

به نام خدا

بخش اول

شبیه‌سازی یک مدار ساده

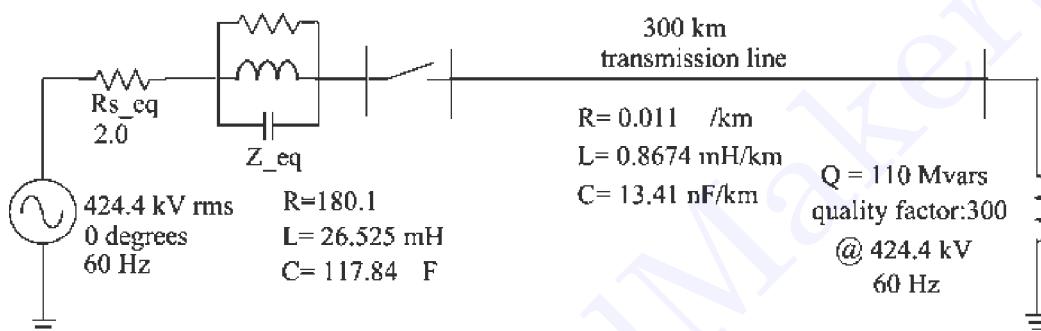
قطعات سیستم قدرت به شما اجازه ساخت و شبیه‌سازی مدارات الکتریکی که شامل المان‌های خطی و غیرخطی هستند را می‌دهد. از بخش ۱ تا بخش ۳ مدار زیر ساخته و شبیه‌سازی می‌شود.

در این بخش با :

- کتابخانه قطعات سیستم قدرت، **powerlib** را بررسی خواهید کرد.
- یاد خواهید گرفت که چگونه یک مدار ساده از کتابخانه **powerlib** بسازید.
- قطعات **Simulink** را به مدارتان وصل می‌نمایید.

مثال :

مدار زیر یک سیستم قدرت هم توان را که یک خط انتقال ۳۰۰ کیلومتری را تغذیه می‌کند نشان می‌دهد. خط در طرف تغذیه با القاگر شنت جبران شده است. یک Breaker اجازه باردار و بی‌بار کردن خط را می‌دهد. برای ساده کردن بحث فقط یکی از سه فاز نمایش داده است. پارامترهای نشان داده شده در شکل مقادیر مربوط به سیستم قدرت **powerlib** می‌باشند.



شکل ۱-۱: مداری که با قطعات سیستم قدرت باید مدل شود.

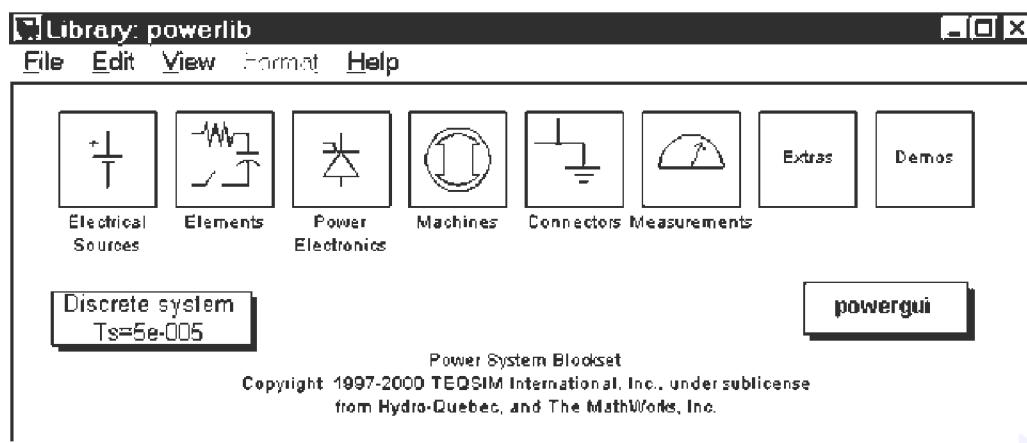
ساختن مدار با کتابخانه **powerlib**

استفاده از رابط گرافیکی، اتصال قطعات **Simulink** به قطعات قدرت را امکان‌پذیر می‌نماید. قطعات در کتابخانه ویژه‌ای به اسم **powerlib** گردآوری شده‌اند.

با وارد کردن دستور زیر در محیط **MATLAB**، کتابخانه قطعات سیستم قدرت را باز نمایید:

powerlib

این فرمان یک پنجره **Simulink** را نمایش می‌دهد که آیکون کتابخانه‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شما می‌توانید این کتابخانه‌ها را بازنمایید تا قطعاتی که به مدارتان کپی خواهد شد را ببینید. هر قطعه با آیکونی که دارای ورودی و خروجی‌های منطبق بر ترمینالهای قطعه می‌باشد، نمایش داده می‌شود.

۱- در پنجره **powerlib** از منوی **File**، یک پنجره جدید که اولین مدار شما خواهد بود باز نمایید. آنرا با نام **circuit1** ذخیره نمایید.

۲- کتابخانه منابع تغذیه (**Electrical Sources**) را باز نموده و یک منبع ولتاژ **AC** را دوبار کلیک کردن روی منبع ولتاژ **AC**، پنجره تنظیمات آنرا باز نموده و پارامترهای دامنه **Frequency (Hz)** و فرکانس (**Peak amplitude (V)**) را مانند مقادیر نشان داده شده در شکل ۱-۱ وارد نمایید.

۴- اسم منبع ولتاژ را به **Vs** تغییر دهید.

۵- قطعه شاخه موازی (**Parallel RLC Branch**) **RLC** را که می‌توانید آنرا در کتابخانه عناصر (**Elements**) بیابید به مدار خود کپی نموده و پارامترهای آنرا هماگونه که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است تغییر دهید و اسم آنرا **Z eq** بگذارید.

۶- مقاومت **Rs eq** می‌تواند از شاخه موازی **RLC** درست شود. قطعه شاخه موازی **RLC** که در حال حاضر از مدارتان وجود دارد را دوباره ایجاد نمایید و پارامتر مقاومت (**Resistan R**) و **Inductance L (H)** و **Capasitance C(F)** را طبق شکل ۱-۱ تغییر دهید و پارامترهای اندوکتانس (**H**) و کاپاسیتانس (**C(F)**) را به ترتیب به بینهایت (**inf**) و صفر (**۰**) تغییر دهید.

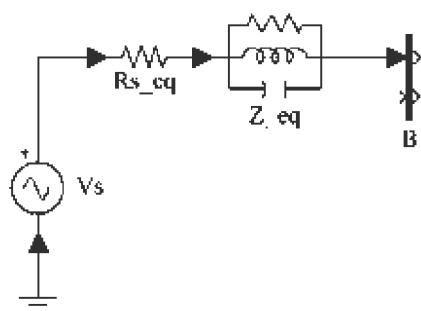
وقتی پنجره تنظیمات را می‌بندید، متوجه می‌شوید که قطعات **L** و **C** نشان داده نمی‌شوند و آیکون **RLC** در حال حاضر یک مقاومت ساده را نمایش می‌دهد. نتیجه مشابه‌ای می‌تواند با شاخه سری **RLC** رخ می‌دهد. با تغییر **L** و **C** به ترتیب به صفر و بینهایت.

۷- این قطعه را **Rs eq** بنامید.

۸- کتابخانه اتصالات (**Bus Bar**) از **powerlib Connectors** را باز نمایید و یک باس‌بار (**Bus Bar**) کپی کنید.

۹- پنجره تنظیمات باس‌بار را باز نمایید و پارامترهای آنرا به دو ورودی (**Number of input**) و دو خروجی (**Number of output**) تغییر دهید و نام آنرا **B1** قرار دهید. همچنین یک قطعه زمین (**Ground**) کپی کنید (قطعه زمین را با یک خروجی را انتخاب نمایید)

اجزا مختلف را جا به جا نمایید و قطعات را با کشیدن خطوط از خروجی‌ها به ورودی‌های قطعات به هم وصل نمایید.



برای تکمیل مدار مطابق شکل ۱-۱ شما نیاز به اضافه کردن یک خط انتقال و یک راکتور شنت دارید. **Breaker** را بعداً در بخش ۳ اضافه خواهید کرد. مدل یک خط با توزیع یکنواخت پارامترهای **R**, **L** و **C** در طول خط شامل یک تاخیر زمانی است که مساوی با زمان انتشار موج در طول خط است. این مدل نمی‌تواند به عنوان یک سیستم خطی شبیه‌سازی گردد. زیرا یک تاخیر، مشابه یک سری حالت سری بی‌کران می‌باشد. ولیکن یک تقریب خوب از یک خط با یک سری از حالات پایدار می‌تواند با سری کردن چندین مدار **PI** که هر کدام به عنوان بخش کوچکی از خط ظاهر می‌شود قابل دست‌یابی است.

یک بخش **PI** شامل یک شاخه سری **RL** و دو شاخه شنت **PI** می‌باشد. دقیق مدل بستگی به تعداد بخش‌های **PI** دارد که برای مدل استفاده شده است. قطعه خط **PI** (PI Section Line) به پنجره **PI** کپی نمایید و پارامترهای آنرا مانند آنچه در را از کتابخانه عناصر (**Elements**) به پنجره **PI** کپی نمایید و پارامترهای آنرا مانند آنچه در **Number of pi** (Number of pi) نشان داده شده است تغییر دهید و تعداد بخش‌های **PI** خط (Section) را برابر ۱ قرار دهید.

راکتور شنت با یک مقاومت و القاگر سری مدل شده است. می‌توانید از شاخه سری **RLC** (Series_RLC_Branch) برای مدل کردن راکتور شنت استفاده نمایید. مقدار **R** و **L** را بر طبق توان اکتیو و راکتیو که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است تغییر دهید. ($f=60\text{Hz}$, $V=4242.4\text{kV(rms)}$, $P=110/300=0.37\text{MW}$ و $Q=110\text{Mvars}$)

شما شاید راحت‌تر باشید که از قطعه بار سری **RLC** (Series RLC Load) استفاده نمایید که به شما اجازه می‌دهد مستقیماً توان اکتیو و راکتیو جذب شده توسط راکتور شنت را تعیین نمایید. قطعه بار سری **RLC** را که می‌توانید آنرا در کتابخانه عناصر (**Elements**) از **powerlib** نمایید را کپی کنید. اسم آنرا **Mvars** 110 قرار دهید و پارامترهای آنرا مانند زیر قرار دهید:

Nominal votage Vn (Vrms) : 424.4e3

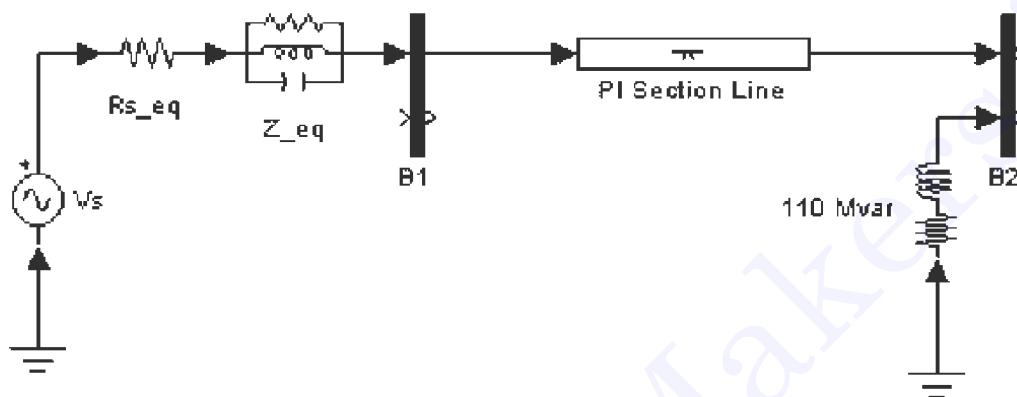
Nominal frequency fn (Hz) : 60

Avtive power P(W) : 110e6/300

Inductive reactive power QL (positive var) : 110e6

Capasitive reactive power QC (negative var) : 0

توجه کنید که وقتی توان راکتیو خازنی تعیین نشده، با بسته شدن پنجره تنظیمات، خازن در آیکون قطعه نمایش داده نمی‌شود. یک بس پایانی گیرنده **PI** با کپی کردن **PI** اضافه نمایید و تمام قطعات جدید را همانطور که نشان داده شده به هم وصل نمایید.

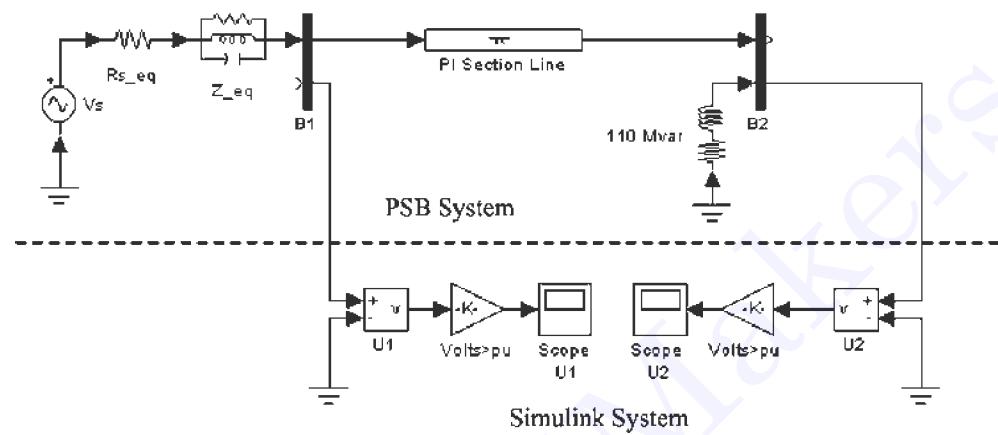


شما یک قطعه اندازه‌گیر ولتاژ (Voltage Measurement) برای اندازه‌گرفتن ولتاژ در بس **B1** نیاز دارید. این قطعه در کتابخانه اندازه‌گیرها (**Measurement**) از **powerlib** یافت می‌شود. آنرا کپی کنید و آنرا **U1** بنامید. ورودی مثبت آنرا به خروجی دوم بس **B1** و ورودی منفی را به یک زمین جدید وصل نمایید.

برای مشاهده ولتاژ اندازه‌گرفته شده توسط قطعه اندازه‌گیر ولتاژ که **U1** نامیده شده؛ یک سیستم نمایش مورد نیاز است. این سیستم می‌تواند هر وسیله‌ای که در کتابخانه **Sinks** از **Simulink** یافت می‌شود باشد.

کتابخانه **Sinks** از **Simulink** را باز نمایید و قطعه اسکوپ **Scope** را به پنجره مدارتان **circuit1** کپی نمایید. اگر اسکوپ؛ مستقیماً به خروجی اندازه‌گیر ولتاژ وصل شود، ولتاژ را به ولت نمایش می‌دهد. ولیکن مهندسان قدرت در سیستم‌های قدرت با مقادیر نرمال شده (سیستم پریونیت) کار می‌کنند. ولتاژ با تقسیم به مقدار پیک ولتاژ نامی سیستم به عنوان مقدار مبنای نرمالیزه می‌شود.

قطعه گین (Gain) را از کتابخانه Simulink انتخاب کنید و گین (Gain) آنرا مطابق بالا وارد نمایید. خروجی آنرا به قطعه اسکوپ و خروجی قطعه اندازه‌گیر ولتاژ را به قطعه گین اتصال دهید این سیستم اندازه‌گیر ولتاژ را کپی کنید و در باس بار B2 قرار دهید. همانند شکل زیر:

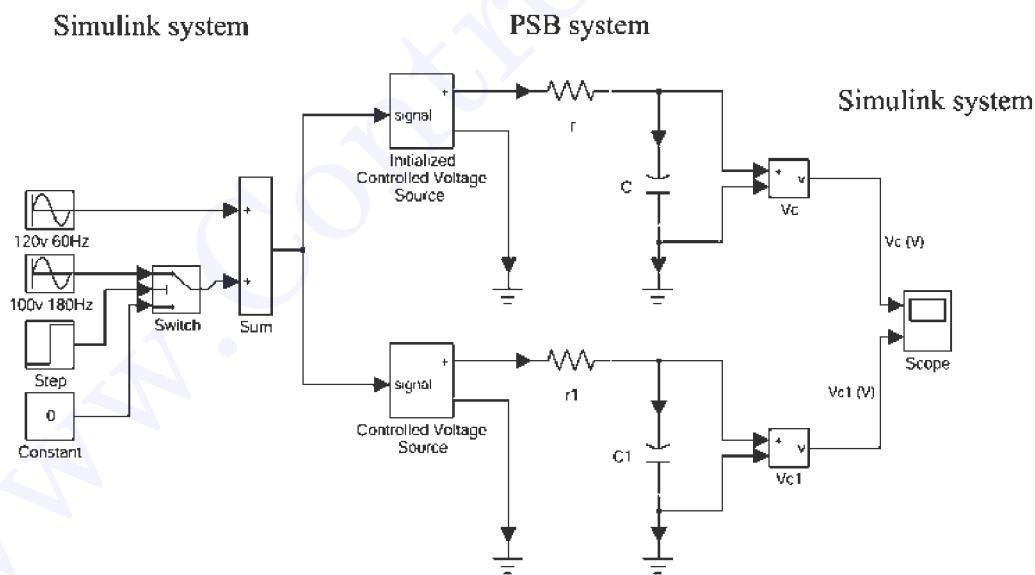


هماهنگ کردن مدار با Simulink

قطعه اندازه‌گیر ولتاژ به عنوان یک هماهنگ کننده بین قطعات **Simulink** عمل می‌نماید. برای سیستم نشان داده شده در بالا؛ ارتباط بین سیستم قدرت و سیستم **Simulink** انجام شده است. قطعات اندازه‌گیر ولتاژ، ولتاژهای اندازه‌گیری شده را به سیگنال **Simulink** تبدیل می‌نماید.

توجه کنید که قطعه اندازه‌گیر جریان (**Current Measurement**) از کتابخانه اندازه‌گیرهای **powerlib** می‌تواند برای تبدیل جیرانهای اندازه‌گیری شده به سیگنال **Simulink** مورد استفاده قرار گیرد.

اتصال قطعات **Simulink** به سیستم قدرت نیز امکان‌پذیر می‌باشد. به عنوان مثال، می‌توانید یک قطعه منبع ولتاژ کنترل شده (**Controlled Voltage Source**) برای تزریق ولتاژ در یک مدار الکتریکی استفاده نمایید. آنگاه ولتاژ با سیگنال **Simulink** کنترل می‌شود.



شبیه‌سازی مدار :

حال شما می‌توانید شبیه‌سازی را از منوی **Simulation** شروع کنید. طبق انتظار ولتاژ سینوسی و با مقدار پیک **p.u1** می‌باشد.

وقتی شبیه‌سازی در حال اجرا می‌باشد؛ پنجره تنظیمات قطعه **Vs** را باز نمایید و دامنه را تغییر دهید. اثر آنرا روی دو اسکوپ مشاهده نمایید. همچنین می‌توانید فرکانس و فاز آنرا تغییر دهید. به یاد داشته باشید که می‌توانید بر روی قسمت مورد علاقه‌تان با کشیدن مسیر بسته روی آن (از کلید چپ موس و کشیدن آن روی ناحیه مورد نظر استفاده کنید) بزرگنمایی داشته باشید.

تذکر: برای شبیه‌سازی این مدار الگوریتم پیش‌فرض (**ode45**) استفاده شده است. ولی به سبب نیاز بیشتر قطعات سیستم قدرت مدارات شما شامل کلیدها و سایر مدل‌های غیرخطی خواهد بود. در چنین مواردی شما باید الگوریتم کامل سازی متفاوتی تعیین نمایید. این موضوع در بخش ۳ قسمت شبیه‌سازی حالت گذرا، هنگامیکه یک **Breaker** به مداراتان وصل می‌شود مورد بحث قرار می‌گیرد

بخش دوم

تحلیل یک مدار ساده

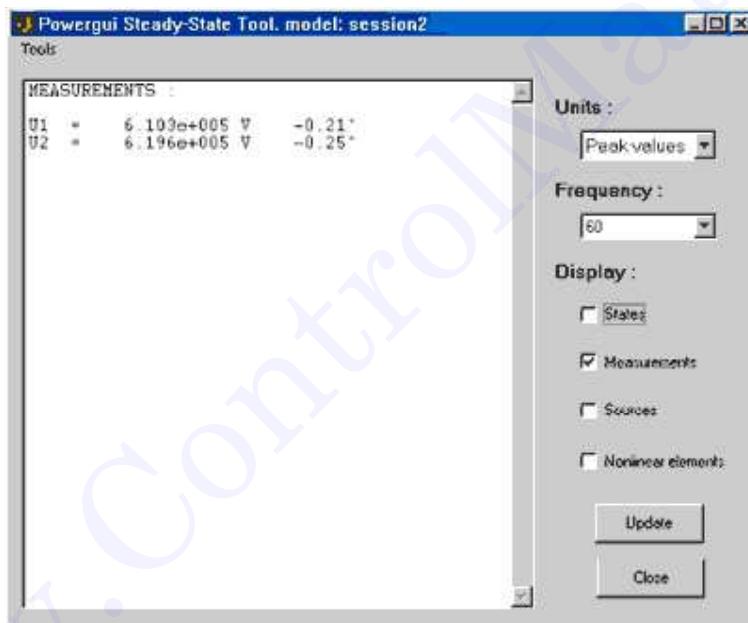
در این بخش با :

- از قطعه **powergui** (نمایشگر گرافیکی) استفاده خواهید نمود.
- خروجی های حالت پایدار سیستم را بدست می آورید.
- مدارتان را با تابع **power2sys** تحلیل می نمایید.
- یک مدار الکتریکی را در ناحیه فرکانسی تحلیل می نمایید.

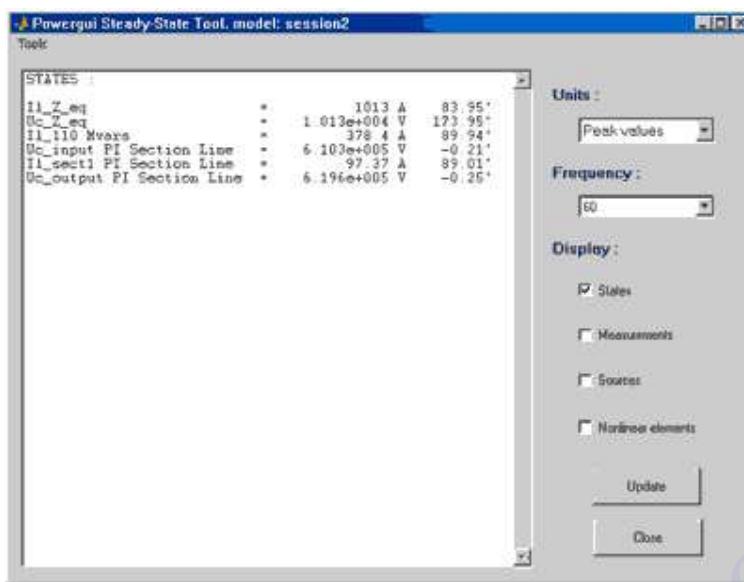
تحلیل حالت پایدار

برای آسان کردن تحلیل حالت پایدار، یک نمایشگر گرافیکی (**powergui**) در کتابخانه **powerlib** در نظر گرفته شده است. قطعه نمایشگر گرافیکی (**powergui**) را به پنجره **circuit1** کپی نمایید و روی آیکون آن دو بار کلیک کنید تا صفحه آن باز شود.

پنجره حالت پایدار را با کلیک روی دکمه ولتاژها و جریان‌های حالت پایدار باز نمایید که در آن فازورهای اندازه گرفته شده توسط دو قطعه اندازه‌گیری به فرم قطبی نشان داده شده است.



خروجی هر اندازه‌گیر با تطبیق آن با اسم قطعه اندازه‌گیر مشخص می‌شود. اندازه فازورهای **U1** و **U2** با مقدار پیک ولتاژ سینوسی تطبیق یافته‌اند. در پنجره حالت پایدار، همچنین می‌توانید مقدار حالت پایدار منبع ولتاژ یا مقدار شرایط را با علامت زدن در جعبه علامت کنار هر یک از منابع (**Sources**) یا شرایط (**States**) انتخاب نمایید تا نمایش داده شوند.



اسم متغیرهای حالت؛ شامل اسم قطعه‌ای می‌باشد که در آن القاگر یا خازن وجود دارد. معرفی شده‌ها با پیشوند (I) برای جریان القاگر و یا معرفی شده‌ها با پیشوند (Uc) برای ولتاژ خازن می‌باشند.

قرارداد علامت منابع ولتاژ و جریان و متغیرهای حالت بر مبنای وضعیت آنها در مدار می‌باشد.

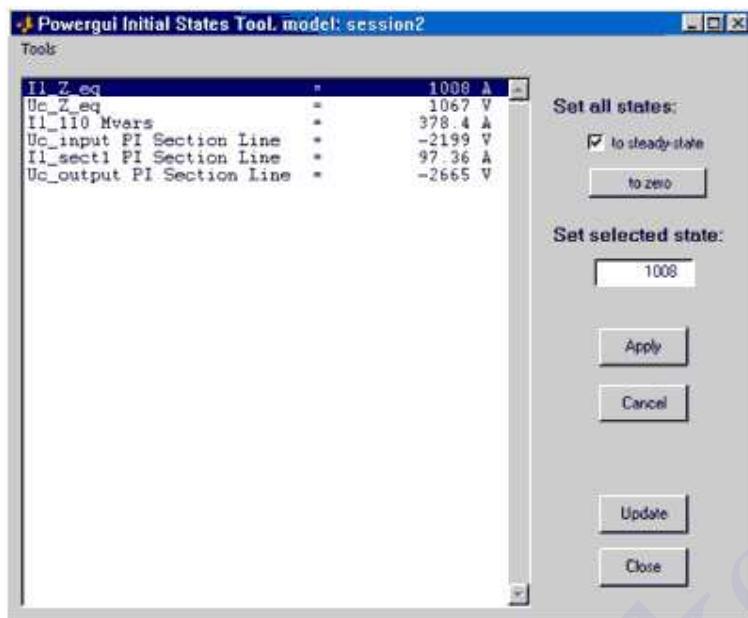
- جریان القاگرها اگر در جهت فلاش جاری باشد مثبت است.

- ولتاژ خازن‌ها عبارت است از ولتاژ خروجی قطعه منهای ولتاژ ورودی قطعه

قدکر :

بر حسب موقعیت دقیق چندین قطعه در دیاگرام **circuit1** ممکن است مقادیر حالت پایدار قطعات همانند آنچه که در مدار دیده می‌شود نمایش داده نشود.

حالا از جعبه ابزار نمایشگر گرافیکی (**powergui**) روی دکمه تنظیم مقادیر اولیه (**Initial States Setting**) کلیک نمایید. مقادیر اولیه شش شرط مدار (جریان سه القاگر و ولتاژ سه خازن) نشان داده می‌شوند. این مقادیر اولیه برای شروع شبیه‌سازی حالت پایدار تنظیم شده‌اند.



تحلیل فرکانسی

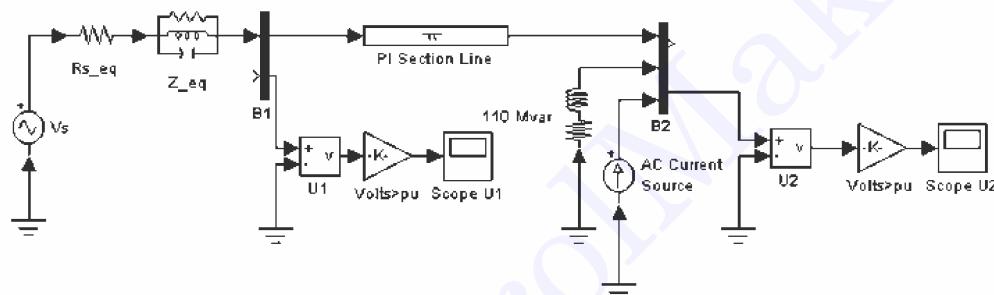
کتابخانه اندازه‌گیرها (**powerlib**) از **Measurments** می‌باشد که امپدانس بین دو گره از یک مدار را اندازه‌گیری می‌کند. در دو بخش آتی شما امپدانس بین **B2** و زمین مدارتان را به دو روش اندازه‌گیرید.

– محاسبه از مدل فضای حالت

– اندازه‌گیری اتوماتیک یه کمک اندازه‌گیر امپدانس دو قطعه نمایشگر گرافیکی (**powergui**)

بدست آوردن امپدانس متقابل فرکانسی از مدل فضای حالت

برای اندازه‌گیری امپدانس متقابل در بسیار **B2**، به یک منبع جریان در بسیار **B2** نیازمندید تا یک ورودی دوم برای مدل فضای حالت ایجاد نمایید. کتابخانه منابع الکتریکی **(Electrical Sources)** را باز نمایید و قطعه منبع جریان **AC** را به مدار خود کپی نمایید. این منبع را به بسیار **B2** همانند شکل زیر اتصال دهید و اندازه ماکریم منبع جریان **60Hz** (Frequency (Hz):) (Peak amplitude (A):) تغییر دهید. قطعات را مانند زیر مرتب نمایید:



شکل ۱-۲: منبع جریان **AC** در بسیار **B2** (مدار **circuit1-1**)

حالا مقادیر فضای حالت مدار **power2sys** را با تابع **circuit1-1** محاسبه نمایید. دستور زیر را در خط فرمان **MATLAB** وارد نمایید:

```
[A,B,C,D,x0,states,inputs,outputs]=power2sys('circuit1-1');
```

تابع **power2sys** مدل فضای حالت مدارات را در چهار ماتریس **A**, **B**, **C** و **D** ارایه می‌کند. **x0** بردار شرایط اولیه‌ای است که شما در قطعه نمایشگر گرافیکی (**powergui**) نیز دیده‌اید. اسم متغیرهای حالت، ورودی‌ها و خروجی‌ها در سه ماتریس ستونی داده می‌شود.

States=	شرایط
<i>I_l_110 Mvars</i>	
<i>U_c_input PI Section Line</i>	
<i>I_l_sect1 PI Section Line</i>	
<i>U_c_output PI Section Line</i>	
<i>I_l_Z_eq</i>	
<i>U_c_Z_eq</i>	
Inputs=	
<i>U_Vs</i>	
<i>I_AC Current Source</i>	
Outputs=	ورودی‌ها
<i>U_U1</i>	
<i>U_U2</i>	

ورودی‌ها
خروجی‌ها

توجه کنید که باید اسم و ترتیب متغیرها، ورودی‌ها و خروجی‌ها را از قطعه **Powergui** استخراج نمایید.

همینکه مدل فضای حالت سیستم شناخته شده باشد، می‌تواند در حوزه فرکانسی تحلیل گردد.
به عنوان مثال مدهای این مدار می‌تواند از مقادیر آیگن ماتریس (**A**) به دست بیايد (فرمان **eig** از MATLAB را استفاده نمایید).

```
eig(A)
ans
1.0e+05*
-2.4972
-0.0001+0.0144i <229Hz
-0.0001-0.0144i
-0.0002+0.0056i <89Hz
-0.0002-0.0056i
-0.0000
```

این سیستم دو مد نوسانی **89Hz** و **299Hz** دارد. فرکانس **89Hz** مربوط به منبع معادل می‌باشد که با تک قطبی معادل، مدل شده است. **229Hz** اولین مد خط است که با یک بخش PI مدل شده است.

اگر شما جعبه ابزار کنترل سیستم را داشته باشید، می‌توانید امپدانس شبکه را با تابع **bode** به عنوان یک تابع فرکانسی محاسبه نمایید. در فضای لaplas، امپدانس **Z2** در بس **B2** به صورت تابعی بین جریان تزریق شده به بس **B2** (ورودی دوم سیستم) و ولتاژ اندازه‌گرفته شده در بس **B2** (خروجی دوم سیستم) [انتقال یافته به محیط لaplas] تعریف می‌شود.

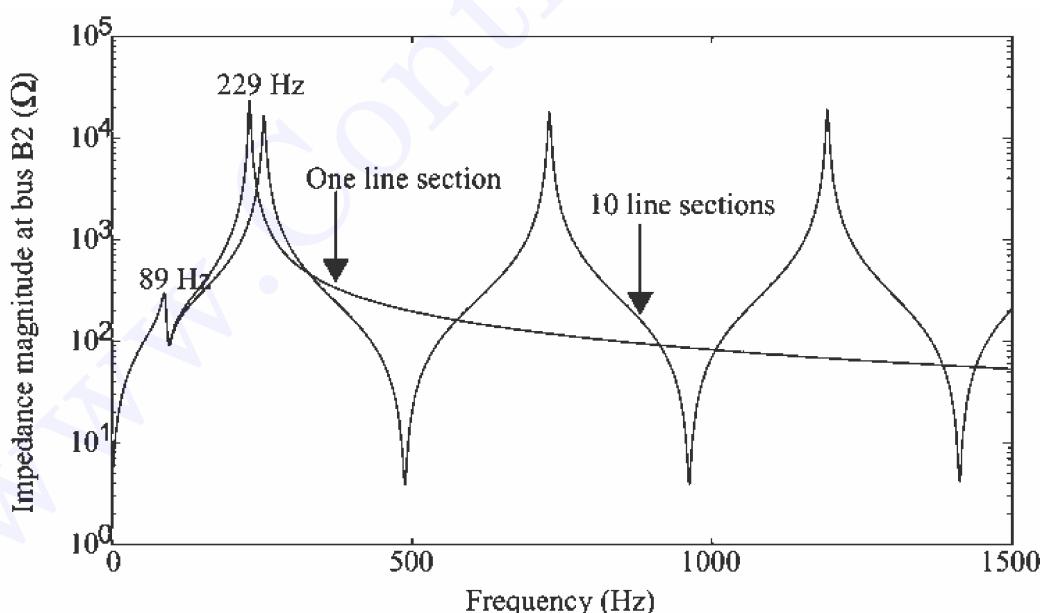
امپدانس در بس **B2** در بازه **0** تا **1500** هرتز می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

```
Freq=0:1500;
W=2*pi*freq;
[mag1,phase1]=bode(A,B,C,D,2,w);
semilogy(freq,mag1 (:,2));
```

عملیات مشابهی را برای بدست آوردن پاسخ مدل خط با 10° بخش تکرار کنید. جعبه محاوره‌ای خط مدل **PI** را باز کنید و تعداد بخشها را از ۱ به 10° تغییر دهید. برای محاسبه پاسخ فرکانسی جدید و انداختن آن روی پاسخ بدست آمده از مدل تک بخشی، دستورات زیر را بنویسید:

```
[A,B,C,D]=power2sys('circuit1-1');
[mag10,phase10]=bode(A,B,C,D,2,w);
semilog(freq,mag1(:,2),freq,mag10(:,2));
```

این نتیجه رسم می‌باشد:



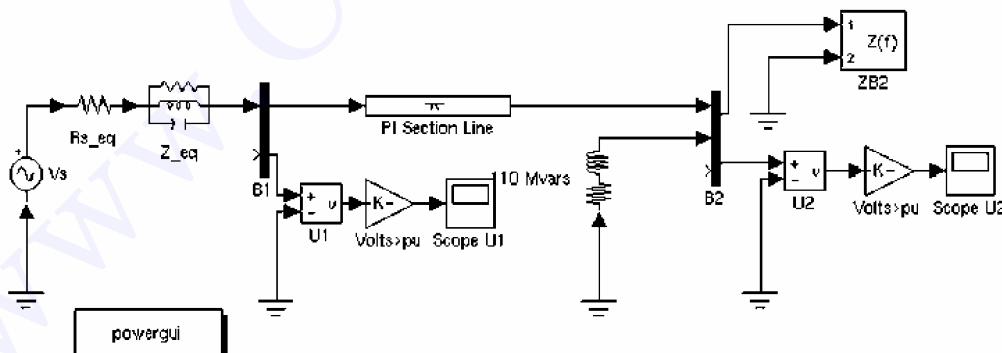
شکل ۱-۳: امپدانس بس **B2** تابع فرکانسی

این شکل نشان می‌دهد، ناحیه فرکانسی که توسط یک خط با یک بخش ظاهر می‌شود تقریباً به ۱۵۰ هرتز محدود شده است. برای فرکانس‌های بالاتر یک خط با ۱۰ بخش تقریب بهتری می‌باشد.

بنابراین زمان انتشار برای 300 km برابر است با: $s = \frac{300}{293.208} = 1.023$ و فرکانس اولین مدل خط برابر است با $f_1 = \frac{1}{4T} = 244 \text{ Hz}$. یک خط تکه تکه شده باید تعدادی نامتناهی از مدها را هر $(n=1,2,3,\dots)$ داشته باشد. خط ۱۰ بخشی؛ ۱۰ مد اول را شبیه‌سازی می‌کند. سه مد اول خط در شکل ۳-۱ دیده می‌شود.

بدست آوردن امپدانس فرکانسی از قطعه اندازه‌گیر امپدانس (Powergui) و قطعه نمایشگر گرافیکی (Measurement_Impedance)

عملیاتی که در بالا برای اندازه‌گیری امپدانس یک مدار توضیح داده شد در قطعات سیستم قدرت اتوماتیک شده است. کتابخانه اندازه‌گیرها (**Measurements**) از **powerlib** را باز کرده و قطعه اندازه‌گیر امپدانس (**Impedance_Measurement**) را به مدل خود کپی نمایید و اسم آنرا به **ZB2** تغییر دهید. قطعه؛ یک منبع جریان و یک اندازه‌گیر ولتاژ را برای اندازه‌گیری امپدانس به کار می‌برد. دو ورودی این قطعه را بین بار **B2** و زمین همانگونه که نشان داده شده است، وصل نمایید.

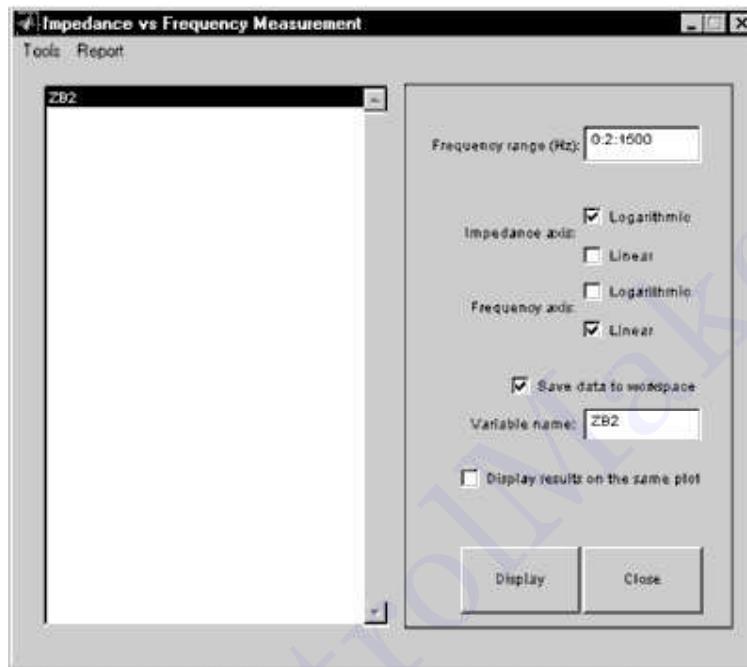


شکل ۱-۴: اندازه‌گیری امپدانس فرکانسی با قطعه اندازه‌گیر امپدانس

حالا پنجره **powergui** را باز کنید و در منوی آن

Impedance_vs_Frequency_Measurement

شود که لیستی از اندازه‌گیرهای امپدانسی که در مدارتان وجود دارد را نشان می‌دهد.



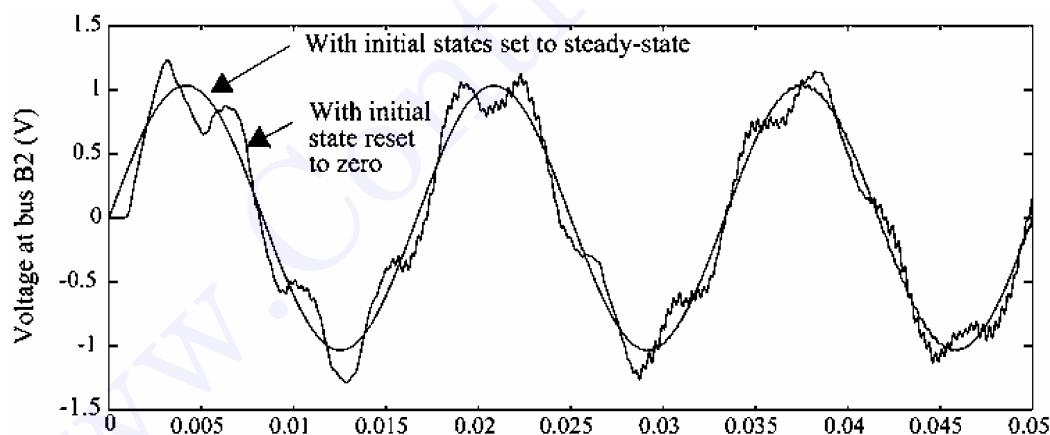
در این مورد، فقط یک امپدانس اندازه گرفته شده است و به عنوان **ZB2** در پنجره شناخته شده است (اسم قطعه **ZB2**). در محدوده فرکانس، مقدار **0:2:1500** (که بین صفر تا **1500** هرتز با پله‌های **2Hz** می‌باشد) را وارد نمایید. تقسیم‌بندی لگاریتمی (Logaritmic Impedance) را برای نمایش اندازه **Z** انتخاب کنید. گرینه **Save_data_to_workspace** را انتخاب نمایید و **ZB2** را در جای اسم متغیر (Variable_name) که شامل امپدانس فرکانسی **vs** خواهد شد، تایپ نمایید.

وقتی که محاسبات تمام شد، پنجره نمودار اندازه و فاز به عنوان تابع فرکانسی نمایش داده می‌شود. نمودار اندازه باید مانند شکل ۳-۱ (برای خط یک بخشی) باشد. اگر به محیط کار خود نگاه کنید باید یک متغیر با اسم **ZB2** داشته باشد. یک ماتریس دو ستونی می‌باشد که ستون اول شامل فرکانس می‌باشد و ستون دوم شامل امپدانس مختلط می‌باشد.

حالا از منوی **Simulation parameters** گزینه **Simulation** را انتخاب نموده و در قسمت **حلال (Solver)**، الگوریتم **ode23tb** را انتخاب نمایید. تغییرات وابسته **Relative tolerance** را به **1e-4** تغییر داده و سایر متغیرها را در حالت **auto** نگه دارید. زمان پایان **(Stop time)** را به **0.05** تغییر دهید. اسکوپ‌ها را باز نمایید و شبیه‌سازی را آغاز نمایید.

به شکل موج ولتاژ در ابتدا و انتهای روی اسکوپ **U1** و **U2** نگاه کنید. از آنجا که متغیرهای حالت به صورت خودکار پردازش شده‌اند، سیستم در حالت پایدار شروع شده و شکل موج‌های سینوسی نمایش داده شده‌اند.

برانجام پنجره **powergui** را باز کرده و تنظیم مقادیر اولیه **(Initial States Setting)** را باز نموده و تمام مقادیر را با کلیک روی دکمه **Set all states to zero** به صفر تغییر دهید و دکمه **Apply** را کلیک نمایید. شبیه‌سازی را تکرار کنید و زمان گذرا را از صفر که خط باردار می‌شود، مشاهده نمایید.



شکل ۱-۵: ولتاژ انتهای **(U2)** با خط شامل ۱۰ بخش