا قابل رؤیت می‌گردد. بر روی Simscape کلیک کنید تا SimPowerSystems که جزء زیرمجموعه‌های آن است نمایان گردد.



جهت آشنایی با نحوه کاربرد نرم‌افزار چند مدار ساده به عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرند و در فصل‌های بعدی ابزارهای مهم کتابخانه در طی تحلیل مدارهای مختلف معرفی خواهند شد.

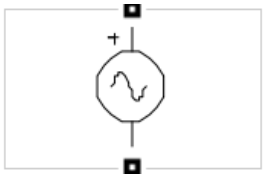
تحلیل چند مدار ساده

اولین مدار مورد بررسی یک مدار سری متشکل از اجزاء ساده است. در این مدار از دو منبع ولتاژ استفاده خواهد شد.



جهت شروع ابتدا در صفحه Simulink روی پوشه New model (قسمت بالای صفحه) کلیک کنید تا فضای لازم برای تشکیل مدار ایجاد گردد.

به مسیر Simscape>SimPowerSystems>Electrical Sources در پنجره سمت چپ Simulink بروید و از آنجا منبع ولتاژ AC را به صفحه (از طریق کلیک راست و انتخاب گزینه ... Add to) اضافه کنید.



بلوک منبع ولتاژ AC نشان دهنده یک منبع ایده‌آل است که ولتاژ U را با مشخصات لازم تولید می‌کند. در این بلوک مقادیر منفی برای دامنه ولتاژ و فاز قابل پذیرش هستند. ولی مقادیر منفی فرکانس باعث ایجاد خطا خواهد شد. جهت مشاهده پنجره تنظیمات منبع ولتاژ دو بار بر روی آن کلیک کنید. در پنجره تنظیمات مقادیر زیر را می‌توان وارد کرد:

دامنه ولتاژ (Peak amplitude): دامنه ولتاژ موج سینوسی برحسب ولت (V)

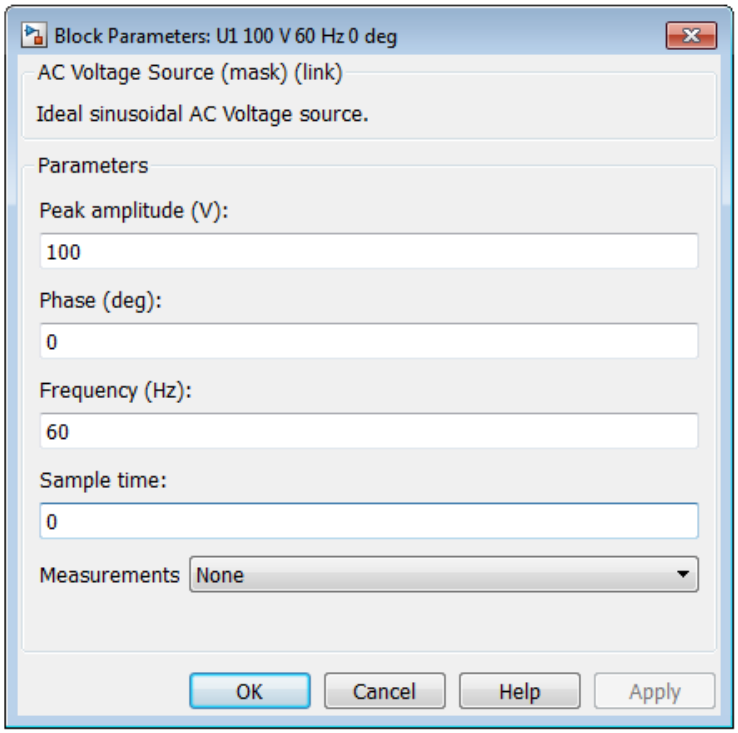
فاز (Phase): فاز منبع بر حسب درجه

فرکانس (Frequency): فرکانس منبع ولتاژ (Hz)

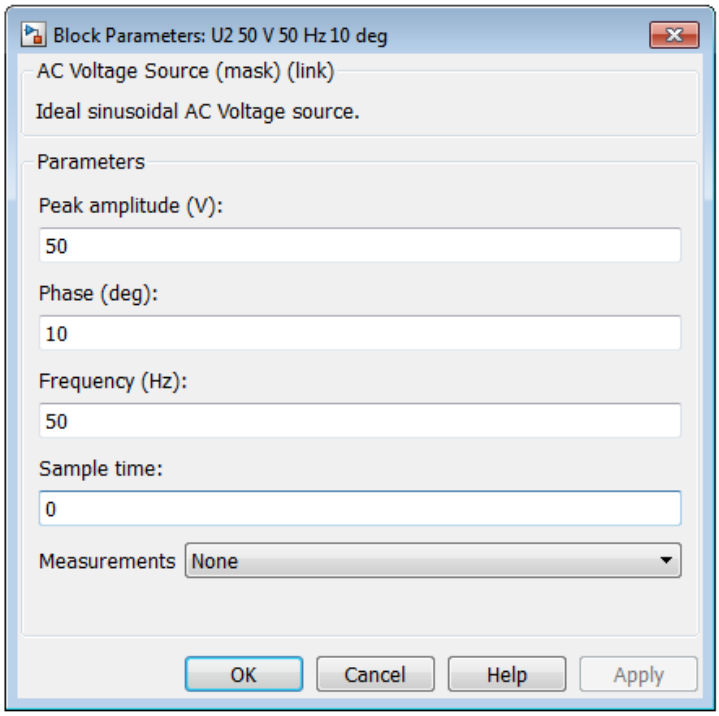
زمان نمونه (Sample time): دوره زمانی نمونه به صورت پیش فرض برابر صفر است.

اندازه‌گیری (Measurements): در صورتی که بخواهیم مقادیری مانند ولتاژ و جریان را اندازه‌گیری کنیم می‌توان گزینه مدنظر را در این بخش انتخاب کنیم.

منبع ولتاژ اول را که به مدل اضافه کردید طبق پنجره زیر تنظیم و سپس ok کنید.



منبع ولتاژ دیگری به مدار اضافه کرده و مطابق زیر آن را تنظیم کنید.

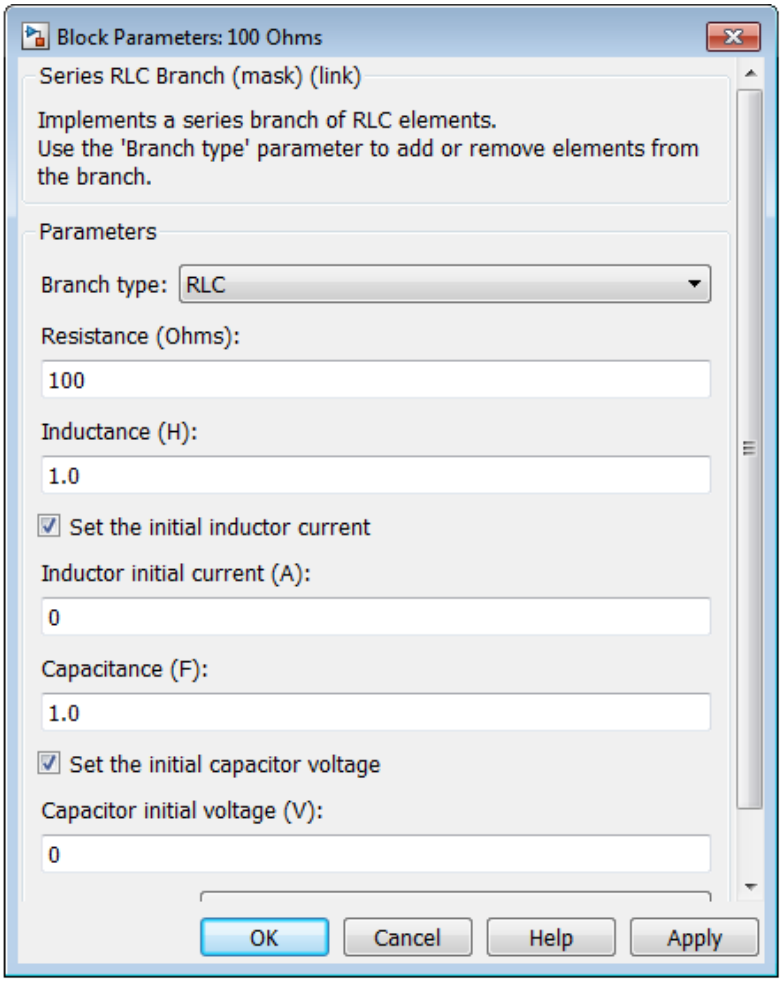


جهت اتصال عناصر انتخاب شده (منابع ولتاژ) به یکدیگر، از گره‌های موجود دو سمت آنها می‌توان استفاده کرد. روی گره یکی از عناصر کلیک چپ کنید و کلیک را نگه دارید و با موس در امتداد مسیر مدنظر جهت اتصال حرکت کنید تا به گره عنصر دوم برسید، حال اگر انگشت خود را از روی کلیک بردارید دو عنصر به هم وصل خواهند شد.

جهت اضافه کردن مقاومت به مسیر Simscape>SimPowerSystems>Elements رجوع کنید و از بین عناصر نشان داده شده در سمت راست صفحه Series RLC Branch را انتخاب کنید و به مدل خود اضافه کنید.

شاخه RLC سری می‌تواند به ازاء یک مقاومت، سلف یا خازن در مدل قرار داده شود و یا به صورت ترکیبی از آنها باشد. در قسمت Branch Type از منوی تنظیمات این عنصر می‌توان نوع ترکیب مورد نیاز را انتخاب کرد. ضمناً در این عنصر مقادیر منفی نیز برای مقاومت، سلف و خازن قابل تنظیم هستند.

پنجره تنظیمات و پارامترها



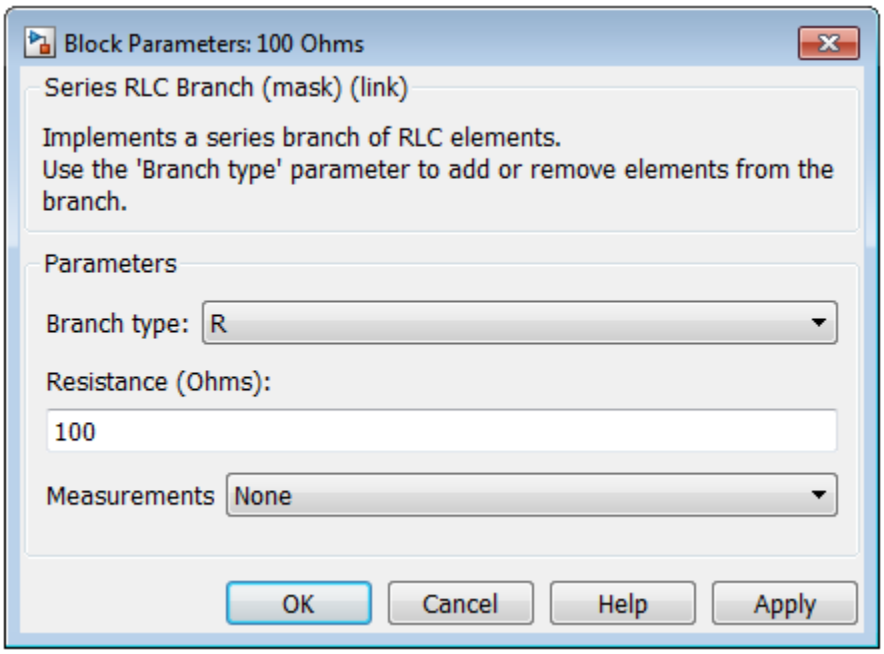
نوع شاخه (Branch type): در این قسمت می‌توان نوع عنصر را از نظر مقاومتی، سلفی و خازنی تنظیم کنید. از طرفی می‌توان عنصر را به صورت ترکیبی از آنها مانند RL، RC، RLC و ... تنظیم نمود. با تنظیم این بخش ورودی‌ها و پنجره‌های منوی تنظیمات نیز تغیر می‌کنند.

مقاومت (Resistance): مقدار آن بر حسب اهم (ohms) باید وارد شود.

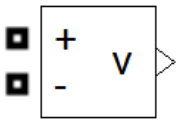
اندوکتانس (Inductance): اگر در منوی نوع شاخه L یا ترکیباتی از آن انتخاب شود این بخش اضافه خواهد شد که بر حسب H باید مقدار آن وارد شود. در صورتی که گزینه Set the initial inductor current را انتخاب کنید نیاز به یک مقدار اولیه برحسب آمپر برای جریان سلف در بخش Inductor initial current خواهد بود که باید توسط کاربر مشخص گردد.

کاپاسیتانس (Capacitance): اگر در منوی نوع شاخه C یا ترکیباتی از آن انتخاب شود این بخش اضافه خواهد شد که بر حسب F باید مقدار آن وارد شود. در صورتی که گزینه Set the initial capacitor voltage را انتخاب کنید نیاز به یک مقدار اولیه برحسب ولت برای ولتاژ خازن در بخش Capacitor initial voltage خواهد بود که باید توسط کاربر مشخص گردد.

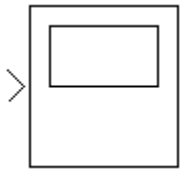
در مدل مورد بررسی مقاومت را با توجه به توضیحات قبلی به صورت زیر تنظیم کنید (در منوی Branch type گزینه R را انتخاب و 100 اهم را به ازاء مقدار آن وارد کنید) و به دو سر منابع ولتاژ سری شده با هم وصل کنید.



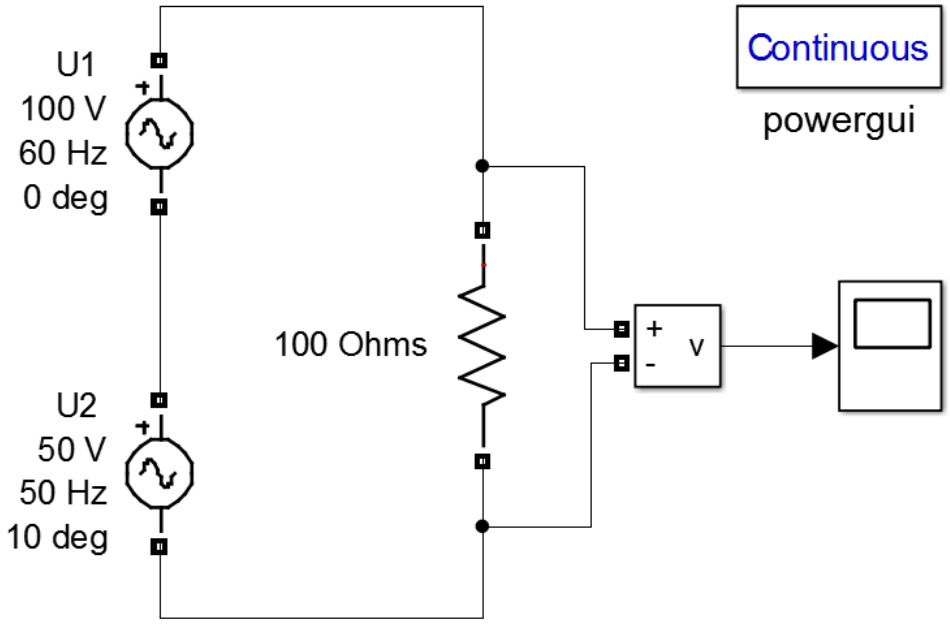
جهت اندازه‌گیری ولتاژ مدار می‌توان از یک اندازه‌گیر بهره برد. اندازه‌گیر ولتاژ باید به صورت موازی به دو سر مدنظر وصل شود. جهت یافتن این عنصر باید به مسیر Simscape>SimPowerSystems> Measurements رجوع شود. بعد از اضافه کردن نمونه‌گیر ولتاژ (Voltage Measurements) سر مثبت و منفی آنرا به دو سر مقاومت وصل کنید. خروجی نمونه‌گیر باید به اسیلوسکوپ وصل شود تا سیگنال ولتاژ قابل رؤیت گردد.



اسیلوسکوپ را از طریق مسیر Simulink> Sinks می‌توان پیدا کرد (در قسمت راست صفحه، اسیلوسکوپ با عنوان Scope قابل مشاهده است).



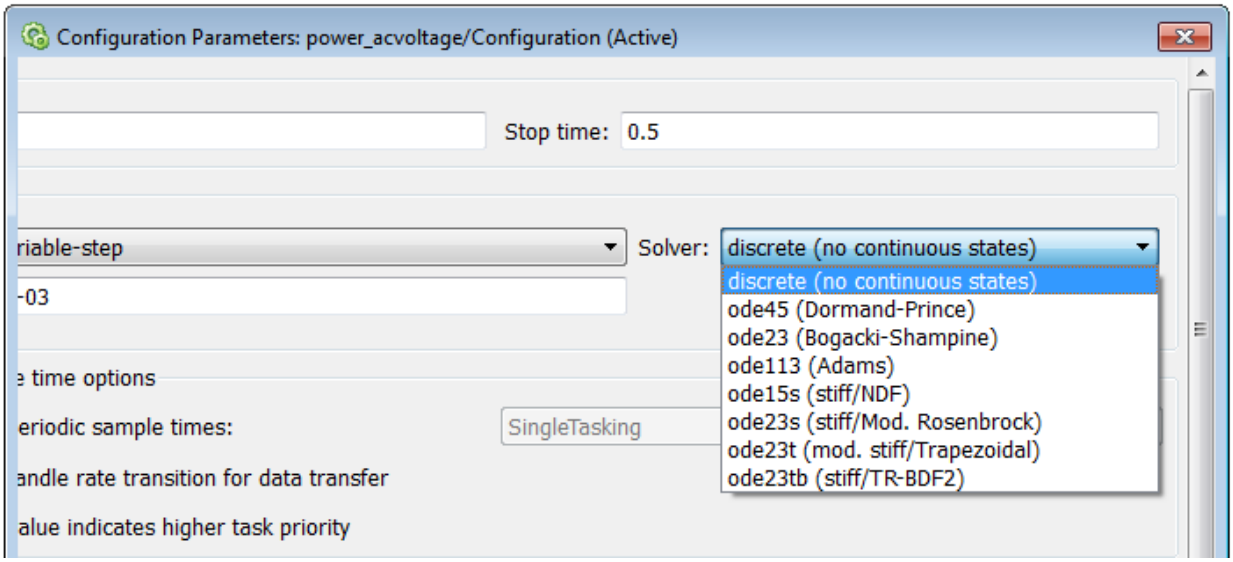
بعد از یافتن عناصر و اتصال آنها به هم باید مدار به شکل زیر درآید.



همانطور که قبلاً اشاره شد، باید در هر مدل که در فضای Simulink ساخته می‌شود حتماً بلوک powergui باید اضافه گردد. Powergui را می‌توان از مسیر Simscape> SimPowerSystems یافت.

اجرای برنامه: لازم به ذکر است که در اجرا می‌توان روش حل را انتخاب نمود. روش حل از طریق منوی Simulation> Model Configuration Parameters (منو Simulation در بالای صفحه قرار دارد)

قابل تنظیم است. بعد از کلیک بر روی عبارت Model Configuration در مسیر فوق صفحه‌ای باز خواهد شد که در آن Solver را می‌توان تغیر داد. در این مدار Solver به صورت discrete می‌تواند باشد.

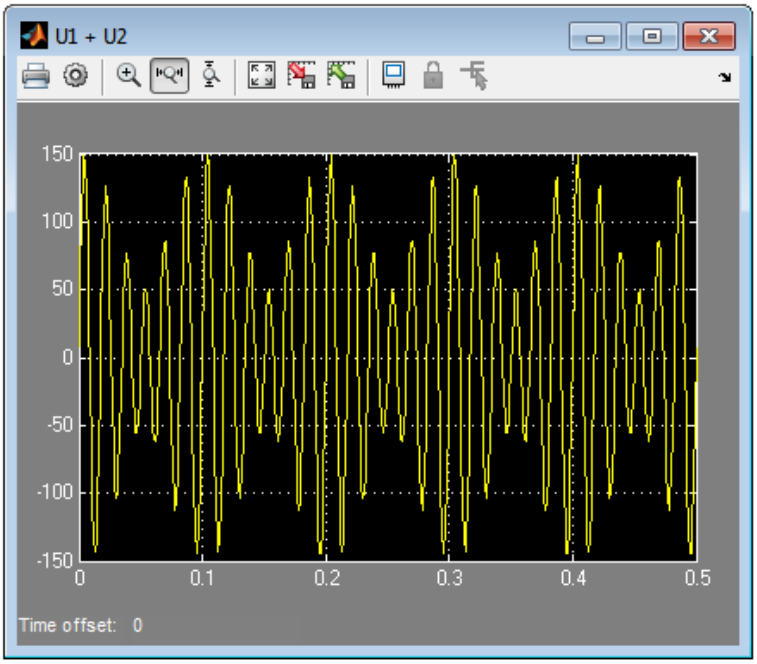


تنظیم مدت زمان اجرا و شروع آن از طریق منوی Run امکان‌پذیر می‌باشد. این منو در قسمت بالای صفحه قرار دارد.

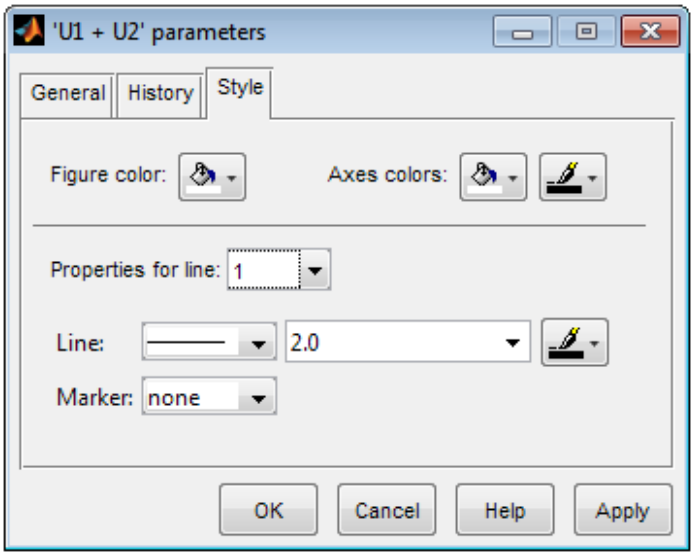
همانطور که مشاهده می‌شود مدت زمان اجرا 0.5 ثانیه انتخاب شده است. با کلیک بر روی اجرای برنامه شروع خواهد شد.

مشاهده خروجی

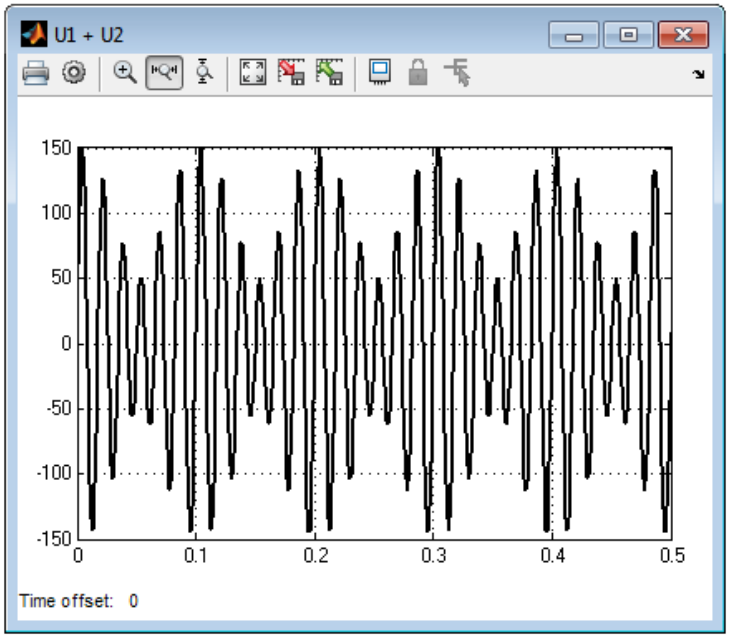
بعد از اجرا، مشاهده خروجی مدار از طریق Scope میسر خواهد بود. بر روی Scope دو بار کلیک کنید تا صفحه آن که شامل سیگنال ولتاژ است ظاهر گردد.



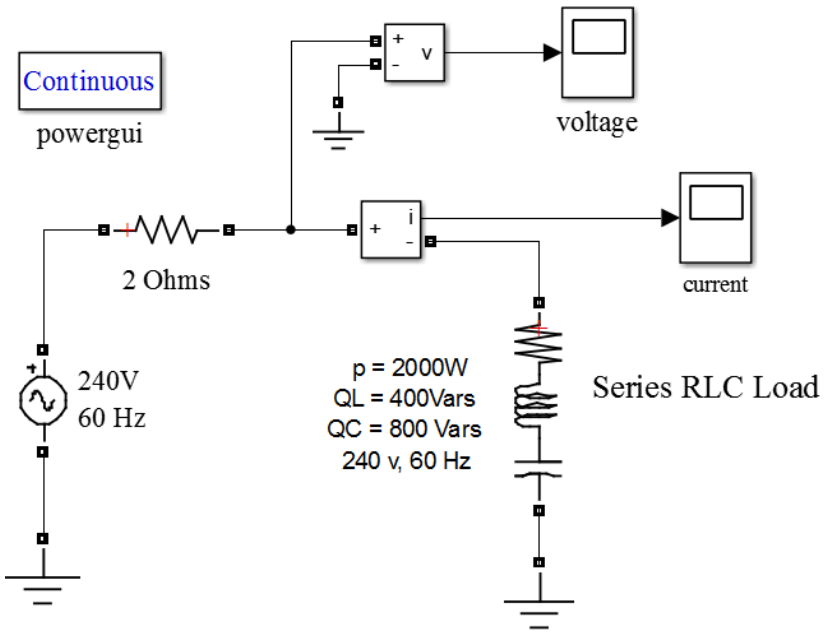
از طریق منوهای بالای صفحه اسیلوسکوپ می‌توان تنظیمات دلخواه را انجام داد. یکی از تنظیماتی که در تهیه گزارشات مدنظر قرار می‌گیرد افزایش وضوح خروجی است. این کار از طریق گزینه (parameters) که در قسمت بالای اسیلوسکوپ قرار دارد انجام می‌شود. بعد از انتخاب گزینه parameters صفحه تنظیمات ظاهر می‌گردد. منوی Style را از منوهای بالای آن انتخاب کنید و تنظیمات رنگ Figure، Axes و Line را مطابق شکل زیر تغیر دهید. در صورتی که افزایش ضخامت خطوط سیگنال نیز مدنظر باشد باید ابعاد آن را از طریق گزینه Line تغیر داد (در شکل زیر مقدار آن 2 انتخاب شده است).



بعد از تغیر منوها Apply کنید تا خروجی به صورت زیر درآید.



مدار دوم شامل یک بار RLC خواهد بود و نمونه‌گیری از جریان و ولتاژ در آن صورت خواهد گرفت. شکل زیر مدار مورد نظر را نشان می‌دهد.

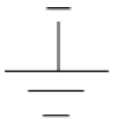


جهت ساخت مدل ابتدا بر روی New model کلیک کنید. سپس یک منبع ولتاژ AC از مسیر Simscape> SimPowerSystms> Electrical Sources به مدل اضافه کنید. مقادیر دامنه ولتاژ، فاز و فرکانس را با دو بار کلیک کردن بر روی آن تنظیم کنید (مقادیر مطابق با جدول زیر هستند).

Sample time	Frequency (Hz)	Phase (deg)	Peak Amplitude (V)	منبع ولتاژ Voltage Source
0	60	0	240	

از مسیر Simscape> Simpowersystems> Elements عنصر RLC Branch را به مدل اضافه کنید. بر روی آن کلیک کرده و Branch type را R انتخاب نمائید. مقدار مقاومت 2 اهم است که باید در پنجره تنظیمات وارد شود.

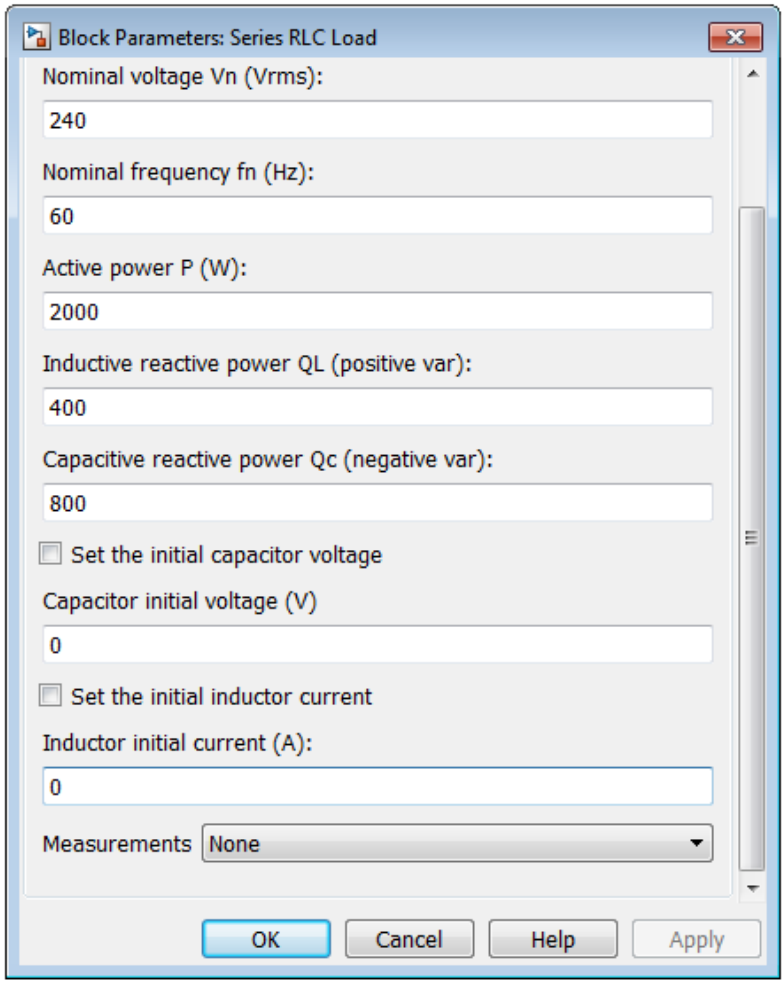
از مسیر Simscape> Simpowersystems> Elements عنصر زمین (Ground) را به مدار اضافه کنید.



حال زمین، منبع ولتاژ و مقاومت را طبق مدار به هم وصل کنید.

اندازه‌گیر ولتاژ (Voltage measurements) و اندازه‌گیر جریان (Current Measurements) را از مسیر Simscape> Simpowersystems> measurements پیدا کرده و به مدل اضافه کنید. عناصر جدید را مطابق شکل به عناصر دیگر اتصال دهید. نمونه‌گیر جریان به صورت سری و نمونه‌گیر ولتاژ به صورت موازی اتصال یابند. لازم به ذکر است که سر منفی نمونه‌گیر ولتاژ باید زمین شود. خروجی اندازه‌گیرها به Scope (مسیر Simulink> Sinks) وصل شده‌اند تا شکل موج ولتاژ و جریان قابل رؤیت باشند.

Series RLC Load را از طریق زیر منوی Simscape> Simpowersystems> Elements به مدار اضافه کنید. بر روی RLC Load کلیک کرده و با گرفتن کلیدهای Ctrl+R به صورت همزمان آنرا به صورت عمودی در مدار درآورید. دو سرآنرا به سر منفی نمونه‌گیر جریان و زمین وصل کنید. با دو بار کلیک کردن بر روی RLC پنجره تنظیمات آن به صورت زیر ظاهر خواهد شد. تنظیمات را منطبق بر مقادیر شکل وارد کنید.



RLC Load به عنوان امپدانس بار می‌تواند استفاده شود. توان اکتیو و راکتیو مصرفی در این بلوک قابل تنظیم هستند. در صورتی که هر یک از توان‌ها مقداری مخالف با صفر داشته باشند در بلوک ظاهر خواهند شد. پارمترهای قابل تنظیم به صورت زیر هستند.

ولتاژ نامی (Nominal voltage Vn): ولتاژ نامی بار که به صورت rms در منو باید وارد شود.

فرکانس نامی (Nominal frequency fn): فرکانس نامی

توان اکتیو (Active power P): توان اکتیو بار بر حسب وات

توان راکتیو سلفی (Inductive reactive power QL): توان راکتیو سلفی بر حسب وار باید لحاظ گردد. مقدار آن باید مثبت و یا صفر باشد.

در صورتی که تعریف مقدار اولیه برای جریان سلف مد نظر باشد باید Set the initial inductor current در پنجره تنظیمات انتخاب گردد. مقدار جریان اولیه بر حسب آمپر در منوی Inductor initial current وارد شود.

توان راکتیو خازنی (Capacitive reactive power QC): توان راکتیو خازنی بر حسب وار است. مقدار آن باید مثبت و یا صفر باشد.

در صورتی که تعریف مقدار اولیه برای ولتاژ خازن مد نظر باشد باید Set the initial capacitor voltage در پنجره تنظیمات انتخاب گردد. مقدار ولتاژ اولیه بر حسب ولت در منوی Capacitor initial voltage وارد شود.

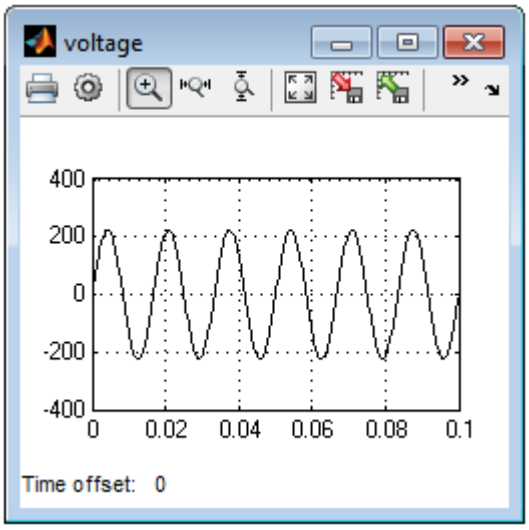
اجرای برنامه: روش حل را از طریق منوی Simulation> Model Configuration Parameters تنظیم کنید. در صفحه‌ای باز شده Solver را ode23tb (stiff/TR-BDF2) به عنوان روش حل مناسب می‌توان انتخاب کرد.

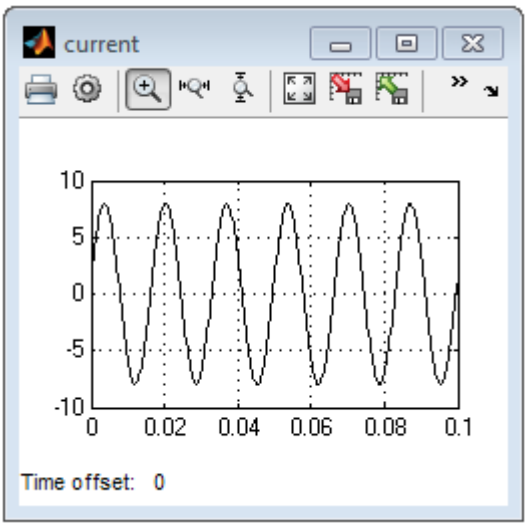
بلوک powergui باید به مدل اضافه گردد. Powergui را می‌توان از مسیر Simscape> SimPowerSystems یافت.

مدت زمان اجرای برنامه 0.1 ثانیه انتخاب شود و بر روی کلیک کنید.

مشاهده خروجی

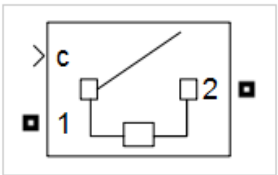
خروجی مدار با توجه به اسیلوسکوپ‌های آن شامل ولتاژ و جریان است. جهت مشاهده شکل موج هر یک بر روی آنها کلیک کنید. ضمناً از طریق منوی parameters>Style می‌توان رنگ Figure، Axes و Line را مشابه مثال قبلی تغیر داد. در شکل‌های زیر خروجی‌ها نشان داده شده‌اند.





تنظیم کلید

کلیدزنی از جمله مواردی است که در مدارها و شبکه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از اینرو در این بخش به تحلیل مداری خواهیم پرداخت که در آن از یک کلید کنترل شده جهت شبیه‌سازی فرآیند قطع و وصل استفاده خواهد شد. بلوک کلید در کتابخانه SimPowerSystems به شکل زیر است و از مسیر ˚ Simscape> SimPowerSystems> Elements می‌توانید آنرا بیابید.

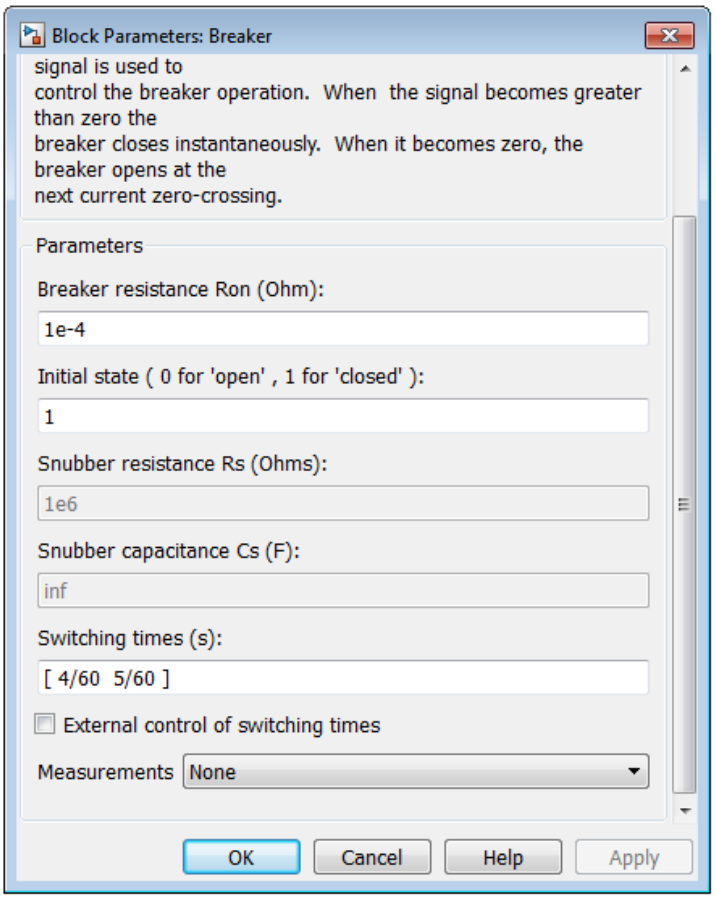


بلوک Breaker کلیدی است که در آن زمان‌های قطع و وصل از طریق کنترل کننده خارجی و یا یک timer داخلی قابل تنظیم هستند. یک امپدانس شامل مقاومت و خازن (R_s-C_s) در مدار کلید در نظر گرفته شده است. در صورتی که کلید با یک مدار اندوکتیو، یک مدار باز و یا یک منبع جریان سری شود باید از آن در ساختار کلید استفاده کرد.

زمانی که کلید بر روی مد کنترل شونده توسط سیگنال خارجی تنظیم گردد یک ورودی با علامت c به بلوک اضافه خواهد شد. سیگنال کنترلی باید حاوی مقادیر 0 و 1 باشد تا باز یا بسته بودن کلید در زمان سیگنال مشخص گردد. با تنظیم کلید بر روی کنترل داخلی، در منوی مربوط به آن باید زمان‌های قطع و وصل تعریف شوند.

زمانی که کلید بسته است معادل یک مقاومت (Ron) در مدار خواهد بود. معمولاً مقدار این مقاومت در حدود میلی اهم در نظر گرفته می‌شود. در حین باز بودن کلید دارای مقاومت نامحدود است.

پنجره تنظیمات کلید در شکل زیر به نمایش درآمده است.



پارامترهای تنظیم شامل موارد زیر می‌باشند.

مقاومت کلید (Breaker resistance Ron): مقاومت بریکر در حین وضعیت وصل است و مقدار آن نباید مساوی صفر انتخاب گردد.

وضعیت اولیه (Initial state): در صورتی که مقدار آن 1 انتخاب شود وضعیت اولیه کلید بسته خواهد بود. به ازاء مقدار 0 وضعیت اولیه کلید باز محسوب می‌گردد.

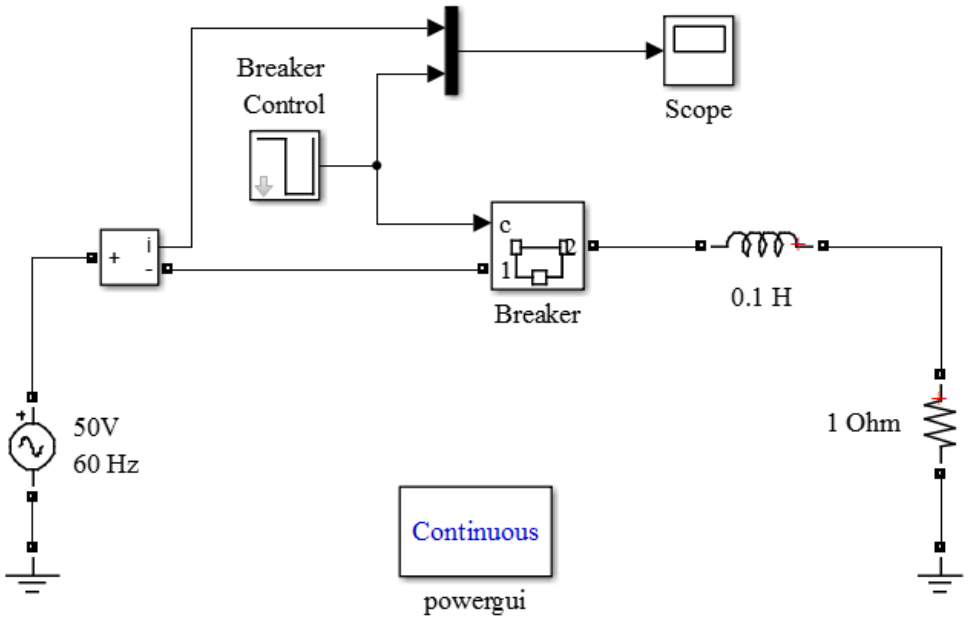
مقاومت مدار کلید (Snubber resistance Rs): در صورتی که بخواهیم مقاومت Rs را از مدار کلید حذف کنیم مقدار آنرا برابر با inf قرار می‌دهیم.

خازن مدار کلید (Snubber capacitance Cs): جهت حذف آن از مدار مقدار آنرا برابر صفر قرار می‌دهیم.

زمانهای کلیدزنی (Switching times): بردار زمان‌های کلیدزنی در صورتی که مد کنترل داخلی فعال باشد قابلیت کنترل کلید را دارد. باز یا بسته شدن کلید در هر زمان از بردار کلیدزنی بستگی به شرایط اولیه کلید دارد. به عنوان مثال اگر وضعیت اولیه کلید 0 (باز) باشد، کلید در اولین زمان کلیدزنی بسته خواهد شد و در دومین زمان کلید باز می‌شود و این روند ادامه خواهد یافت. در صورتی که در پنجره تنظیمات کلید کنترل خارجی (External control) انتخاب گردد منوی کنترل داخلی قابل رؤیت نخواهد بود.

کنترل خارجی زمان‌های کلیدزنی (External control of switching times): اگر منوی کنترل خارجی انتخاب شود یک ورودی با اسم c در بلوک کلید ایجاد می‌گردد. از طریق تنظیم یک سیگنال 0 و 1 متصل به ورودی c زمان‌های قطع و وصل کلید قابل کنترل خواهد بود.

در این بخش مداری شامل کلید را بررسی خواهیم کرد که در آن یک سیگنال خارجی جهت کنترل کلید استفاده می‌شود. مدار مدنظر در شکل زیر به نمایش درآمده است.



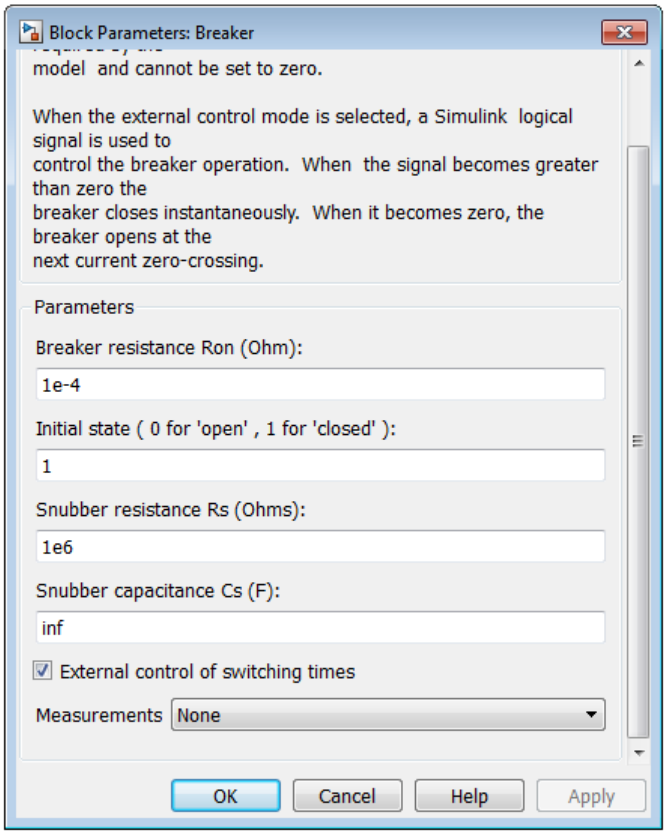
تعدادی از بلوک‌های مدار در مثال‌های قبلی توضیح داده شده‌اند. لذا تنها مسیر آنها و مقادیر نامی آنها ذکر خواهد گردید. بعد از ایجاد New model بلوک‌ها را از مسیرهای عنوان شده به آن اضافه کنید و طبق مدار به هم اتصال دهید.

Ground: مسیر انتخاب آن Simscape> SimPowerSystems> Elements می‌باشد.

AC Voltage Source: از منوی Simscape> SimPowerSystems> Electrical Sources آن را بیابید. مقدار ولتاژ منبع را 50 ولت و فرکانس آن را 60Hzتنظیم کنید.

Current Measurement: این بلوک را از مسیر Simscape> SimPowerSystems> Measurements به مدل اضافه کنید. لازم به ذکر است که این بلوک باید به صورت سری در مدار قرار گیرد.

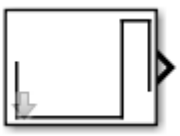
Circuit Breaker: کلید را از مسیر Simscape> SimPowerSystems> Elements به مدار اضافه کرده و تنظیمات را با کلیک کردن بر روی آن به صورت زیر انجام دهید.



از آنجا که کلید دارای کنترل کننده خارجی است در پنجره تنظیمات External control of switching times را فعال کنید.

Series RLC Branch: مدار دارای اندوکتانس 0.1H و مقاومت 1 اهمی است، لذا جهت تکمیل مدار نیاز به دو بلوک Series RLC Branch می‌باشد که از طریق مسیر Simscape> SimPowerSystems> Elements باید به مدار اضافه شود. Branch Type را برای بلوک اندوکتانس L و برای بلوک مقاومت R انتخاب کرده و مقادیر را وارد کنید.

Breaker Control

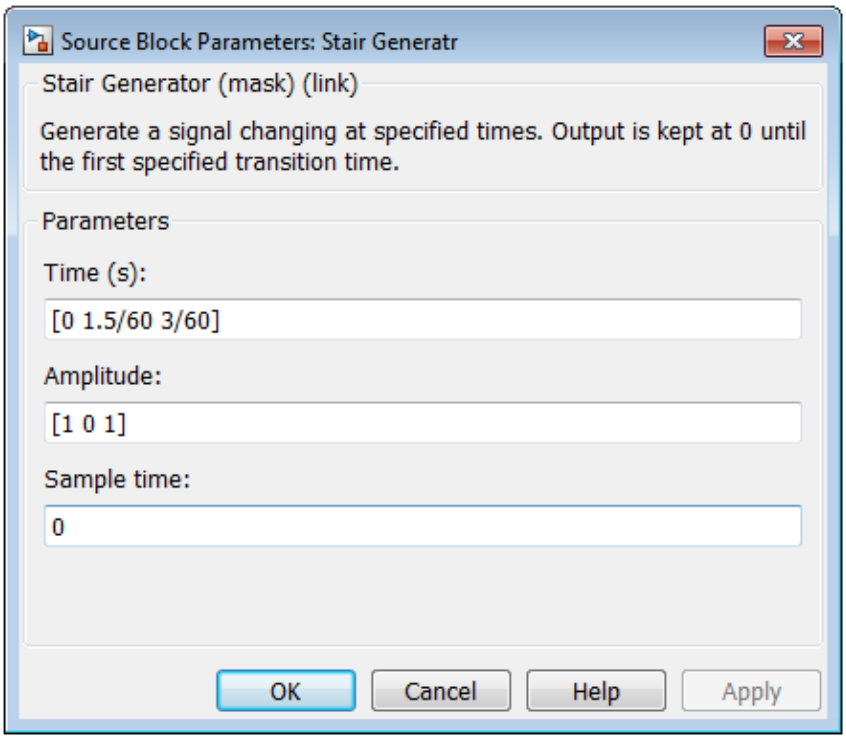


در مدار از یک timer برای تولید پالس‌های مورد نیاز کنترلی می‌توان استفاده کرد و تنظیمات آن را براساس عملکرد مدار انتخاب نمود. در Matlab2012 و قبل از آن برای پیدا کردن این بلوک می‌توانید به آدرس‌های

رجوع Extras/Discrete Control Blocks یاSimPowerSystems> Extras> Control Blocks کنید.

در Matlab2013 این بلوک در آدرس Simscape> SimPoawerSystems> Control and Measurements> Pulse & Signal Generator قرار داده شده و با نام Stair Generator معرفی گردیده است.

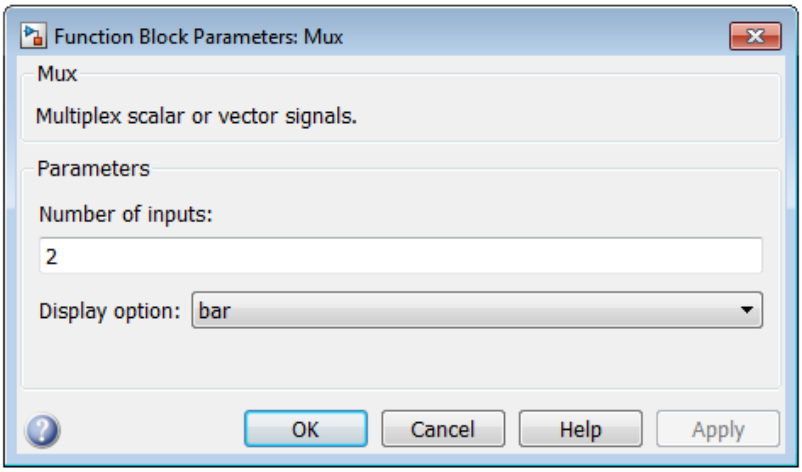
در پنجره تنظیمات Stair Generator، زمان (Times) و دامنه پالس (Amplitude) تولیدی را در هر دوره زمانی می‌توان تنظیم کرد. در مدار مورد نظر در دوره زمانی 0 تا قبل از 1.5/60 ثانیه دامنه پالس 1 و در دوره 1.5/60 تا قبل از 3/60 ثانیه دامنه صفر است. در لحظه 3/60 ثانیه الی زمان انتهایی شبیه‌سازی مقدار دامنه 1 خواهد بود. لذا تنظیمات را باید به صورت نشان داده شده در شکل زیر وارد کرد.



MUX

این بلوک قابلیت ترکیب چند سیگنال ورودی به عنوان یک خروجی را دارد. ورودی‌ها می‌توانند به صورت اسکالر یا برداری باشند، ولی همه آنها باید حاوی اطلاعاتی از یک نوع باشند. به عنوان نمونه دو سیگنال ورودی ولتاژ با دوره زمانی یکسان را می‌توان به آن وصل کرد. خروجی بلوک شامل همه سیگنال‌های ورودی خواهد بود، ولی قابلیت استخراج از یک دهانه را دارند و می‌توان آنها را بر روی یک اسیلوسکوپ به نمایش در آورد.

این بلوک در مسیر Simulink> Commonly Used Blocks قرار دارد و پنجره تنظیمات آن دارای دو گزینه است. در گزینه Number of inputs تعداد سیگنال‌ای ورودی را می‌توان تعیین کرد. پنجره دیگر منوی Display option است که سه گزینه signal، bar و none در آن قابل بارگذاری است. تنظیمات بلوک در مدار حاضر را به صورت زیر انجام دهید.

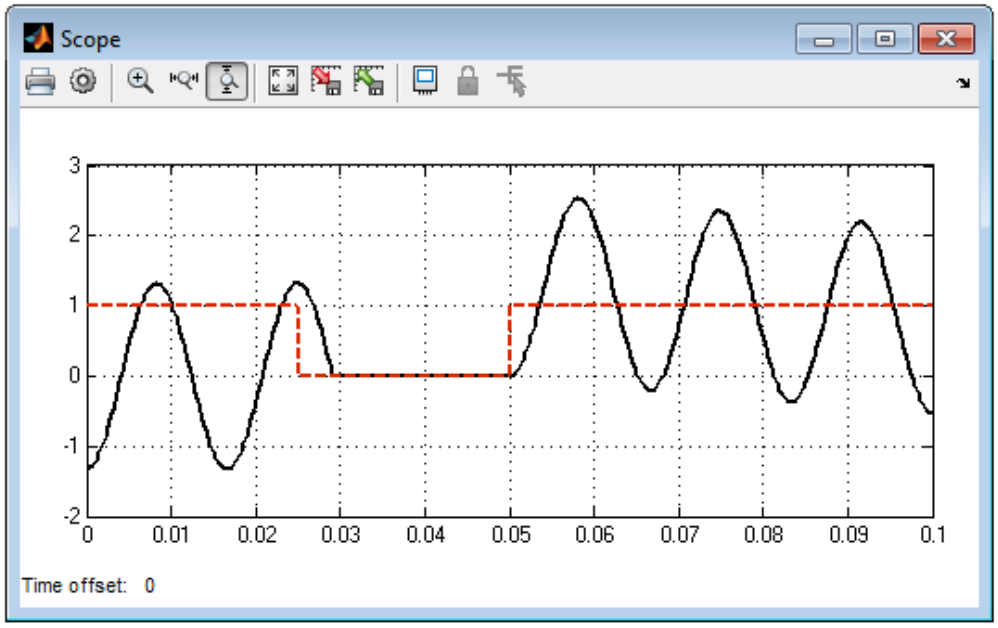


در ادامه خروجی Mux را به Scope اتصال دهید. بعد از بررسی اتصالات و تنضیمات هر بخش، زمان و روش را باید مشخص کرد.

زمان اجرا را مانند مدارهای قبلی 0.1 ثانیه و روش حل را ode23bt در نظر بگیرید.

مشاهده خروجی

همانطور که در مورد بلوک Mux اشاره شد، خروجی به صورت مجتمع و در یک اسیلوسکوپ قابل مشاهده خواهد بود. با توجه به اتصالات مدار، خروجی دو سیگنال جریان و پالس کنترلی کلید را نشان می‌دهد.



منابع کنترل شونده

با استفاده از ابزارهای Simulink می‌توان شکل موج‌های مختلف را برای جریان و ولتاژ منابع ایجاد کرد. در بعضی از مطالعات نحوه واکنش مدار به شکل موج‌های مختلف و بررسی خروجی‌ها مدنظر می‌باشد. بنابراین در این بخش نحوه تشکیل یک نمونه مدار با منبع کنترل‌پذیر و شکل موج ترکیبی توضیح داده می‌شود.

در کتابخانه Simscape> SimPowerSystems> Electrical Sources دو نمونه منبع کنترل شونده با عناوین منبع جریان کنترل شونده (Controlled Current Source) و منبع ولتاژ کنترل شونده (Controlled Voltage Sourc) موجود می‌باشد. که از آنها می‌توان به عنوان ورودی دلخواه مدار استفاده کرد.

منبع جریان کنترل شونده

منبع جریان کنترل شونده سیگنال ورودی را به یک شکل موج جریان تبدیل می‌کند. شکل موج مبتنی بر سیگنال ورودی است. شرایط اولیه جریان تولیدی را با مقادیر AC و DC می‌توان تعیین کرد. زمانی که در

شبیه‌سازی از مقادیر فازی استفاده می‌شود سیگنال ورودی نیز باید به صورت فازی است. SimPowerSystems به صورت خودکار سیگنال زمانی را به فازی تبدیل نخواهد کرد و کاربر باید هماهنگی را در نظر بگیرد.

پنجره تنظیمات

پارامترهای قابل تنظیم در پنجره شامل موارد زیر است که در شکل نیز نشان داه شده است.

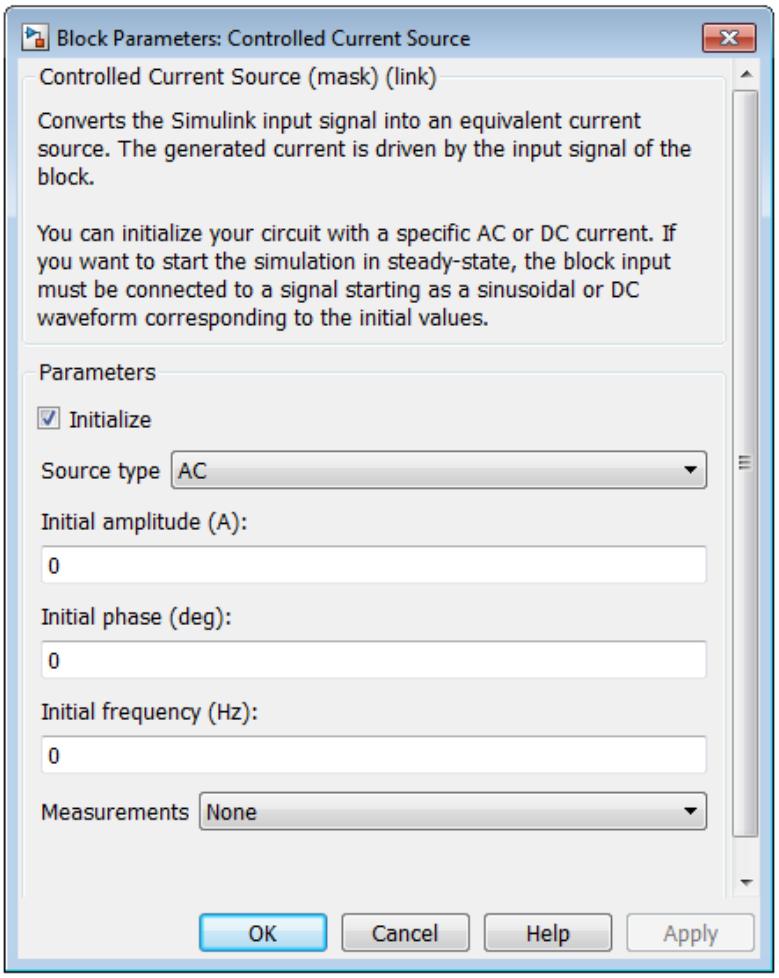
شریایط اولیه (Initialize): در صورتی که این گزینه را انتخاب کنید، در بلوک منبع گزینه‌هایی برای شرایط اولیه جریان، فاز و فرکانس ایجاد خواهد شد.

نوع منبع (Source type): در صورتی که گزینه Initialize فعال نشود، نوع منبع را نیز نمی‌توان مشخص کرد. با انتخاب نوع منبع به صورت AC و یا DC منوهای شرایط اولیه نیز متناسب با آنها تغییر خواهد کرد.

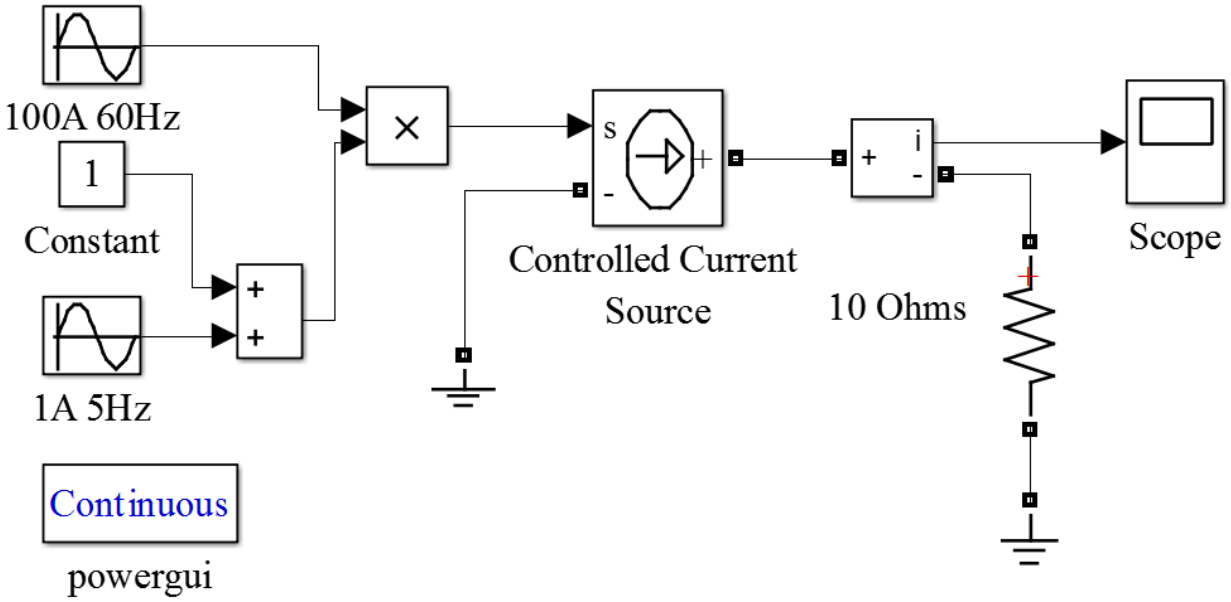
جریان اولیه (Initial current): مقدار اولیه جریان باید بر مبنای آمپر مشخص گردد.

فاز اولیه (Initial phase): فاز اولیه باید به صورت درجه باشد. در صورتی که نوع منبع DC باشد گزینه فاز اولیه غیر فعال خواهد بود.

فرکانس اولیه (Initial frequency): فرکانس اولیه باید به صورت Hz مشخص گردد. در صورتی که نوع منبع DC باشد گزینه فرکانس اولیه غیر فعال خواهد بود.



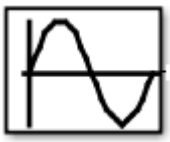
در شکل زیر مداری مشاهده می‌گردد که در آن از منبع جریان قابل کنترل استفاده شده است. جهت آشنایی بیشتر، در این بخش مدار ذکر شده را بررسی خواهیم کرد.



همانطور که در مدار مشاهده می‌شود، از یک مجموعه سیگنال برای تولید ورودی منبع استفاده شده است. ورودی حاصل جمع یک مقدار ثابت و یک سینوسی با دامنه یک و فرکانس 5Hz ضربدر یک سینوسی با دامنه 100 و فرکانس 60Hz است.

جهت ایجاد قسمت‌های ورودی باید آنها را از کتابخانه Simulink به مدار اضافه کرد. لذا مسیر هر یک و نحوه تنظیم آنها در ادامه توضیح داده می‌شود.

Sine Wave



بلوک Sine Wave جهت تولید یک موج سیسنوسی قابل استفاده است. سیگنال تولیدی در پنجره تنظیمات با دامنه، فرکانس (برحسب rad/s) و فاز مشخص می‌گردد. در مدار دو موج سیسنوسی 5Hz و 60Hz باید تولید شود، لذا باید دو بلوک Sine Wave به مدار اضافه کرد (مسیر بلوک Simulink> Sources است). پنجره تنظیمات این نوع بلوک به ترتیب دارای مشخصات زیر می‌باشد.

Sine Type: در این بخش می‌توان نوع سیگنال را معین کرد. این بلوک دارای دو گزینه Time based و Sample based است. به عنوان ورودی یک منبع، در این منو گزینه Time based را انتخاب کنید.

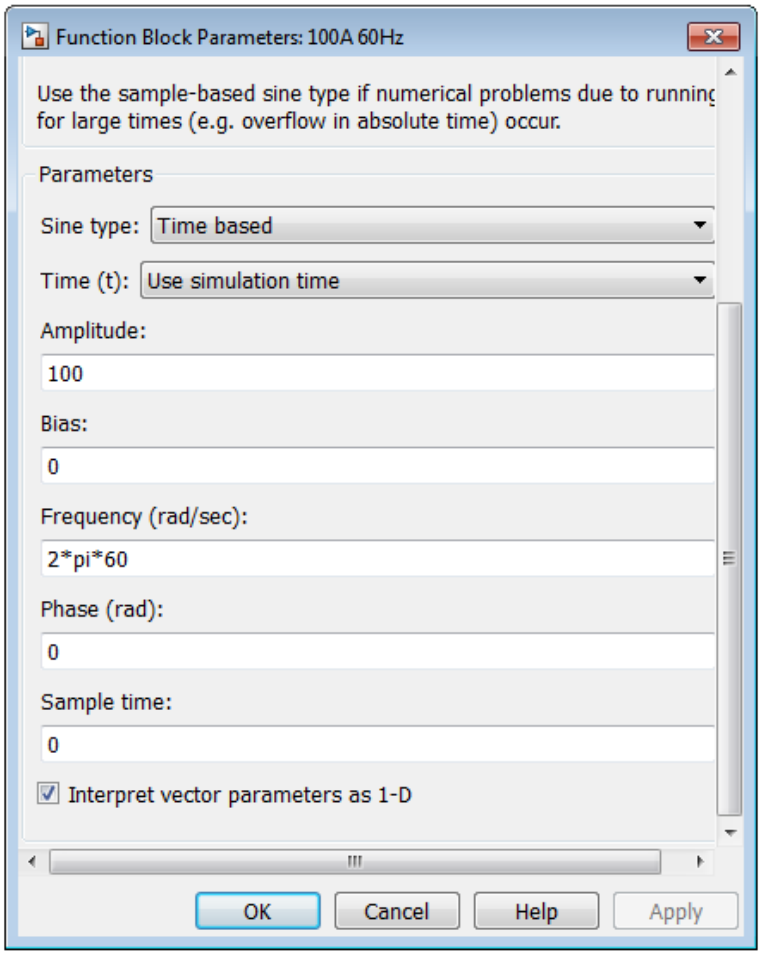
Time: زمان‌بندی سیگنال از طریق زمان خود شبیه‌سازی (Use Simulation time) و یا یک سیگنال بیرونی (Use External Signal) امکان‌پذیر است. لذا در این منو هر دو گزینه را می‌توان فعال کرد. در صورتی که از سیگنال بیرونی استفاده شود، یک ورودی به بلوک اضافه خواهد شد.

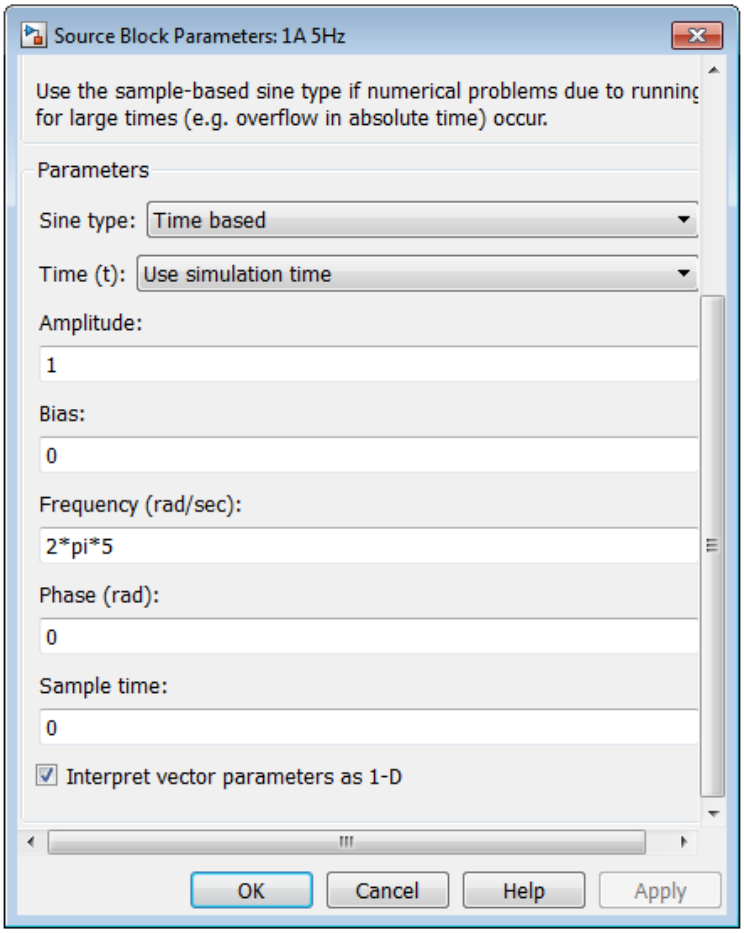
Amplitude: دامنه سیگنال مورد نظر در این بخش تنظیم می‌گردد.

Ferequency: فرکانس سیگنال بر حسب rad/sec باید وارد شود.

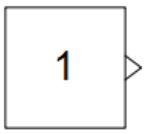
Phase: در صورتی که فاز سیگنال مشخص باشد می‌توان از این بخش استفاده کرد.

با توجه به توضیحات فوق و مقادیر سیگنال‌ها پنجره تنظیمات هر دو سیگنال سینوسی به صورت زیر خواهند بود.

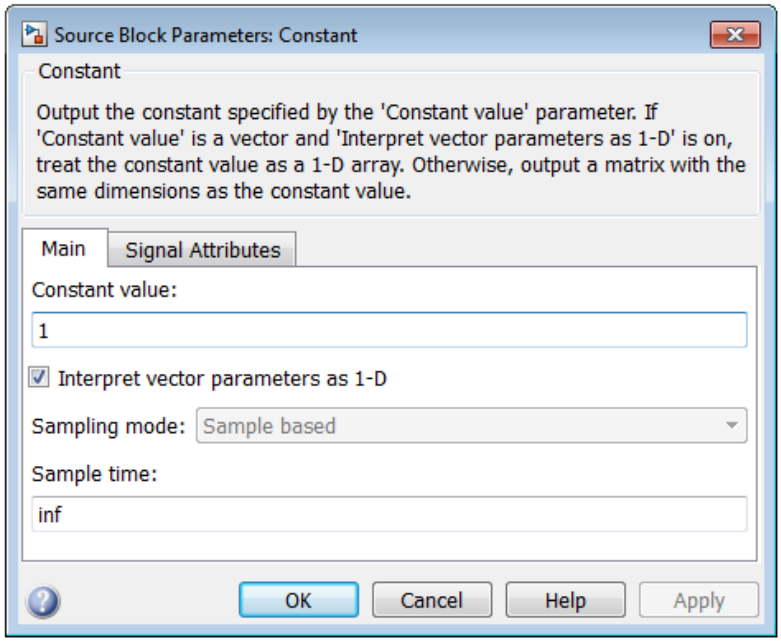




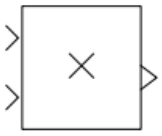
Constant



با استفاده از این بلوک یک سیگنال با دامنه ثابت می‌توان تولید کرد و در آدرس Simulink> sources قرار دارد. دامنه سیگنال را یک گرفته و تنظیمات را مشابه پنجره زیر انجام دهید.

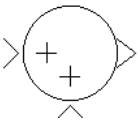


Product

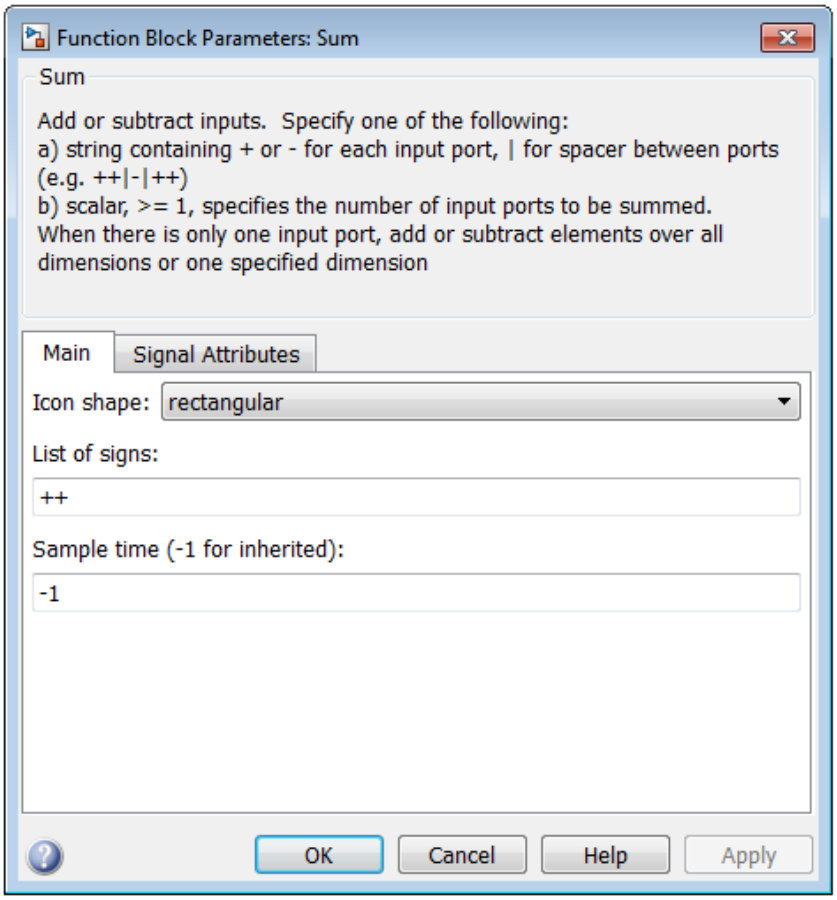


بلوک ضرب کننده را می‌توان از مسیر Simulink> Commonly Used Blocks به مدار اضافه کرد. در پنجره تنظیمات آن می‌توان تعداد ورودی را در بخش Number of inputs تغییر داد. در مدار مورد بررسی دو ورودی باید در هم ضرب شوند لذا عدد 2 را باید در منو آن وارد کرد.

Sum



بلوک جمع کننده در آدرس Simulink> Commonly Used Blocks قرار دارد. شکل ظاهری آن را می-توان با تغییر Icon shape در پنجره تنظیمات عوض کرد و به شکل دایره یا مربع درآورد. در منوی List of signs می‌توان بلوک را به شکل جمع کننده ++ و یا تفاضلی +- تعریف کرد. پنجره تنظیمات در مدار به صورت زیر است.



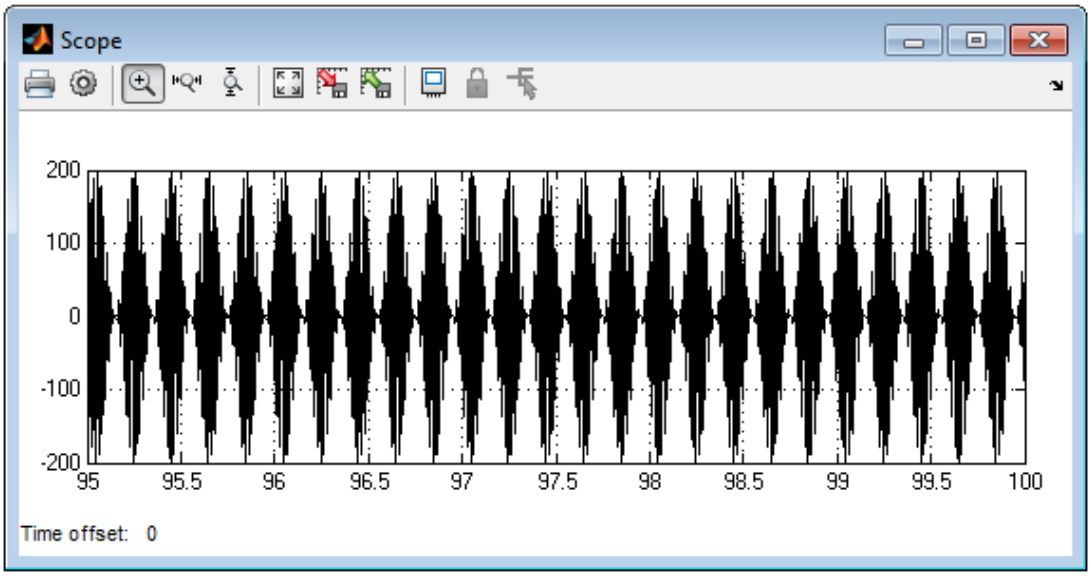
تمامی اجزاء سیگنال ترکیبی، نحوه تنظیمات و مقادیر آنها در بخش‌های قبلی توضیح داده شدند، حال با توجه به شکل مدار آنها را به هم وصل کنید.

بعد از ایجاد سیگنال ورودی، آن را به یک منبع جریان کنترل شونده مشابه مدار وصل کنید و مقادیر آن را مانند پنجره تنظیمات نشان داده شده در بخش منبع جریان در نظر بگیرید (Initialize را انتخاب کرده و Source Type را بر روی AC تنظیم کنید. تمامی مقادیر اولیه صفر هستند).

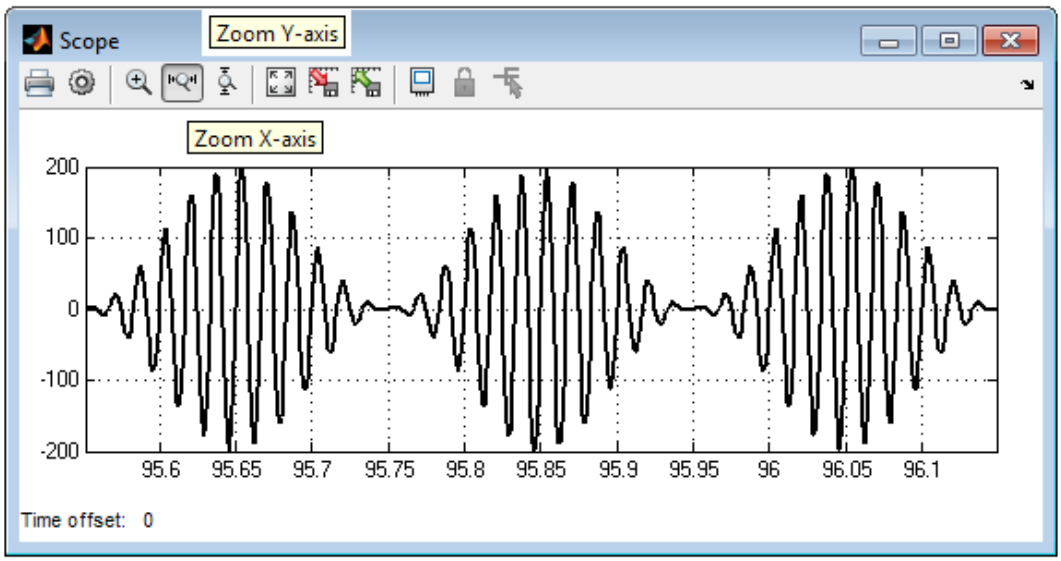
در ادامه یک نمونه‌گیر جریان (Current Measurements)، یک مقاومت 10 اهمی و یک Scope به مدار اضافه کنید. بعد از اتمام تنظیمات و اتصالات، زمان اجرای برنامه را 100 ثانیه انتخاب نمایید. به منوی Simulation> model Configuration parameters بروید و در پنجره آن Solver را Discrete انتخاب کرده و برنامه را اجرا کنید.

مشاهده خروجی

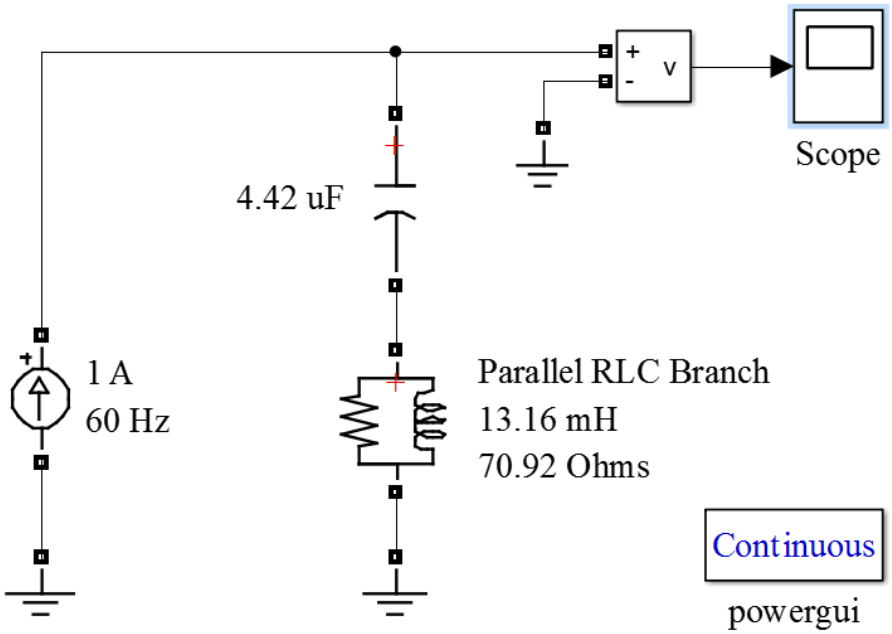
جریان منبع کنترل شونده به عنوان خروجی مدار در نظر گرفته شده است. خروجی اسیلوسکوپ در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد.



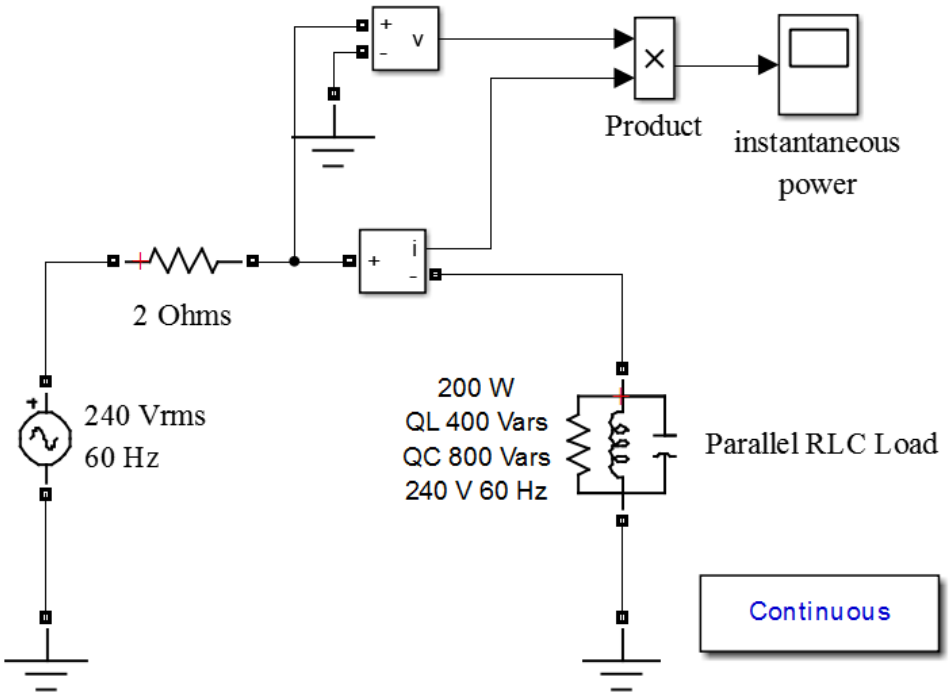
در صورتی که بخواهید خروجی اسیلوسکوپ را در طی چند دوره و با وضوح بیشتر مشاهده نمائید، باید از گزینه‌های Zoom در راستاهای X و Y (Zoom X-axis و Zoom Y-axis) در قسمت بالای اسیلوسکوپ استفاده کنید. با فعال کردن آنها و انتخاب قسمتی از منحنی خروجی بزرگ‌نمایی خواهد شد. در شکل زیر منوها نشان داده شده و خروجی در راستای X بزرگ‌نمایی شده است.



تمرین: مدارهای زیر را با توجه به داده‌های مشخص شده بر روی آنها تحلیل کنید؟



زمان اجرا را 0.1 ثانیه و Solver را ode23tb درنظر بگیرید.

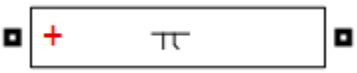


زمان اجرا را 0.1 ثانیه و Solver را ode23tb درنظر بگیرید.

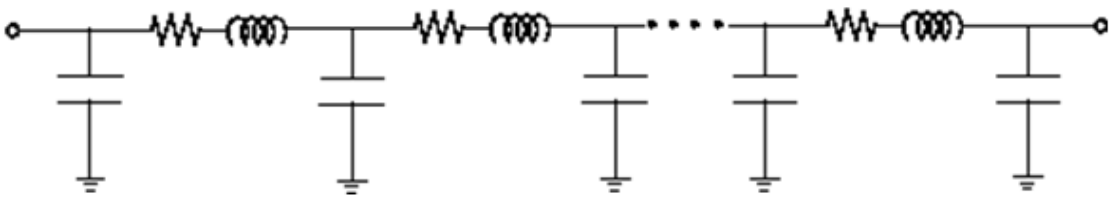
فصل دوم تجهیزات شبکه‌های قدرت

در این فصل مدارهای تک خط و متناسب با تجهیزات متداول قدرت مورد بررسی خواهند گرفت. در کتابخانه SimPowerSystems بلوک‌های بسیاری برای تجهیزات قدرت و مدارهای معادل آنها معرفی شده‌اند که همگی براساس معادلات متداول و به صورت ساخت یافته درآمده‌اند. بعضی از این تجهیزات کاربردهای بیشتری در تحلیل شبکه دارند، لذا مدارهای متناسب با آنها بررسی خواهند شد.

مدل خط π (PI Section Line):



مدل خط π اولین مدلی است که معمولاً برای خطوط معرفی می‌گردد و بیشتر در خطوط متوسط استفاده دارد. در این مدل خط به صورت تکفاز و مقادیر امپدانس و ادمیتانس آن به صورت مجتمع در نظر گرفته می‌شوند. در خطوط مقادیر مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس به صورت گسترده در خط باید لحاظ گردند و مدل π یک مدل تقریبی است. با ایجاد چند مدل π پشت سر هم می‌توان تا حدودی دقت را بالا برد مانند آنچه در شکل زیر به نمایش درآمده است.



در خطوط گسترده تنها از یک بخش استفاده می‌شود، ولی در مدل π می‌توان از چند مدل پشت سرهم استفاده کرد، که تعیین تعداد آن بستگی به محدوده فرکانسی عملکرد مدار دارد. جهت بهبود نتایج و افزایش دقت مدل π در نرم‌افزار، از محاسباتی که متشکل از توابع هیپربولیکی است به عنوان یک اصلاح کننده استفاده می‌شود.

پنجره تنظیمات و پارامترها

پارامترهای پنجره تنظیمات در مدل متناسب با خصوصیات خط است که به ترتیب زیر می‌باشند.

فرکانس مورد استفاده جهت محاسبه مقادیر مرتبط با RLC (Frequency used for rlc specifications): فرکانس عملکرد مدار در حین شبیه‌سازی به عنوان مبنا باید در این بخش وارد شود و محاسبات RLC با همین فرکانس انجام می‌گردد. اصلاحیه هیپربولیکی نیز براساس همین فرکانس خواهد بود.

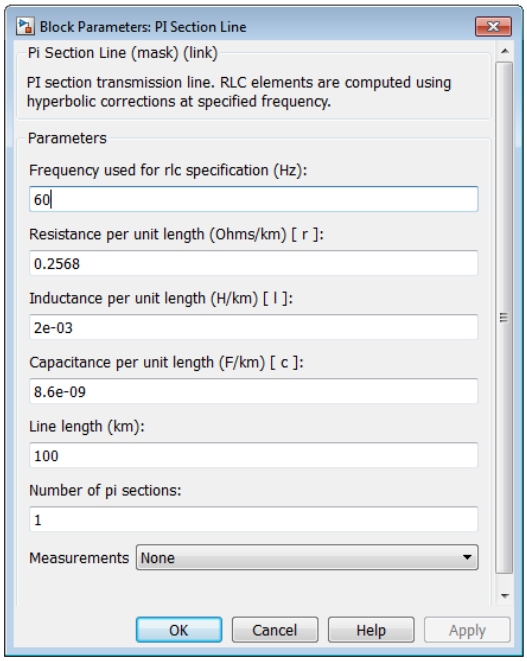
مقاومت در واحد طول (Resistance per unit length): مقاومت خط در واحد طول (Ω/km) به عنوان ورودی این بخش در نظر گرفته شده است.

اندوکتانس در واحد طول (Inductance per unit length): اندوکتانس خط در واحد طول (H/km) ورودی این بخش است. مقدار اندوکتانس جهت محاسبه سرعت انتشار موج مورد نیاز است و مقدار آن باید مخالف صفر باشد.

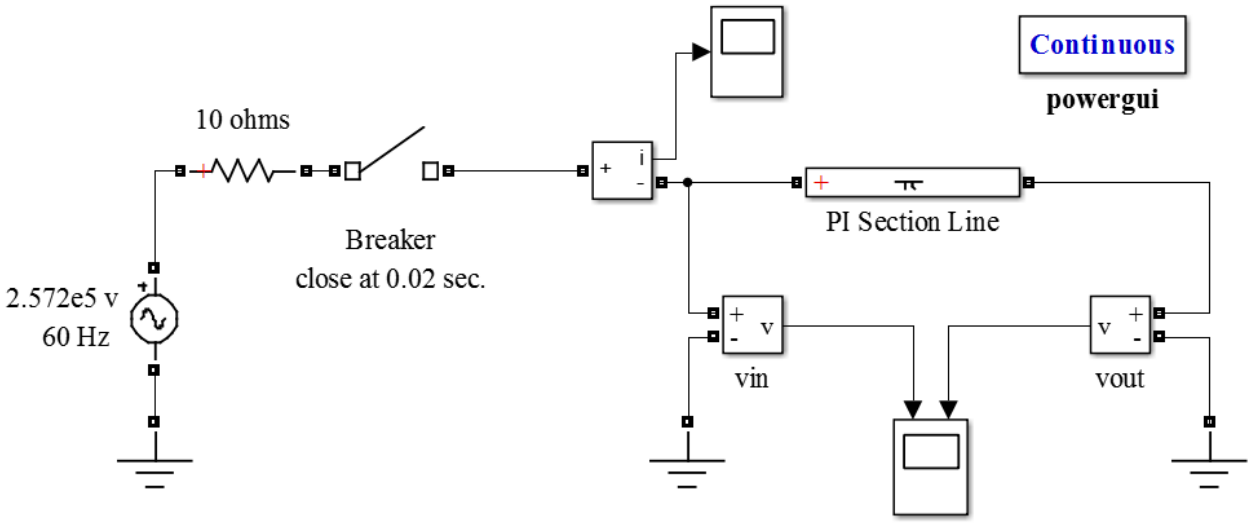
کاپاسیتانس در واحد طول (Capacitance per unit length): کاپاسیتانس نیز در واحد طول و بر مبنای F/km باید لحاظ گردد. مقدار کاپاسیتانس جهت محاسبه سرعت انتشار موج مورد نیاز است و مقدار آن باید مخالف صفر باشد.

طول خط (Length): در این منو طول خط بر حسب km تعریف شده است.

تعداد πهای پشت سرهم (Number of pi sections): کمترین مقدار آن 1 است.



در این بخش به تحلیل مداری خواهیم پرداخت که در آن از بلوک مدل خط π استفاده شده است. مدار مورد بررسی در شکل زیر قابل مشاهده است.



در ابتدا New model را ساخته و powergui را به آن اضافه کنید.

منبع ولتاژ: مقدار ولتاژ سه فاز مدل 315kV است که در مدل باید به صورت تک فاز و rms درآید. در Matlab از sqrt (x) به جای ریشه xام استفاده می‌شود. لذا مقدار دامنه ولتاژ باید به صورت sqrt(2)*315kV/sqrt(3) وارد شود (فرکانس منبع 60Hz است).

مقاومت: از یک series RLC branch برای مقاومت 10 اهمی استفاده شود و منوی Branch type را بر روی R تنظیم کنید.

کلید: گزینه External control of switching time را غیر فعال کرده و تنظیمات کلید را طبق جدول زیر انجام دهید.

Switching tims	Cs	Rs	Initial State	Ron
0.02	0	inf	0	0.1

اندازه‌گیر جریان و Scope: اندازه‌گیر جریان را با کلید سری کنید و خروجی آن به اسیلوسکوپ متصل گردد.

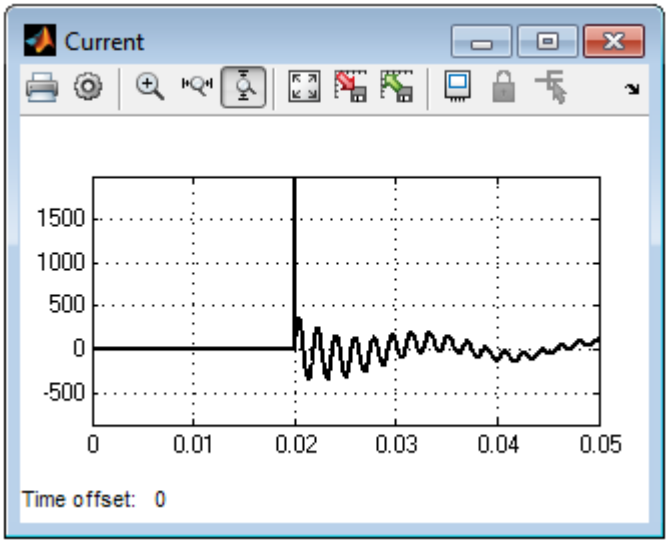
مدل خط π: مدل خط یا Pi Section Line را در مسیر Simscape> SymPowerSystems> Elements می‌توان یافت. تنظیمات آن نیز براساس مقادیر پنجره نشان داده شده در بخش توضیحات مد خط π خواهد بود.

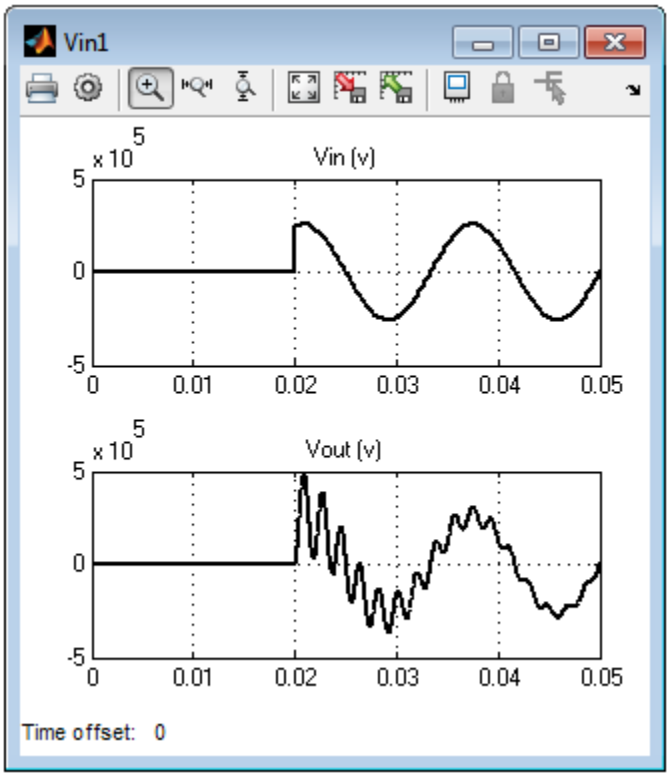
اندازه‌گیر ولتاژ: از دو اندازه‌گیر ولتاژ برای نمونه‌گیری از ولتاژ ابتدا و انتهای خط استفاده شده است. از آنجا که خط بی‌بار است انتظار می‌رود طبق اثر فرانتی (ناشی از کاپاسیتانس خط) ولتاژ انتها بیشتر از ابتدای خط باشد. در نهایت خروجی اندازه‌گیرهای ولتاژ به یک اسیلوسکوپ جهت مقایسه متصل شده‌اند. جهت افزایش تعداد ورودی‌های Scope بر روی آن کلیک کنید و گزینه (parameters) را بزنید. در پنجره باز شده و در قسمت Number of axes عدد 2 را وارد کنید.

زمان اجرای برنامه 0.05 ثانیه و روش حل آن (Solver) ode23tb است.

مشاهده خروجی

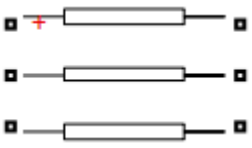
خروجی‌های مدار شامل جریان کلید، ولتاژ ابتدا (Vin) و ولتاژ انتها (Vout) است که در شکل‌های زیر به نمایش درآمده‌اند.





همانطور که مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ انتهای خط تقریباً دو برابر ولتاژ ابتدا است و این موضوع نشان‌دهنده اثر فرانتی می‌باشد.

مدل خط گسترده



بلوک مدل خط گسترده متشکل از یک مدل گسترده N فازی است که در آن تلفات به صورت مجتمع می‌باشد. مدل بر مبنای تئوری انتقال امواج گذرای الکترومغناطیسی استوار بوده که به تئوری Bergeron موسوم است. در قسمت گسترده، مدل بدون تلفات درنظر گرفته می‌شود و براساس دو پارامتر امپدانس موجی و سرعت انتشار محاسبات صورت می‌گیرد. جهت مدل‌سازی تلفات، دو مقاومت R/4 در ابتدا و انتهای خط و یک مقاومت R/2 در میانه خط قرار داده شده است.

برای خطوط چند فازه، روش انتقال مدال جهت تبدیل مقادیر فاز به مقادیر مدال و مستقل کردن پارامترها از هم استفاده می‌شود. در پایان محاسبات، مقادیر خروجی از مدال به فاز تبدیل می‌گردد.

در مقایسه مدل خط گستره و مدل π، مدل گستره شامل محاسبات انتقال، انتشار و انعکاس امواج بوده و مقادیر خروجی از دقت بالاتری برخوردار است.

پنجره تنظیمات و پارامترها

تعداد فازها (Number of phases N): تعداد فازهای خط و ابعاد فضای مدال را در این بخش می‌توان مشخص کرد. بعد از بستن پنجره تنظیمات تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های بلوک براساس عدد وارد شده تغییر خواهند کرد.

فرکانس قابل استفاده در RLC (Frequency used for rlc specifications): فرکانسی که قابل استفاده جهت محاسبات مقاومت، اندوکتانس، کاپاسیتانس و ماتریس مدال است در این منو تعیین می‌گردد.

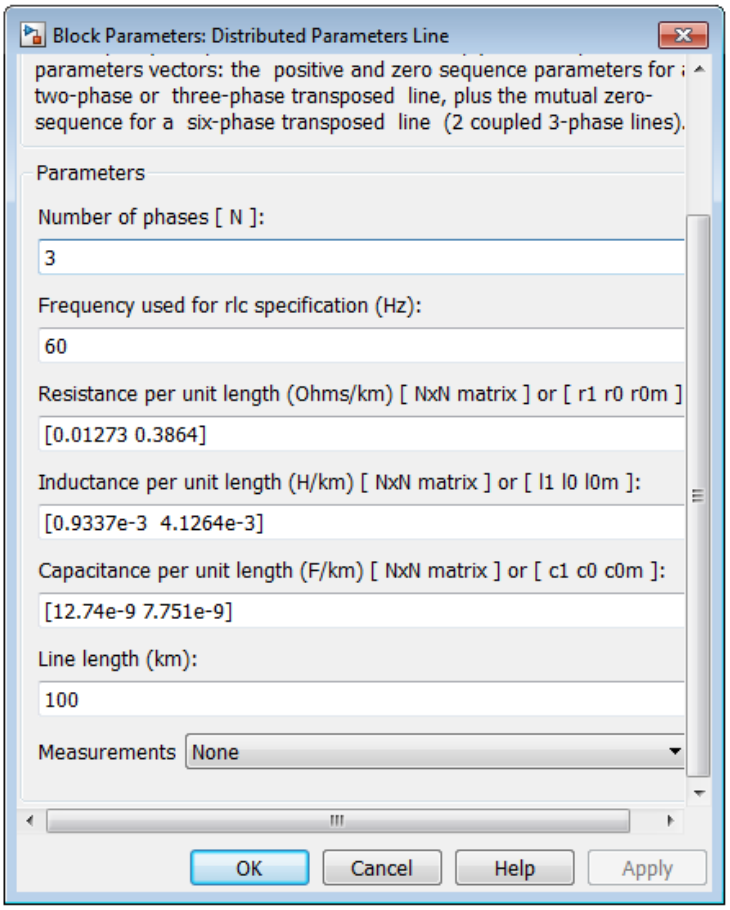
مقاومت در واحد طول (Resistance per unit length): ورودی این بخش مقاومت در واحد طول (Ω/km) است. برای خطوط متقارن چند فازه یک ماتریس N در N برای مقاومت می‌توان لحاظ کرد. در حالت دو فاز یا سه فاز توالی مثبت و توالی صفر برای مقاومت [r1 r0] باید درنظر گرفت.

اندوکتانس در واحد طول (Inductance per unit length): ورودی این بخش اندوکتانس در واحد طول (H/km) است. برای خطوط متقارن چند فازه یک ماتریس N در N برای اندوکتانس می‌توان لحاظ کرد. در حالت دو فاز یا سه فاز توالی مثبت و توالی صفر [l1 l0] برای اندوکتانس باید درنظر گرفت.

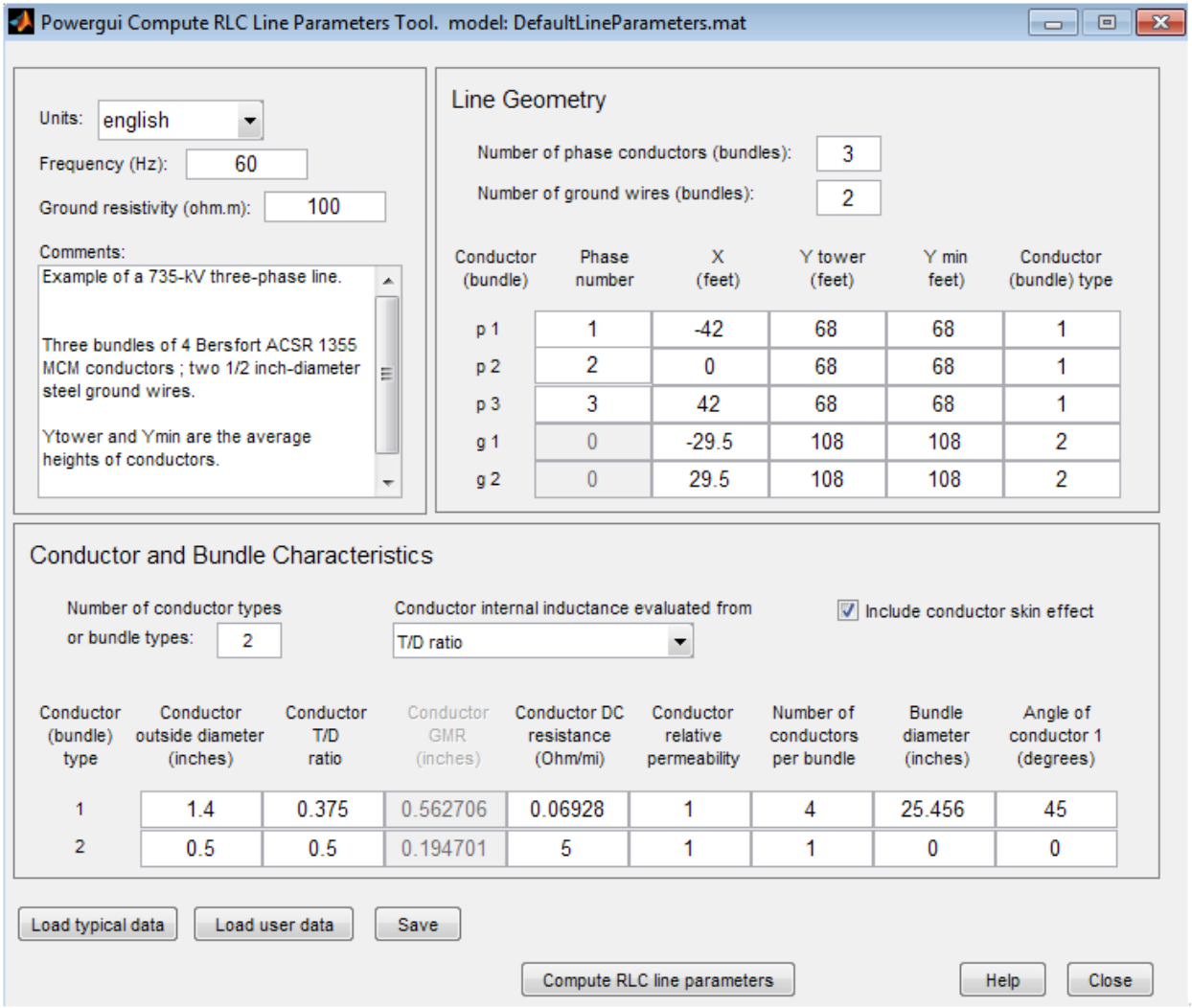
کاپاسیتانس در واحد طول (Capacitance per unit length): ورودی این بخش کاپاسیتانس در واحد طول (F/km) است. مشابه مقاومت و اندوکتانس در حالت چند فازه، ماتریس و یا توالی‌ها را به عنوان ورودی باید درنظر گرفت.

طول خط (Line length): در این قسمت طول خط بر حسب km تعریف شده است.

در شکل زیر نجره تنظیمات به ازاء یک خط سه فاز نشان داده شده است.

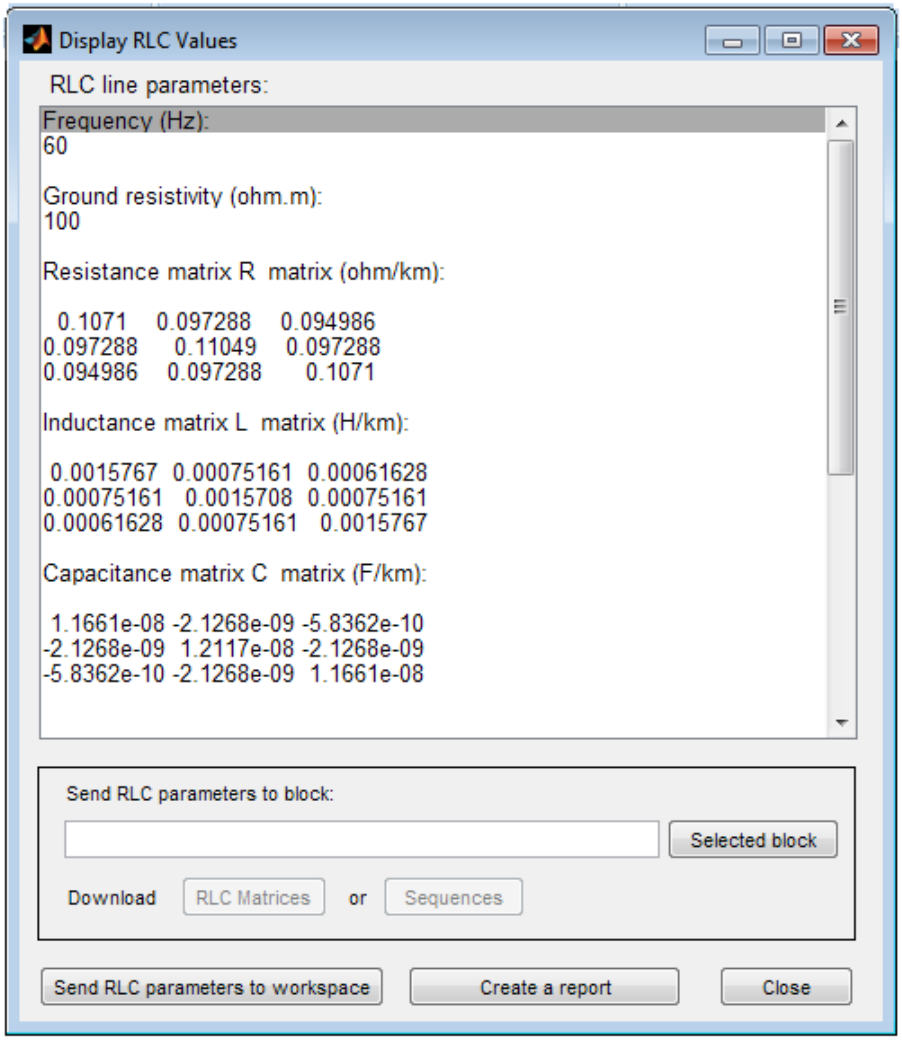


علاوه بر قابلیت تعریف خصوصیات خط در پنجره تنضیمات، بلوک Powergui دارای یک ابزار گرافیکی است که توانایی محاسبه مقاومت، اندوکتاس و کاپاسیتانس خط در واحد طول با توجه به خصوصیات هادی و ابعاد هندسی را دارد. جهت مشاهده این بخش روی Powergui کلیک کنید و منوی Compute RLC Line Parameters را انتخاب نمائید. صفحه‌ای متشکل از چند قسمت جهت وارد کردن خصوصیات الکتریکی، مشخصات هندسی خط و ساختار هادی‌ها ظاهر خواهد شد که در شکل زیر قابل مشاهده است.



در پنجره باز شده، زیر بخش‌هایی جهت تعریف مقادیر وجود دارد. در قسمت بالا سمت چپ فرکانس و مقاومت زمین (Ground resistivity) قابل تعریف هستند. در سمت راست و قسمت بالای پنجره خصوصیات هندسی خط (Line Geometry) مانند ارتفاع دکل، فاصله باندل‌ها، فاصله فازها و ... را می‌توان با استفاده از اطلاعات شبکه وارد نمود. در منوی پایین پنجره بخش‌های لازم جهت تعریف خصوصیات هادی و باندل‌ها (Conductor and Bundle Characteristics) با جزئیات کامل درنظر گرفته شده است.

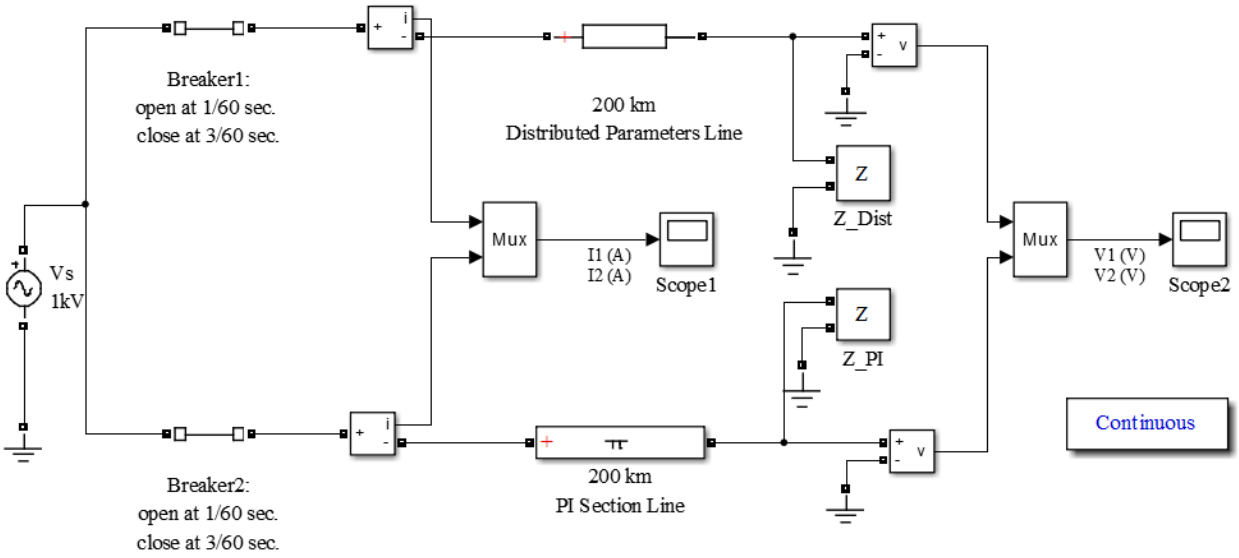
بعد از وارد کردن خصوصیات، با انتخاب منوی Compute RLC line parameters امپدانس خط شامل مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس در واحد طول به صورت ماتریسی و مدل توالی محاسبه خواهد شد و در صفحه‌ای به شکل زیر به نمایش در می‌آید.



اگر بر روی بلوک مدل خط گسترده در مدار شبیه‌سازی یک بارکلیک کنید و بعد در پنجره فوق زیر منوی Selected block را انتخاب نمائید، مقادیر محاسبه شده قابل بارگذاری در مدل خط خواهند بود. جهت بارگذاری باید در بخش Download بر روی یکی از گزینه‌های آن کلیک کنید. در صورتی که RLC Matrices انتخاب شود مقادیر امپدانس به صورت ماتریسی بارگذاری می‌گردد. اگر Sequences گزینه انتخابی باشد، بارگذاری به شکل امپدانس توالی خواهد بود. در این صورت نیازی به وارد کردن خصوصیات امپدانسی خط در پنجره تنظیمات آن نمی‌باشد.

مقایسه مدل گسترده و π

در راستای مقایسه مدل گسترده و مدل π مداری با مشخصات نشان داده شده در شکل زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.



در مدار دو مدل کاملاً یکسان به صورت موازی با هم قرار گرفته‌اند و تنها تفاوت در مدل خط آنها است. تشکیل مدار و تنظیم قسمت‌های مختلف به ترتیب زیر می‌باشد.

منبع ولتاژ: دامنه ولتاژ 1kV، فرکانس 60Hz و فاز آن صفر است.

کلیدها: Breaker1 و Breaker2 کاملاً مشابه هم هستند و مقادیر قابل تنظیم آنها در جدول زیر آمده است. در پنجره تنظیمات External control of switching times را غیر فعال کنید.

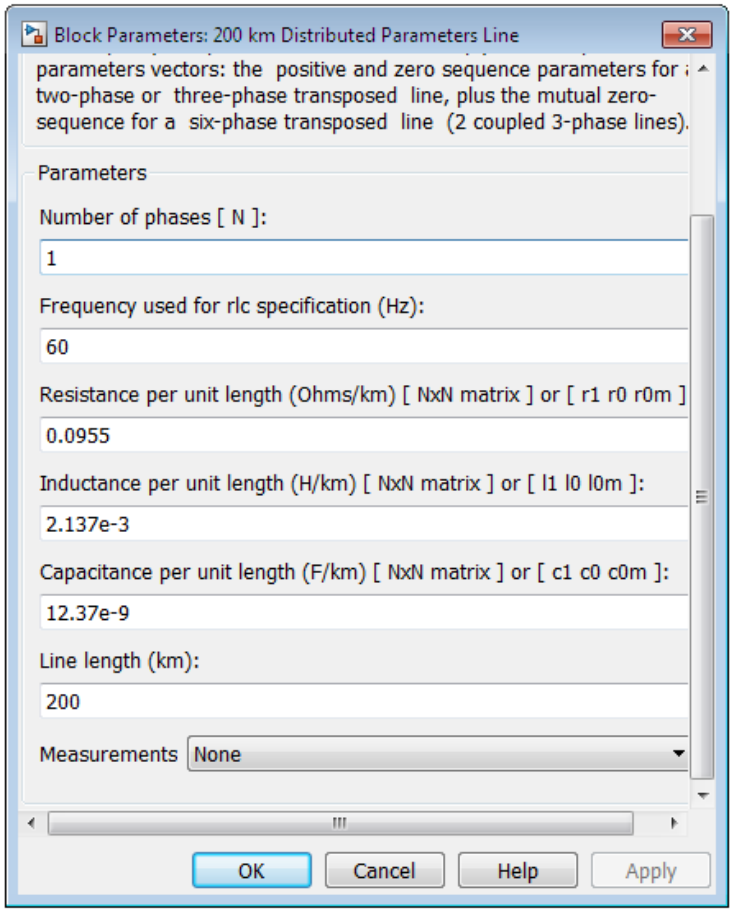
Switching tims	Cs	Rs	Initial State	Ron
[1/60 3/60]	0	inf	1	0.1

دو زمان برای عملکرد کلیدها در نظر گرفته شده است. 1/60 ثانیه زمان باز شدن و 3/60 ثانیه زمان بسته شدن کلید می‌باشد.

اندازه‌گیر جریان: از اندازه‌گیر جریان برای نمونه‌گیری از جریان خطوط استفاده شده است.

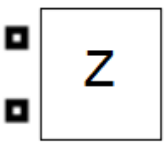
MUX: یک MUX در مدار قرار داده شده تا بتوان جریان‌ها را با هم مقایسه کرد. خروجی آن باید به یک Scope اتصال یابد. در پنجره تنظیمات Number of inputs را 2 و Display option را none در نظر بگیرید.

Distributed Parameters Line: مدل خط گسترده باید تک فاز (N=1) تعریف شود. مقادیر امپدانسی خط نیز مطابق پنجره تنظیمات زیر است.

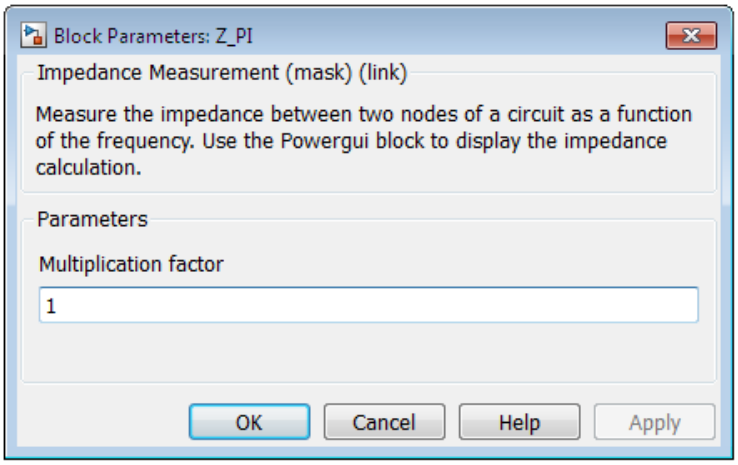


PI Section Line: مدل خط π دارای مشخصاتی مشابه خط گسترده است. مقادیر مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس را دقیقاً مانند مقادیر موجود در پنجره تنظیمات مدل خط گسترده در نظر بگیرید. تعداد مدل π (Number of PI Section) را 2 وارد کنید.

اندازه‌گیر امپدانس (Impedance Measurement)



بوسیله این بلوک، امپدانس از دید دو نقطه‌ای که به آنها وصل شده اندازه‌گیری می‌شود و در مسیر Simscape> SimPowerSystems> Measurement قرار دارد. پنجره تنظیمات این بلوک در زیر قابل مشاهده است.



شکل موج امپدانس اندازه‌گیری شده به صورت تابعی از فرکانس و از طریق Powergui قابل ترسیم می‌باشد که در بخش شرح خروجی مدار در مورد آن توضیحات لازم داده خواهد شد.

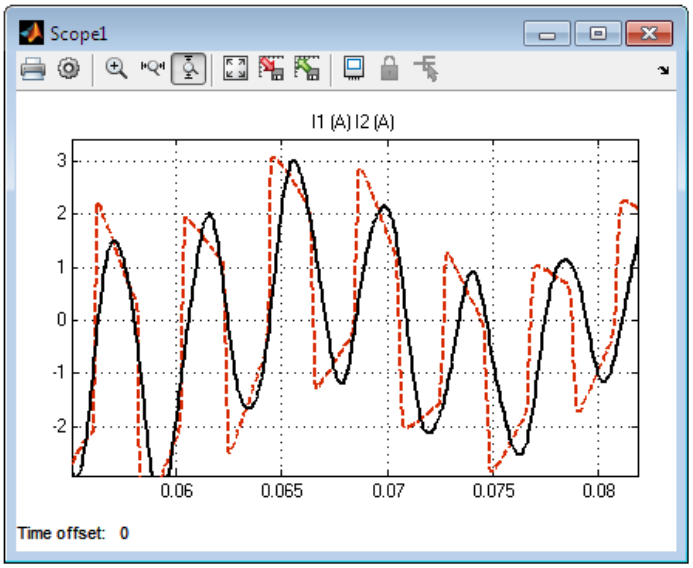
جهت تکمیل مدار، برای هر خط یک بلوک اندازه‌گیر امپدانس به مدل اضافه کنید و به صورت موازی با نقطه انتهایی خطوط قرار دهید.

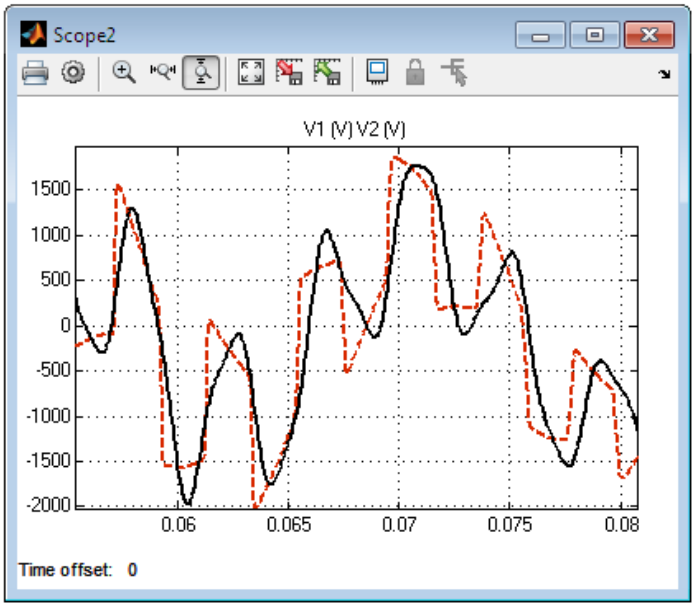
اندازه‌گیر ولتاژ: اندازه‌گیری ولتاژ انتهای خطوط در راستای مقایسه نتایج مدنظر می‌باشد. لذا در نقطه انتهایی هر خط یک اندازه‌گیر باید قرار گیرد و بعد از اتصال آنها به یک MUX، خروجی را به Scope وصل کنید.

بعد از اتصال قسمت‌های مختلف و تنظیمات شرح داده شده، زمان اجرای برنامه را 0.1 ثانیه در نظر گرفته و Solver را روی ode23tb تنظیم کنید.

مشاهده خروجی

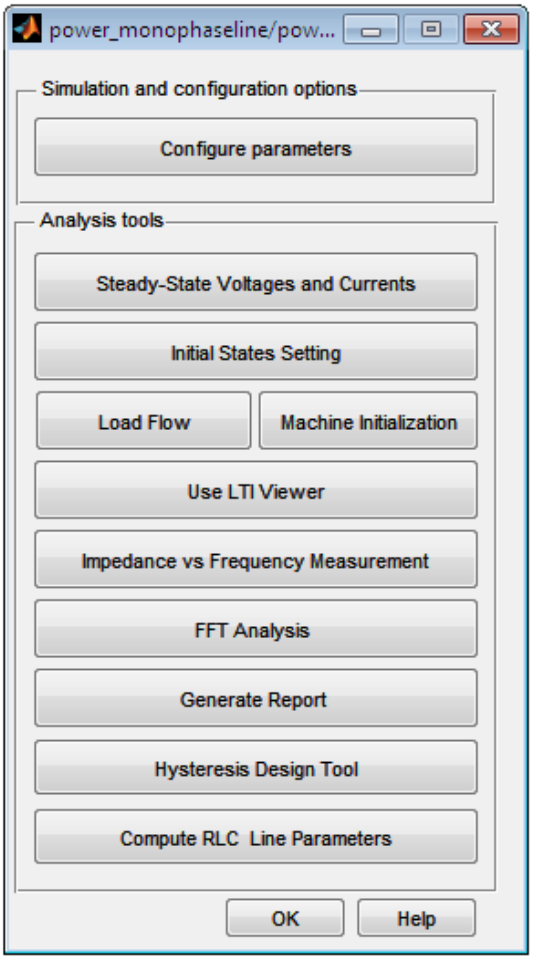
خروجی مدار شامل جریان ابتدای خط و ولتاژ انتهای خط می‌باشد. در شکل‌های زیر قسمت‌هایی از خروجی‌ها جهت امکان مقایسه بهتر به صورت بزگ‌نمایی شده به نمایش درآمده‌اند.



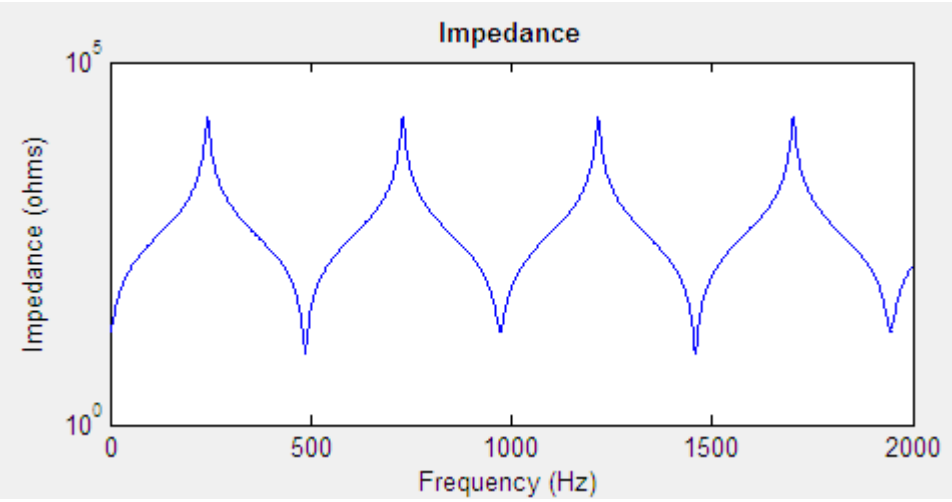


شکل موج‌هایی که پیوستگی بیشتری دارند و به صورت سینوسی هستند، خروجی‌های مدل خط گسترده می-باشند. در هر دو خروجی به نظر می‌رسد که دقت مدل گسترده بالاتر بوده و از کیفیت بهتری برخوردار است.

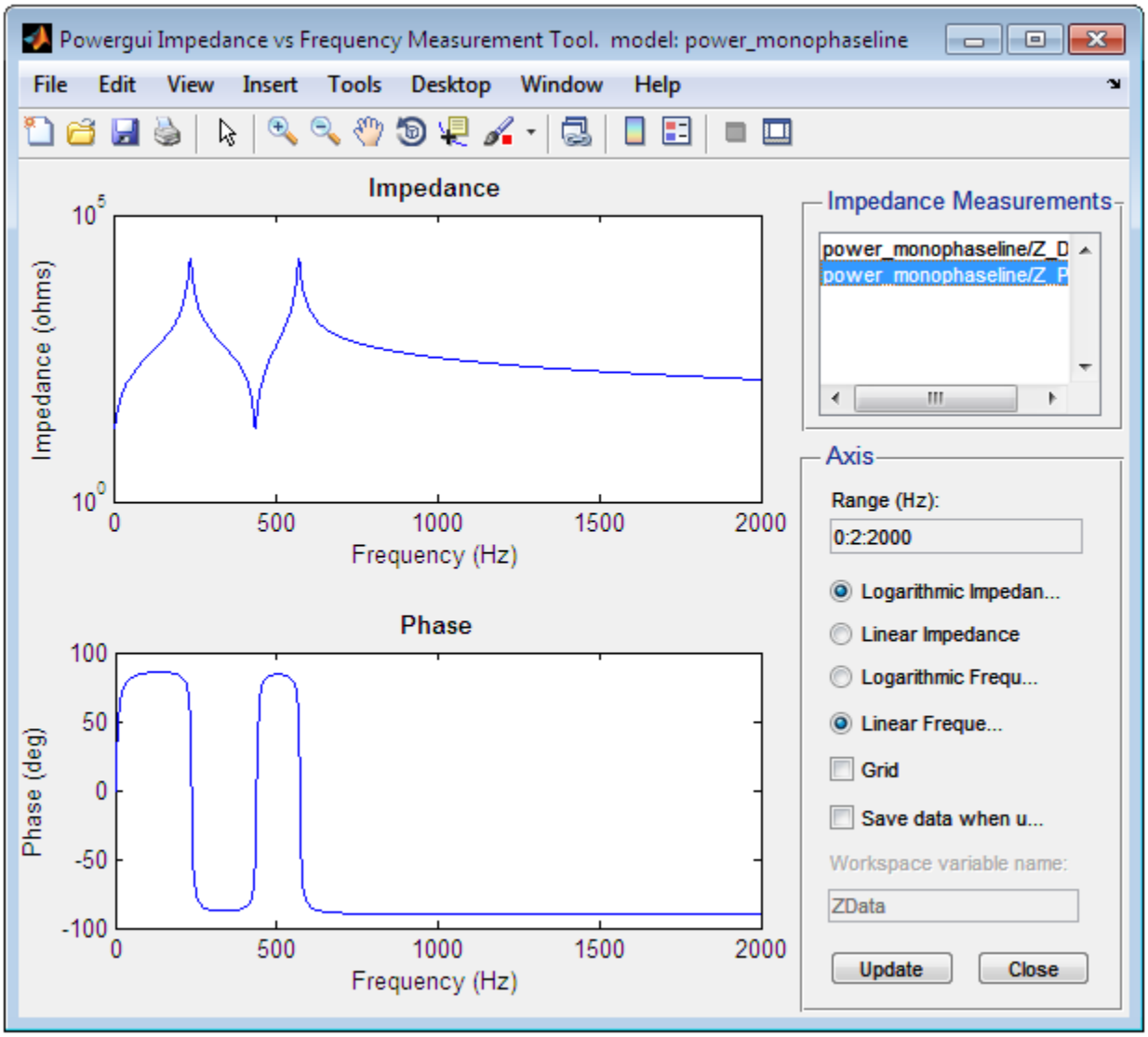
با استفاده از بلوک Powergui می‌توان نتایج اندازه‌گیرهای امپدانس را در فرکانس‌های مختلف مشاهده کرد. بر روی Powergui کلیک کنید تا صفحه مرتبط با آن به صورت زیر نمایان گردد.



بعد از انتخاب منوی Impedance vs Frequency Measurements (در پنجره Powergui) شکل موج امپدانس متغیر با فرکانس ظاهر خواهد شد. در شکل زیر امپدانس مدل خط گسترده به نمایش درآمده است.



خروجی اندازه‌گیر امپدانس شامل شکل موج تغییرات فاز برحسب فرکانس نیز می‌باشد. در صورتی که چند اندازه‌گیر در مدل وجود داشته باشد امکان انتخاب هر یک و مشاهده شکل موج مربوط به آن در منو Impedance Measurements (بالای صفحه سمت راست) وجود دارد. در شکل زیر امپدانس خط مدل π انتخاب شده است و نتایج مرتبط با آن قابل مشاهده می‌باشد.



در صفحه منحنی امپدانس شکل موج از طریق منوهای بالای صفحه قابل ویرایش است. بدین منظور بر روی منوی Show Plot Tools and Dock Figure کلیک کنید تا امکانات ویرایشی لازم در دسترس قرار گیرند.