

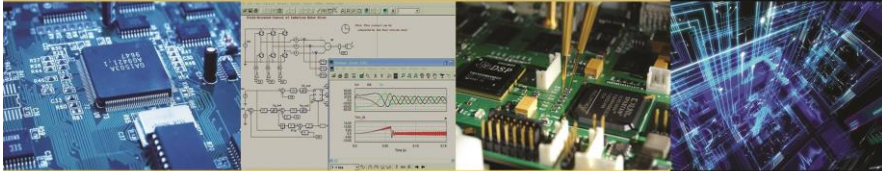
$L_{out}$  0.75m 2 $\mu$   
 10V  
 1500 $\mu$ F  
 $C_{out}$  12\*12/600  
 8S  
 87k  
 10k  
 $R_b$   
 CLF 300p

## PSIM Accelerates Your Pace of Innovation

For engineers who want to expand the possibilities of power electronics, PSIM is the fastest and most reliable simulation tool. Built by engineers, for engineers. ➔

# آموزش مقدماتی تا پیشرفته نرم افزار شبیه سازی PSIM

نرم افزار قدرتمند در حوزه الکترونیک قدرت، درایو، الکترونیک



مجتبی اسماعیلی  
حسین کاظمی

نرم افزار PSIM یا Powersim یکی از نرم افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی شبیه سازی مدارات الکترونیک قدرت نظیر منابع تغذیه (سوئیچینگ، ترستوری، دیودی و...)، چاپرها، درایو موتور، مبدل‌ها و سیستم‌های کنترل است. به دلیل سرعت و دقت بالای این نرم افزار در شبیه سازی مدارات الکترونیک قدرت، از آن می توان در شبیه سازی مبدل‌های الکترونیک قدرت با هر اندازه‌ای استفاده کرد.

کتابخانه‌ی کنترل نرم افزار PSIM لیست جامعی از اجزا و بلوک توابع فراهم می کند که از طریق آن‌ها می توان مدارهای کنترلی را در شکل‌های مختلف از قبیل مدار آنالوگ، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه ی s، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه ی z، کد C یا سیمولینک MATLAB شبیه سازی کرد. از ویژگی های این نرم افزار می توان به موارد زیر اشاره کرد:

• رابط کاربری آسان

• تحلیل حالت‌های Thermal Analysis، Harmonic Analysis، Motor Drive Analysis، AC Analysis، AC Sweep

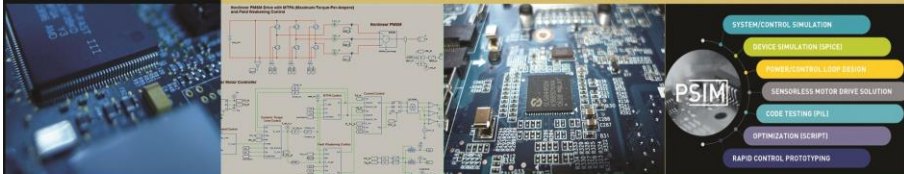
• دارا بودن امکانات مختلف از قبیل نمایش مقدار موثر ولتاژ و متوسط هر نقطه از

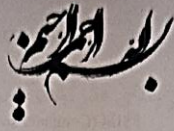
شکل موج خروجی

• وجود قابلیت‌هایی نظیر تغییر رنگ شکل موج‌ها، انجام اعمال ریاضی روی شکل موج‌های خروجی، تغییر محورهای مبنا، مشاهده‌ی چندین شکل موج در یک صفحه و به دست آوردن نقاط تلاقی آن‌ها

• قابلیت ایجاد ارتباط با نرم افزار MATLAB/Simulink

در این کتاب آموزش با روش مثال محور در نظر گرفته شده است که می تواند با صرف کمترین زمان توسط کاربران عزیز، بالا ترین تسلط به نرم افزار و قابلیت های آن حاصل شود.





آموزش مقدماتی تا پیشرفته

# فرم افزار psim

مولفان:

مجتبی اسماعیلی / حسین کاظمی



۱۳۹۸

سرشناسه	اسماعیلی، مجتبی، ۱۳۶۹ -
عنوان و نام پدیدآور	آموزش مقدماتی تا پیشرفته نرم افزار psim / مجتبی اسماعیلی، حسین کاظمی.
مشخصات نشر	تهران: نخبه سازان، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	۲۰۴ ص.
شابک	978-964-5938-62-6
وضعیت فهرست نویسی	فبا
موضوع	نرم افزار بی سیم
موضوع	PSIM (Computer software)
موضوع	مدارهای الکترونیکی -- شبیه سازی کامپیوتری -- نرم افزار.
موضوع	Electronic circuits -- Computer simulation--Software
شناخته افزوده	کاظمی، حسین، ۱۳۷۰ -
رده بندی کنگره	TK ۷۸۶۷ / الف ۵۳   ۸ ۱۳۹۸
رده بندی دیویی	۶۲۱/۳۸۱۵۲۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	۵۶۴۵۰۸۳



## آموزش مقدماتی تا پیشرفته نرم افزار psim

مجتبی اسماعیلی / حسین کاظمی

چاپ اول

تابستان ۱۳۹۸

۳۳۰۰۰ تومان

لیتوگرافی نقش سبز

چاپ ترانه

صحافی تیرگان

۵۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۵۹۳۸-۶۲-۶

نشانی انتشارات: خیابان جمهوری - خیابان دانشگاه شمالی - کوچه بهار - پلاک ۳ - واحد ۵  
تلفن: ۶۶۹۶۲۸۰۲ فکس: ۶۶۴۹۳۱۸۵



تقديم به ساحت مقدس امام مهدی (عج الله تعالى فرجه الشريف)

سلامتی و تعجیل در فرج حضرت ولیعصر ارواحنا له الفداء **صلوات**

## مقدمه مولف

نرم افزار PSIM یا Powersim یکی از نرم افزارهای قدرتمند در زمینه ی شبیه سازی مدارات الکترونیک قدرت نظیر منابع تغذیه (سوئیچینگ، تریستوری، دیودی و ...)، چاپرها، درایو موتور، مبدل ها و سیستم های کنترل است. به دلیل سرعت و دقت بالای این نرم افزار از آن می توان در شبیه سازی مبدل های الکترونیک قدرت با هر ابعادی استفاده کرد. کتابخانه ی کنترل نرم افزار PSIM لیست جامعی از اجزا و بلوک توابع فراهم می کند که بوسیله ی آن ها می توان مدارهای کنترلی را در شکل های مختلف از قبیل مدار آنالوگ، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه ی s، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه ی z، کد C یا سیمولینک MATLAB شبیه سازی کرد.

سایر ویژگی های این نرم افزار عبارت اند از:

- ✓ رابط کاربری آسان
- ✓ تحلیل حالت های Thermal Analysis، Harmonic Analysis، Motor Drive، AC Sweep، AC Analysis، Analysis
- ✓ دارا بودن امکانات مختلف از قبیل نمایش مقدار موثر ولتاژ و متوسط هر نقطه از شکل موج خروجی
- ✓ وجود قابلیت هایی نظیر تغییر رنگ شکل موج ها، انجام اعمال ریاضی روی شکل موج های خروجی، تغییر محورهای مبنا، مشاهده ی چندین شکل موج در یک صفحه و به دست آوردن نقاط تلاقی آن ها
- ✓ قابلیت ایجاد ارتباط با نرم افزار MATLAB/Simulink

نرم افزار PSIM در کتابخانه‌ی خود علاوه بر المان‌های متعارف مدارهای الکتریکی مانند سلف، مقاومت، خازن، انواع دیودها و سوئیچ‌ها، ترانسفورماتورها، انواع ماشین‌های الکتریکی و ... دارای بخش‌های زیر نیز می‌باشد:

✓ کنترل دیجیتال: که در آن بلوک‌هایی برای کنترل دیجیتال سیستم نظیر بلوک تابع تبدیل حوزه‌ی  $z$ ، بلوک‌های تبدیل سیگنال آنالوگ به عددی، فیلترهای دیجیتال تعبیه شده است.

✓ SimCoupler Module: که رابط بین PSIM و MATLAB/Simulink فراهم می‌کند.

✓ Thermal Module: که توانایی محاسبه‌ی تلفات نیمه هادی‌ها را فراهم می‌کند.

✓ MagCoupler Module: برای ایجاد ارتباط بین PSIM و نرم‌افزارهای تحلیل الکترومغناطیسی همچون JMAG از آن استفاده می‌شود.

✓ MagCoupler-RT: نرم‌افزار PSIM را با داده‌های JMAG-RT لینک می‌کند.

✓ SimCoder Module: امکان تولید خودکار کد را برای تجهیزات سخت‌افزاری DSP فراهم می‌کند.

✓ Renewable Energy Package: که شامل مدل منابع انرژی تجدیدپذیر مثل صفحات خورشیدی و توربین بادی می‌باشد.

در این کتاب قسمت‌های مختلف نرم‌افزار PSIM در قالب مثال‌های مختلف آموزش داده شده است. روند انتخاب مثال‌ها به ترتیب از آسان به دشوار بوده و در مثال‌های ابتدایی توضیحات کامل‌تری، برای آموزش نکات اولیه جهت انجام شبیه‌سازی ارائه شده است که در مثال‌های بعدی از تکرار آموزش‌های مطرح شده خودداری شده است. جهت یادگیری کامل کتاب پیشنهاد می‌شود مطالعه کتاب از ابتدا شروع شود و پس از تسلط بر روی هر فصل، مطالعه فصل‌های بعدی آغاز گردد.

در پایان خداوند متعال را از لطف، احسان و نعماتی که به این حقیر عنایت فرموده و توفیق نوشتن این اثر را به بنده حقیر مرحمت نموده‌اند، بی‌نهایت شکر گذارم.

از زحمات برادران بزرگووارم، آقایان عبدالحسین حویزه و سعید نصیری زرنندی تقدیر و تشکر فراوان دارم.

مجتبی اسماعیلی

m.esmaeili.ee@gmail.com

پاییز ۱۳۹۷



امام صادق (علیه السلام):

اگر زمان انجور امام مهدی (عج) الله تعالی فرجه الشریف است

او را درک می‌کردم به عزم راد خدمت می‌گذراندم...



## فهرست

- فصل ۱ " محیط نرم افزار " ..... ۱
- فصل ۲ " شبیه سازی دیود غیر خطی " ..... ۱۱
- فصل ۳ " کنترل یک سوئیچ ترिस्तوری " ..... ۵۱
- فصل ۴ " شبیه سازی یکسوساز سه فاز تريستوری " ..... ۷۷
- فصل ۵ " شبیه سازی مبدل DC به DC با کنترل جریان متوسط " ..... ۹۹
- فصل ۶ " شبیه سازی اینورتر منبع ولتاژ تک فاز " ..... ۱۱۹
- فصل ۷ " شبیه سازی اینورتر منبع ولتاژ سه فاز " ..... ۱۲۹
- فصل ۸ " شبیه سازی یکسوساز PWM سه فاز " ..... ۱۴۱
- فصل ۹ " شبیه سازی یک فیلتر اکتیو سه فاز " ..... ۱۵۷
- فصل ۱۰ " آشنایی با بارها و سنسورهای مکانیکی " ..... ۱۷۳
- فصل ۱۱ " شبیه سازی همزمان کنترل جریان متوسط در PSIM و MATLAB " ..... ۱۸۹
- فصل ۱۲ " تجزیه و تحلیل حرارتی برای یک دیود " ..... ۲۱۱
- فصل ۱۳ " تعریف قطعه‌ی جدید برای تجزیه و تحلیل حرارتی " ..... ۲۲۳
- فصل ۱۴ " معرفی مدل‌های مربوط به سلول‌های خورشیدی " ..... ۲۴۳
- فصل ۱۵ " آشنایی با ابزار SmartCtrl " ..... ۲۶۳
- فصل ۱۶ " مدل باتری لیتیوم یونی " ..... ۲۸۳
- " مراجع " ..... ۳۰۱

## تقدیم به امیرالمومنین امام علی (علیه السلام):

سلام مولا و آقایم...

سلام بر کفش‌های کهنه‌ات که مایه کرامت شیعه است...

سلام بر عبای پر وصله‌ات که سبب شرافت شیعه است...

سلام بر دست‌های پینه بسته‌ات که بوسه گاه ملائک مقرب خداست...

سلام بر بازوان تنومندت وقتی خیبر را از جای برکندی...

سلام بر تو وقتی در «لایله المبیت» در بستر حضرت محمد(صلی الله علیه و آله وسلم) خوابیدی و به

استقبال مرگ رفتی و مرگ از ابهت تو گریخت...

سلام بر تو وقتی ریسمان به گردن به مسجدت می‌بردند و تو برای رضای خدا خاموش بودی...

سلام بر تو وقتی همسرت را پیش چشمانت سیلی زدند و ذوالفقارت برای حفظ دین محمد(ص) در

غلاف بود...

سلام بر تو وقتی در مشرق دستان پیامبر خدا در غدیر بوسعت عالم طلوع کردی...

سلام بر تو وقتی استخوان در گلو و خار در چشم یک ربع قرن آفتاب خانه ات بودی...

سلام بر آه...

سلام بر چاه...

سلام بر نان جو...

سلام بر نمک...

سلام بر فدک...



# فصل اول

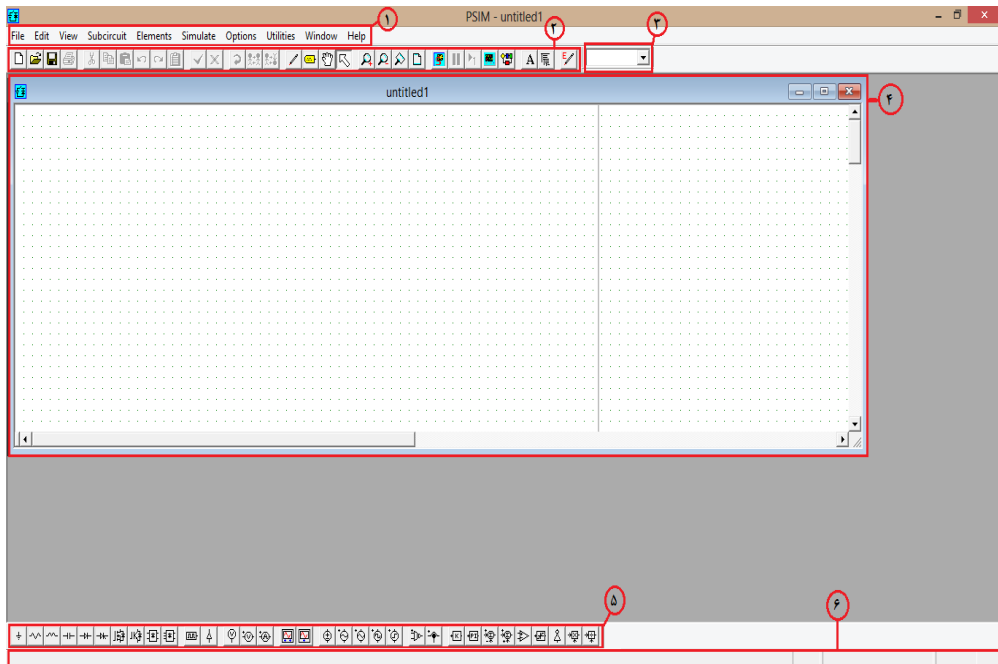
## محیط نرم افزار

### ۱- محیط PSIM

شکل (۱.۱) محیط نرم افزار PSIM را نشان می دهد که شامل بخش های زیر می باشد.

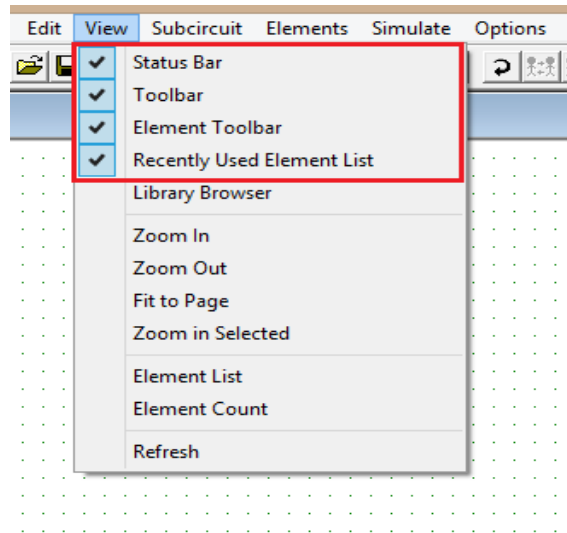
- ۱- منوی اصلی
- ۲- نوار ابزار
- ۳- لیست المان هایی که اخیرا استفاده شده اند (با استفاده از این لیست کشویی می توانید لیست المان هایی که اخیرا استفاده کرده اید را مشاهده کنید)
- ۴- پنجره ی ترسیم مدارات الکتریکی

- ۵- نوار ابزار المان‌های پرکاربرد
- ۶- نوار وضعیت (توضیحات مختلفی از شبیه‌سازی در این نوار نمایش داده می‌شود، برای مثال با قرار گرفتن ماوس روی المان‌ها، نام آن‌ها در این نوار نشان داده می‌شود)



(شکل ۱.۱): محیط نرم‌افزار PSIM

قسمت‌های نوار ابزار، لیست المان‌های اخیراً استفاده شده، نوار ابزار المان‌ها و نوار وضعیت را می‌توان بوسیله‌ی منوی View فعال و یا غیرفعال کرد که در شکل زیر نشان داده شده است.















شکل (۲.۱): منوی View

## ۱-۲- نوار ابزار

توضیحات مربوط به عملکرد هر یک از المان‌های نوار ابزار در قسمت زیر بیان شده

است.

ایجاد پروژه‌ی جدید		فراخوانی پروژه‌های موجود	
ذخیره کردن تغییرات پروژه‌ی جاری		چاپ مدار رسم‌شده	
بریدن قسمت انتخاب شده		کپی کردن قسمت انتخاب‌شده	
چسباندن بخش کپی‌شده		برگرداندن مدار به یک مرحله قبل	
برگردان مدار به یک مرحله جلو		فعال کردن المان انتخاب شده	
غیر فعال کردن المان انتخاب شده		چرخاندن المان انتخاب‌شده	

قرینه کردن نسبت خط عمودی		قرینه کردن نسبت خط افقی	
اتصال سیم		ایجاد برچسب روی مدار رسم شده	
جابجایی صفحه		انتخاب المان	
ابزار بزرگنمایی و کوچک‌نمایی		اجرای شبیه‌سازی	
توقف شبیه‌سازی		اجرای یک گام از شبیه‌سازی	
اجرای SIMVIEW		اجرای SmartCtrl	
نوشتن متن در هر نقطه‌ی دلخواه از		باز کردن کتابخانه‌ی قطعات	

## ۱-۳- نوار ابزار المان‌های پر کاربرد

در این نوار ابزار المان‌های پر کاربرد در ترسیم مدارهای الکتریکی، قرار گرفته‌اند.

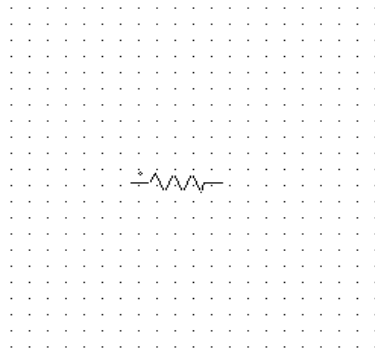
زمین الکتریکی که از آن برای ایجاد ولتاژ مبنای صفر استفاده می‌شود.

المان‌های خازن، سلف و مقاومت می باشد.

برای انتخاب المان‌های فوق روی آن‌ها کلیک می‌کنیم، با این کار نشانگر ماوس به

شکل آن المان تبدیل می‌شود. برای مثال با انتخاب مقاومت از نوار ابزار المان‌ها شکل

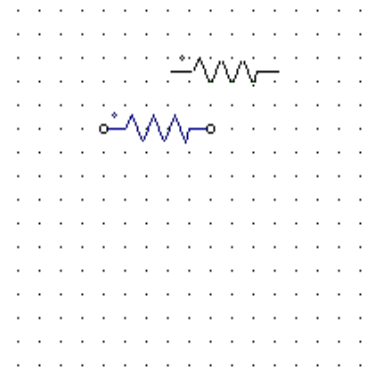
ماوس به صورت زیر خواهد شد.



(شکل ۳.۱): انتخاب مقاومت

با کلیک چپ ماوس المان در محل مورد نظر قرار می‌گیرد، شکل زیر این حالت را

نشان می‌دهد.




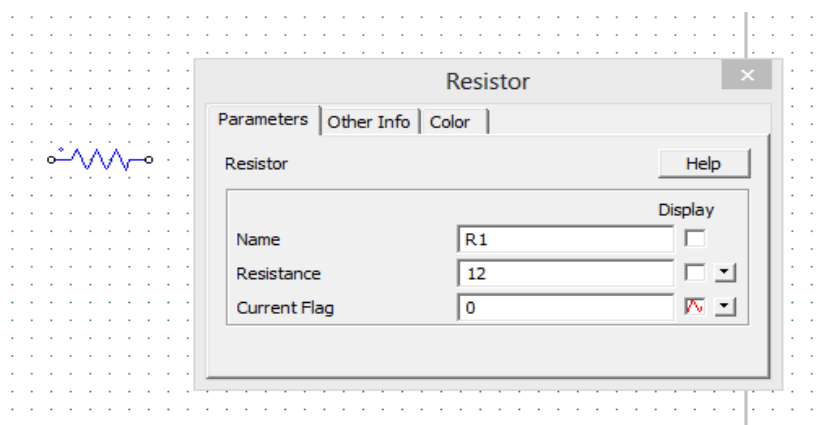
(شکل ۴.۱): پیاده سازی مقاومت

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که سر نقطه‌دار مقاومت، جهت مثبت آن را

نشان می‌دهد، به این صورت که اگر جریان از این نقطه وارد شود مثبت در نظر گرفته

می شود. چنین نقطه‌ای در المان‌های سلف و خازن نیز وجود دارد که سر مثبت المان را نشان می‌دهند.

حال با انتخاب ابزار Select (  ) از نوار ابزار شکل ماوس به حالت قبلی باز می‌گردد. در این حالت با دو بار کلیک کردن روی مقاومت قرار گرفته در صفحه، پنجره‌ای به شکل زیر باز می‌شود.

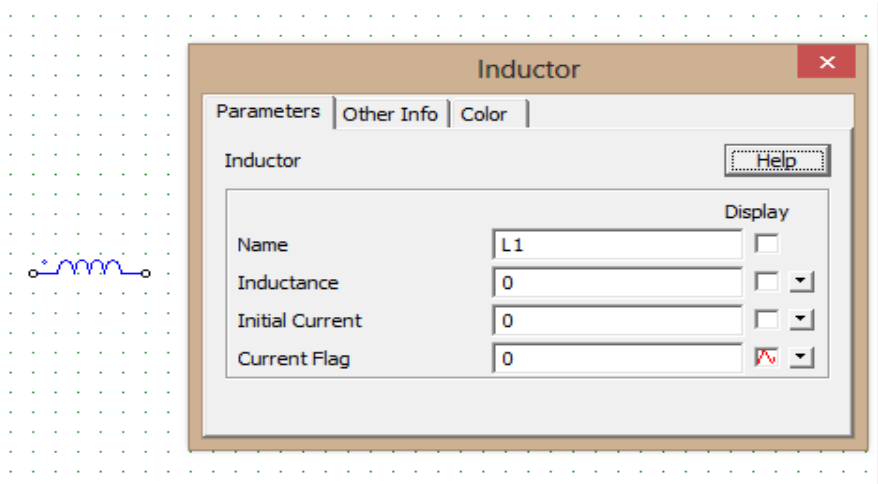


(شکل ۵.۱): تنظیمات مقاومت

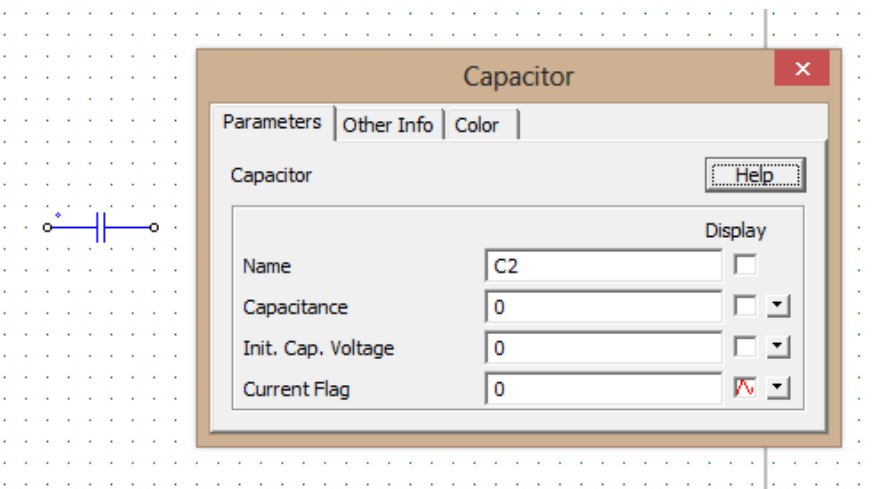
در این پنجره می‌توان نام مقاومت و اندازه‌ی مقاومت را (بر حسب اهم) تعیین کرد. اگر در قسمت Display تیک مربوطه زده شود، نام مقاومت و یا اندازه‌ی آن روی مقاومت نمایش داده می‌شود. گزینه‌ی دیگری که در پنجره دیده می‌شود Current Flag است که در کادر مقابل مقادیر صفر یا یک را می‌توان قرار داد. اگر در این کادر عدد یک را قرار دهیم، جریان عبوری از مقاومت نسبت به زمان، در خروجی شبیه‌سازی نمایش داده خواهد شد.



پنجره‌ی مشابهی نیز برای المان سلف و خازن وجود دارد که در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند.




(شکل ۶.۱): تنظیمات سلف




(شکل ۷.۱): تنظیمات خازن

با استفاده از این پنجره‌ها می‌توان نام، اندازه (بر حسب فاراد برای خازن و بر حسب هانری برای سلف)، جریان اولیه (بر حسب آمپر) یا ولتاژ اولیه‌ی (بر حسب ولت) سلف و خازن را تغییر داد. اگر عدد مقابل Current Flag یک باشد، جریان المان (نسبت به زمان) در خروج نمایش داده می‌شود. با دوبار کلیک کردن روی سایر المان‌ها نیز چنین پنجره‌ای باز می‌شود و می‌توان تنظیمات مربوط به آن المان را انجام داد. با استفاده از گزینه‌ی Help موجود در این پنجره می‌توان اطلاعات مفیدی در خصوص المان مربوطه و تنظیمات آن به دست آورد.


در ادامه سایر المان‌های این نوار ابزار به‌طور خلاصه معرفی می‌شوند:


تریستور 

دیود 

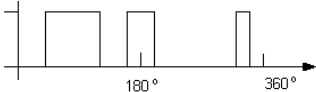
سوئیچ نوع IGBT 

سوئیچ نوع MOSFET 


پل دیودی سه‌فاز 


پل دیودی تک‌فاز 


تولید کننده‌ی سیگنال برای قطع و وصل سوئیچ‌ها. (بوسیله‌ی این بلوک می‌توان


سیگنال‌های متناوبی همانند شکل  برای تنظیم قطع


و وصل سوئیچ‌ها تولید کرد، لازم به ذکر است که سیگنال تولیدی توسط این بلوک فقط به گیت سوئیچ‌ها قابل اعمال است)


 کنترل‌کننده‌ی سوئیچ on-off. (این کنترل‌کننده رابط بین مدار کنترل و مدار قدرت است که ورودی صفر یا یک را از مدار کنترل گرفته و در خروجی، سیگنال لازم برای روشن یا خاموش شدن سوئیچ‌ها تولید می‌کند)


 پروب ولتاژ (که ولتاژ بین گرهی که به آن متصل است را نسبت به زمین اندازه‌گیری می‌کند)


 پروب ولتاژ (که ولتاژ بین دو گرهی را که به آن متصل است اندازه‌گیری می‌کند)

 پروب جریان

 به ترتیب از راست به چپ اسکوپ‌های یک کاناله و دوکاناله

 به ترتیب از راست به چپ منابع ولتاژ پله، مربعی، مثلثی، سینوسی و DC (پس از قرار دادن آن‌ها در پنجره‌ی ترسیم مدار و دوبار کلیک کردن روی آن‌ها می‌توان پارامترهای مربوطه را تنظیم کرد)

 به ترتیب از راست به چپ سنسورهای جریان و ولتاژ (این سنسورها مقادیر جریان و ولتاژ را از مدار قدرت اندازه‌گیری کرده و سیگنال مناسبی را برای مدار کنترل تولید می‌کند)

 بلوک‌های مربوط به مدار کنترل که به ترتیب از راست به چپ عبارتند از: تقسیم‌کننده، ضرب‌کننده، گیت NOT، محدودکننده، مقایسه‌گر، جمع‌کننده، تفریق‌کننده، کنترل‌کننده‌ی PI و کنترل‌کننده‌ی تناسبی

---

در این فصل به طور خلاصه محیط نرم افزار PSIM معرفی شد. سعی شد که در مورد المان‌های پرکاربرد توضیحات بیشتری ارائه شود. سایر ابزارها و المان‌ها بوسیله‌ی مثال‌هایی که در فصل‌های بعدی مطرح می‌گردد که آشنایی کامل تری صورت می‌پذیرد. مثال‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که تا حد امکان نیازهای کاربران مبتدی تا پیشرفته را فراهم کند.

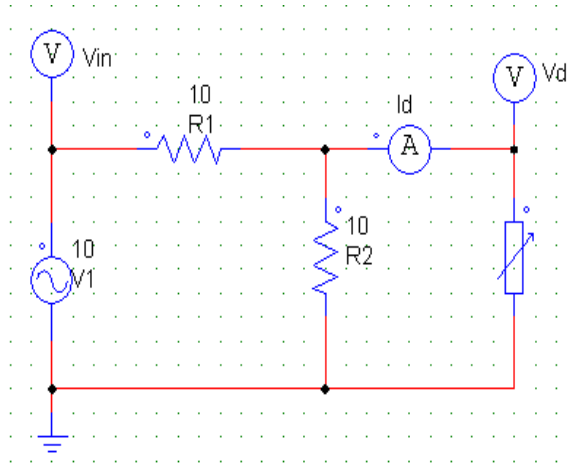
# فصل دوم

## شبیه‌سازی دیود غیر خطی

### ۲- مقدمه


در این فصل شبیه‌سازی یک دیود غیرخطی با معادله‌ی  $i = f(v)$  مشخص انجام خواهد گرفت و با ابزارهای موجود در پنجره‌ی Simview آشنا خواهید شد.

## ۲-۱- طرح مدار

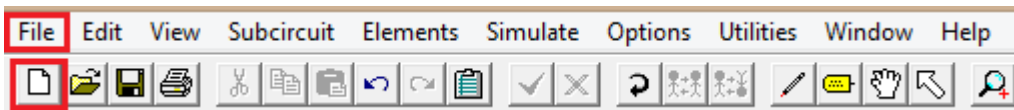


(شکل ۱.۲): مدار دیود غیر خطی

## ۲-۲- اجرای شبه سازی

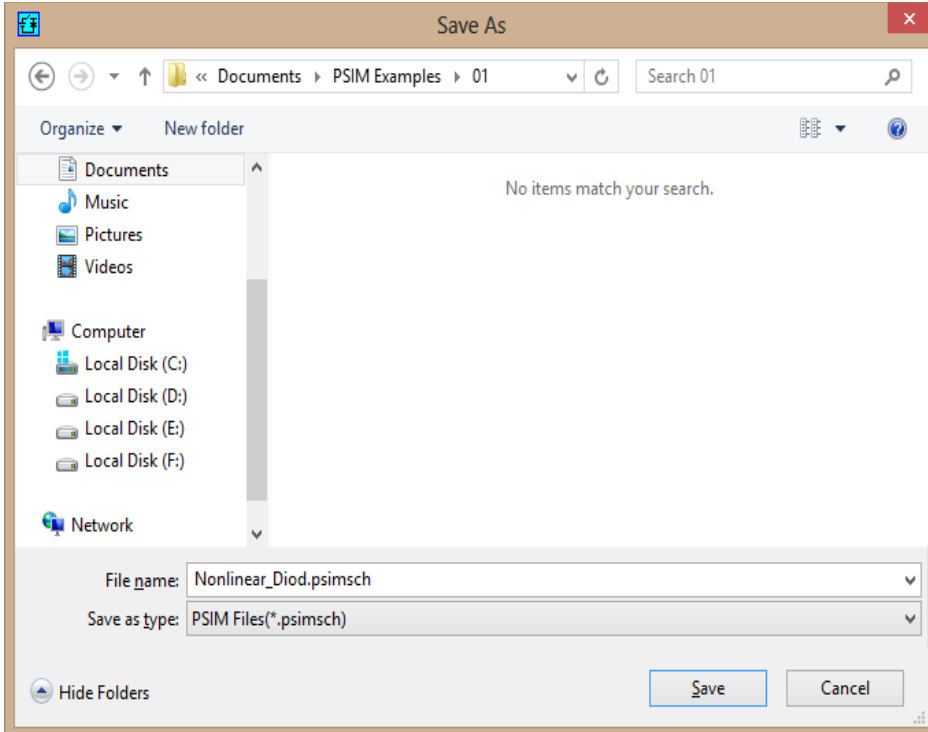
پس از باز کردن نرم افزار PSIM، با استفاده از ابزار  از نوار اصلی یا بوسیله ی مسیر

File → New یا با فشردن کلیدهای Ctrl+N یک پروژه ی جدید ایجاد می کنیم.



(شکل ۲.۲): مسیر ایجاد پروژه جدید

سپس از مسیر File → Save As شبیه سازی را در دایرکتوری مورد نظر ذخیره می کنیم. در این جا شبیه سازی با نام Nonlinear\_Diod ذخیره شده است.




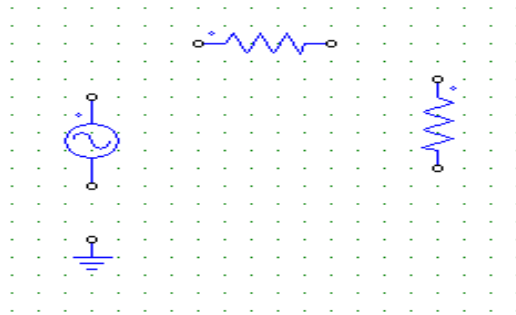
(شکل ۳.۲): مسیر ذخیره سازی و نام گذاری

المان های مورد نیاز برای این شبیه سازی را می توان از نوار ابزار المان ها طبق شکل زیر انتخاب کرد.



(شکل ۴.۲): نوار ابزار انتخاب المان

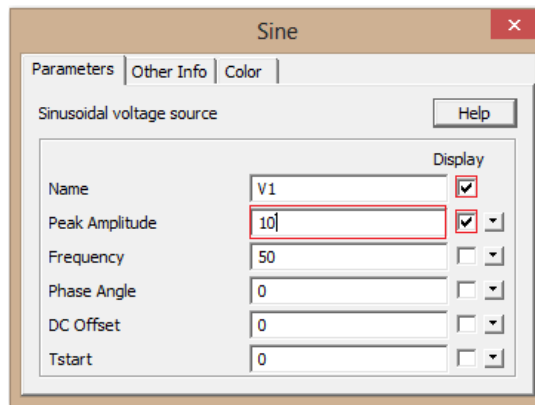
وقتی که یک المان را انتخاب کردیم و شکل ماوس به صورت آن المان درآمد، می توان با کلیک راست ماوس آن را چرخاند. اگر المان روی صفحه ی ترسیم مدار قرار داشته باشد، آن را انتخاب کرده و با استفاده از ابزار  از نوار ابزار اصلی آن را می چرخانیم. با توجه به نکات فوق، شکل اولیه ی مدار را به صورت زیر ترسیم می شود.



(شکل ۵.۲): المان های انتخاب شده

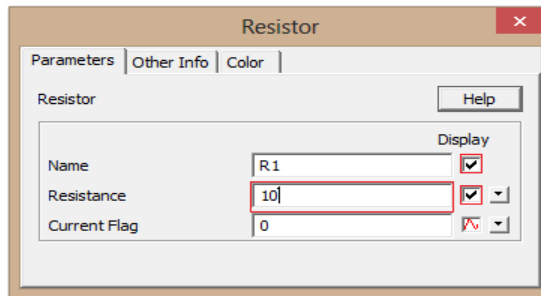
با دوبار کلیک کردن روی المان های فوق، پارامترهای آن ها را به صورت زیر تنظیم

می کنیم.

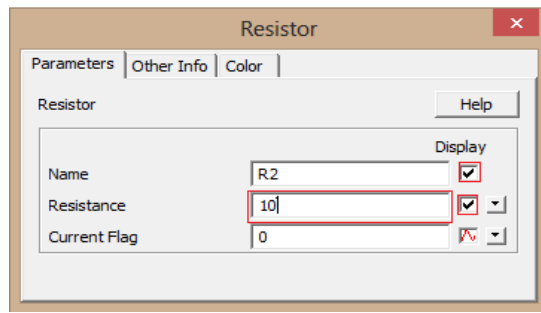


(شکل ۶.۲): تنظیم منبع ولتاژ





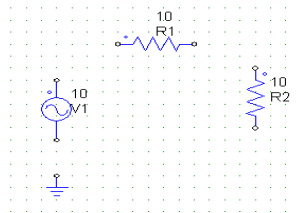
(شکل ۷.۲): تنظیم مقاومت سری




(شکل ۸.۲): تنظیم مقاومت موازی

باید در نظر داشت که اگر اندازه‌ی مقاومت به صورت ۱۰ نوشته شود، اندازه‌ی آن توسط نرم‌افزار ۱۰ کیلو اهم در نظر گرفته می‌شود، به عبارتی واحد تعریف شده مقاومت کیلو اهم می‌باشد یعنی برای اعمال مقاومت ۱۰ اهمی می‌بایست عدد ۰,۰۱ وارد شود.

پس از تنظیمات فوق مدار به شکل زیر در می‌آید:



(شکل ۹.۲): اعمال مقدار المان‌ها

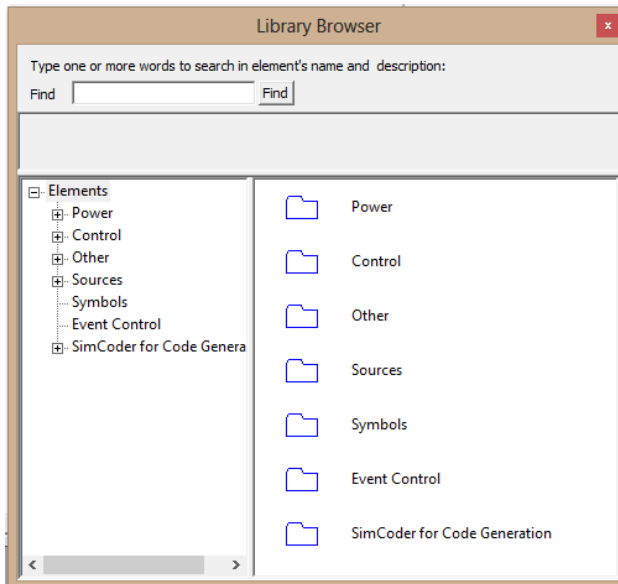
حال باید دیود را به مدار اضافه کنیم. در کتابخانه‌ی نرم‌افزار PSIM المان‌های غیر خطی نیز تعبیه شده است که در آن‌ها می‌توان رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان را به شکل‌های  $i=f(v)$  یا  $v=f(i)$  تعریف کرد، برای اضافه کردن این المان، ابزار  را از نوار ابزار اصلی انتخاب می‌کنیم. با این کار پنجره‌ای به شکل (۱۱.۲) باز می‌شود.



(شکل ۱۰.۲): مسیر انتخاب ابزار Library Browser

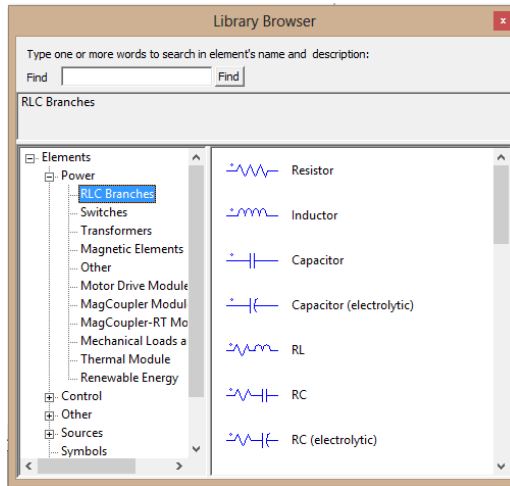
البته به این پنجره می‌توان بوسیله‌ی منوی  $\text{View} \rightarrow \text{Library Browser}$  نیز دسترسی

پیدا کرد.



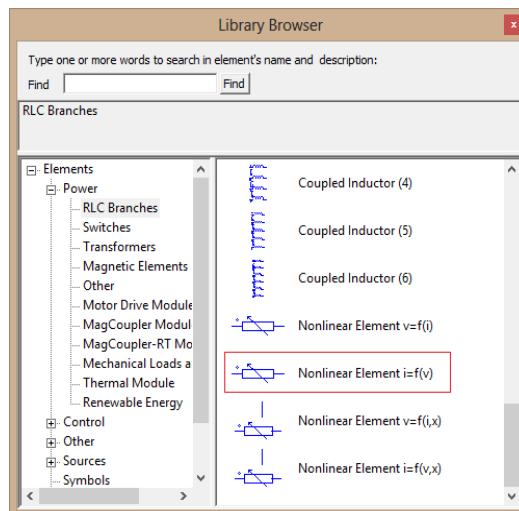
(شکل ۱۱.۲): منوی Library Browser

در سربرگ  $\text{Power} \rightarrow \text{Elements}$  قسمت RLC Branches را انتخاب می‌کنیم.



Library Browser : (شکل ۱۲.۲)

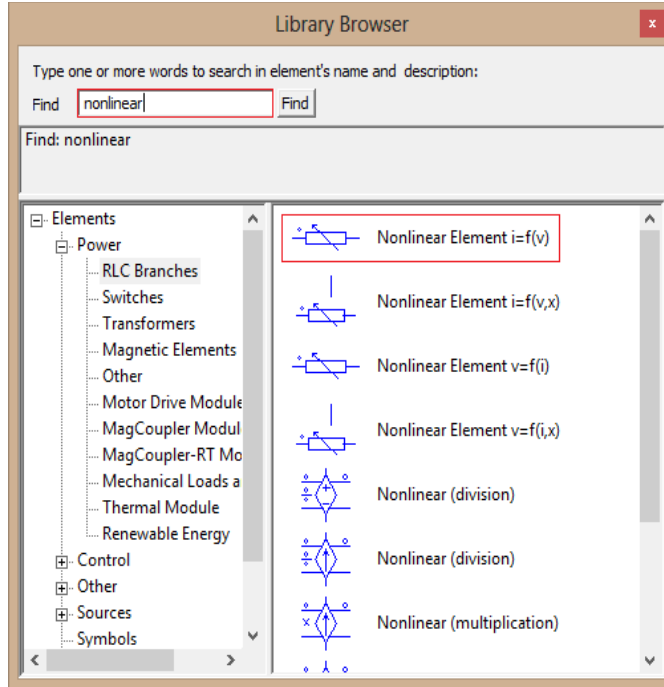
المان‌های غیر خطی در قسمت پایین لیست سمت راست قرار دارد. المانی را که در آن رابطه‌ی بین  $v$  و  $i$  به صورت  $i=f(v)$  تعریف می‌شود، با دوبار کلیک روی آن انتخاب کرده و در مدار قرار می‌دهیم.



Library Browser : (شکل ۱۳.۲)

باید در نظر داشت که می توان نام المان ها را در قسمت Find پنجره ی کتابخانه نیز

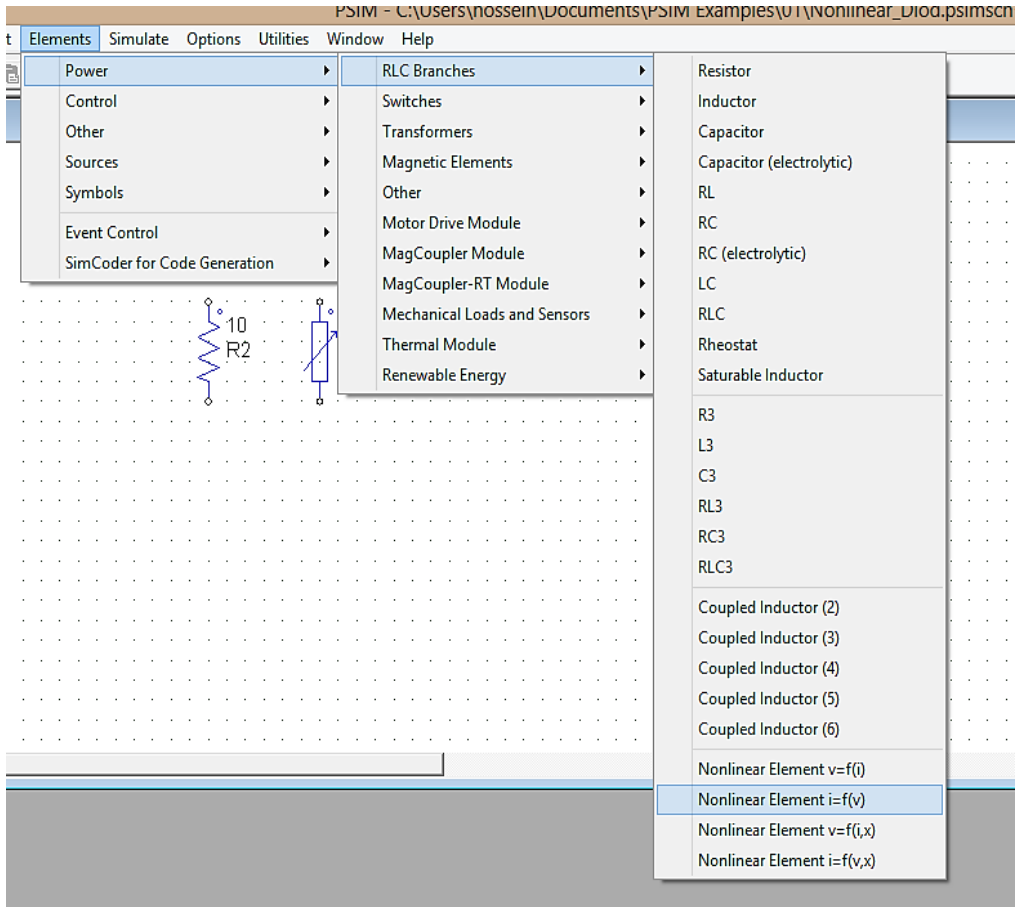
جستجو کرد.



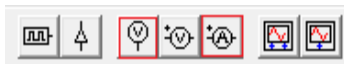
شکل ۱۴.۲: Library Browser

روش سومی که می توان بوسیله ی آن به المان ها دسترسی پیدا کرد، منوی Elements

است.

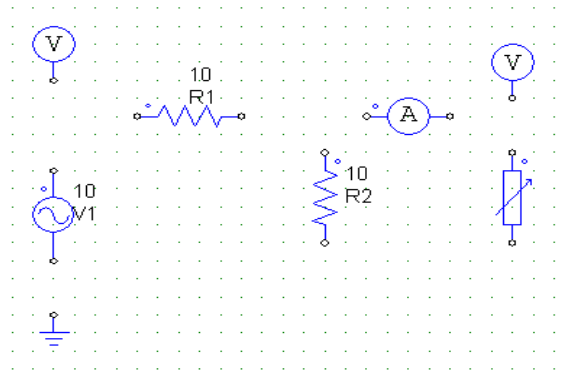


شکل ۱۵.۲: نوار ابزار Elements



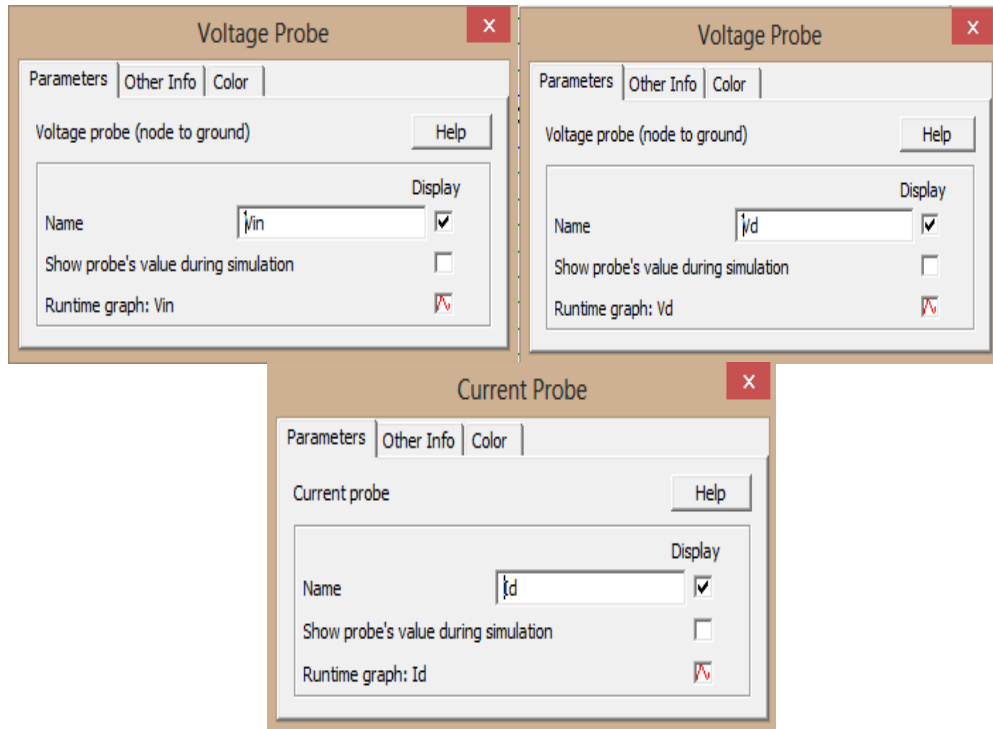
با اضافه کردن پروب‌های ولتاژ و جریان از نوار ابزار المان‌ها

مدار به شکل زیر در می‌آید.




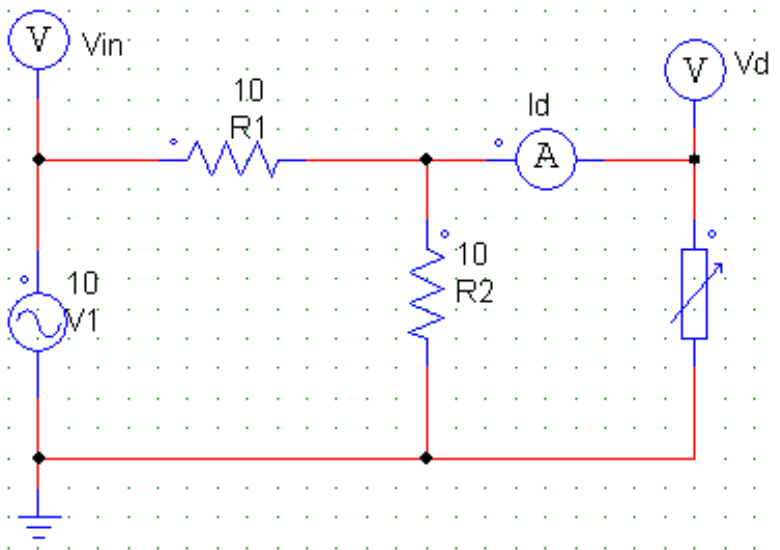
(شکل ۱۶.۲): اضافه کردن پروب‌های ولتاژ و جریان

با دوبار کلیک رو پروب‌های ولتاژ و جریان، نام آن‌ها را به صورت زیر تغییر می‌دهیم.



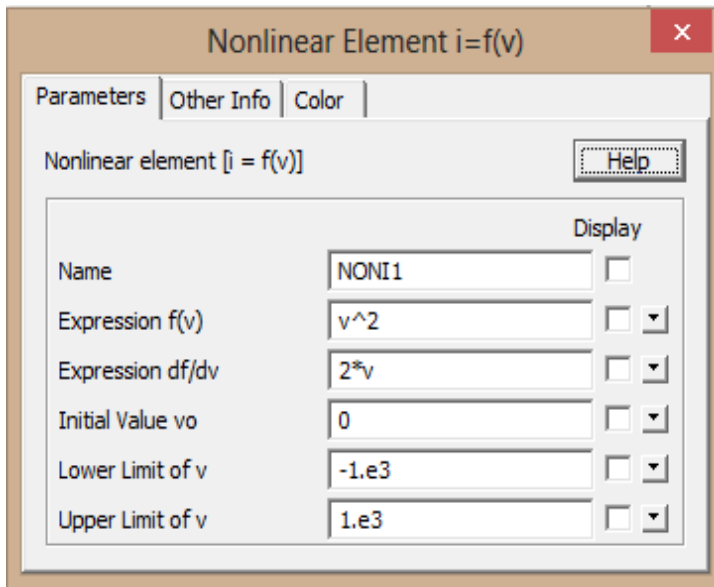
(شکل ۱۷.۲): تنظیمات پروب‌های ولتاژ و جریان

حال برای کشیدن سیم بین المان‌ها ابزار را  از نوار ابزار اصلی انتخاب می‌کنیم. برای کشیدن سیم بین دو نقطه کافی است که نشانگر را در نقطه‌ی اول قرار داده و سپس کلیک چپ ماوس را فشار می‌دهیم، هم‌چنان که کلیک چپ ماوس را نگه داشته‌ایم، نشانگر را به نقطه‌ی دوم می‌بریم. شکل زیر مدار کامل شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۸.۲): مدار تکمیل شده

حال فقط باید معادله‌ی المان غیر خطی را وارد کنیم تا شبیه‌سازی تکمیل شود. برای این منظور روی المان غیرخطی دوبار کلیک می‌کنیم، که پنجره‌ای به شکل زیر باز می‌شود.



(شکل ۱۹.۲): معادله‌ی المان غیر خطی

قسمت‌های مختلف این پنجره شامل:

Expression f(v): در این قسمت سمت راست معادله‌ی  $i=f(v)$  نوشته می‌شود.

Expression df/dv: از رابطه‌ی  $i=f(v)$  نسبت به  $v$  مشتق گرفته و حاصل را در این

قسمت می‌نویسیم.

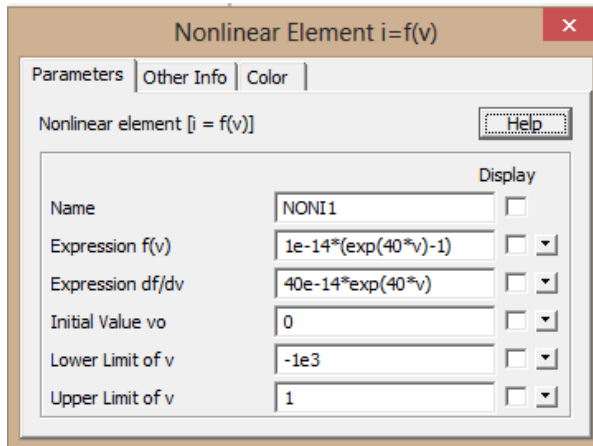
Initial Value v0: مقدار اولیه برای ولتاژ  $v$  در این قسمت تعریف می‌شود.

Lower Limit of v: حد پایین ولتاژ  $v$

Upper Limit of v: حد بالای ولتاژ  $v$




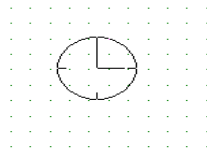
پس از اعمال تنظيمات، نتيجه به صورت زير خواهد بود:



(شکل ۲۰.۲): تنظیمات المان غیر خطی

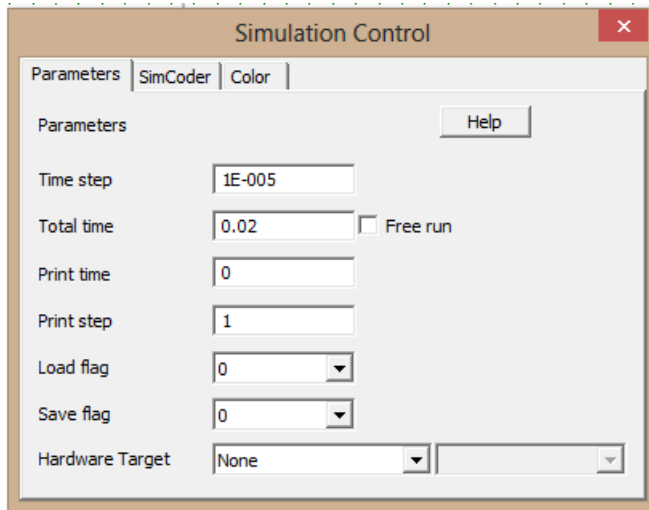
همانطور که می دانید  $e^{-۱۴}$  همان  $۱۰^{-۱۴}$  و  $\exp(۴۰*v)$  همان  $e^{۴۰*v}$  می باشد.

حال مدار آماده‌ی اجرا (Run) است. برای این کار کافی است روی ابزار  از نوار ابزار اصلی کلیک کنیم یا اینکه Run Simulation را از منوی Simulate انتخاب کنیم. پیش از اجرای شبیه سازی از منوی Simulate گزینه‌ی Simulation Control را انتخاب می کنیم، با این کار نشانگر ماوس به شکل ساعت در می آید، مطابق شکل زیر:



(شکل ۲۱.۲): Simulation Control

با کلیک چپ ماوس روی صفحه‌ی ترسیم، پنجره‌ی زیر باز می‌شود:




شکل ۲۲.۲: تنظیمات Simulation Control

گزینه‌های پرکاربرد موجود در این پنجره به شرح زیر است:

**Time step:** این گزینه فواصل بین زمان را مشخص می‌کند. در اینجا شبیه سازی با دقت  $10^{-5}$  ثانیه اجرا می‌شود.

**Total time:** کل زمان شبیه سازی در اینجا وارد می‌شود. برای شبیه سازی این مثال زمان ۰,۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. اگر تیک گزینه‌ی Free run زده شود،




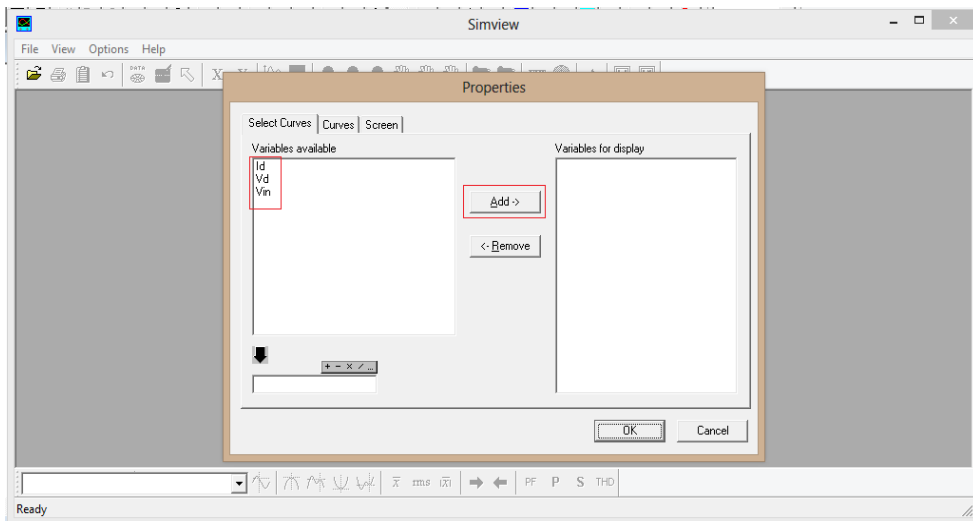
شبیه سازی تا بی نهایت ادامه پیدا می‌کند. در این حالت ابزار  به شکل

در می‌آید و با کلیک کردن روی آن می‌توان شبیه سازی را متوقف کرد.

Print time: عددی که جلوی این گزینه نوشته می شود زمانی را مشخص می کند که پس از آن شبیه سازی در خروجی نمایش داده می شود. برای مثال اگر در این قسمت عدد ۰,۰۱ درج شود، در خروجی فقط نتایج بین ۰,۰۱ ثانیه تا ۰,۰۲ ثانیه نمایش داده می شود.

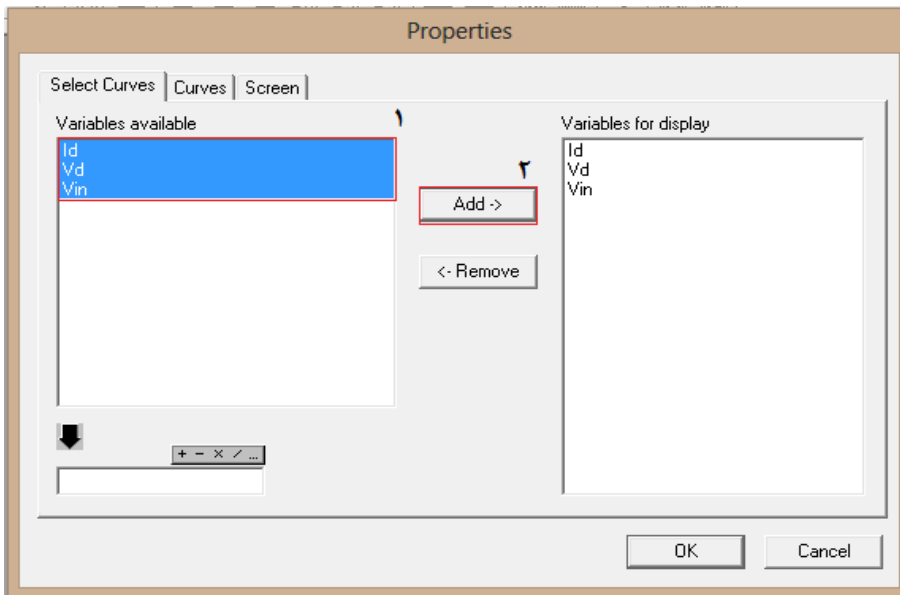
اطلاعات مربوط به سایر گزینه ها را می توان بوسیله ی Help موجود در این پنجره به دست آورد.

حال پنجره ی فوق را بسته و با انتخاب ابزار  شبیه سازی را اجرا می کنیم. پس از اتمام شبیه سازی اگر تیک Auto-run SIMVIEW در منوی Option زده شده باشد، پنجره ای به شکل (۲۳.۲) نمایش داده می شود.



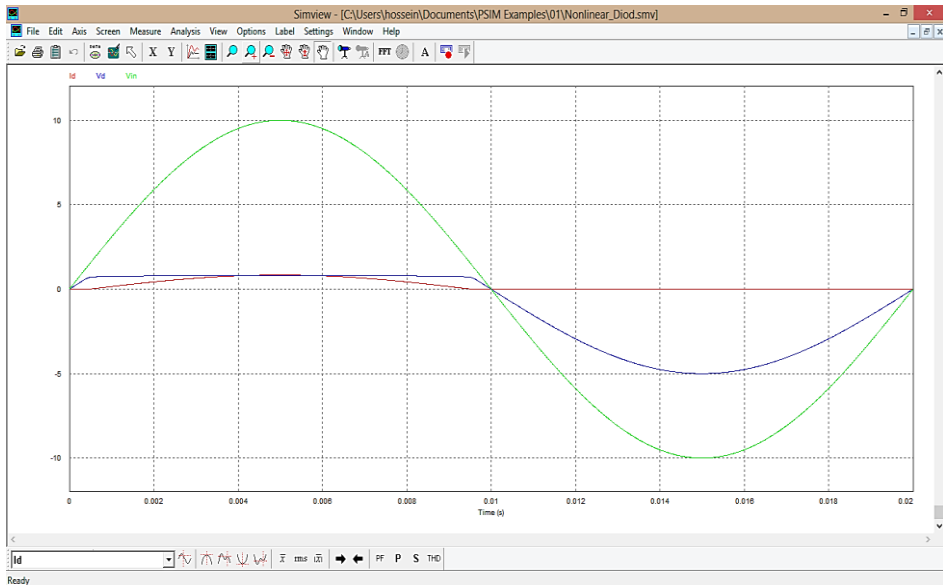
(شکل ۲۳.۲): پنجره تنظیمات المان های قابل نمایش

در قسمت Variables available متغیرهایی که قابل نمایش هستند درج شده‌اند که همان نام پروب‌های ولتاژ و جریان هستند. برای نمایش آن‌ها در خروجی کافی است یک بار روی آن‌ها کلیک کرده و سپس گزینه‌ی Add را بزنیم.





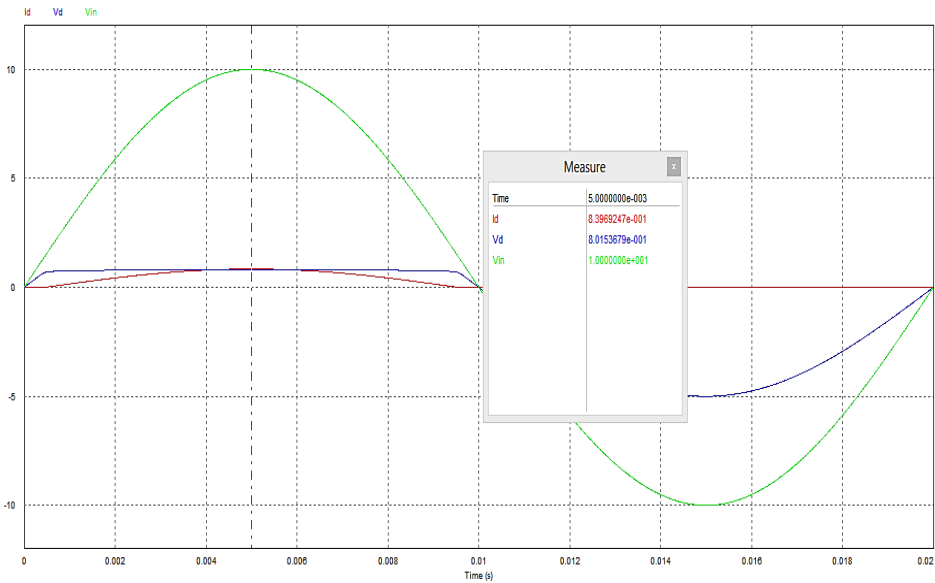
(شکل ۲۴.۲): Variables available

پس از زدن OK شکل زیر نمایش داده می‌شود که در آن منحنی سبز Vin، منحنی آبی Vd و منحنی قرمز Id را نشان می‌دهد.



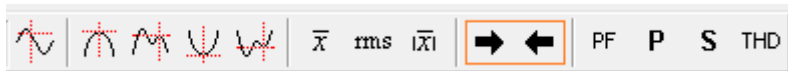
(شکل ۲۵.۲): نمایش شکل موج های مدار

در ادامه با ابزار موجود در پنجره‌ی SIMVIEW بیشتر آشنا خواهیم شد. برای مشاهده‌ی مقادیر دقیق منحنی‌ها ابزار  را از نوار ابزار انتخاب کرده و سپس روی منحنی کلیک می‌کنیم. با این کار مقادیر هر سه منحنی به همراه زمان، در پنجره‌ی کوچکی نمایش داده می‌شود. با این کار ابزار  نیز فعال شده و با کلیک روی آن مقادیری که در پنجره‌ی Measure وجود دارند روی منحنی‌ها درج می‌شوند.



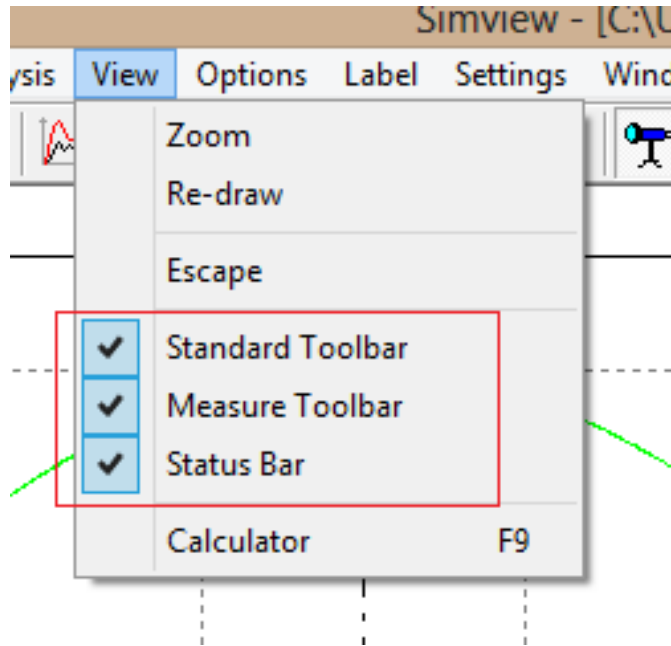
(شکل ۲۶.۲): ابزار نمایش دقیق منحنی ها

برای مشاهده‌ی مقادیر منحنی در سایر نقاط کافی است که در قسمت مورد نظر کلیک کنیم. به منظور جابجایی دقیق تر خط اندازه‌گیری می‌توان از علامت‌های فلش موجود در پایین پنجره‌ی Simview استفاده کرد.




(شکل ۲۷.۲): ابزار جابجایی دقیق تر خط اندازه‌گیری

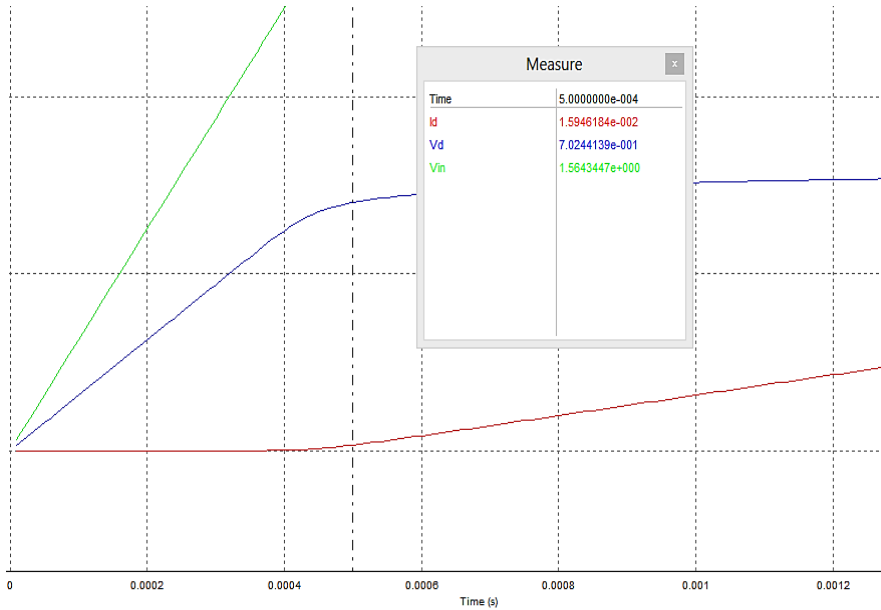
باید در نظر داشت که این ابزارها را می‌توان از منوی View فعال یا غیرفعال کرد.



(شکل ۲۸.۲): منوی View

حال به منحنی‌های به‌دست آمده بازمی‌گردیم تا آن‌ها را تحلیل کنیم. همانطور که مشخص است در نیم سیکل اول دیود به‌طور مستقیم بایاس شده و افت ولتاژ داخلی آن  $0/8$  ولت و جریان عبوری از آن  $0/84$  آمپر است. برای بزرگنمایی روی منحنی‌ها می‌توان از ابزارهای  استفاده کرد.

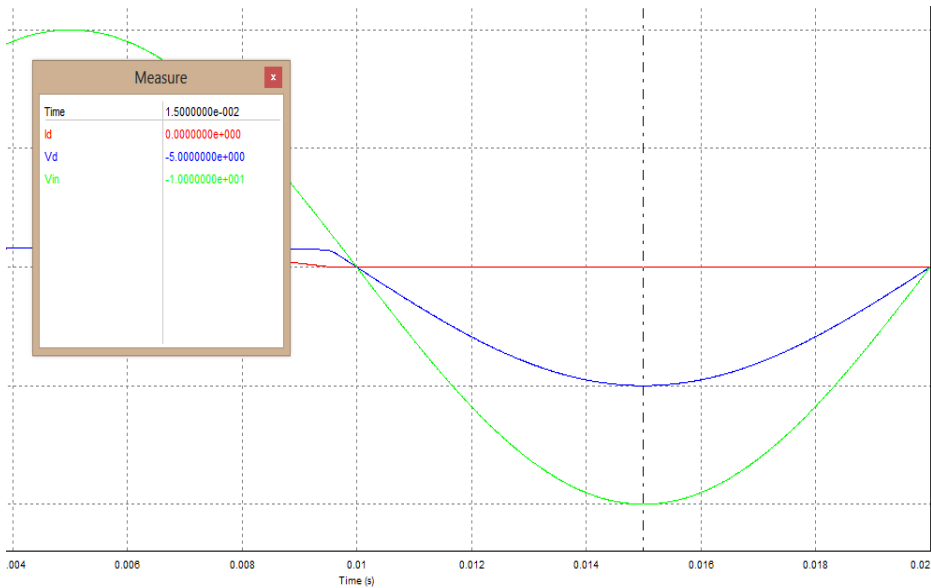
با بزرگنمایی در زمان‌های اولیه‌ی شبه‌سازی، شکل زیر به دست می‌آید.



(شکل ۲۹.۲): شکل موج خروجی در بازه زمانی معین

همانطور که مشخص است تا زمانی که ولتاژ دیود به  $0.7$  ولت نرسیده است، جریان آن همچنان صفر است. به محض اینکه ولتاژ به  $0.7$  ولت می‌رسد، دیود روشن شده و جریان شروع به افزایش می‌کند. شکل زیر نیم‌سیکل دوم منحنی‌ها را نشان می‌دهد. در این حالت دیود بایاس معکوس شده و در نتیجه جریان آن برابر صفر و ولتاژ آن برابر ولتاژ دو سر مقاومت  $R_2$  است.

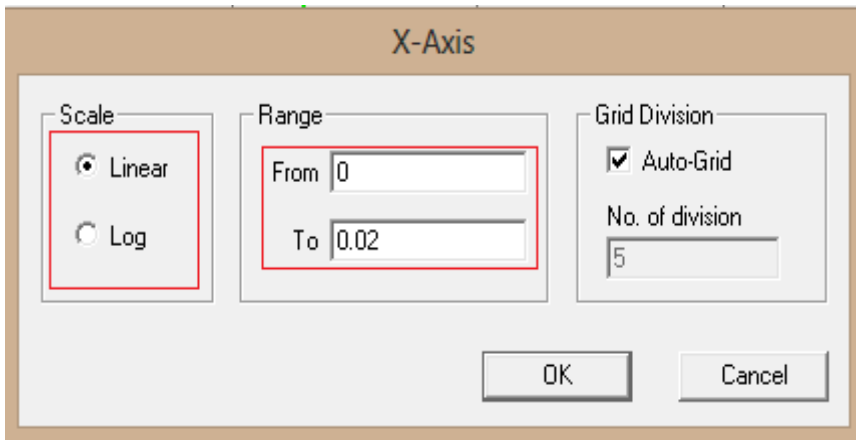




(شکل ۳۰.۲): نیم سیکل دوم شکل خروجی

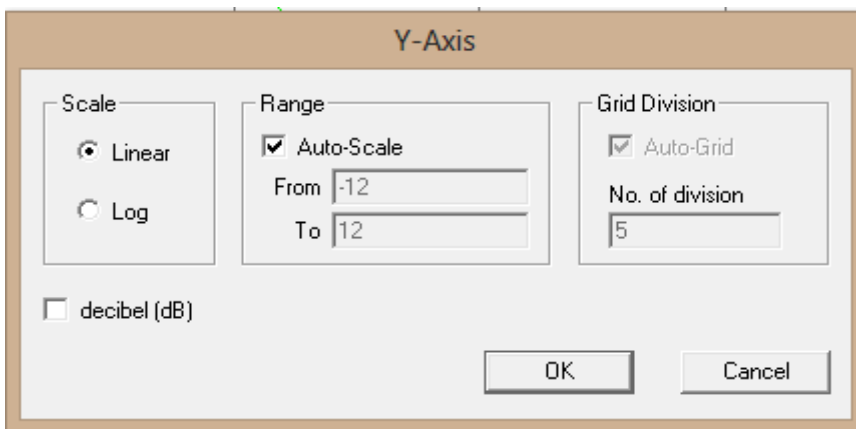
همانطور که ملاحظه می شود نرم افزار PSIM می تواند تحلیل دقیقی از رفتار مدارهای الکتریکی ارائه دهد. در ادامه توضیحاتی در خصوص سایر ابزارهای موجود در پنجره ی Simview خواهیم داد.

به منظور تنظیمات مربوط به محورهای X و Y می توان از ابزارهای **X** و **Y** موجود در نوار ابزار پنجره ی Simview استفاده کرد. تنظیمات موجود برای محور X به صورت زیر است:




(شکل ۳۱.۲): تنظیمات محور X

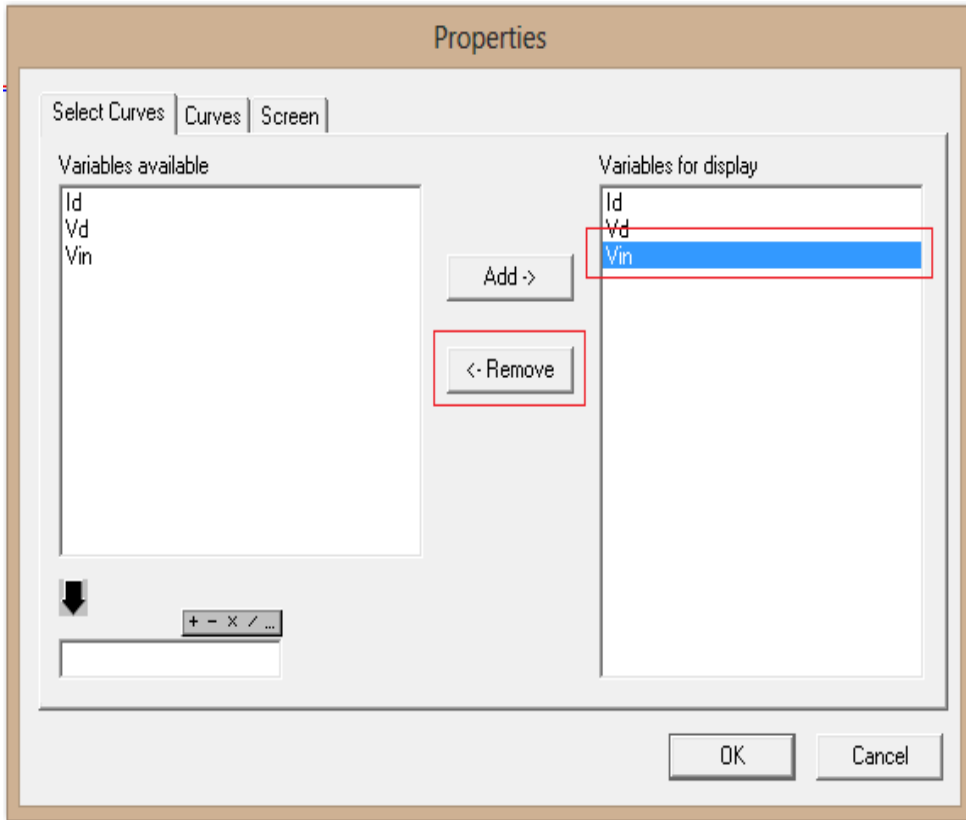
در قسمت Range می‌توان محدوده‌ی نمایش داده شده توسط محور X را مشخص کرد که در اینجا از صفر تا ۰/۰۲ ثانیه است. هم‌چنین در بخش Scale با انتخاب Log می‌توان محور X را به صورت لگاریتمی ترسیم کرد. شکل زیر تنظیمات مربوط به محور Y را نشان می‌دهد:




(شکل ۳۲.۲): تنظیمات محور Y

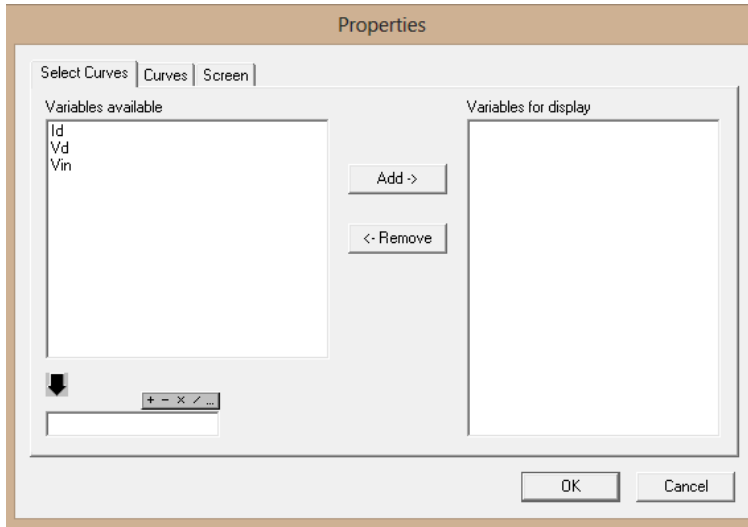
تنظیمات مربوط به محور Y نیز مشابه تنظیمات محور X است با این تفاوت که برای تنظیمات مربوط به بخش Range گزینه‌ی Auto-Scale نیز وجود دارد که با استفاده از آن محدوده‌ی محور Y به صورت خودکار تنظیم می‌شود. در قسمت Scale نیز می‌توان محور Y را به صورت لگاریتمی ترسیم کرد. همچنین اگر تیک مربوط به decibel (dB) زده شود، محور Y برحسب دسیبل رسم می‌شود.

با زدن ابزار  پنجره‌ی زیر باز می‌شود که همان پنجره‌ی مربوط به رسم متغیرهاست. اگر متغیر دیگری بود که آن را رسم نکرده بودیم، می‌توانستیم آن را انتخاب کرده و به متغیرهای سمت راست اضافه کنیم. با زدن OK منحنی‌های جدید به منحنی موجود اضافه می‌شود. همچنین می‌توان برای حذف منحنی‌ها، متغیر مربوط به آن را از لیست سمت راست انتخاب کرده و با زدن Remove آن را حذف کرد. برای مثال در این جا منحنی مربوط به Vin را حذف می‌کنیم، با زدن OK تغییرات اعمال می‌شود.



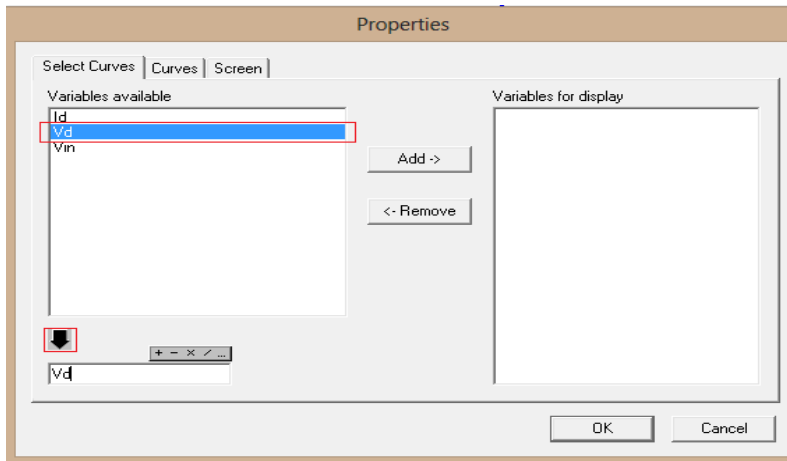
(شکل ۳۳.۲): تنظیمات Properties

با استفاده از ابزار  دوباره پنجره‌ای به شکل زیر نمایش داده می‌شود و با استفاده از آن می‌توان منحنی‌های جدید را رسم کرد با این تفاوت که منحنی‌های جدید در محورهای جداگانه نمایش داده می‌شوند که در شکل (۳۴.۲) نمایش داده شده است.




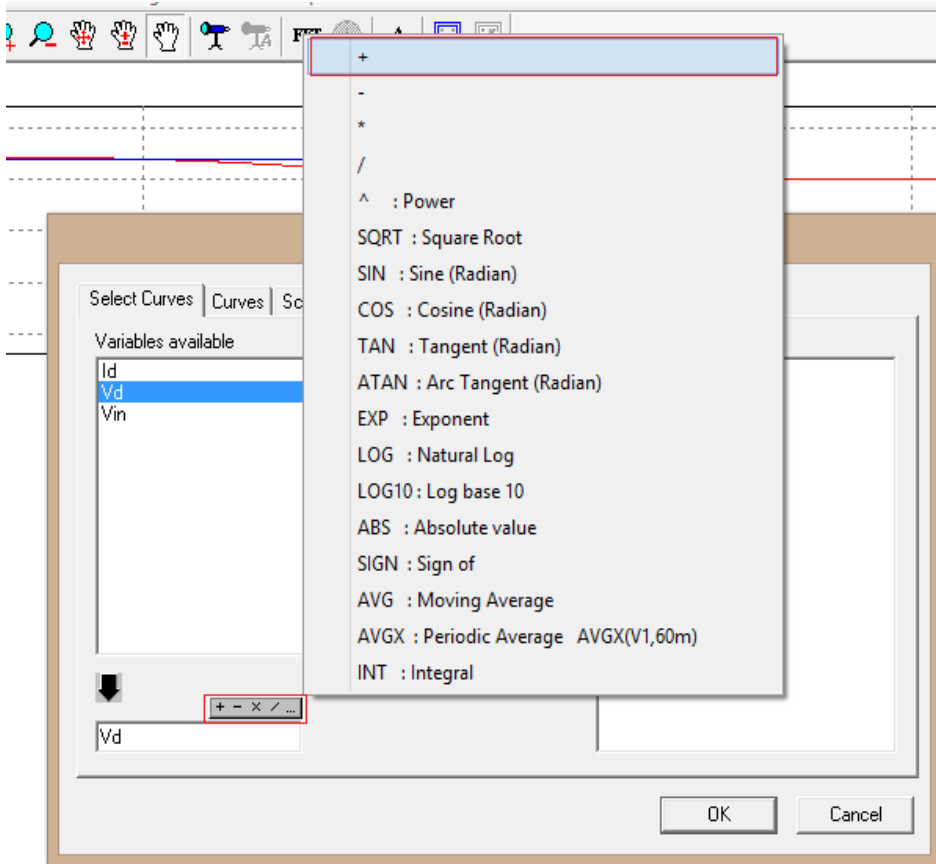
شکل ۳۴.۲: تنظیمات Properties

برای مثال در این جا می‌خواهیم منحنی‌های  $Vd+Id$  و قدر مطلق  $Vd$  را رسم کنیم. برای این کار  $Vd$  را از لیست سمت چپ انتخاب کرده علامت فلش موجود در قسمت پایین پنجره را می‌زنیم. با این کار متغیر  $Vd$  به کادر پایین منتقل می‌شود.



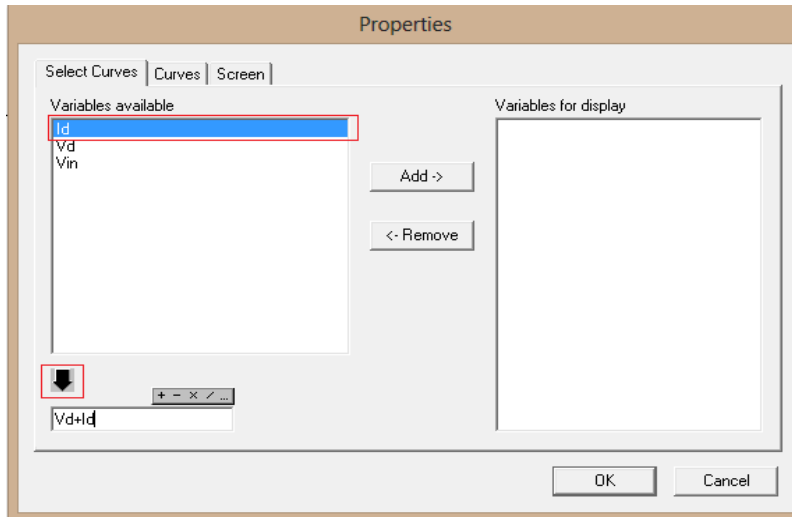
شکل ۳۵.۲: تنظیمات Properties

برای انتخاب عملگر ریاضی می‌توان روی علامت  کلیک کرده و نوع عملگر را انتخاب کرد.



(شکل ۳۶.۲): انتخاب عملگر ریاضی

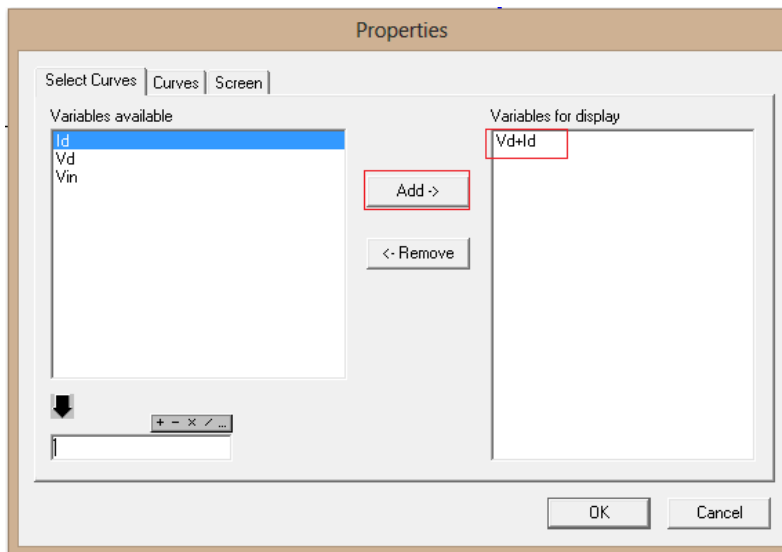
سپس از قسمت Variables available، Id را نیز به کادر پایین منتقل می‌کنیم.




شکل ۳۷.۲: تنظیمات Properties

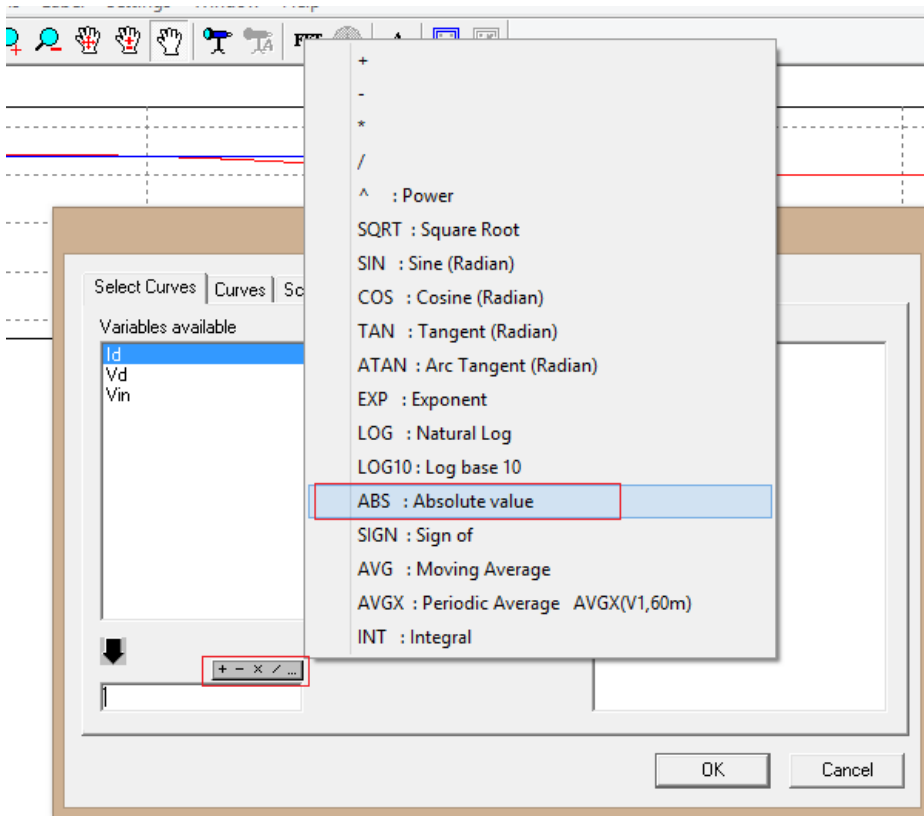
با زدن Add معادله‌ی نوشته شده در کادر پایین به قسمت Variables for display

منتقل می‌شود.



شکل ۳۸.۲: تنظیمات Properties

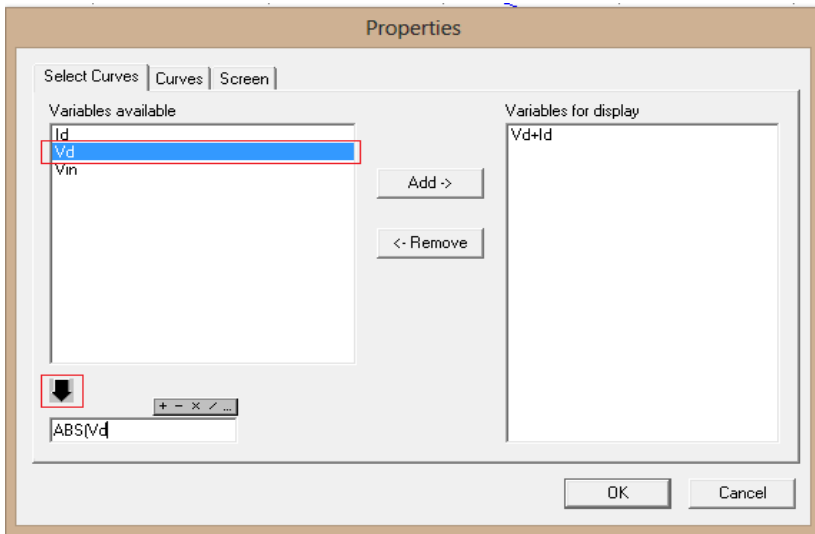
برای رسم قدر مطلق  $V_d$  ابتدا روی علامت  کلیک کرده و گزینه‌ی ABS (به معنی قدر مطلق) را انتخاب می‌کنیم.



(شکل ۳۹.۲): عملگر ریاضی

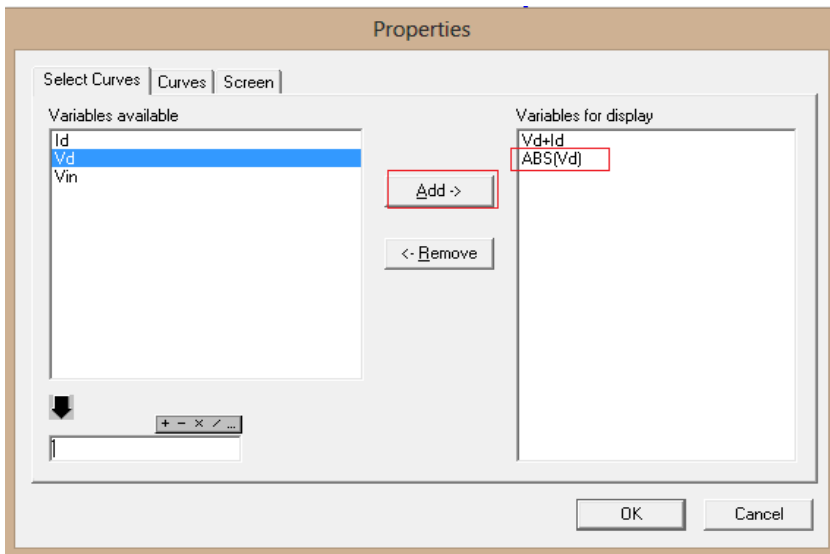
سپس  $V_d$  را از لیست سمت چپ به کادر پایین منتقل می‌کنیم.





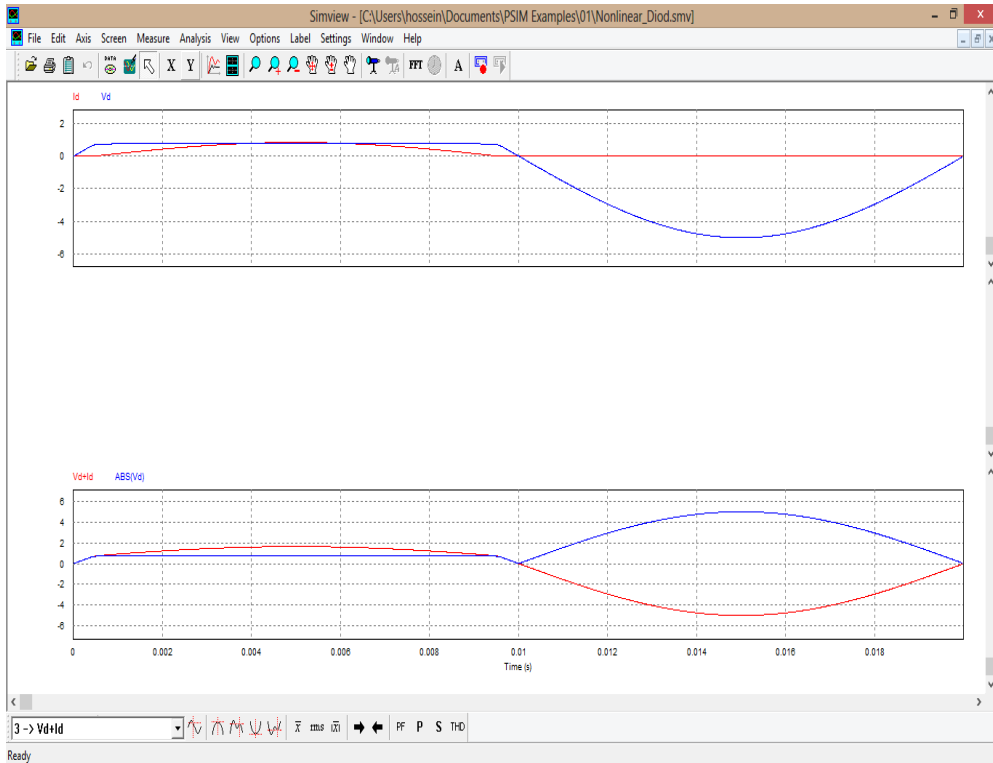
(شکل ۴۰.۲): تنظیمات Properties

پرانتر را با استفاده از کلیدهای Shift+o بسته و گزینه‌ی Add را می‌زنیم.



(شکل ۴۱.۲): تنظیمات Properties

سایر عملیات ریاضی بر روی نمودارها نیز با این روش انجام می شود. با زدن دکمه‌ی OK منحنی‌ها به صورت زیر نمایش داده می شوند.



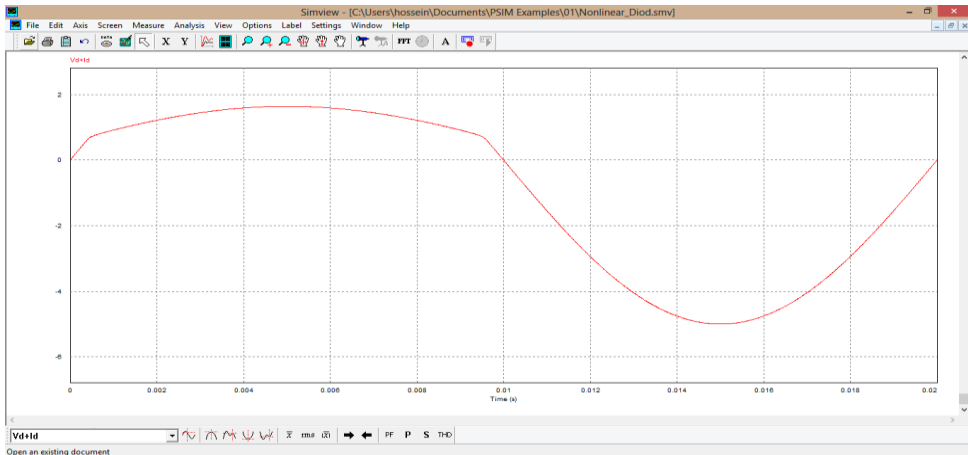
(شکل ۴۲.۲): نمایش منحنی های خروجی

حال همه‌ی منحنی‌ها را حذف کرده و فقط منحنی  $V_d + I_d$  را نگه می داریم.



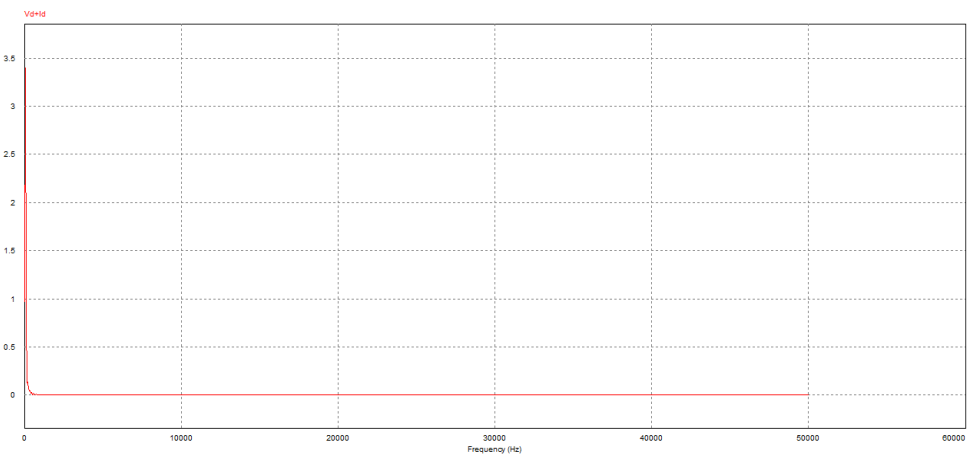
نکته: به منظور تطبیق منحنی‌ها با صفحه‌ی نمایش می توان از

استفاده کرد.



(شکل ۴۳.۲): استفاده از ابزار تطبیق منحنی ها

با استفاده از ابزار **FFT** می توان مولفه های فرکانسی موجود در شکل موج را مشاهده کرد. با این کار نمودار زیر نمایش داده می شود که محور افقی، فرکانس و محور عمودی، اندازه ی مولفه ی مربوط به آن فرکانس را نشان می دهد.

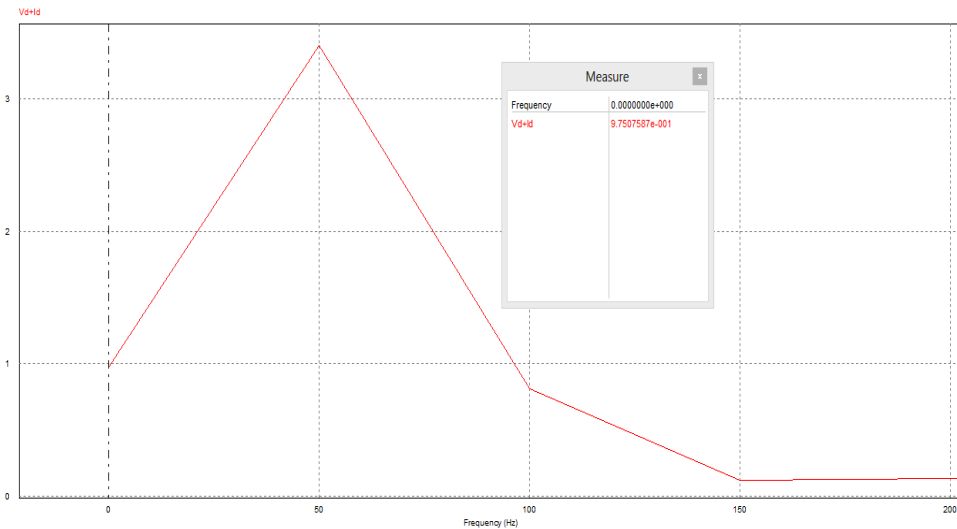


(شکل ۴۴.۲): FFT



برای فهم بهتر نمودار، روی فرکانس های پایین بزرگنمایی کرده و از ابزار

برای نمایش دقیق تر مقادیر استفاده می کنیم.



(شکل ۴۵.۲): نمایش دقیق مقادیر

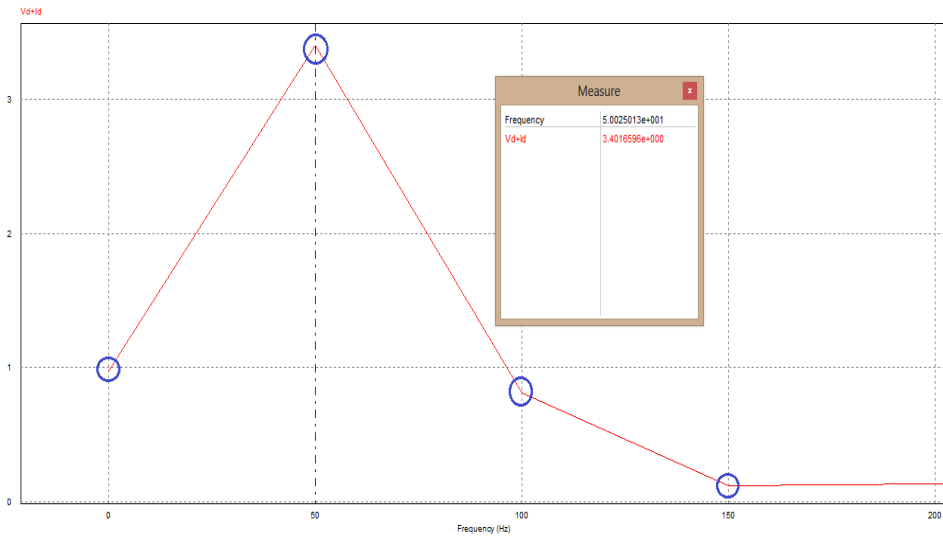
همانطور که ملاحظه می شود اندازه ی مولفه ی DC برابر  $0/975$  است. برای مشاهده ی

سایر مولفه ها می توان از علامت های  استفاده کرد. لازم به ذکر است

که فقط نقاطی که در آن ها شکستگی وجود دارد جزء مولفه های فرکانسی هستند

(مولفه های فرکانسی مضارب صحیحی از فرکانس شکل موج اصلی هستند که در اینجا


این فرکانس  $50$  هرتز است).



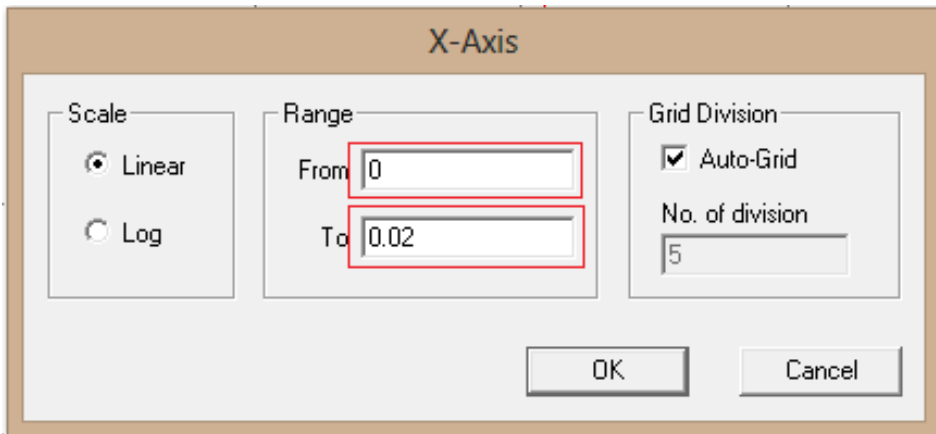
(شکل ۴۶.۲): نمایش نقاط مولفه های فرکانسی

بنابراین مولفه های فرکانسی موجود در شکل موج  $V_d + I_d$  به صورت جدول زیر است:

دامنه	فرکانس
۰/۹۷۵	۰
۳/۴	۵۰
۰/۸۰۹	۱۰۰
۰/۱۲۲	۱۵۰
۰/۱۳۷	۲۰۰
...	...

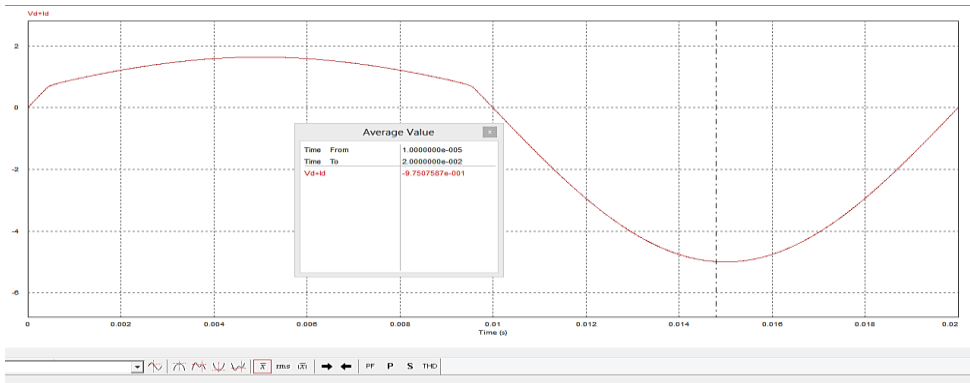
برای نمایش منحنی در حوزه‌ی زمان می‌توان از ابزار  استفاده کرد. با استفاده از ابزارهای  $\bar{x}$  rms  $\bar{x}$  که در قسمت پایین پنجره‌ی Simview موجود هستند، می‌توان به ترتیب از راست به چپ مقدار متوسط قدر مطلق نمودار، مقدار موثر نمودار و مقدار متوسط نمودار را به دست آورد.

نقطه‌ی شروع و پایان محاسبات بوسیله‌ی تنظیمات محور X مشخص می‌شوند. روی ابزار  $\bar{x}$  کلیک کرده و نقاط شروع و پایان را به ترتیب در صفر و  $0.02$  تنظیم می‌کنیم. با این کار مقادیر متوسط و موثر در محدوده‌ی زمانی صفر تا  $0.02$  ثانیه محاسبه می‌شوند.



(شکل ۴۷.۲): تنظیمات محور X

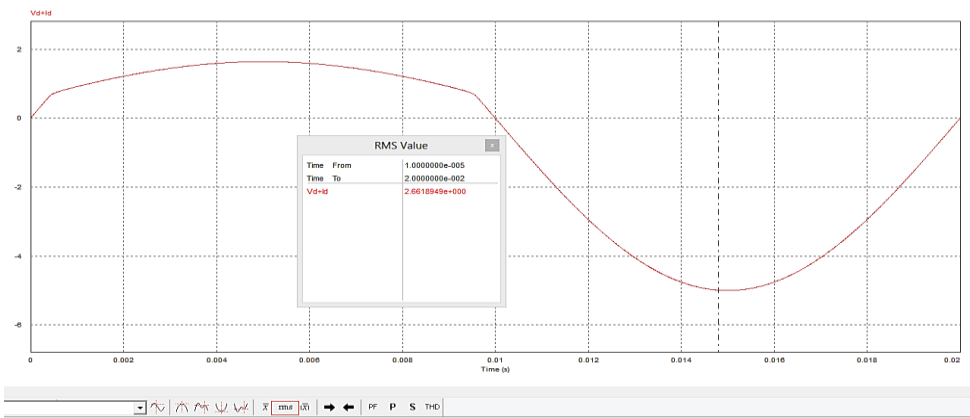
حال روی ابزار  $\bar{x}$  کلیک می‌کنیم تا مقدار متوسط نمودار محاسبه شود.



(شکل ۴۸.۲): نمایش مقدار متوسط نمودار

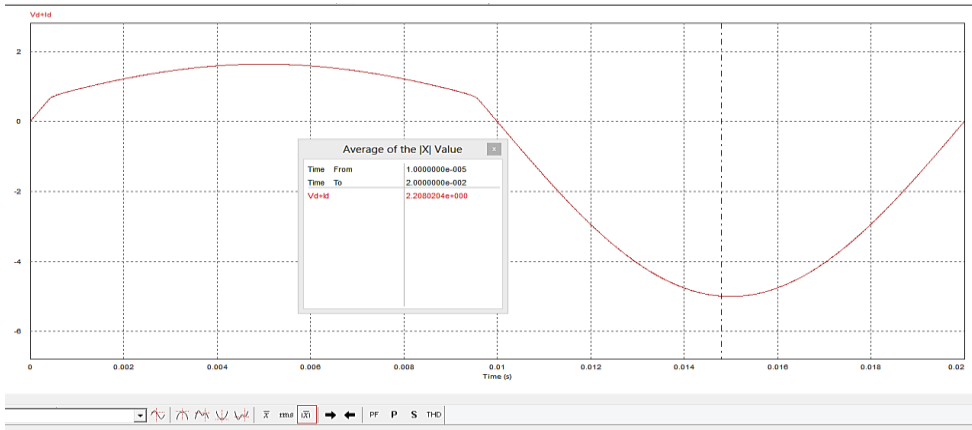
همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار متوسط بین زمان‌های صفر تا  $0.02$  ثانیه برابر  $-0.975$  است.

برای محاسبه‌ی مقدار rms روی ابزار **rms** کلیک می‌کنیم که مقدرا rms شکل موج برابر خواهد بود با  $2.66$ .



(شکل ۴۹.۲): محاسبه مقدار rms

مقدار متوسط قدر مطلق شکل موج نیز برابر ۲/۲۱ است.



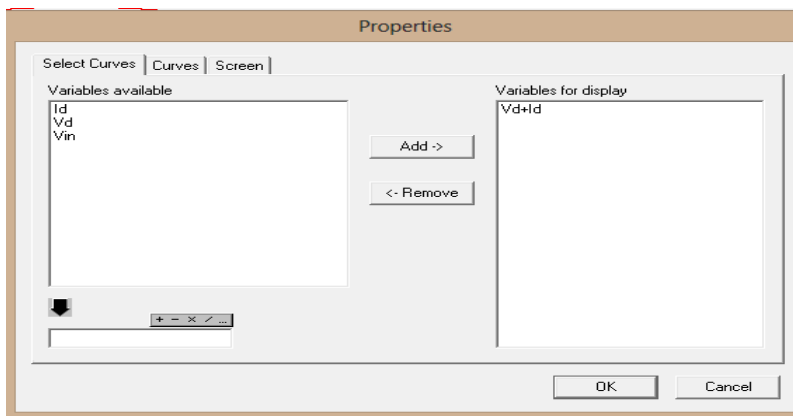
(شکل ۵۰.۲): محاسبه مقدار متوسط قدر مطلق

حال در پایان می‌خواهیم منحنی  $i-v$  مربوط به دیود را رسم کنیم. برای این کار ابزار

را انتخاب کرده یا روی منحنی دوبار کلیک می‌کنیم. با این کار پنجره‌ی آشنای



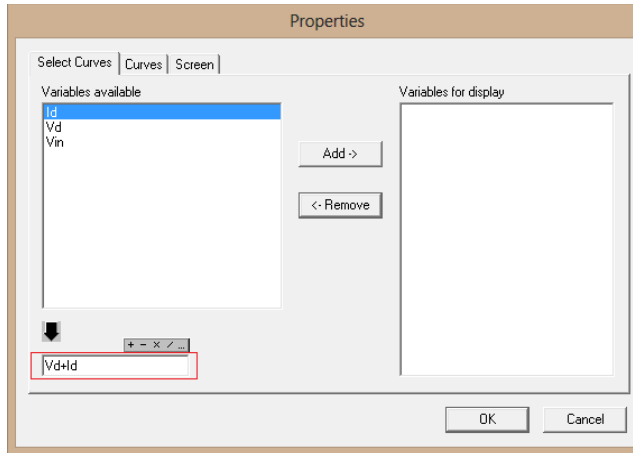
زیر نمایش داده می‌شود.



(شکل ۵۱.۲): تنظیمات Properties



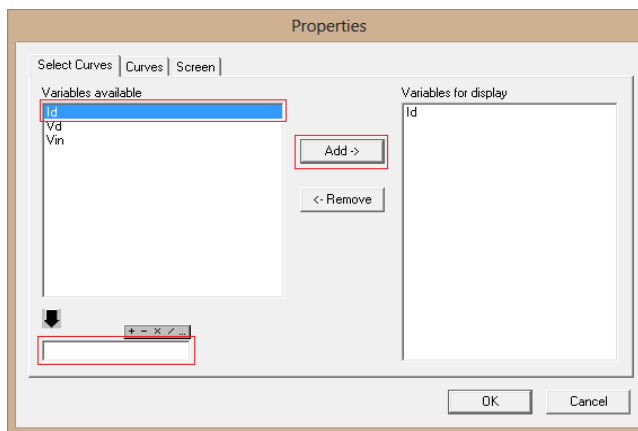
از لیست سمت راست عبارت  $Vd+Id$  را انتخاب کرده و Remove را می‌زنیم. با این کار این عبارت به کادر سمت چپ و پایین منتقل می‌شود.



(شکل ۵۲.۲): تنظیمات Properties

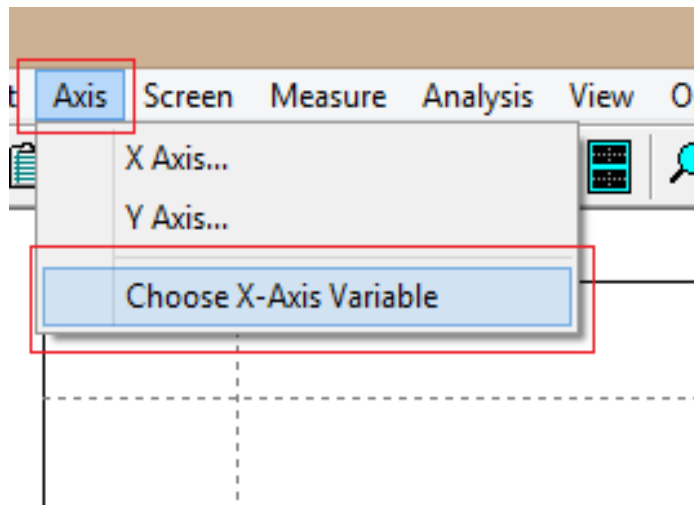
حال عبارت  $Vd+Id$  را از این کادر نیز delete می‌کنیم. سپس Id را به لیست سمت

راست Add می‌کنیم.



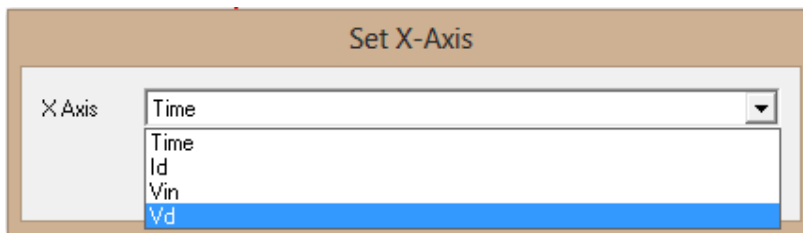
(شکل ۵۳.۲): تنظیمات Properties

حال گزینه OK را می‌زنیم. با این کار نمودار Id بر حسب زمان رسم می‌شود. برای اینکه منحنی  $i-v$  را رسم کنیم باید محور افقی به جای زمان بر حسب  $V_d$  باشد. برای تغییر محور افقی به منوی Axis رفته و گزینهی Choose X-Axis Variable را انتخاب می‌کنیم.



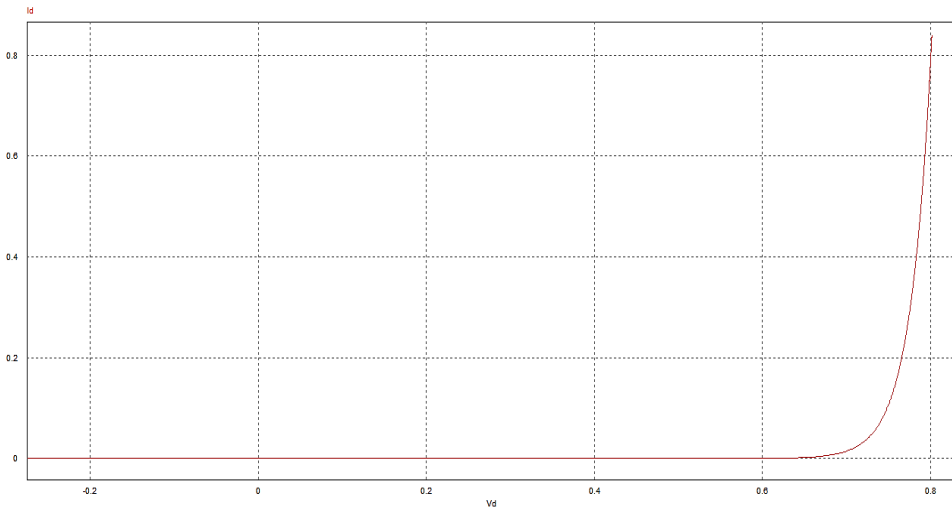
(شکل ۵۴.۲): منوی Axis

با این کار پنجره‌ی زیر باز می‌شود. از کادر کشویی موجود متغیر  $V_d$  را انتخاب می‌کنیم.



(شکل ۵۵.۲): تنظیمات محور X

با اين كار نمودار  $i-v$  مربوط به ديود به صورت زير رسم مى شود.



(شكل ۵۶.۲): نمودار  $i-v$  ديود

در اين فصل شبيه سازى يك المان غير خطى (ديود) با معادله  $i=f(v)$  مشخص شبيه سازى شده و قابليت هاي مهم پنجره *Simview* كه مربوط به نمايش منحنى هاي خروجى است، توضيح داده شد. سعى شد كه روند شبيه سازى با جزئيات بالا تشریح شود تا کاربران مبتدى نيز بتوانند با روند شبيه سازى آشنا شوند. بديهى است كه در فصل هاي بعدى فقط نكات جديد توضيح داده خواهد شد.



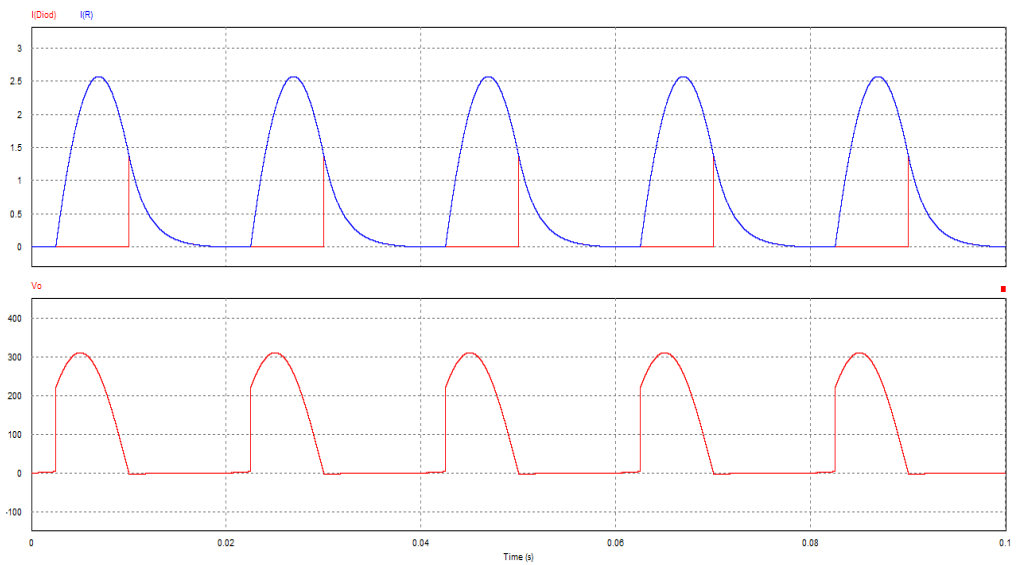
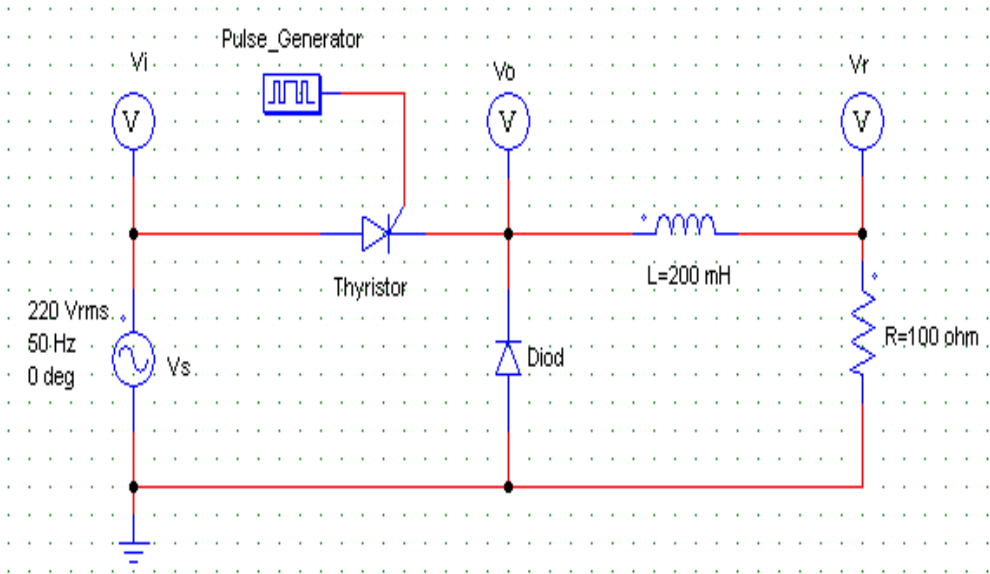
## فصل سوم

# کنترل یک سوئیچ تریستوری

### ۳- مقدمه

در این فصل کنترل یک سویچ تریستوری با استفاده از تولیدکننده‌ی پالس مطرح می‌گردد همچنین با کنترل‌کننده‌ی سوئیچ آلفا آشنا خواهیم شد.

### ۳-۱- طرح مدار







(شکل ۱.۳): شمای کلی مدار

## ۳-۲- اجرای شبیه‌سازی

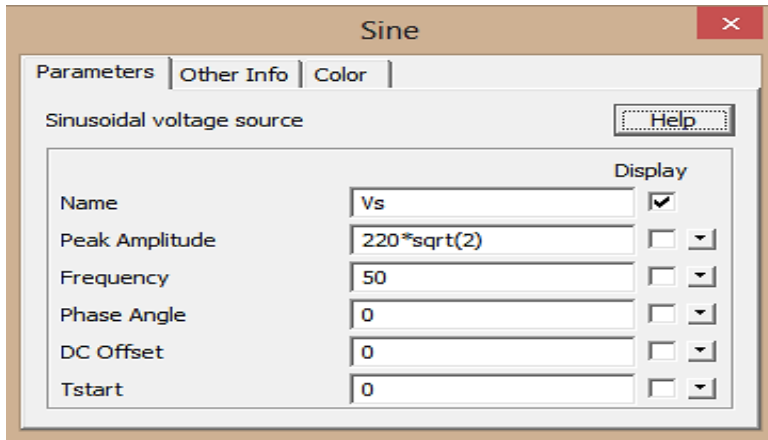
با استفاده از المان‌های موجود در نوار ابزار المان، مدار شکل فوق را رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۳): انتخاب المان‌ها از نوار ابزار

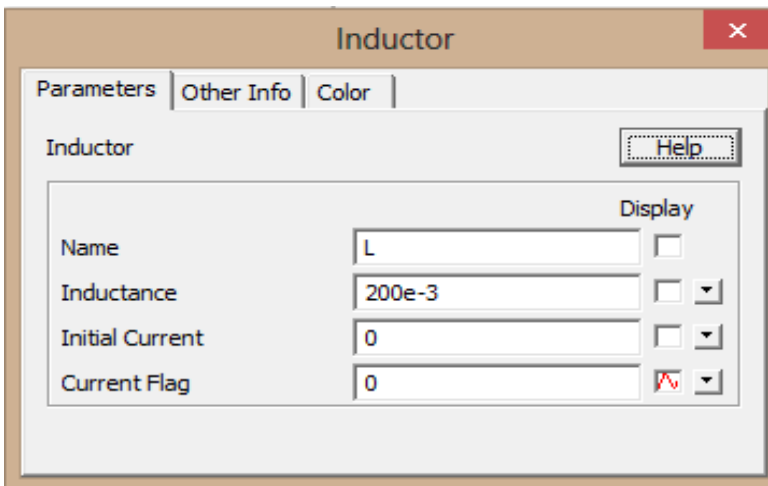
نکته: پس از قرار دادن تریستور در صفحه‌ی ترسیم، شکل آن بصورت  می‌باشد. برای اینکه گیت آن را به سمت بالا بچرخانیم، با استفاده از ابزار  آن را انتخاب کرده و با کلیک روی علامت  آن را به شکل  در می‌آوریم.

تنظیمات مربوط به منبع ولتاژ، سلف و مقاومت را مطابق اعداد نوشته شده در شکل انجام می‌دهیم. باید در نظر داشت که اندازه‌ی ولتاژ منبع سینوسی بر حسب rms درج شده است، بنابراین باید عدد مربوطه را در  $\sqrt{2}$  ضرب کنیم.



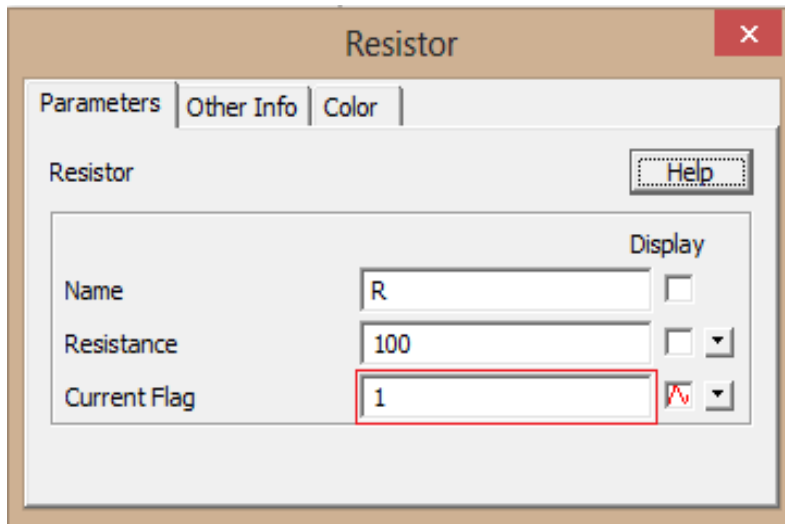
(شکل ۳.۳): ولتاژ منبع سینوسی

تنظیمات سلف و مقامت نیز به صورت زیر انجام می‌شود.



(شکل ۴.۳): تنظیمات سلف

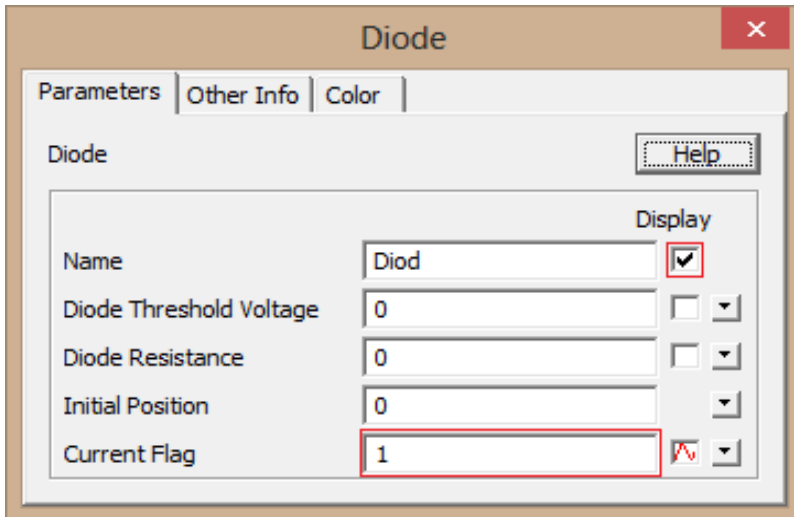




(شکل ۵.۳): تنظیمات مقاومت

همانطور که ملاحظه می‌شود در تنظیمات مربوط به مقاومت در کادر مقابل Current Flag عدد یک درج شده است، با این کار بدون اینکه نیازی به نصب آمپر متر باشد جریان مقاومت در خروجی قابل نمایش خواهد بود، چنین قابلیتی برای سایر المان‌ها نیز وجود دارد. برای اندازه‌گیری ولتاژ المان‌ها حتما باید از ولت‌متر استفاده کنیم.

دیود هرزگرد نیز به صورت زیر تنظیم می شود:



(شکل ۶.۳): تنظیمات دیود

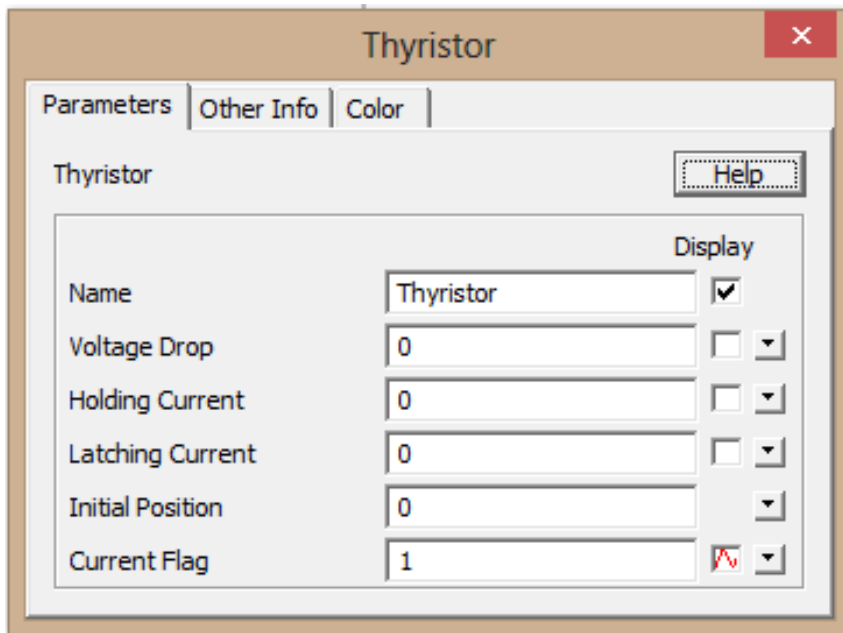
برای نمایش جریان عبوری از دیود هرزگرد نیز Current Flag یک شده است. وقتی تیک مربوط به Display زده شده باشد، عبارت موجود در کادر کناری اش نمایش داده می شود. سایر پارامترها برابر صفر تنظیم شده اند تا یک دیود ایده آل داشته باشیم. در ادامه توضیحاتی در خصوص این پارامترها ارائه می شود.

Diod Threshold Voltage: دیود وقتی روشن می‌شود که ولتاژ دو سر آن در هنگام بایاس مستقیم، از این مقدار بیشتر شود.

Diode Resistance: مقاومتی که دیود پس از روشن شدن از خود نشان می‌دهد (بر حسب اهم).

Initial Position: وضعیت اولیه‌ی دیود را مشخص می‌کند، از صفر برای حالت اولیه‌ی خاموش و از یک برای حالت اولیه‌ی روشن استفاده می‌شود.

پارامترهای تریستور نیز به صورت یک کلید ایده‌آل تنظیم شده است:



(شکل ۷.۳): تنظیمات تریستور

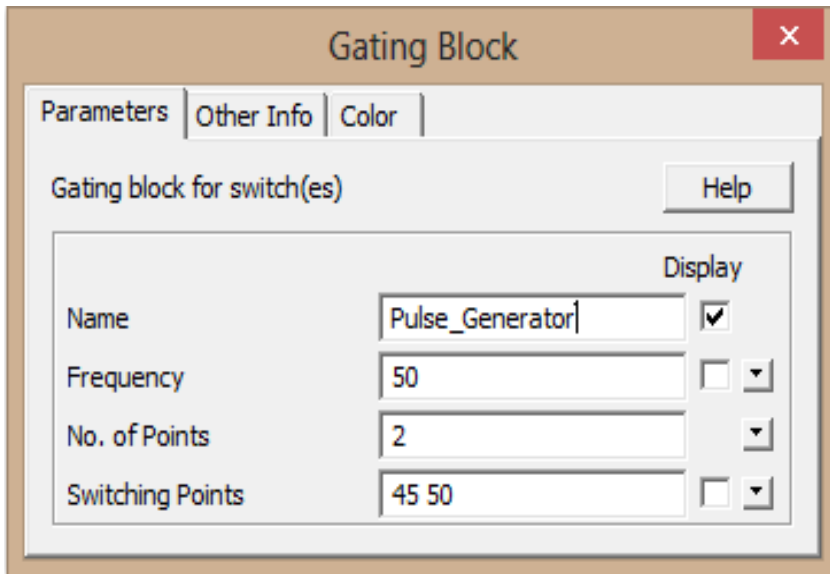
Voltage Drop: افت ولتاژ تریستور در زمان هدایت
Holding Current: حداقل جریان لازم (بر حسب A) برای اینکه تریستور روشن باقی بماند. وقتی جریان عبوری این مقدار کم تر شود تریستور خاموش می شود.
Latching Current: حداقل جریانی که لازم است تا تریستور پس از اینکه پالس اعمالی به گیت آن برداشته شد همچنان روشن باقی بماند.
Initial Position: وضعیت اولیه ی تریستور (روشن یا خاموش بودن) را مشخص می کند و تنظیمات آن همانند دیود است.

## ۳-۳- نحوه ی عملکرد تریستور

عملکرد تریستور مشابه دیود است با این تفاوت که روشن شدن آن توسط یک سیگنال خارجی کنترل می شود (در حالی که روشن و خاموش شدن دیود صرفاً توسط شرایط مدار کنترل می شود). وقتی تریستور به صورت مستقیم بایاس می شود (یعنی زمانی که ولتاژ آند از کاتد بیشتر شود) فقط زمانی هدایت می کند که گیت آن تحریک شود. به این صورت که در بایاس مستقیم به محض اعمال سیگنال به گیت، تریستور روشن می شود و با صفر شدن پالس نیز تا زمانی که جریان عبوری از آن صفر شود همچنان به هدایت خود ادامه می دهد (در یک تریستور ایده آل). بنابراین فقط روشن

شدن تریستور توسط سیگنال خارجی کنترل می شود و خاموش شدن آن توسط مدار صورت می پذیرد. در حالتی که تریستور به صورت معکوس بایاس شده باشد اعمال سیگنال به گیت منجر به روشن شدن تریستور نخواهد شد.

المان پالس های لازم برای روشن شدن سوئیچ ها را تولید می کند. تنظیمات این المان در این شبیه سازی به صورت زیر انجام می شود.



(شکل ۸.۳): تنظیمات پالس گیت

Frequency: فرکانس پالس‌های تولیدی را مشخص می‌کند.

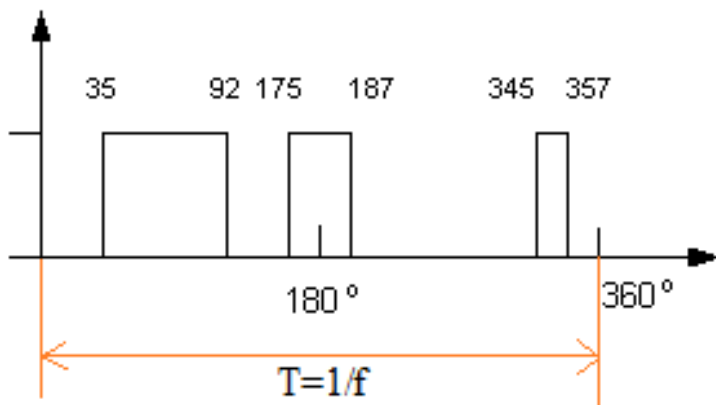
No. of Points: تعداد نقاط کلیدزنی در این قسمت تنظیم می‌شود.

Switching Points: نقاط کلیدزنی بر حسب درجه در این قسمت مشخص می‌شود.

اگر فرکانس صفر باشد، نقاط کلیدزنی توسط نرم‌افزار برحسب ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

تنظیمات برای  $\text{No. Of Points} = 6$  و  $\text{Switching Points} = 35 \ 92 \ 175 \ 187 \ 345 \ 357$

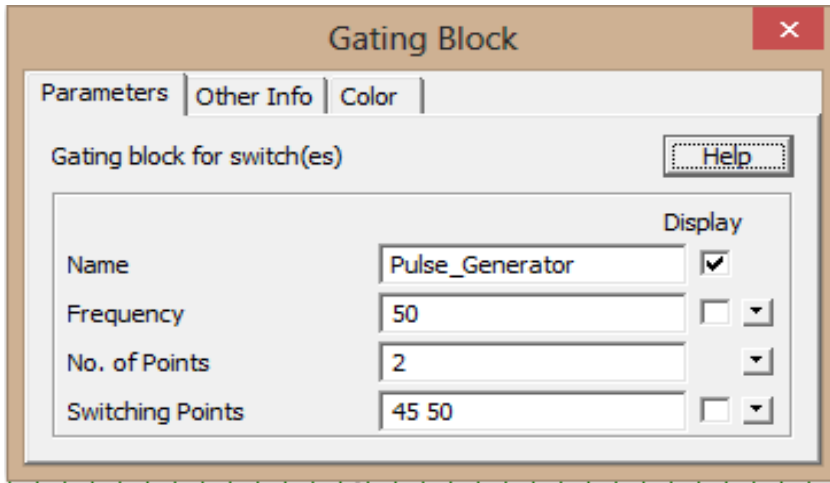
در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۹.۳): تنظیمات کلیدزنی در یک دوره زمانی

این الگو با فرکانس  $f$  تکرار می‌شود. در این شبیه‌سازی تولیدکننده‌ی پالس تریستور

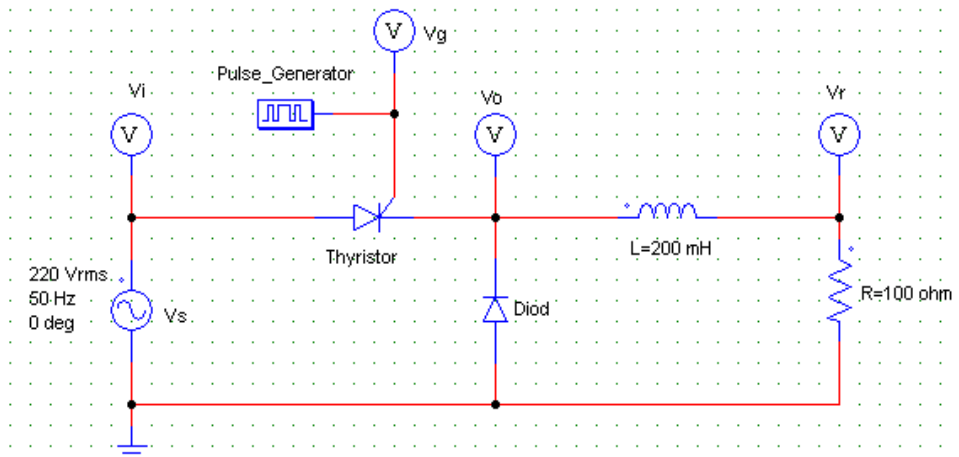
به‌صورت زیر تنظیم شده است:



(شکل ۱۰.۳): تنظیمات گیت

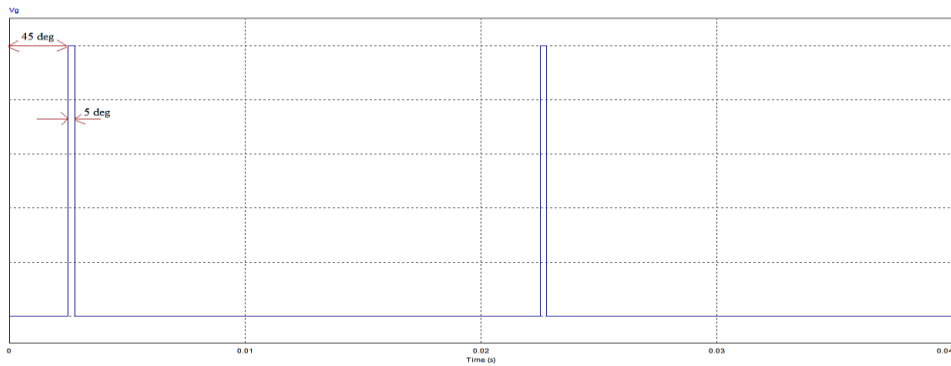
برای مشاهده‌ی خروجی می‌توان مطابق شکل زیر یک پروب ولتاژ به خروجی سیگنال

ژنراتور متصل کرد.



(شکل ۱۱.۳): اعمال ابزار کنترل مدار

پس از اجرای شبیه‌سازی می‌توان پالس تولیدی را با رسم نمودار  $V_g$  مشاهده نمود.



(شکل ۱۲.۳): پالس تولیدی

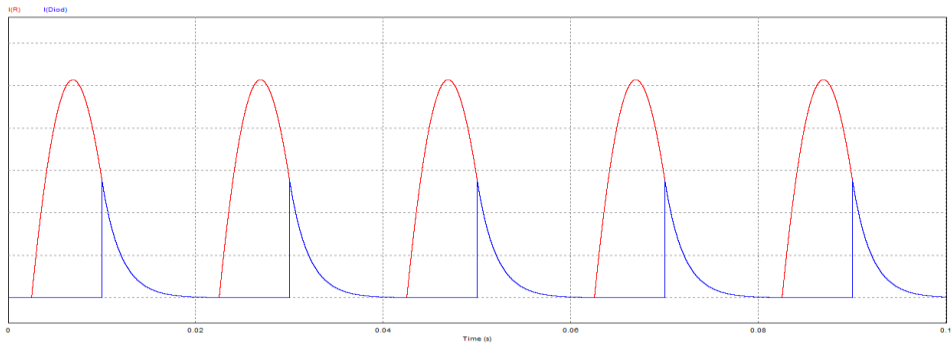
همانطور که ملاحظه می‌شود با تنظیمات فوق، پالسی با فرکانس ۵۰ هرتز و پهنای ۵ درجه و تاخیر ۴۵ درجه تولید می‌شود. برای تبدیل درجه به زمان می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$t = \frac{\varphi}{360 \times f}$$

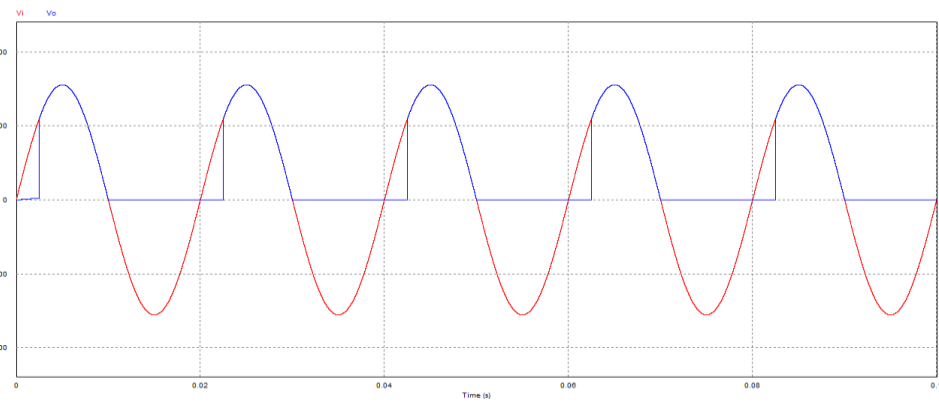
$t$  بر حسب ثانیه و  $\varphi$  بر حسب درجه است.

با اعمال این پالس به تریستور، خروجی شبیه‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

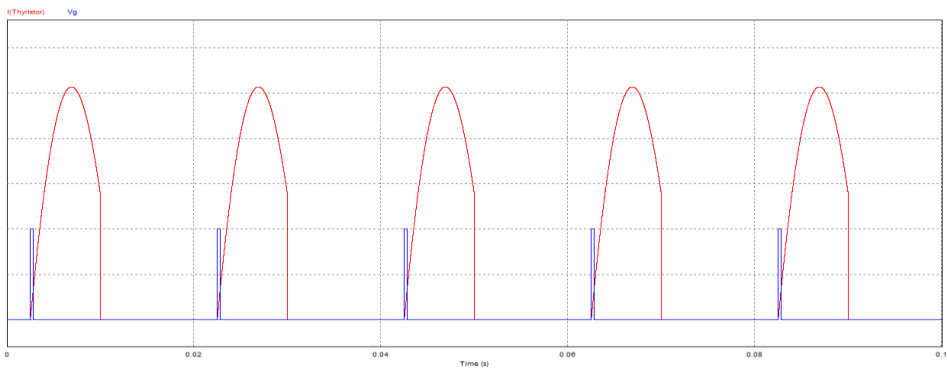




(شکل ۱۳.۳): جریان مقاومت و جریان دیود هرزگرد



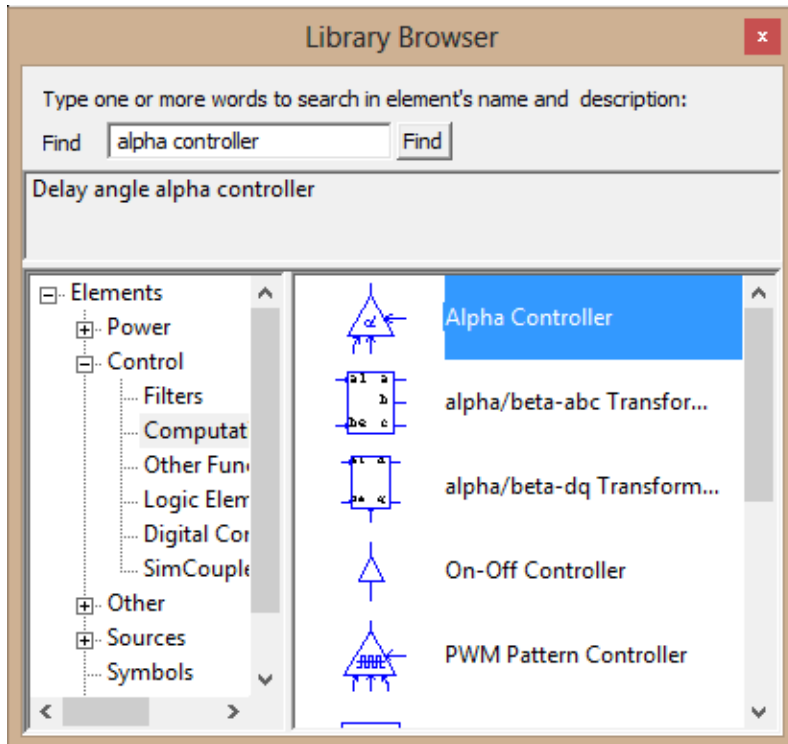
(شکل ۱۴.۳): ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور



(شکل ۱۵.۳): جریان عبوری از تریستور و پالس اعمالی به آن

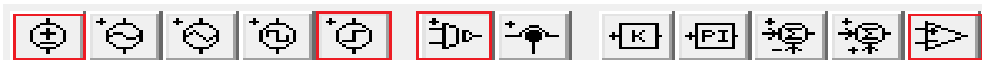
در زمان  $2/5$  میلی ثانیه (۴۵ درجه)، پالس به تریستور اعمال می‌شود و چون تریستور به صورت مستقیم بایاس شده است در این زمان روشن شده و حتی پس از حذف سیگنال اعمال شده به گیت نیز به هدایت خود ادامه می‌دهد. زمانی که تریستور روشن است دیود هرزگرد به صورت منفی بایاس شده و جریانی از آن عبور نمی‌کند. به محض اینکه ولتاژ منبع صفر می‌شود جریان سلف دیود هرزگرد را روشن کرده و در نتیجه جریان عبوری از تریستور صفر می‌گردد. با صفر شدن جریان، تریستور خاموش شده و ولتاژ دو سر آن منفی می‌شود.

لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به پالس تولیدی با توجه به فاز ولتاژ منبع تنظیم شده‌اند. اگر ولتاژ منبع دارای فاز اولیه باشد تنظیمات مربوط به پالس نیز باید تغییر کنند تا شکل موج خروجی ثابت بماند. برای مثال اگر فاز منبع در  $90^\circ$  درجه تنظیم شود باید پالس‌ها در  $45^\circ$  و  $50^\circ$  منهای  $90^\circ$  تنظیم شوند تا خروجی تغییر نکند. بنابراین در این شرایط باید فاز ولتاژ منبع معلوم باشد که در عمل این گونه نیست. برای حل این مشکل می‌توان از کنترل‌کننده‌ی سوئیچ آلفا برای تولید سیگنال گیت تریستور استفاده کرد. برای این منظور  $\alpha$  controller را در کتابخانه‌ی نرم‌افزار جستجو کرده و آن را به مدار اضافه می‌کنیم.



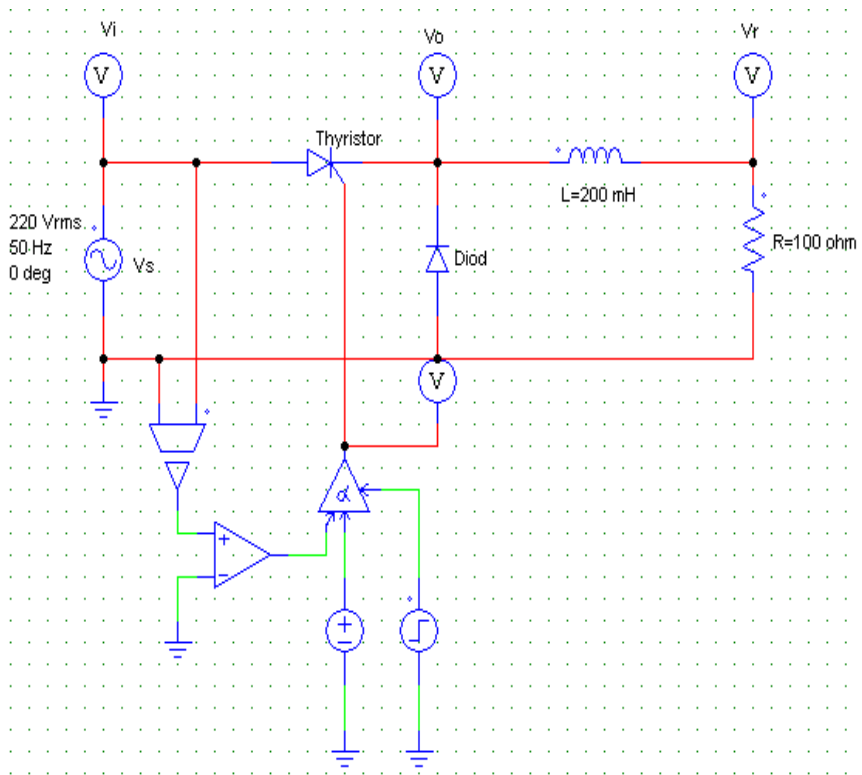
شکل ۱۶.۳: انتخاب alpha controller

برای تنظیم این کنترل کننده به سنسور ولتاژ، منبع ولتاژ DC، منبع ولتاژ پله و یک مقایسه گر احتیاج خواهیم داشت. این المان ها را هم از نوار ابزار المان ها به مدار اضافه می کنیم.



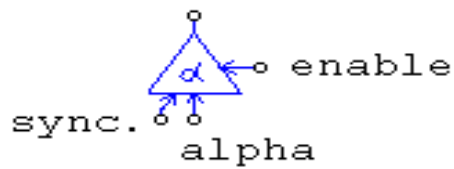
شکل ۱۷.۳: نوار ابزار المان ها

در این حالت مدار به شکل زیر درمی آید:



(شکل ۱۸.۳): شمای کلی مدار

ورودی‌های کنترل کننده ی آلفا به صورت زیر است:



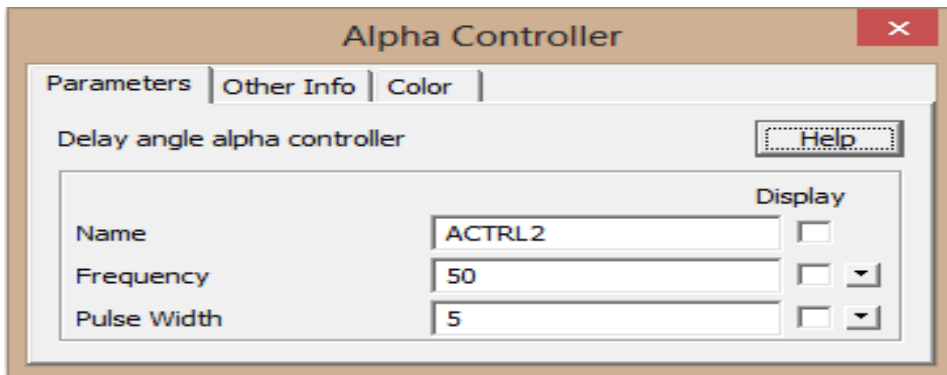
(شکل ۱۹.۳): ورودی‌های کنترل کننده ی آلفا

enable: سیگنال فعال کننده به این قسمت اعمال می شود. با سیگنال یک بلوک فعال شده و زاویه آتش تریستور را تولید می کند و با سیگنال صفر غیر فعال می گردد. برای اینکه این بلوک در لحظه ی صفر فعال شود به آن خروجی یک منبع ولتاژ پله را متصل می کنیم.

alpha: زاویه ی آتش تریستور برحسب درجه در این قسمت اعمال می شود که برای تنظیم آن می توان از یک منبع ولتاژ DC استفاده کرد. اندازه ی ولتاژ منبع زاویه ی آتش را مشخص می کند.

sync: سیگنال سنکرون کننده به این قسمت اعمال می شود. کنترل کننده ی آلفا با لبه ی بالا رونده ی این سیگنال از نو تنظیم می شود. در ادامه در رابطه با این سیگنال بیشتر توضیح خواهیم داد.

با دوبار کلیک روی کنترل کننده ی آلفا پنجره ی مربوط به تنظیمات آن باز می شود.

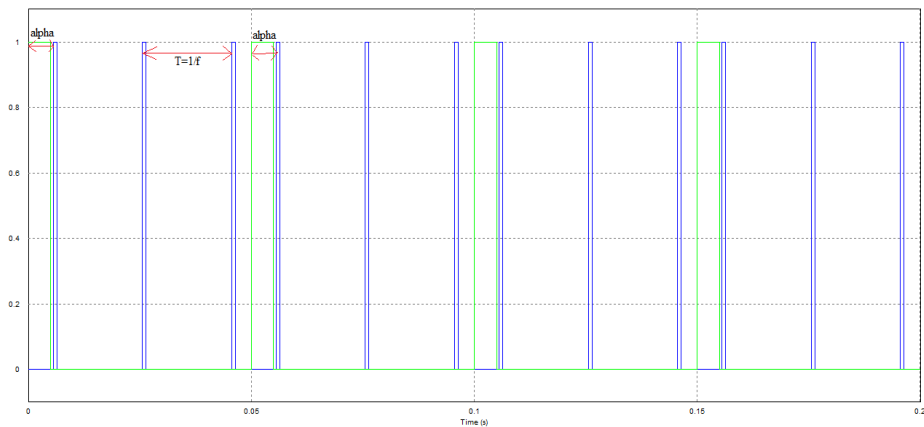


(شکل ۲۰.۳): تنظیمات کنترل کننده ی آلفا

Frequency: فرکانس پالس تولید شده

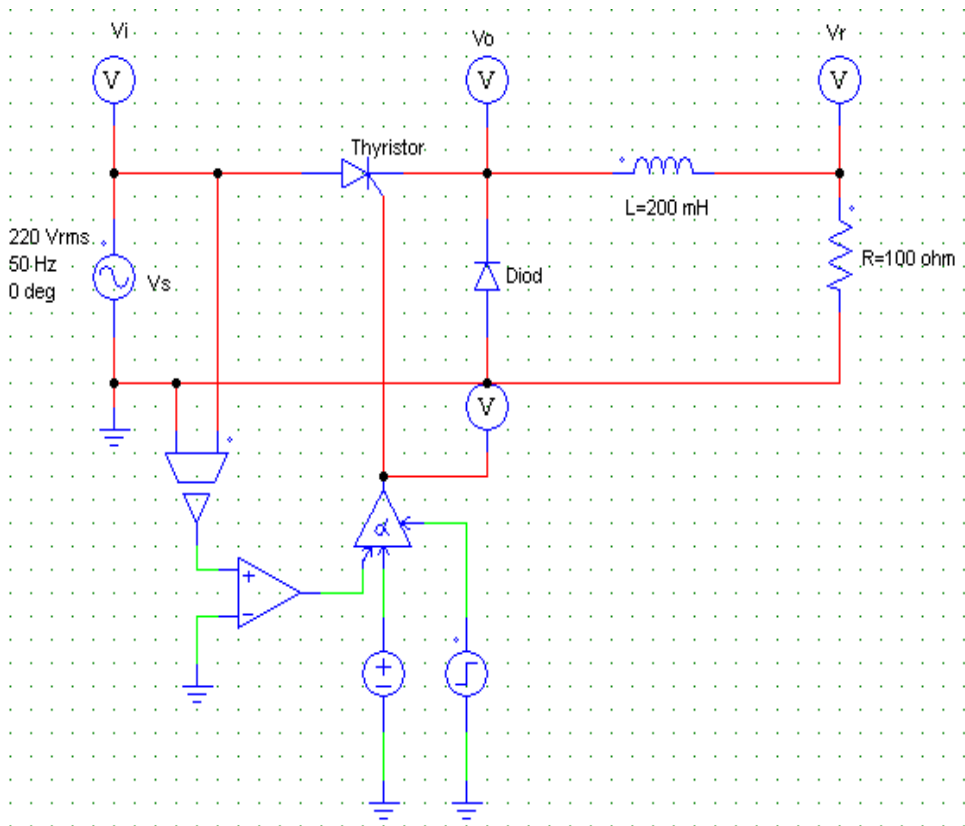
Pulse Width: پهنای پالس تولید شده بر حسب درجه

با لبه‌ی بالارونده‌ی سیگنال سنکرون کننده، کنترل‌کننده‌ی آلفا شروع به تولید پالسی با فرکانس ۵۰ هرتز می‌کند که پهنای آن ۵ درجه است. اولین پالس تولیدی به اندازه‌ی  $\alpha$  درجه (که توسط منبع DC تنظیم می‌شود) از لبه‌ی بالارونده‌ی سیگنال سنکرون کننده فاصله دارد و فاصله‌ی دومین پالس از اولین پالس به اندازه‌ی  $\frac{1}{f}$  ثانیه است و پالس‌های بعدی نیز به همین ترتیب تولید می‌شوند تا اینکه یک لبه‌ی بالارونده به گیت سنکرون کننده اعمال شود و دوباره اولین پالس با زاویه‌ی  $\alpha$  درجه تولید شود. شکل زیر این موضوع را نشان می‌دهد که در آن نمودار سبز مربوط به سیگنال سنکرون کننده و نمودار آبی خروجی کنترل‌کننده‌ی آلفا است.



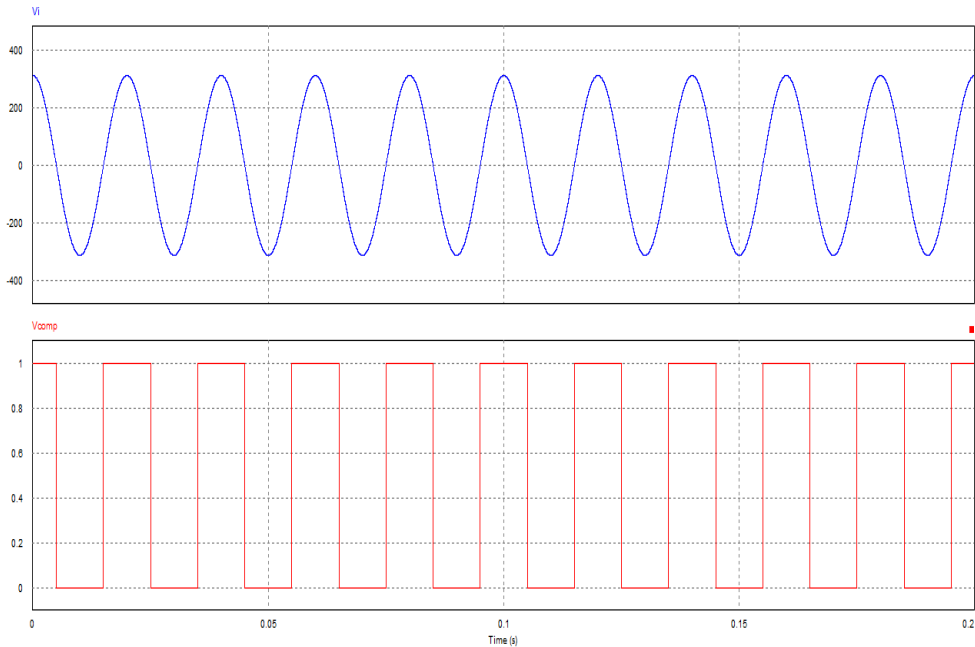
(شکل ۲۱.۳): شکل موج سیگنال سنکرون کننده و سیگنال آلفا

در شکل زیر ولتاژ دوسر منبع توسط سنسور ولتاژ اندازه‌گیری شده و در خروجی آن را به سیگنال کنترلی تبدیل می‌کند (همانطور که مشخص است در نرم‌افزار PSIM سیگنال‌های قدرت به رنگ قرمز و سیگنال‌های کنترلی به رنگ سبز در می‌آیند). این سیگنال در یک مقایسه‌کننده با مقدار صفر مقایسه می‌شود. خروجی مقایسه‌گر زمانی که ولتاژ مثبت است برابر یک و زمانی که ولتاژ منبع منفی است برابر صفر می‌شود.



(شکل ۲۲.۳): شمای کلی مدار

شکل زیر ولتاژ منبع و خروجی مقایسه‌گر را نشان می‌دهد که لبه‌ی بالارونده در عبور از صفر ولتاژ (از منفی به مثبت) اتفاق می‌افتد.

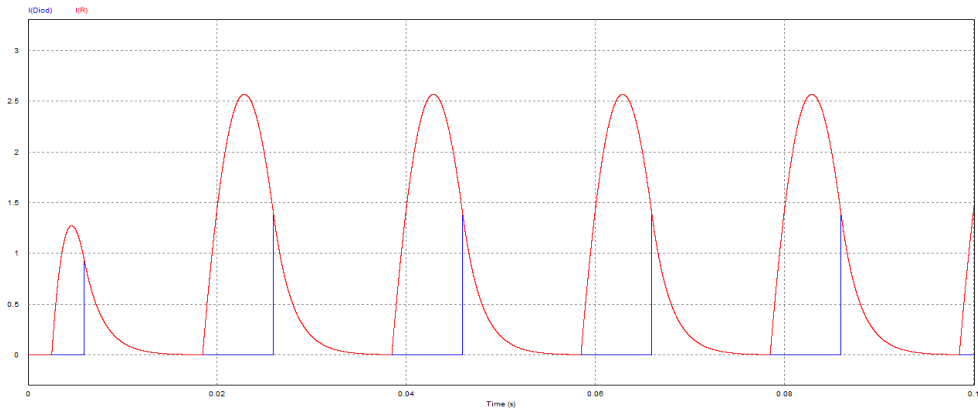


(شکل ۲۳.۳): ولتاژ منبع و خروجی مقایسه‌گر

حال اگر فرکانس کنترل‌کننده‌ی آلفا را در ۵۰ هرتز تنظیم کنیم به محض تغییر علامت ولتاژ از منفی به مثبت، کنترل‌کننده‌ی آلفا پالس‌ی تولید می‌کند که به اندازه‌ی  $\alpha$  درجه از صفر ولتاژ فاصله دارد. برای بررسی صحت مدل فاز منبع ولتاژ را در ۷۳ درجه و ولتاژ منبع DC را در ۴۵ ولت تنظیم می‌کنیم که همان زاویه‌ی آتش ۴۵ درجه برای تریستور است.

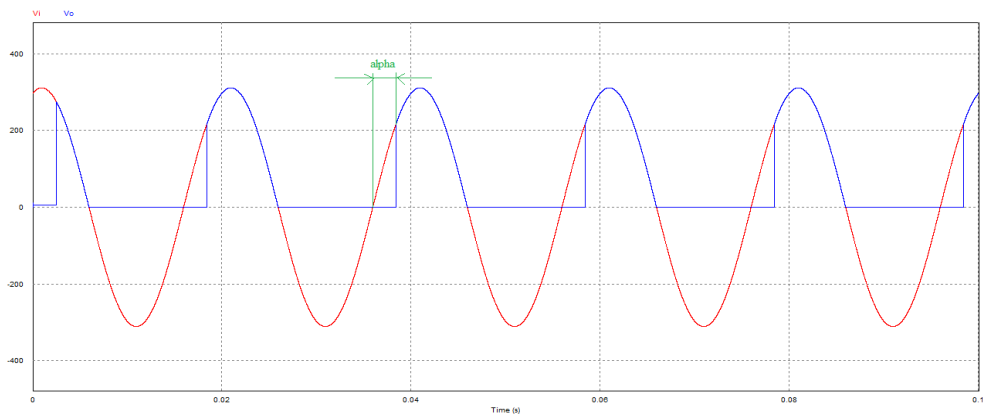


شکل زیر جریان مقاومت و جریان دیود هرزگرد را نشان می‌دهد که بعد از سیکل اول مشابه زمانی است که منبع ولتاژ فاز اولیه‌ی صفر داشت.



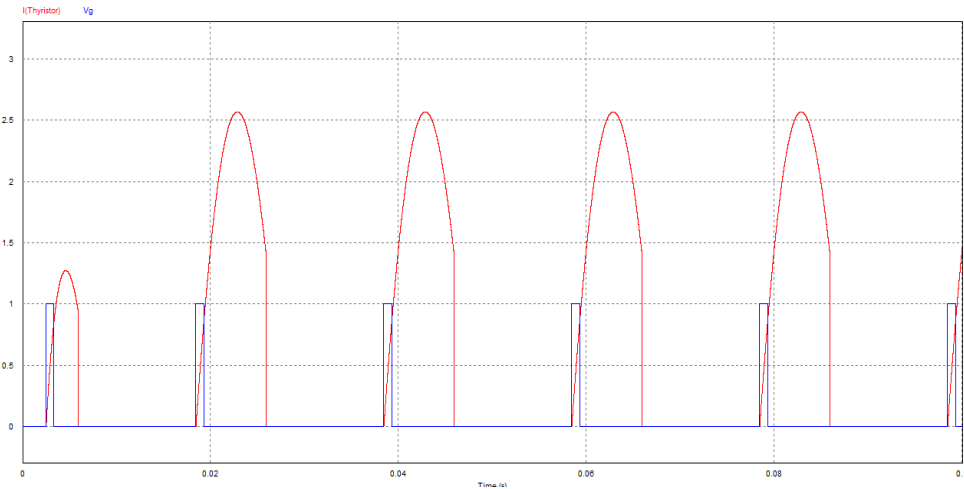
(شکل ۲۴.۳): جریان مقاومت و جریان دیود هرزگرد

شکل زیر ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور را نشان می‌دهد.




(شکل ۲۵.۳): ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور

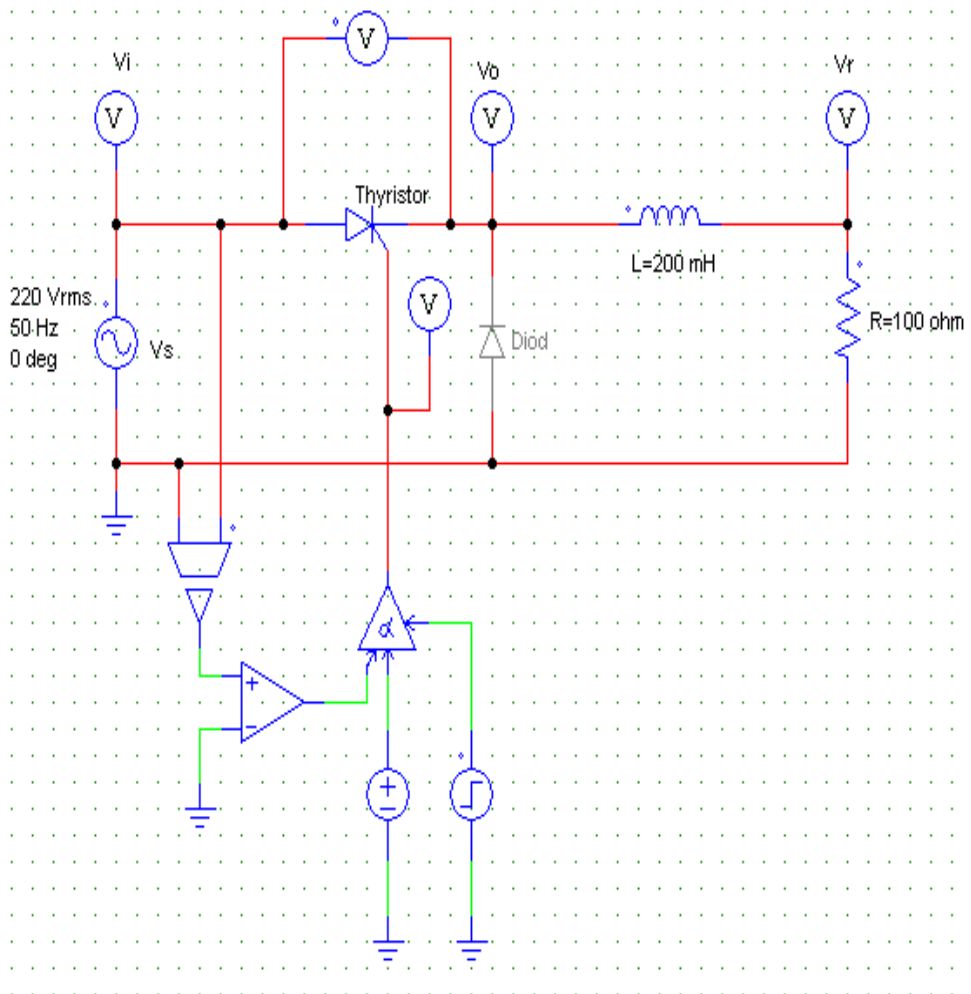
شکل زیر نیز سیگنال خروجی کنترل‌کنندهی آلفا و جریان تریستور را نشان می‌دهد.



(شکل ۲۶.۳): سیگنال خروجی کنترل‌کنندهی آلفا و جریان تریستور

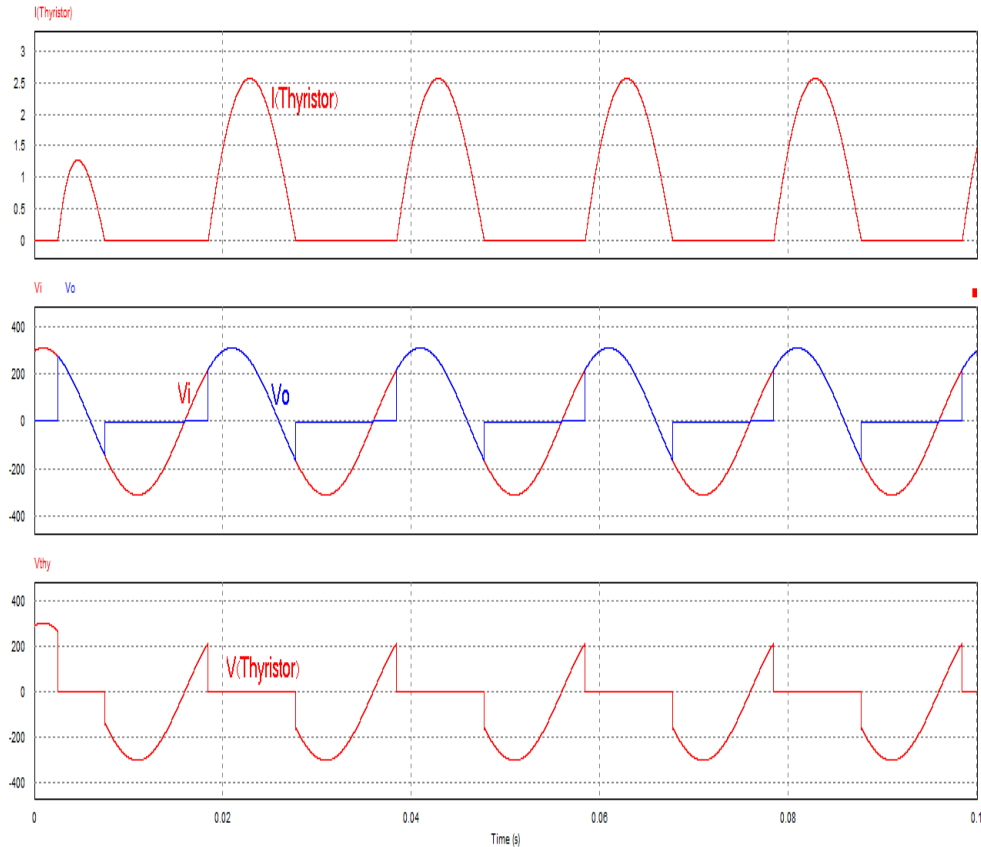
بنابراین در این مدار برای تنظیم زاویه‌ی آتش تریستور، به معلوم بودن فاز ولتاژ منبع نیاز نیست. نکته‌ی آخر اینکه در تنظیم زاویه‌ی آتش تریستور در این مدار هم فرکانس مدار مهم است و هم فرکانس کنترل‌کنندهی آلفا. زاویه‌ی آتش با توجه به شکل موج ولتاژ محاسبه می‌شود، به این صورت که اگر فرکانس ولتاژ ۵۰ هرتز و فرکانس کنترل‌کنندهی آلفا ۱۰۰ هرتز باشد و بخواهیم که دیود در زاویه‌ی ۹۰ درجه شروع به هدایت کند، ولتاژ منبع DC را باید در ۱۸۰ تنظیم کنیم، چراکه زاویه‌ی ۹۰ درجه در فرکانس ۵۰ هرتز برابر زمان  $0.005$  ثانیه است و همین زمان در فرکانس ۱۰۰ هرتز معادل ۱۸۰ درجه خواهد بود.

در این قسمت می‌خواهیم با عملکرد دیود هرزگرد بیشتر آشنا شویم. برای این منظور دیود هرزگرد را انتخاب کرده و با استفاده از ابزار  آن را غیر فعال می‌کنیم. مدار به صورت شکل زیر خواهد بود:



(شکل ۳۷.۳): شمای مدار بعد از غیر فعال کردن دیود هرزگرد

در این جا یک ولتمتر به دوسر تریستور متصل کرده‌ایم تا بتوانیم ولتاژ دو سر تریستور را نیز مشاهده کنیم. حال شبیه‌سازی را اجرا می‌کنیم.



(شکل ۲۸.۳): نمایش شکل موج های خروجی

همانطور که ملاحظه می‌شود با حذف دیود هرزگرد، تریستور دیرتر خاموش می‌شود و حتی در خروجی، ولتاژ منفی نیز ظاهر می‌شود. همانطور که گفته شد تریستور زمانی خاموش می‌شود که جریان عبوری از آن صفر شود. با حذف دیود هرزگرد جریان سلف از

---

تریستور عبور کرده و تریستور را قدری بیشتر از حالت قبل که دیود در مدار حضور داشت، روشن نگه می‌دارد. به محض اینکه جریان سلف صفر شد تریستور خاموش شده و ولتاژ دو سر آن منفی می‌شود و در نتیجه خاموش باقی می‌ماند تا ولتاژ دو سر آن مثبت شده و سیگنال به گیت آن اعمال شود.

در این فصل نحوه‌ی کنترل یک تریستور با استفاده از سیگنال ژنراتور آموزش داده شد. آموختید که در این حالت برای تنظیم زاویه‌ی آتش تریستور حتما باید فاز اولیه‌ی ولتاژ معلوم باشد، از این رو برای استخراج فاز ولتاژ، کنترل‌کننده‌ی سوئیچ آلفا معرفی شد که بو سیله‌ی آن ابتدا فاز ولتاژ استخراج شده و سپس زاویه‌ی آتش تریستور تولید می‌شود. هم‌چنین با عملکرد دیود هرزگرد نیز آشنا شدید.



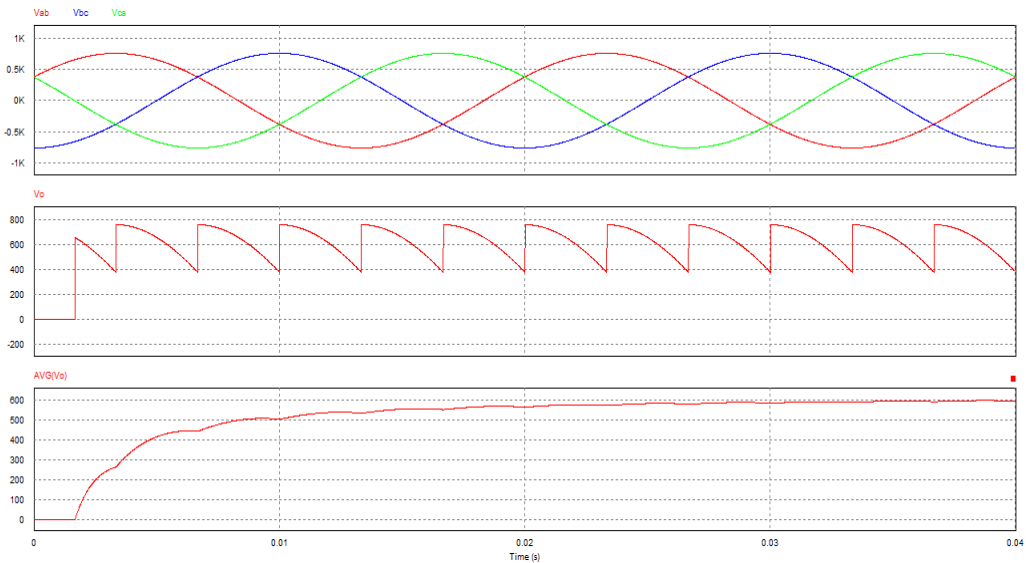
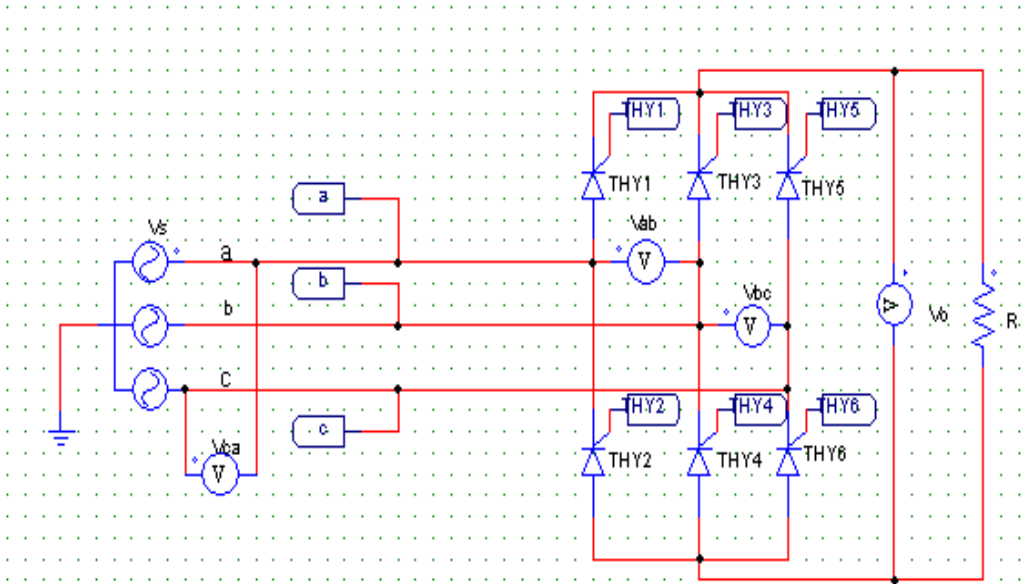
# فصل چهارم

## شبیه‌سازی یکسوساز سه‌فاز تریستوری

### ۴- مقدمه

در این فصل یکسوساز سه‌فاز تریستوری شبیه‌سازی خواهد شد و با نحوه‌ی کنترل سوئیچ‌ها و بلوک پل تریستوری سه‌فاز، آشنا خواهید شد.

## ۴-۱- طرح مدار

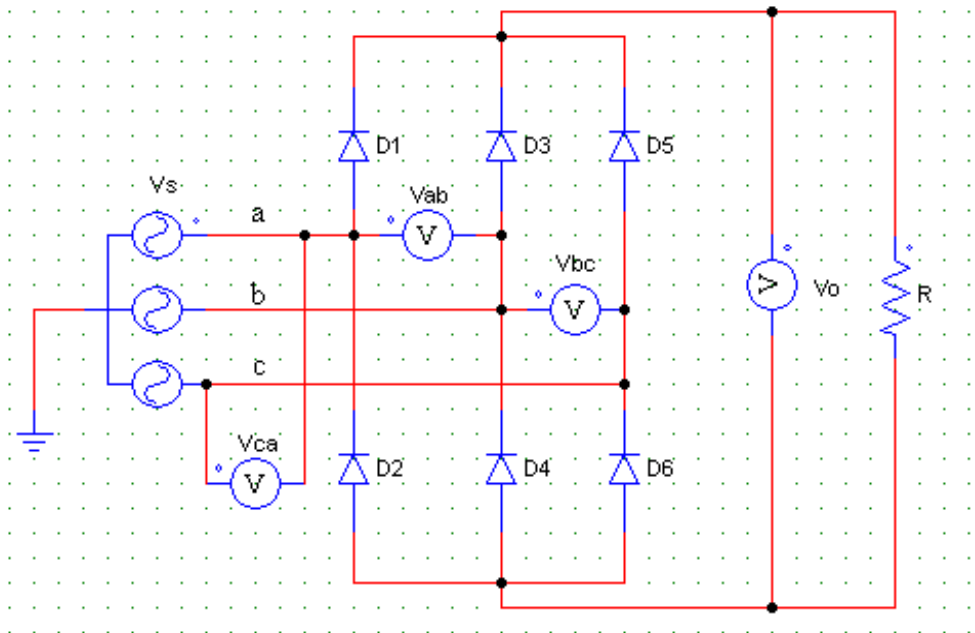


(شکل ۱.۴): شمای کلی مدار



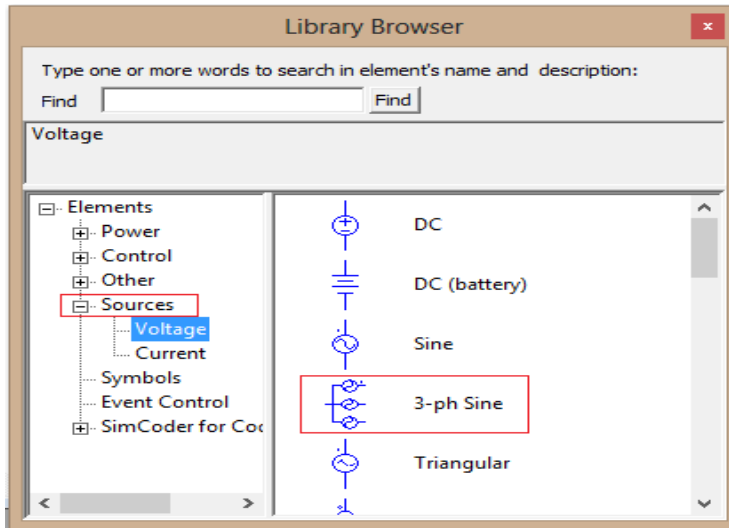
## ۴-۲- اجرای شبیه‌سازی

پیش از شبیه‌سازی مدار برای آشنایی بیشتر با ترتیب روشن شدن سوئیچ‌ها در یک یکسو ساز سه‌فاز، ابتدا یکسو ساز دیودی سه‌فاز شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور در محیط نرم‌افزار PSIM یک پروژه‌ی جدید ایجاد کرده و آن را با نام `Diod_rectifier` ذخیره کنید. با استفاده از المان‌های موجود در نوار ابزار المان‌ها یا کتابخانه‌ی نرم‌افزار، مدار شکل زیر را رسم نمایید.



(شکل ۲.۴): یکسو سازی دیودی سه‌فاز

منبع ولتاژ سه‌فاز را می‌توان در کتابخانه‌ی نرم‌افزار و بخش منابع ولتاژ پیدا کرد:

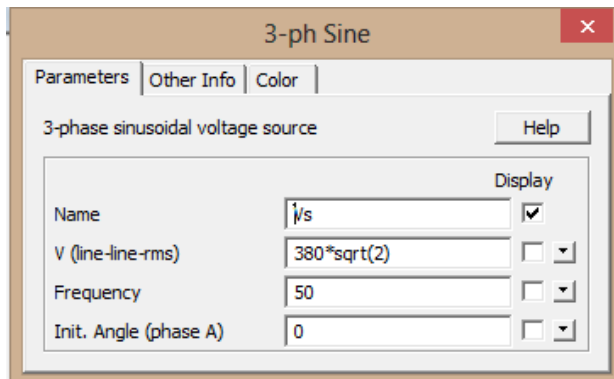


(شکل ۳.۴): کتابخانه

مقدار مقاومت در مدار فوق ۱۰۰ اهم بوده و دیودها ایده‌آل فرض شده‌اند. برای نمایش

جریان عبوری از دیودها در مقابل کادر مربوط به Current Flag عدد یک را درج کنید.

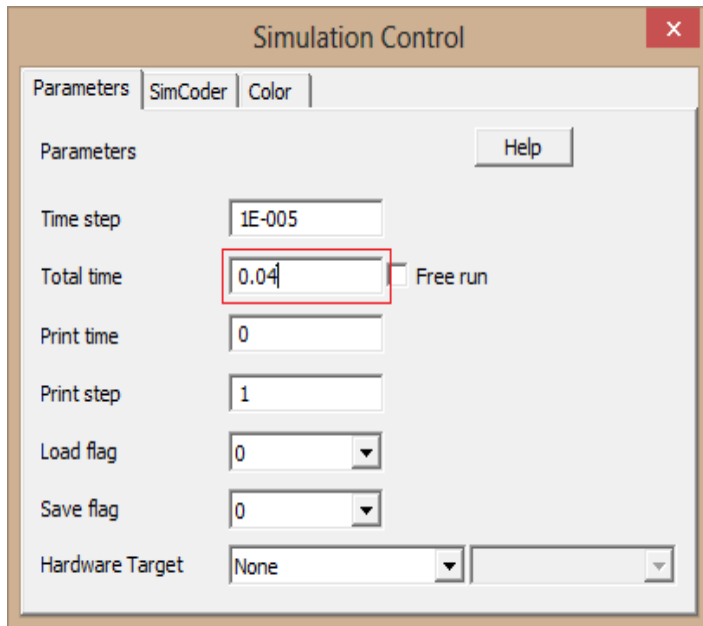
تنظیمات منبع سه‌فاز نیز به‌صورت زیر صورت گرفته است.



(شکل ۴.۴): منبع ولتاژ سه‌فاز

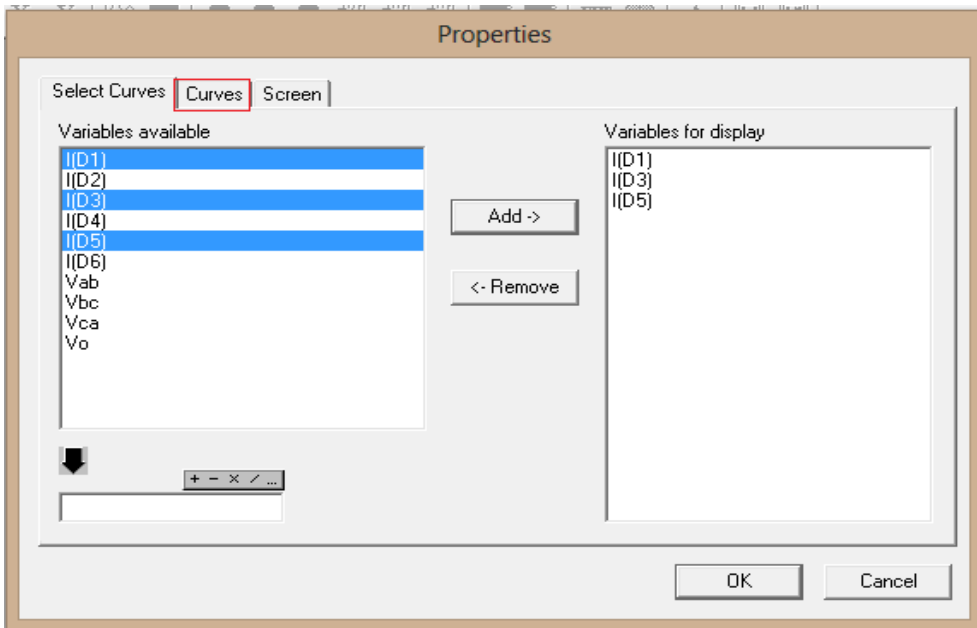
در تنظیمات منبع سه‌فاز، فقط ولتاژ خط به خط و زاویه‌ی ولتاژ فاز a درج می‌شود و سایر مقادیر توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که فاز a با یک نقطه مشخص شده است و فاز b نیز توسط منبع وسط تولید می‌گردد.

پیش از اجرای شبیه‌سازی از منوی Simulate گزینه‌ی Simulation Control را انتخاب می‌کنیم. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، نشان‌گر ماوس به شکل ساعت در می‌آید، با کلیک کردن در نقطه‌ی دلخواهی از صفحه، پنجره‌ی زیر باز می‌شود که در آن زمان شبیه‌سازی را در ۰,۰۴ ثانیه تنظیم می‌کنیم.




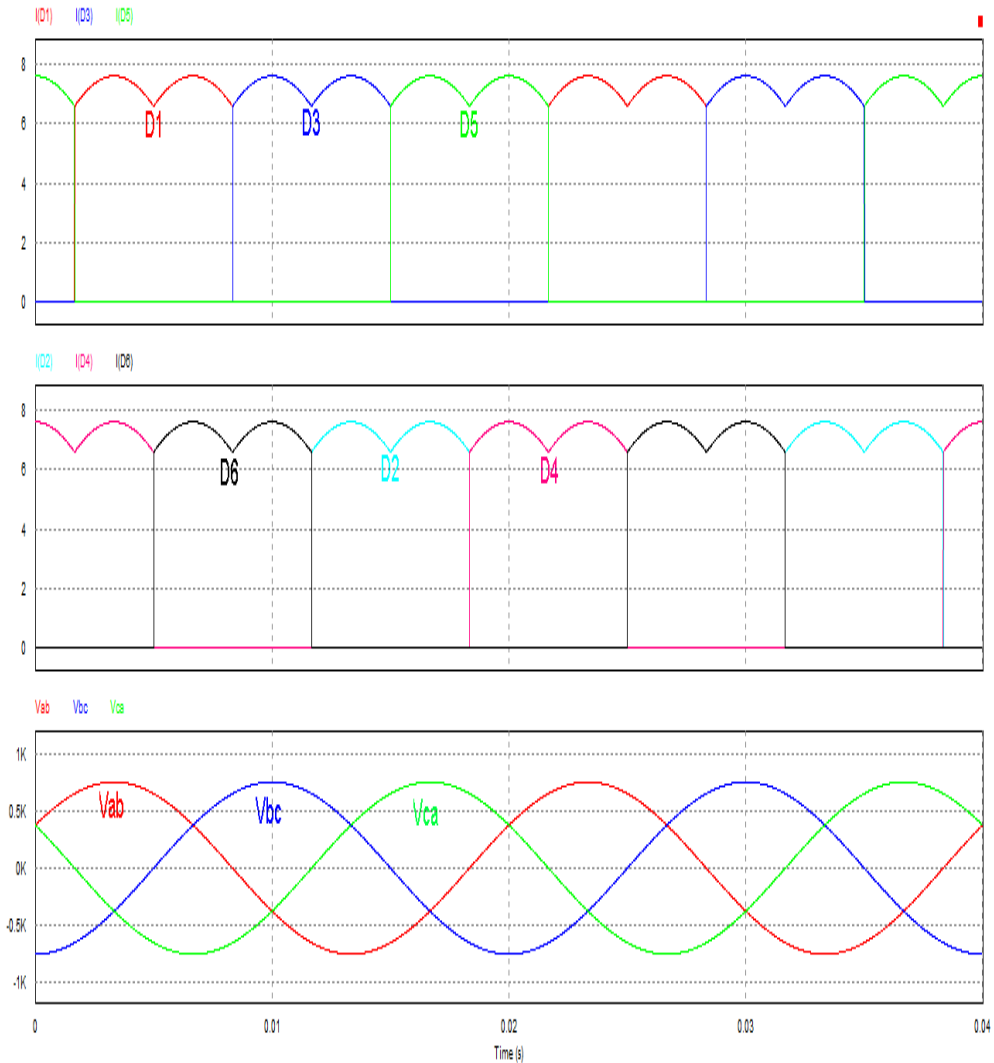
Simulation Control: (شکل ۵.۴)

حال شبه‌سازی را اجرا می‌کنیم و در پنجره‌ی بازشده، جریان دیودهای  $D_1$ ،  $D_3$  و  $D_5$  را انتخاب می‌کنیم. توجه داشته باشید که در تب Curves موجود در همین پنجره، می‌توان رنگ نمودارها را تغییر داد. پس از اعمال تغییرات، گزینه‌ی OK را می‌زنیم.



شکل ۶.۴: تنظیمات Properties

حال ابزار  را انتخاب کرده و این بار جریان دیودهای دو، چهار و شش را در یک نمودار جدید زیر نمودار قبلی رسم می‌کنیم، همین کار را برای ولتاژهای  $Vab$ ،  $Vbc$  و  $Vca$  انجام می‌دهیم. شکل زیر خروجی را نمایش می‌دهد.



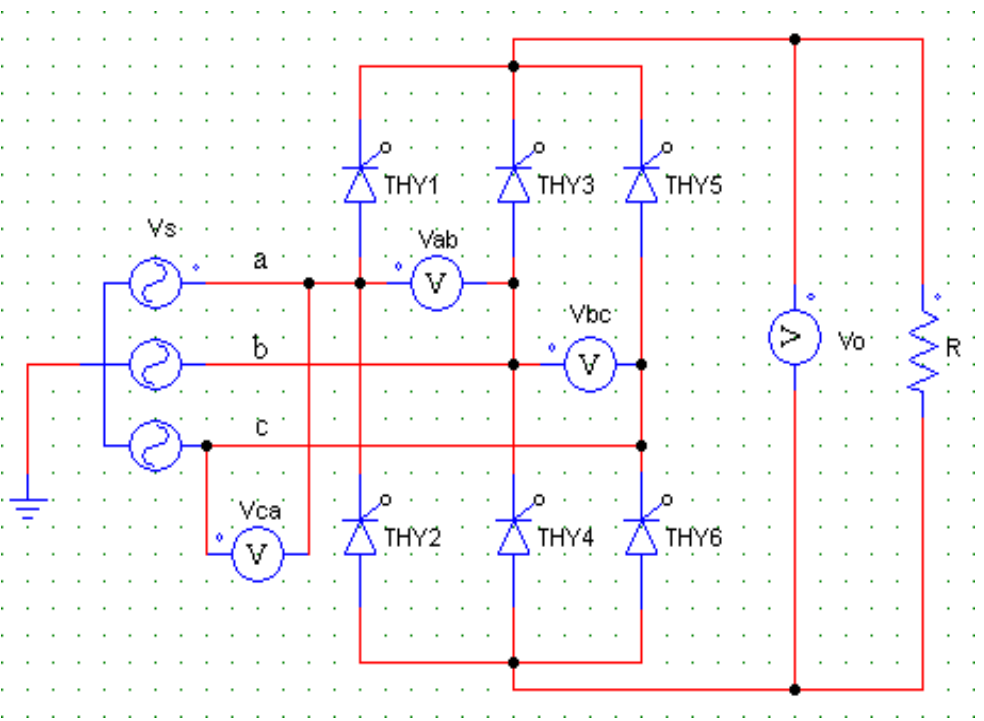
(شکل ۷.۴): جریان‌های دیود و ولتاژهای خط

همانطور که مشخص است دیود شماره یک، زمانی روشن می‌شود که  $V_{ca} < 0$  باشد. دیود شماره سه نیز وقتی که  $V_{ab}$  منفی گردد، روشن می‌شود. جدول زیر زمان روشن

شدن سایر دیودها را نشان می‌دهد. با استفاده از این اطلاعات، می‌توان سیگنال سنکرون‌کننده را برای کنترل‌کننده‌های آلفا تولید کرد. بنابراین برای هر تریستور، یک کنترل‌کننده‌ی آلفا در نظر می‌گیریم.

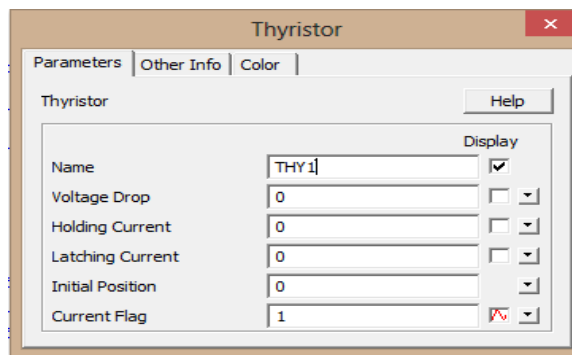
شماره‌ی تریستور	شرط روشن شدن
۱	$V_{ca} < 0$
۲	$V_{ca} > 0$
۳	$V_{ab} < 0$
۴	$V_{ab} > 0$
۵	$V_{bc} < 0$
۶	$V_{bc} > 0$

حال در مدار `Diod_rectifier` دیودها را حذف کرده و به‌جای آن تریستور قرار می‌دهیم. این مدار را با نام `Thy_rectifier` ذخیره می‌کنیم که مدار شکل زیر حاصل می‌شود.




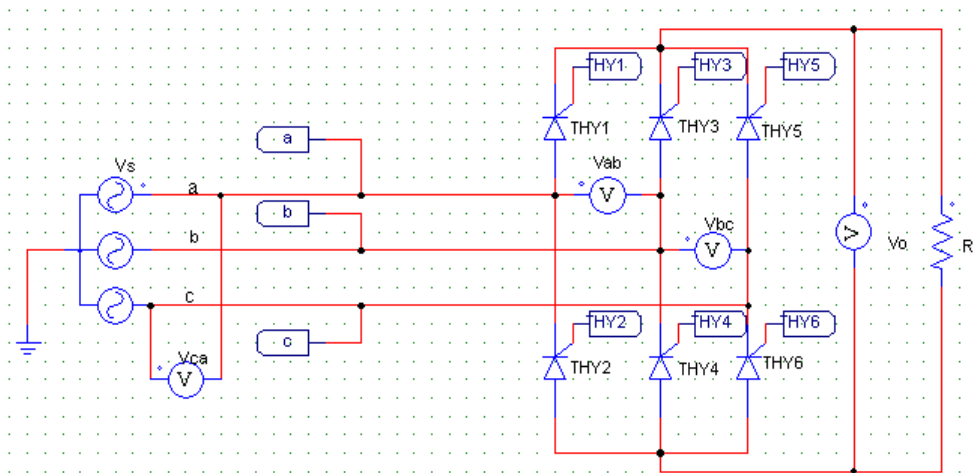
(شکل ۸.۴): مدار یکسو ساز سه‌فاز تریتوری

تمامی تریتورها به صورت زیر تنظیم شده‌اند:





(شکل ۹.۴): تنظیمات تریتور

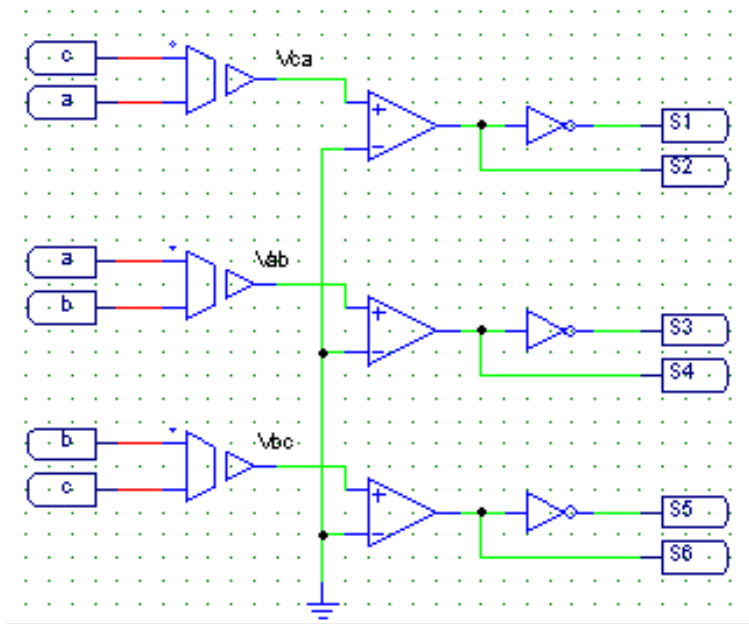
برای تولید سیگنال‌های مربوط به گیت ترستورها، به شش کنترل‌کننده‌ی آلفا نیاز داریم. سیگنال سنکرون‌کننده‌ی مربوط به این کنترل‌کننده‌ها نیز مطابق جدول فوق، بوسیله‌ی مقایسه‌ی ولتاژ خطوط با صفر به دست می‌آید. بنابراین مدار کنترلی به سیم‌کشی‌های زیادی احتیاج خواهد داشت. به منظور جلوگیری از پیچیده شدن مدار، می‌توان از ابزار  موجود در نوار ابزار اصلی نرم‌افزار استفاده کرد. این ابزار (که نام آن برچسب یا label است) راه دیگری را برای اتصال دو نقطه فراهم می‌کند، به این صورت که اگر آن را به دو نقطه‌ی مورد نظر متصل کرده و نام آن‌ها را یکسان کنیم، دو نقطه از نظر الکتریکی به هم متصل می‌شوند. برای این منظور طبق شکل زیر از برچسب برای انشعاب گرفتن از سه‌فاز a، b و c و هم‌چنین گیت ترستورها استفاده می‌کنیم.



(شکل ۱۰.۴): استفاده از برچسب برای انشعاب گرفتن و گیت ترستور



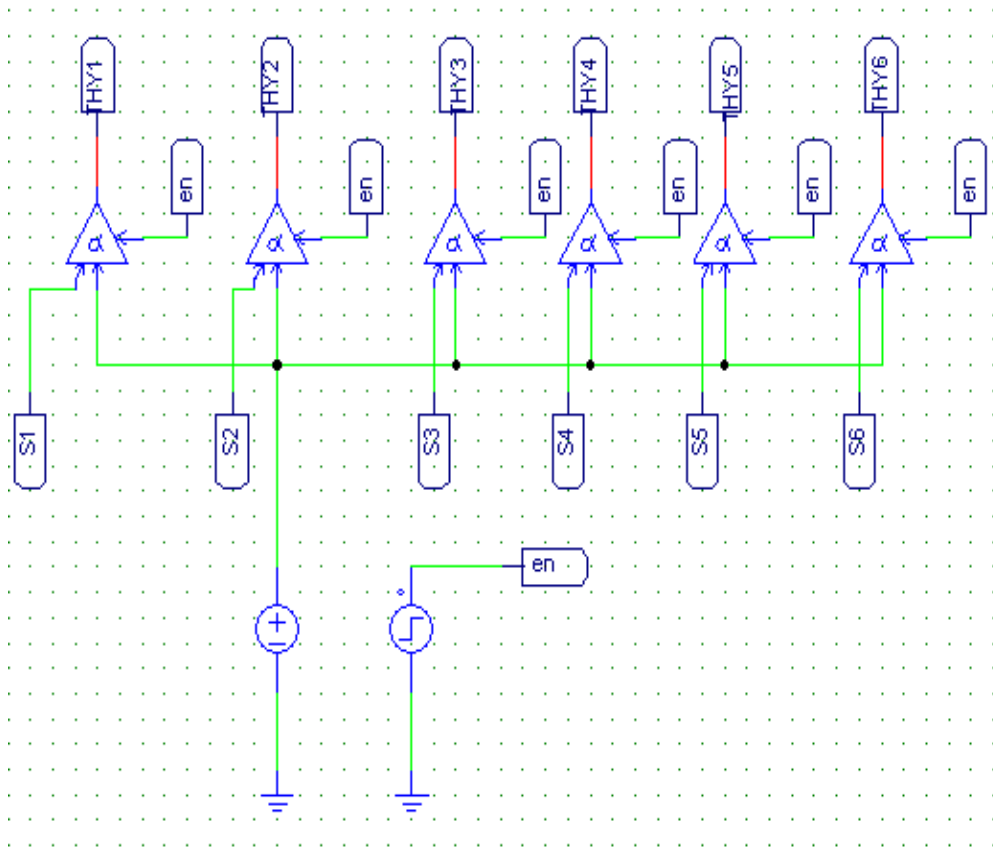
پس از انتخاب برچسب پنجره‌ای به شکل زیر باز می‌شود که در کادر مربوطه نامی را برای گره مورد نظر در نظر می‌گیریم. اگر دو برچسب نام یکسانی داشته باشند، دو نقطه‌ای که برچسب‌ها به آن متصل هستند به یکدیگر متصل می‌شوند. برای اندازه‌گیری ولتاژ خطوط باید از سنسور ولتاژ () استفاده کنیم. برای مثال برای اندازه‌گیری ولتاژ  $V_{ab}$  سر نقطه‌دار سنسور را به فاز  $a$  و سر بدون نقطه را به فاز  $b$  متصل می‌کنیم. برای مقایسه‌ی دو ولتاژ اندازه‌گیری شده نیز باید از مقایسه‌گر استفاده کرد () . شکل زیر مدار مربوط به سیگنال‌های سنکرون‌کننده را نشان می‌دهد. در این شکل دقت کنید که برچسب‌ها چگونه نام‌گذاری شده‌اند.



(شکل ۱۱.۴): مدار سیگنال‌های سنکرون‌کننده

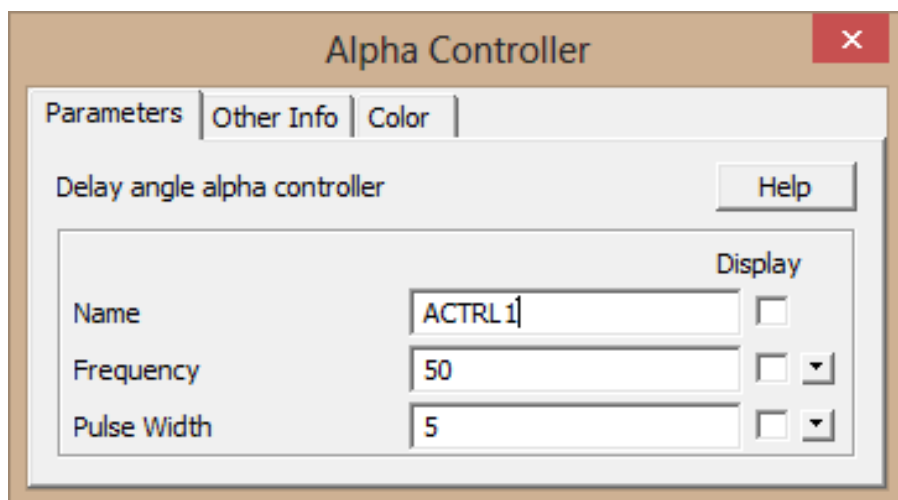
حال شش کنترل کننده‌ی آلفا به مدار اضافه می‌کنیم. شکل زیر مدار مربوط به این

کنترل کننده‌ها را نشان می‌دهد.



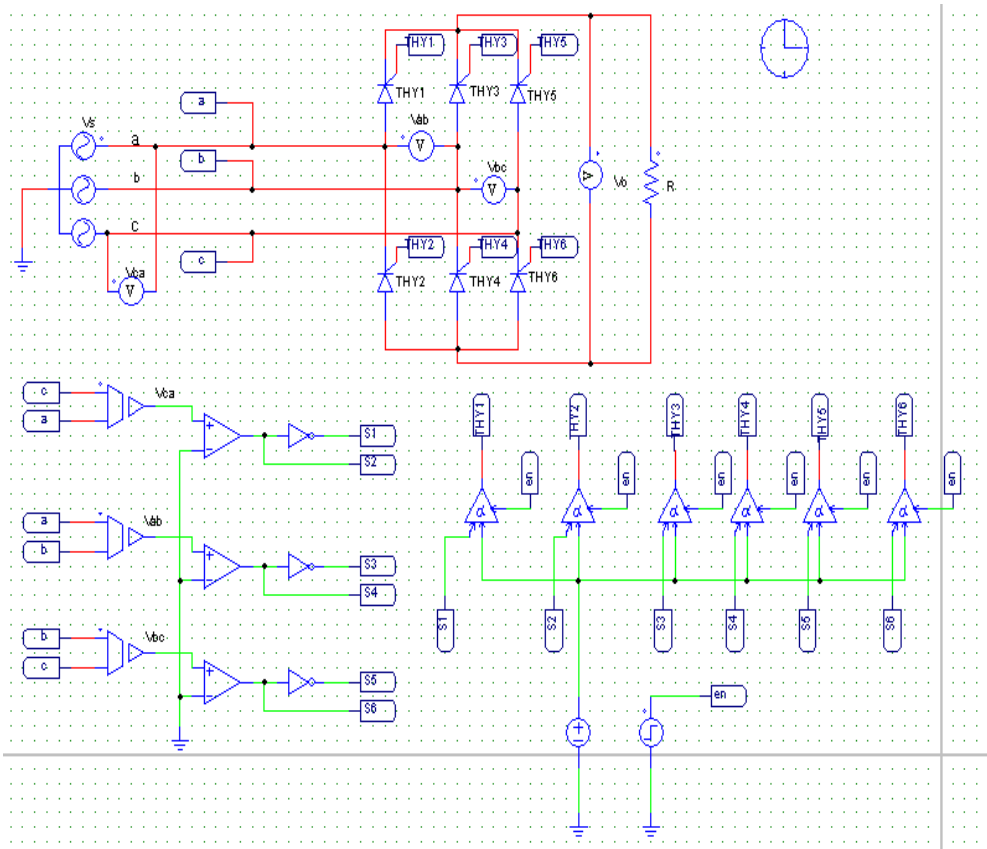
(شکل ۱۲.۴): مدار کنترل کننده‌ها

تمام کنترل کننده‌های آلفا را به صورت زیر تنظیم می‌کنیم.



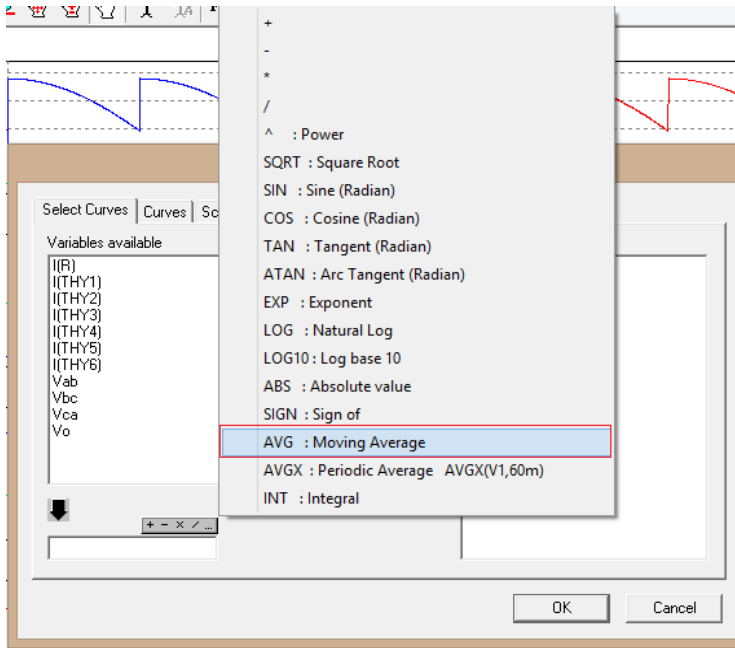
(شکل ۱۳.۴): تنظیم کنترل‌کننده‌های آلفا

دقت کنید که خروجی منبع پله بوسیله‌ی برچسب en به ورودی فعال‌ساز تمام کنترل‌کننده‌ها متصل شده است. خروجی مقایسه‌گرها را نیز با استفاده از برچسب به ورودی سنکرون‌کننده‌ی کنترل‌کننده‌ها متصل می‌کنیم. در منبع پله،  $V_{step}$  در یک و  $T_{step}$  در صفر تنظیم شده است. همچنین دامنه‌ی منبع DC نیز ۳۰ در نظر گرفته شده است. این منبع به تمامی کنترل‌کننده‌ها اعمال شده است. با این کار هر وقت که سیگنال سنکرون‌کننده به کنترل‌کننده‌ها اعمال شود، ۳۰ درجه پس از آن پالسی به پهنای ۵ درجه به گیت تریستورها اعمال خواهد شد، شکل زیر نمای کاملی از مدار را نشان می‌دهد.

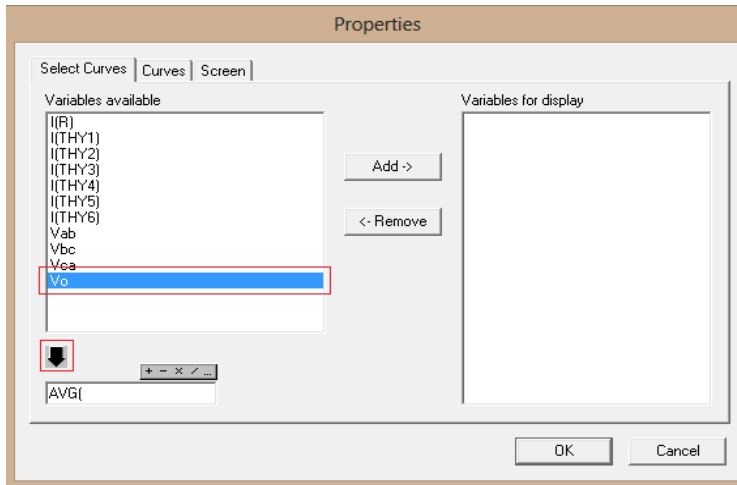


(شکل ۱۴.۴): نمای کامل مدار

زمان شبیه‌سازی را در  $0.4$  ثانیه تنظیم کرده و شبیه‌سازی را اجرا کنید. در خروجی منحنی‌های تریستور یک، سه و پنج را در نمودار اول، منحنی‌های تریستورهای دو، چهار و شش را در نمودار دوم، ولتاژ مربوط به سه خط را در نمودار سوم و در نهایت متوسط ولتاژ خروجی را در نمودار چهارم رسم کنید. برای این کار طبق شکل زیر گزینه‌ی AVG را انتخاب کرده و سپس  $V_0$  را به کادر پایین انتقال می‌دهیم.

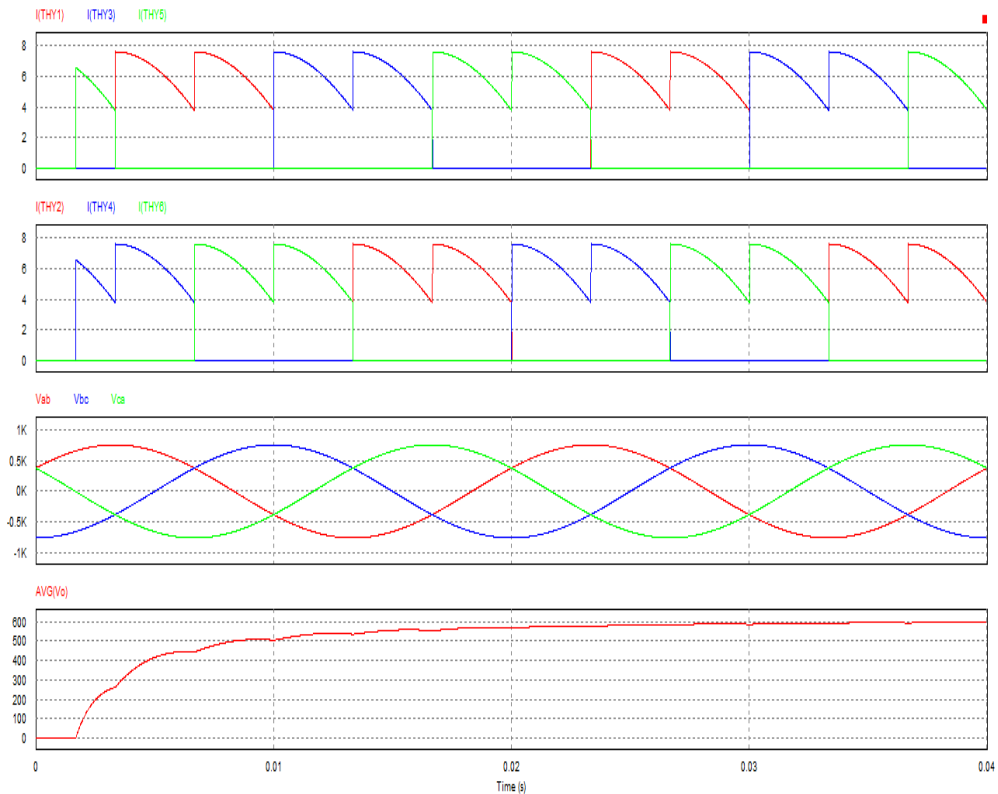


(شکل ۱۵.۴): ابزار عملگرها



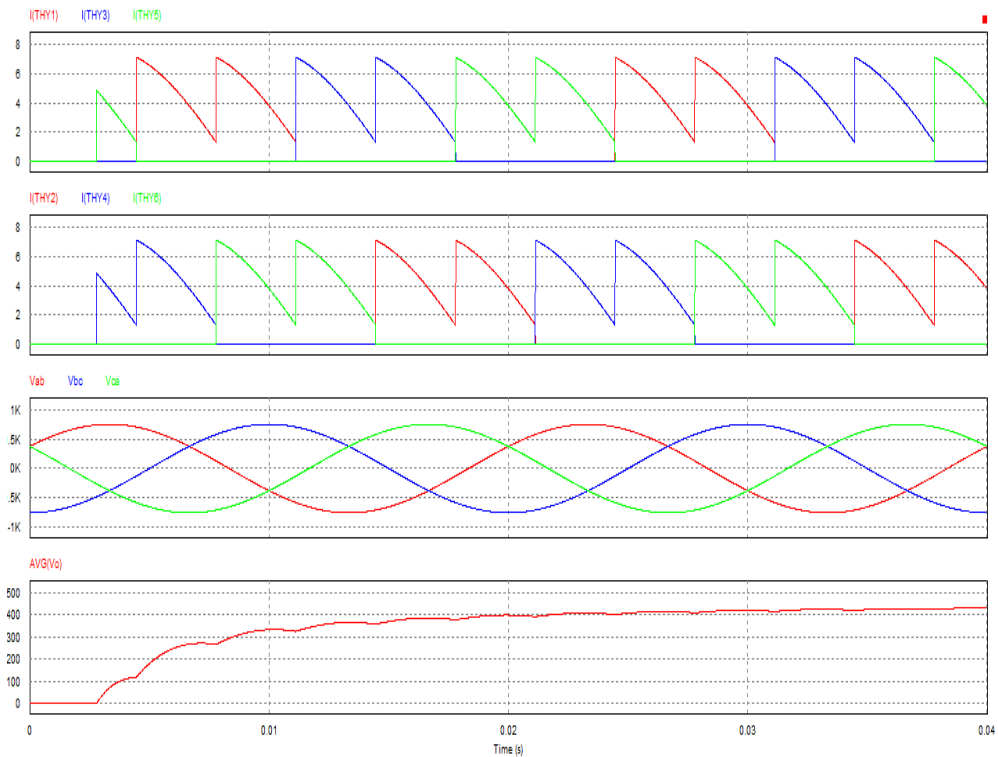
(شکل ۱۶.۴): تنظیمات Properties

با زدن Add عبارت  $AVG(V_o)$  به کادر سمت راست منتقل می‌شود. حال اگر دکمه‌ی OK را بزنیم متوسط ولتاژ خروجی رسم می‌شود، شکل زیر خروجی مدار را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۷.۴): شکل موج‌های خروجی

حال زاویه‌ی آتش تریستورها را در  $50^\circ$  درجه تنظیم می‌کنیم. برای این کار کافی است که ولتاژ منبع DC را در  $50^\circ$  تنظیم کنیم. شکل نمودارهای فوق را با زاویه‌ی آتش  $50^\circ$  درجه نشان می‌دهد.

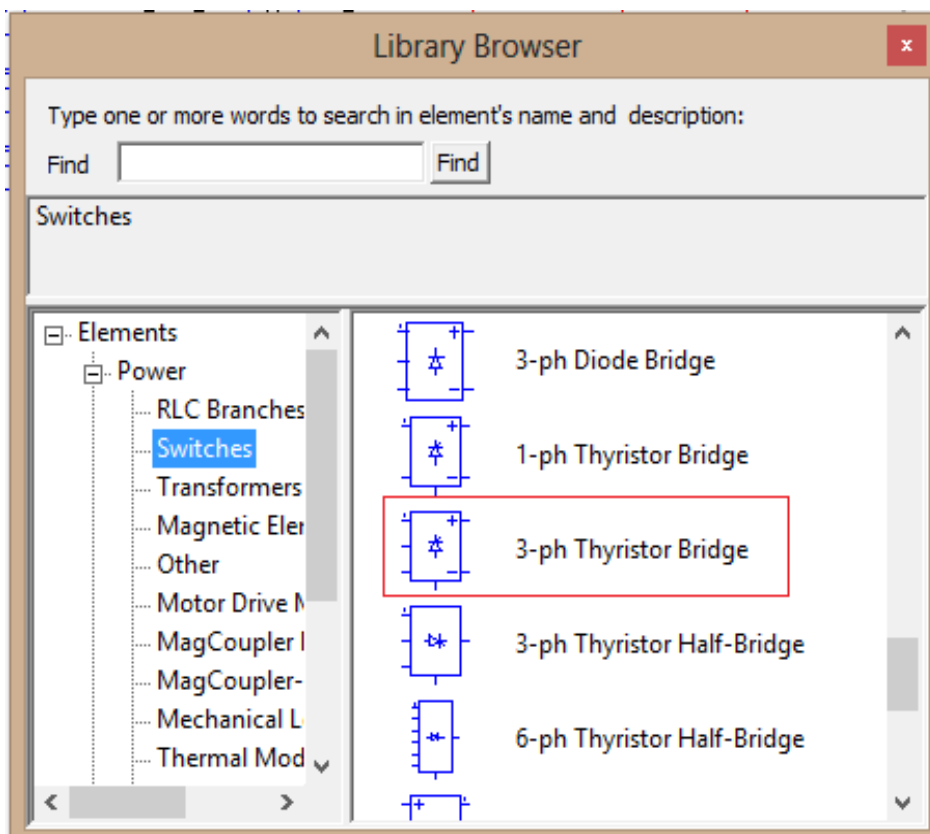


(شکل ۱۸.۴): شکل موج خروجی با زاویه آتش ۵۰ درجه

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه‌ی آتش تریستورها متوسط ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. از آنجایی که طراحی مدار یکسو ساز تریستوری فوق تا حدودی زمان‌بر بوده و از طرف دیگر کاربرد آن در سایر مدارهای قدرت زیاد است، بلوک آماده‌ی این مدار به همراه سایر مدارهای پر کاربرد به صورت آماده در نرم‌افزار PSIM وجود دارد و هدف از این شبیه‌سازی فقط آشنایی بیشتر با نحوه‌ی هماهنگ کردن کلیدها بود. برای دسترسی به بلوک آماده‌ی یکسو ساز تریستوری طبق شکل زیر در کتابخانه‌ی نرم‌افزار ۳-ph

Thyristor Bridge را انتخاب کنید. همانطور که ملاحظه می‌کنید در این قسمت

بلوک‌های آماده‌ی مربوط به سایر مدارهای پرکاربرد نیز وجود دارند.

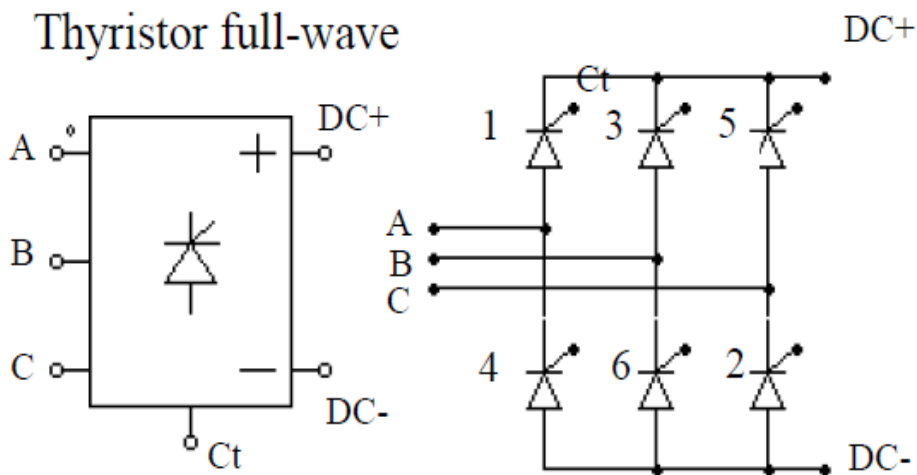


(شکل ۱۹.۴): کتابخانه ابزار

بلوک مربوط به یک‌سوساز تریستوری دارای شش پایه است. سه پایه سمت چپ ورودی است که منبع ولتاژ سه‌فاز به آن متصل می‌شود. دو پایه سمت راست نیز خروجی‌های مدار هستند. زاویه‌ی آتش تریستورها نیز با سیگنال اعمالی به پایه‌ی پایینی

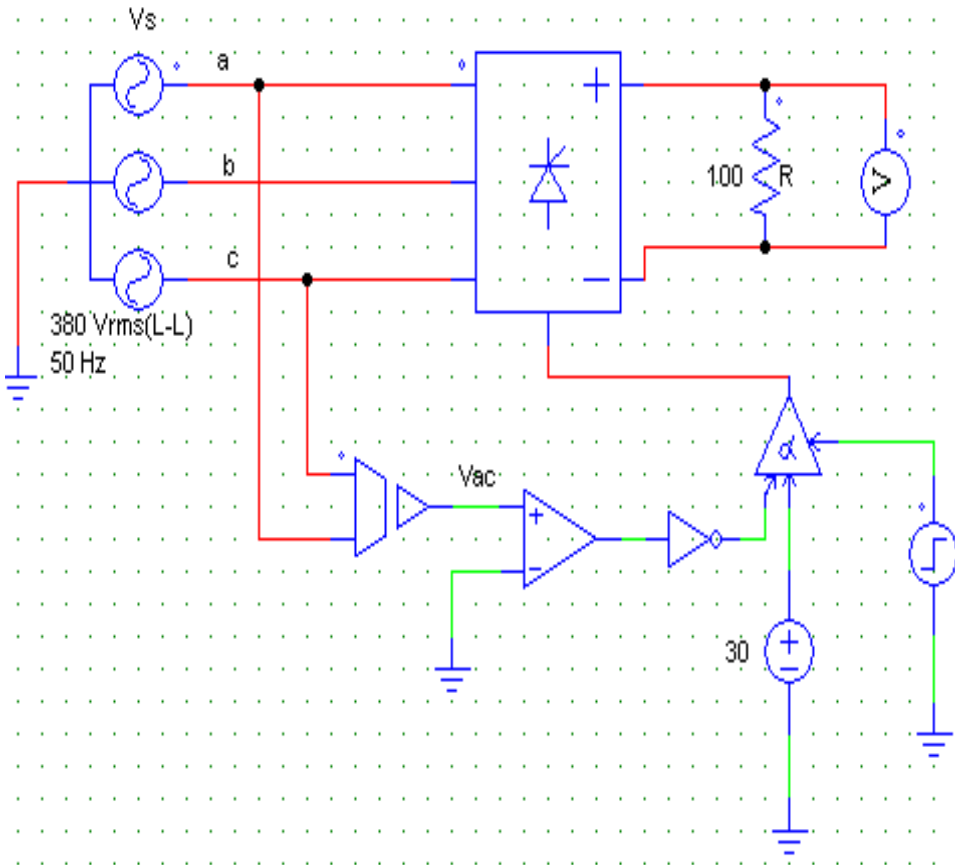


توسط کنترل‌کننده‌ی آلفا یا تولیدکننده‌ی پالس تنظیم می‌شوند. به این ورودی فقط زاویه‌ی آتش تریستور یک اعمال می‌شود و زاویه‌ی آتش مربوط به سایر تریستورها به صورت داخلی توسط خود بلوک تولید می‌گردد. شکل زیر، داخل این بلوک را به همراه نحوه‌ی شماره‌گذاری تریستورها نشان می‌دهد.



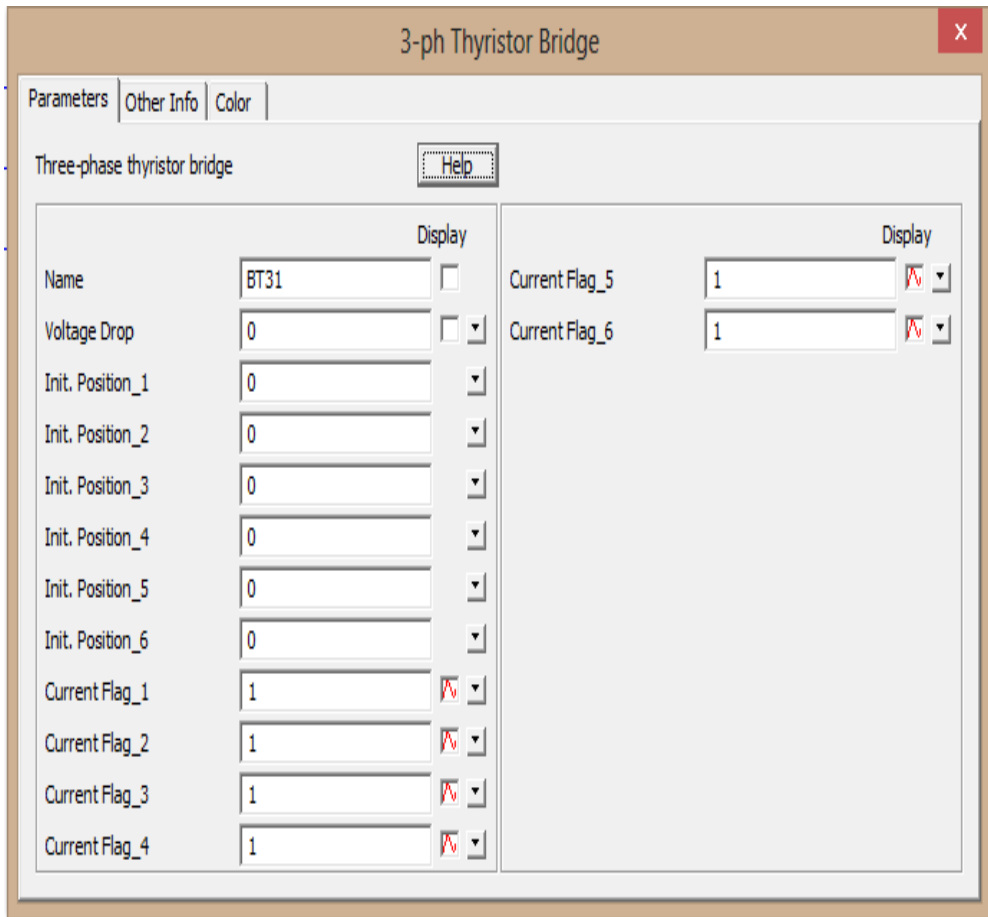
(شکل ۲۰.۴): بلوک تریستور تمام موج سه‌فاز

حال با استفاده از این بلوک مدار یکسوساز تریستوری را طبق شکل زیر رسم می‌کنیم. دقت کنید که فقط مدار مربوط به کنترل‌کننده‌ی تریستور یک به بلوک اعمال شده است.



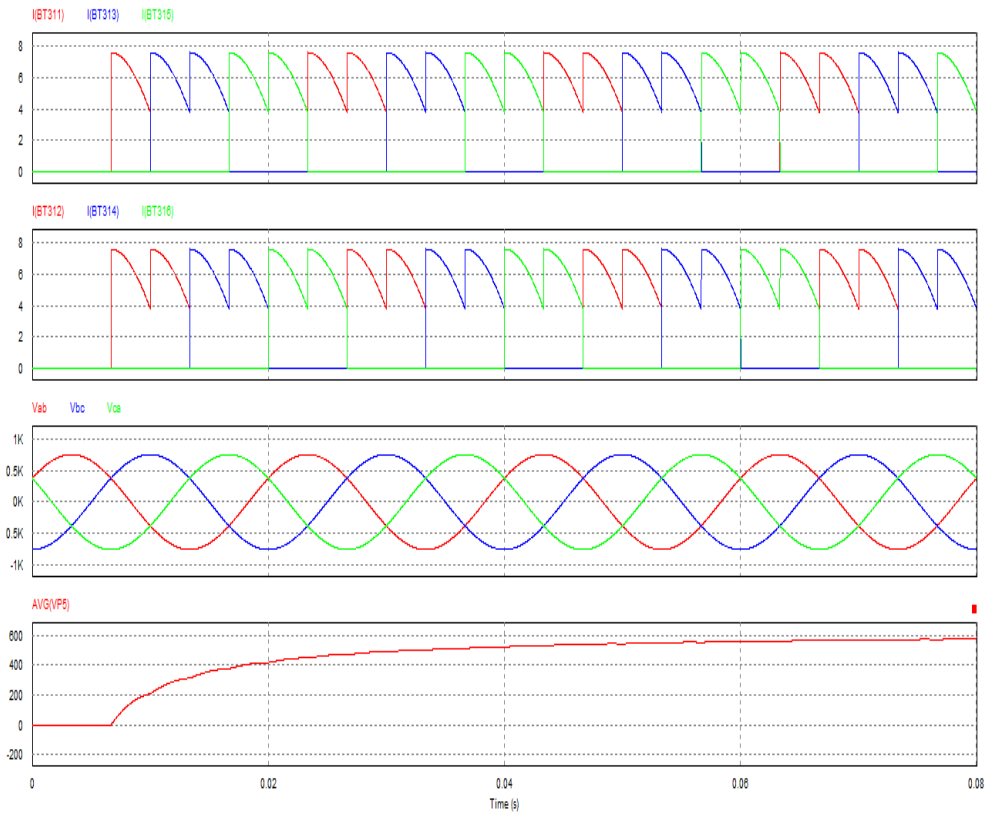
(شکل ۲۱.۴): مدار یکسوساز تریستوری با استفاده از بلوک تریستور

با دوبر کلیک روی بلوک یکسوساز، پنجره‌ای باز می‌شود که در آن می‌توان تنظیمات مربوط به شش دیود را اعمال کرد. در نظر داشته باشید که شماره‌گذاری‌ها، طبق شکل صفحه‌ی قبل انجام شده است. در این‌جا برای نمایش جریان تریستورها در کادر مقابل Current Flag ها عدد یک درج شده است.



(شکل ۲۲.۴): تنظیمات پل تریستوری سه‌فاز

با شبیه‌سازی این مدار خروجی زیر حاصل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود خروجی‌ها با شبیه‌سازی قبلی یکسان هستند.



(شکل ۲۳.۴): شکل موج‌های خروجی

در این فصل شبه‌سازی یک یکسو ساز تریستوری سه‌فاز را فرا گرفتید و با اصول کنترل و نحوه‌ی هماهنگی تریستورها آشنا شدید. از این اصول می‌توان برای هماهنگی کلیدها در سایر مدارها نیز استفاده کرد. هدف از این فصل صرفاً آشنایی با نحوه‌ی کنترل و هماهنگی تریستورها در یک مدار بود و برای شبه‌سازی انواع مختلف یکسوسازها می‌توان از بلوک‌های آماده‌ی موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار استفاده کرد.

## فصل پنجم

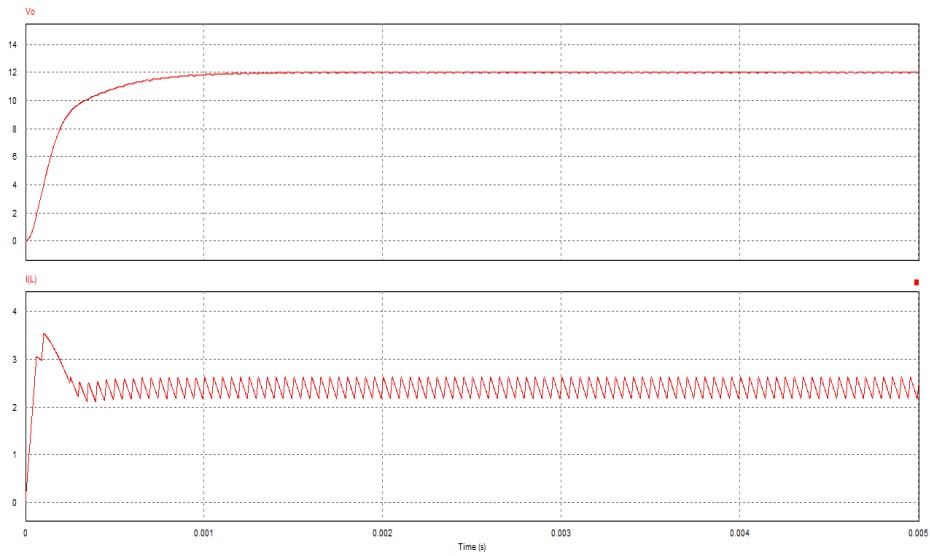
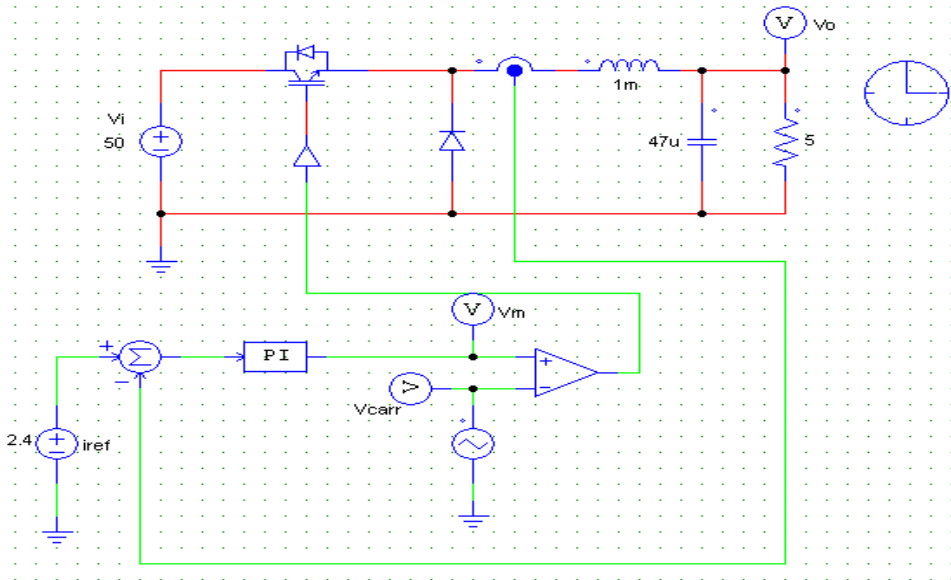
# شبیه‌سازی مبدل DC به DC با کنترل

## جریان متوسط

### ۵- مقدمه

در این فصل با سوئیچ IGBT و نحوه‌ی کنترل آن به منظور تبدیل ولتاژ DC به DC (تبدیل ولتاژ از یک سطح به سطح دیگر) آشنا خواهید شد. همچنین نحوه‌ی تغییر یک پارامتر در حین شبیه‌سازی و نحوه‌ی کار با اسیلوسکوپ توضیح داده خواهد شد.

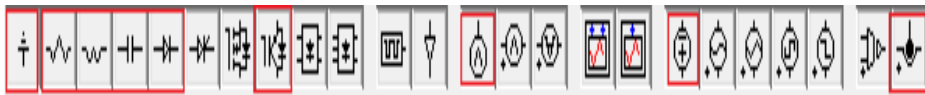
## ۵-۱- طرح مدار



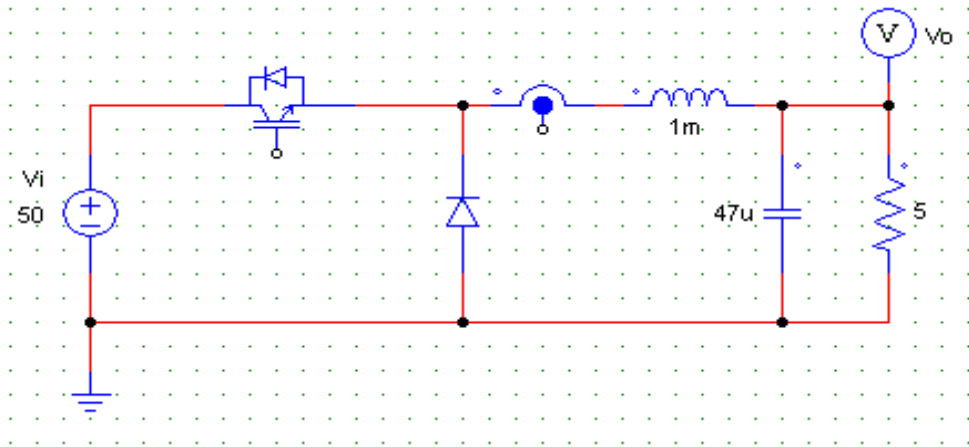
(شکل ۱.۵): شمای کلی مدار

## ۵-۲-۱ اجرای شبیه‌سازی

ابتدا مدار شکل زیر را با استفاده از المان‌های موجود در نوار ابزار المان رسم کرده و آن را با نام Average\_Current\_Mode\_Ctrl ذخیره می‌کنیم.

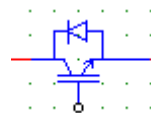


(شکل ۲.۵): انتخاب‌های المان‌ها از نوار ابزار



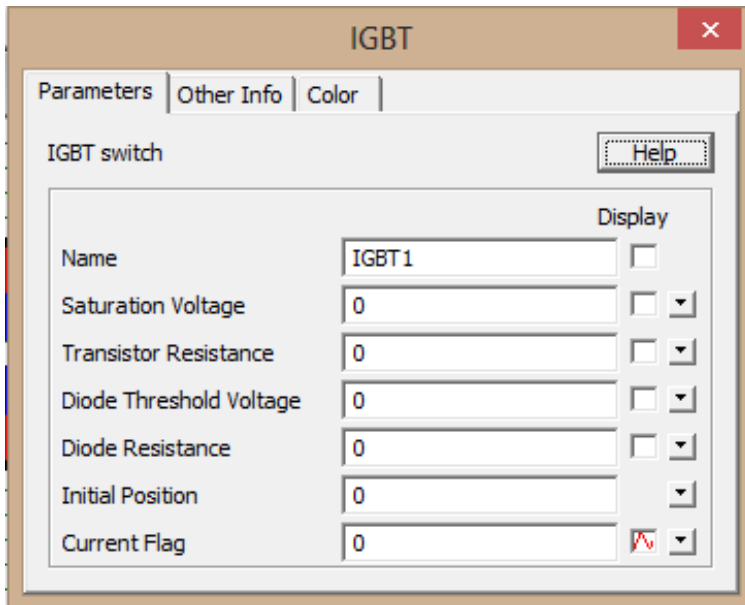
(شکل ۳.۵): پیاده‌سازی اولیه مدار

در مدار فوق المان همان کلید IGBT است. این سوئیچ شامل یک



ترانزیستور به همراه یک دیود موازی و معکوس است. اگر به صورت مثبت بایاس شود


زمانی روشن می‌شود که به گیت آن سیگنال اعمال شود. با برداشتن سیگنال اعمالی به گیت یا صفر شدن جريان کلید خاموش می‌شود. باید توجه کرد که وقتی کلید به صورت مثبت بایاس می‌شود، دیود به صورت معکوس بایاس شده و در نتیجه خاموش است؛ در حالی که اگر کلید به صورت منفی بایاس گردد دیود روشن می‌شود. بنابراین در حالت بایاس منفی کلید اجازه‌ی عبور جريان را خواهد داد. از IGBT عمدتاً برای کنترل و تبدیل ولتاژ DC استفاده می‌شود. با دوبار کلیک کردن روی این المان پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۴.۵): تنظیمات IGBT



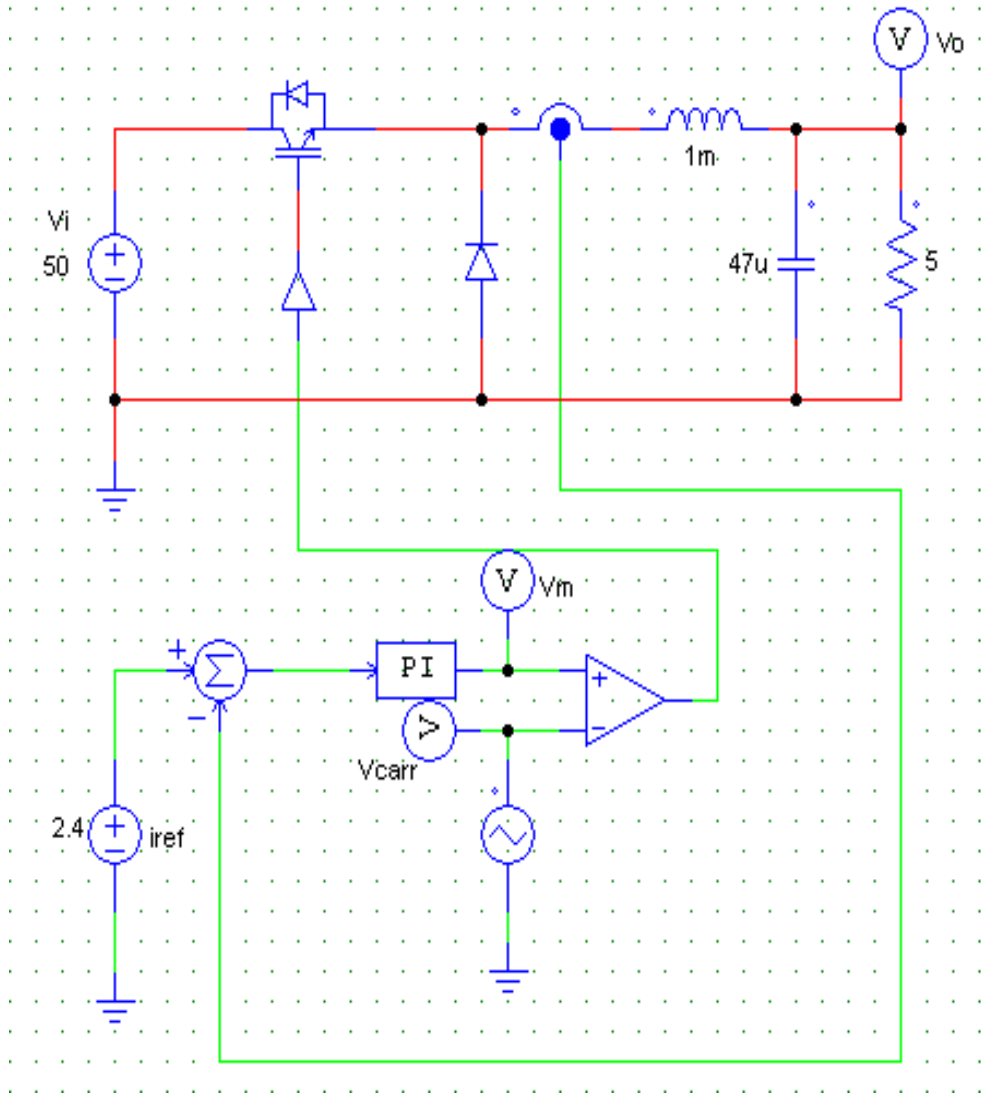
Saturation Voltage: افت ولتاژ روی ترانزیستور زمانی که روشن است
Transistor Resistance: مقاومت ترانزیستور در زمان روشن بودن
Diode Threshold Voltage: ولتاژ آستانه‌ی هدایت دیود معکوس و موازی
Diode Resistance: مقاومت دیود در زمان هدایت
Initial Position: موقعیت اولیه‌ی ترانزیستور (صفر برای خاموش و یک برای روشن)

تنظیمات مربوط به IGBT را به صورت پنجره‌ی فوق در نظر می‌گیریم. تنظیمات مربوط به سایر المان‌ها نیز مطابق اعداد درج شده روش شکل صورت می‌پذیرد. در نظر داشته باشید با نوشتن حروف m و u در کنار اعداد، نرم‌افزار اعداد را به ترتیب به صورت میلی و میکرو در نظر می‌گیرد. در مدار فوق ابزار  سنسور جریان است و وظیفه‌ی آن اندازه‌گیری جریان عبوری از مدار و تبدیل آن به سیگنال مناسب جهت استفاده در مدارهای کنترلی است.

حال مدار کنترلی را با استفاده از المان‌ها زیر رسم می‌کنیم.



(شکل ۵.۵): نوار ابزار

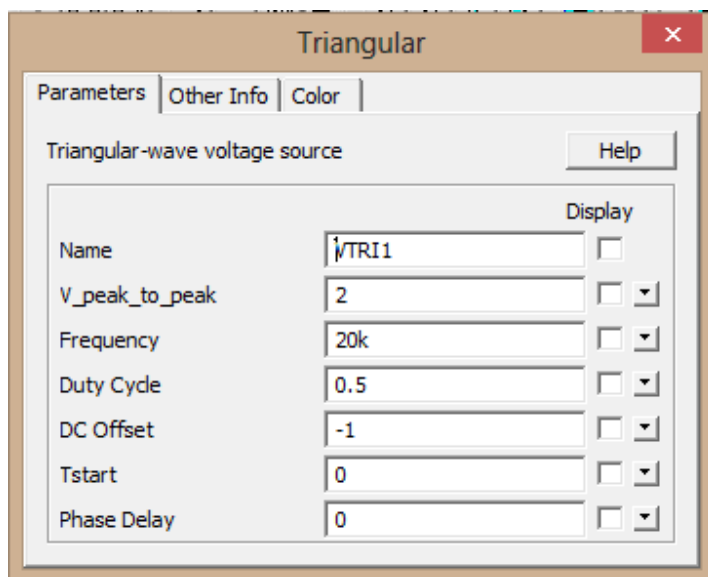


(شکل ۶.۵): اعمال قسمت کنترلی به مدار

در مدار کنترلی فوق، جریان عبوری از سلف با مقدار مرجع مقایسه شده و سیگنال خطا تولید می شود. این سیگنال خطا از یک کنترل کننده PI عبور می کند تا سیگنال

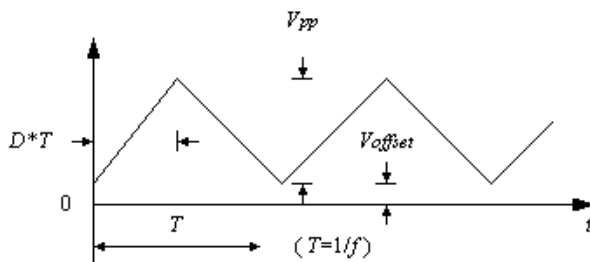
مناسب جهت مقایسه با سیگنال حامل (سیگنال مثلثی) تولید شود. در خروجی مقایسه‌گر، پالس‌های مناسب جهت روشن و خاموش شدن کلید به گونه‌ای تولید می‌شود که جریان سلف در مقدار مرجع تنظیم شود. باید توجه کرد از آنجایی که سیگنال خروجی مقایسه‌گر یک سیگنال کنترلی است، نمی‌توان آن را مستقیماً به گیت ترانزیستور متصل کرد. از این رو باید از یک کنترل‌کننده‌ی سوئیچ ( $\Phi$ ) استفاده کرد تا سیگنال کنترلی را به سیگنال مناسب برای گیت ترانزیستور تبدیل کند.

تنظیمات مربوط به منبع مثلثی به صورت زیر انجام شده است:



(شکل ۷.۵): تنظیمات منبع مثلثی

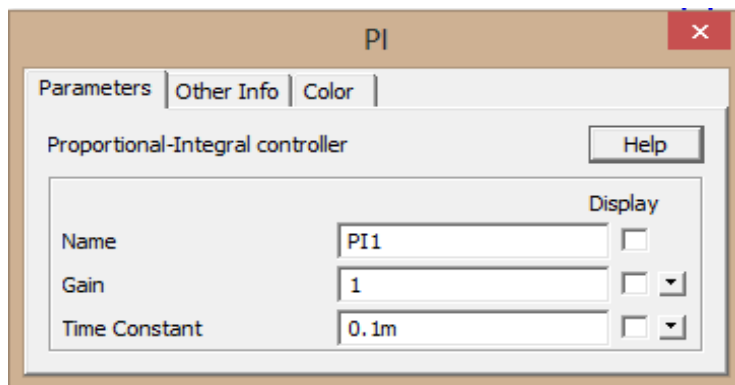
با این تنظیمات یک سیگنال مثلثی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌شود که در آن ولتاژ پیک تا پیک ۱۲V است. DC Offset و Duty Cycle در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۸.۵): سیگنال مثلثی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز

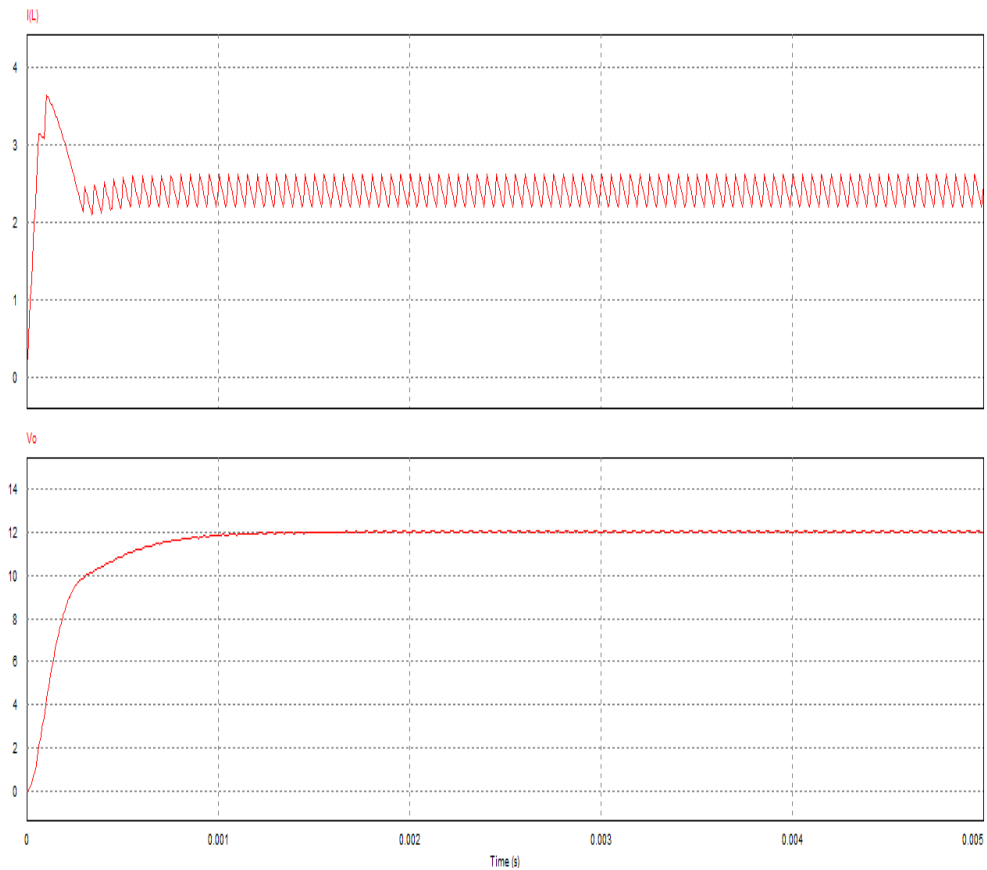
کنترل کننده‌ی PI را نیز به صورت زیر تنظیم می‌کنیم. این تنظیمات طبق تابع تبدیل کنترل کننده‌ی PI صورت می‌پذیرد.

$$G(s) = K * (1 + sT)/(sT)$$



(شکل ۹.۵): تنظیمات کنترل کننده‌ی PI

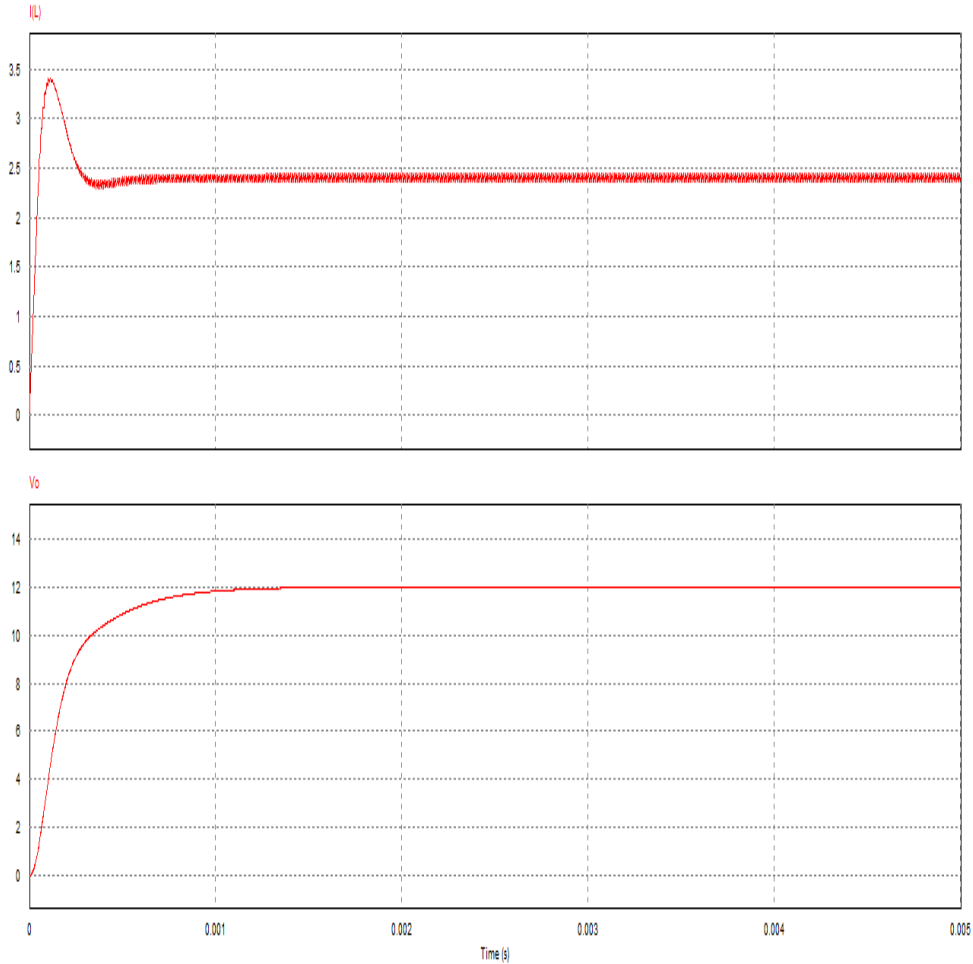
پیش از شبیه‌سازی، Current Flag مربوط به سلف را یک می‌کنیم تا در خروجی جریان سلف نیز نمایش داده شود. زمان شبیه‌سازی را ۵ میلی‌ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی نمودارهای  $V_o$  و  $I(L)$  را رسم می‌کنیم، شکل زیر این خروجی‌ها را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۰.۵): خروجی نمودارهای  $V_o$  و  $I(L)$

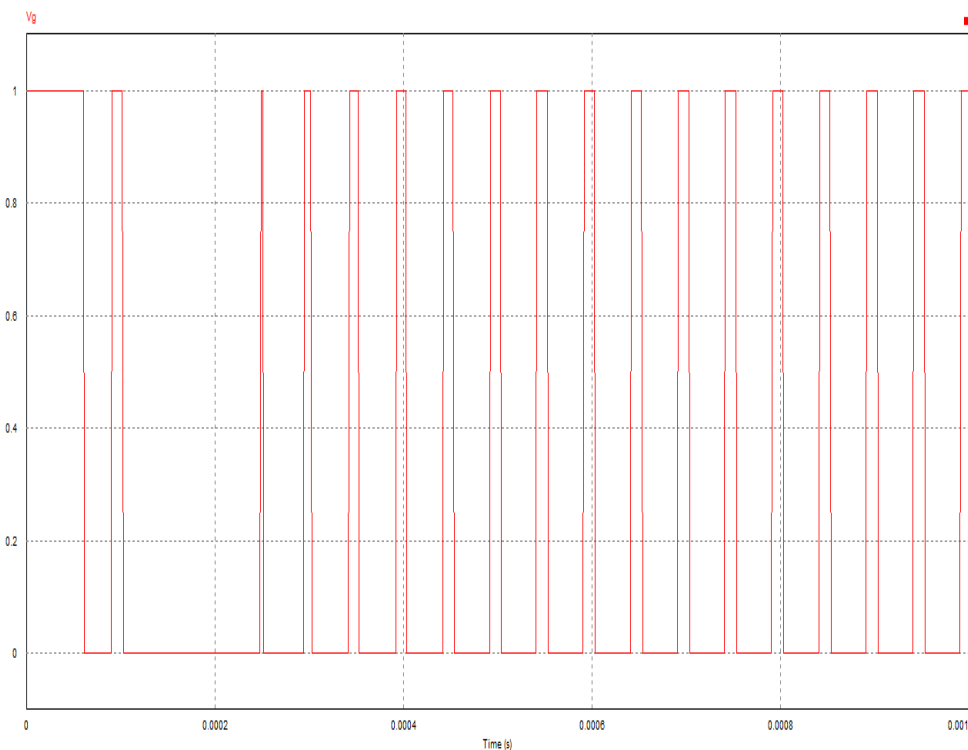
همانطور که مشاهده می‌شود جریان سلف در  $2/4$  آمپر تثبیت شده است (چراکه جریان مرجع در  $2/4$  آمپر تنظیم شده است) و ولتاژ خروجی نیز ۱۲ ولت است. حال اگر مقاومت را تغییر دهیم ولتاژ خروجی تغییر کرده ولی جریان سلف همان  $2/4$  آمپر خواهد بود.

نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که هرچه فرکانس کلید زنی بیشتر باشد ریپل‌های موجود در نمودارهای خروجی کمتر می‌شود. فرکانس کلید زنی با فرکانس موج حامل برابر است. برای مثال فرکانس سیگنال مثلثی را در ۱۰۰ کیلوهرتز تنظیم کرده و شبیه‌سازی را دوباره اجرا نمایید، شکل زیر خروجی‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش فرکانس کلید زنی جریان سلف هموارتر شده و اندک ریپل موجود در ولتاژ خروجی نیز از بین می‌رود.



(شکل ۱۱.۵): شکل موج‌های جریان و ولتا خروجی

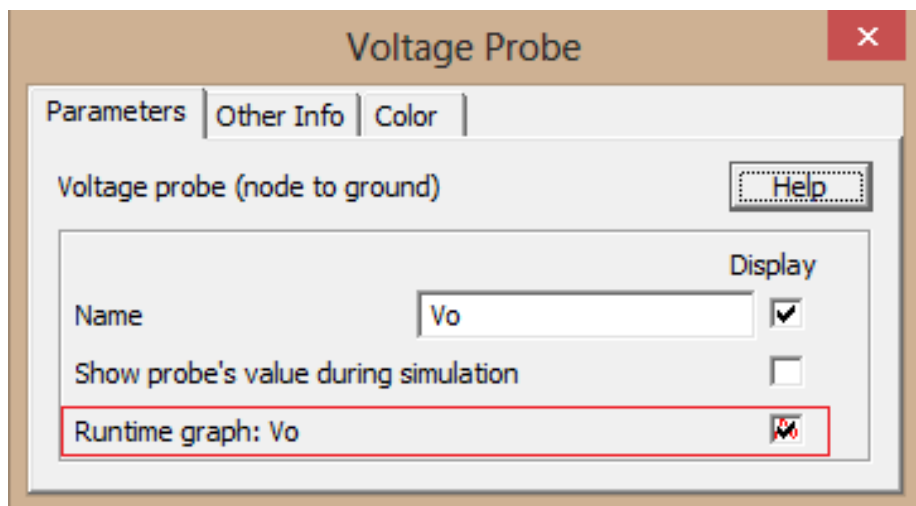
با قرار دادن یک پروب ولتاژ در خروجی مقایسه‌گر می‌توان پالس‌های اعمالی به گیت ترانزیستور را مشاهده کرد. شکل زیر پالس‌های اعمال شده به ترانزیستور را نشان می‌دهد.




(شکل ۱۲.۵): پالس‌های اعمال شده به ترانزیستور

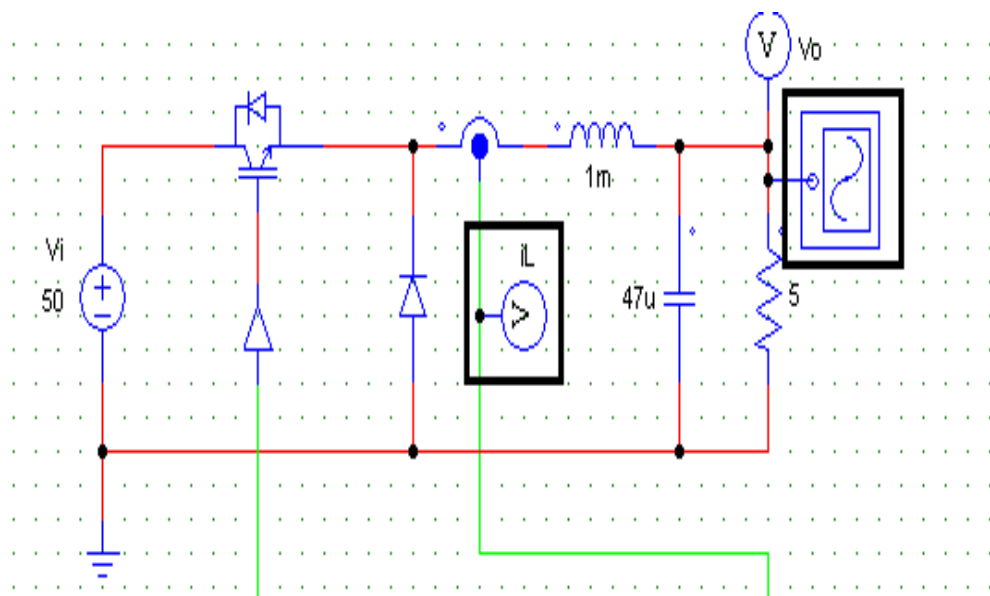
برای مشاهده‌ی اثر تغییر مقاومت روی شکل موج خروجی در حین شبیه‌سازی ابتدا زمان شبیه‌سازی را در یک ثانیه تنظیم کنید. برای مشاهده‌ی شکل موج ولتاژ خروجی در حین شبیه‌سازی دو روش وجود دارد. در روش اول روی پروب ولتاژ ( $V_0$ ) دو بار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی مربوط به تنظیمات آن باز شود. با زدن تیک مربوط به گزینه‌ی Runtime graph شکل موج مربوطه در حین شبیه‌سازی رسم می‌شود.





(شکل ۱۳.۵): پروب ولتاژ

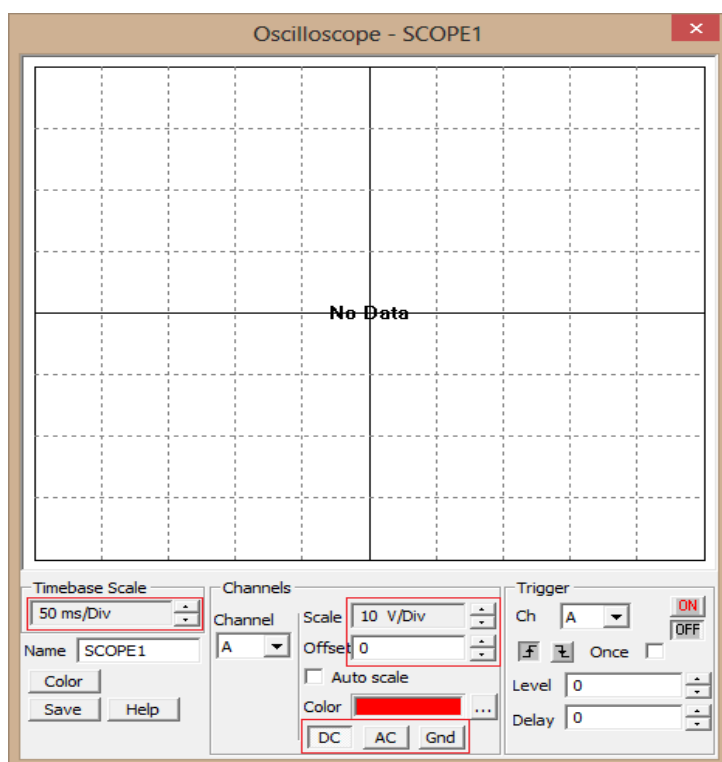
در روش دوم می‌توان یک اسیلوسکوپ یک کاناله (  ) به نقطه‌ی مورد نظر متصل کرد. در این حالت اسیلوسکوپ، ولتاژ آن نقطه را نصب به زمین نمایش خواهد داد. برای نمایش جريان سلف در حين شبيه‌سازی نیز می‌توان یک پروب ولتاژ به خروجی سنسور جريان متصل نمود و تیک مربوط به Runtime graph را زد یا از یک اسیلوسکوپ استفاده کرد، شکل زیر تغییرات اعمال شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۴.۵): استفاده از اسیلوسکوپ و پروب ولتاژ

با دو بار کلیک روی اسیلوسکوپ پنجره‌ی زیر باز می‌شود. در این پنجره در قسمت Timebase Scale می‌توان زمان نشان‌داده شده توسط هر تقسیم افقی را تنظیم کرد. در قسمت Channels با استفاده از Scale، مقیاس تقسیمات عمودی تنظیم می‌شود. برای مثال در اینجا هر تقسیم افقی نشان‌دهنده‌ی ۵۰ میلی‌ثانیه و هر تقسیم عمودی نشان‌دهنده‌ی ۱۰ ولت است. با استفاده از Offset می‌توان شکل موج خروجی را به بالا یا پایین منتقل کرد. اگر تیک مربوط به Auto Scale زده شده باشد، مقیاس‌بندی عمودی به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که شکل موج همواره داخل صفحه‌ی نمایش باقی بماند. برای نمایش خروجی سه حالت DC، AC و Gnd وجود دارد. در حالت DC کل شکل موج، در

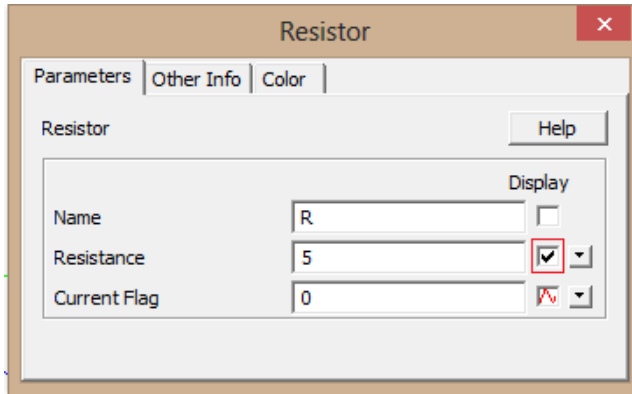
حالت AC فقط تغييرات AC شکل موج و در حالت Gnd زمين مرجع نمايش داده می‌شود. اگر Trigger خاموش روشن باشد، شکل موج زمانی نمايش داده می‌شود که شرایط Trigger ارضا شود.



(شکل ۱۵.۵): اسیلوسکوپ

برای مثال اگر در اینجا تریگر روشن شود، نمايش شکل موج از زمانی شروع می‌شود که سیگنال ورودی از صفر عبور کند (چون لبه‌ی بالارونده انتخاب شده است عبور از صفر

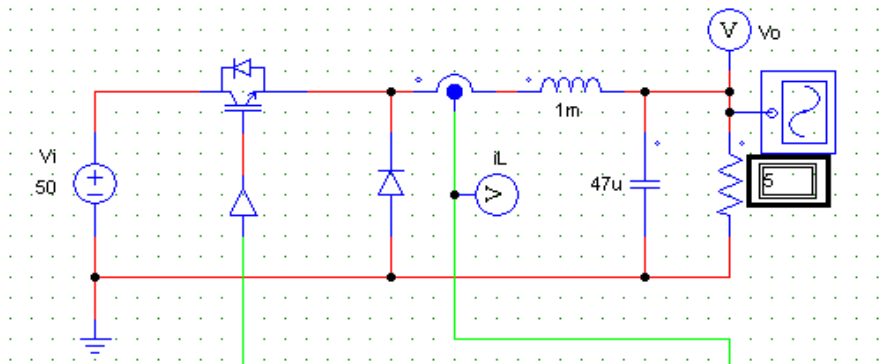
در زمان تغییر علامت از منفی به مثبت در نظر گرفته می‌شود. با این کار می‌توان حالت‌های گذرای شکل موج را استخراج کرد. برای تغییر مقدار مقاومت در حین شبیه‌سازی باید تیک مربوط به نمایش مقدار آن زده شده باشد.



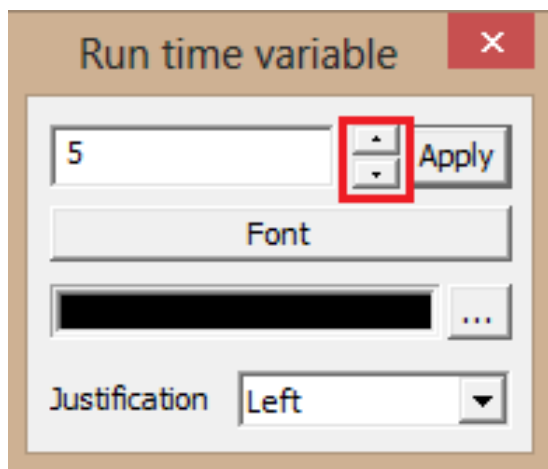
(شکل ۱۶.۵): مقاومت

حال روی مقدار نمایش داده شده برای مقاومت دو بار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی زیر باز

شود.

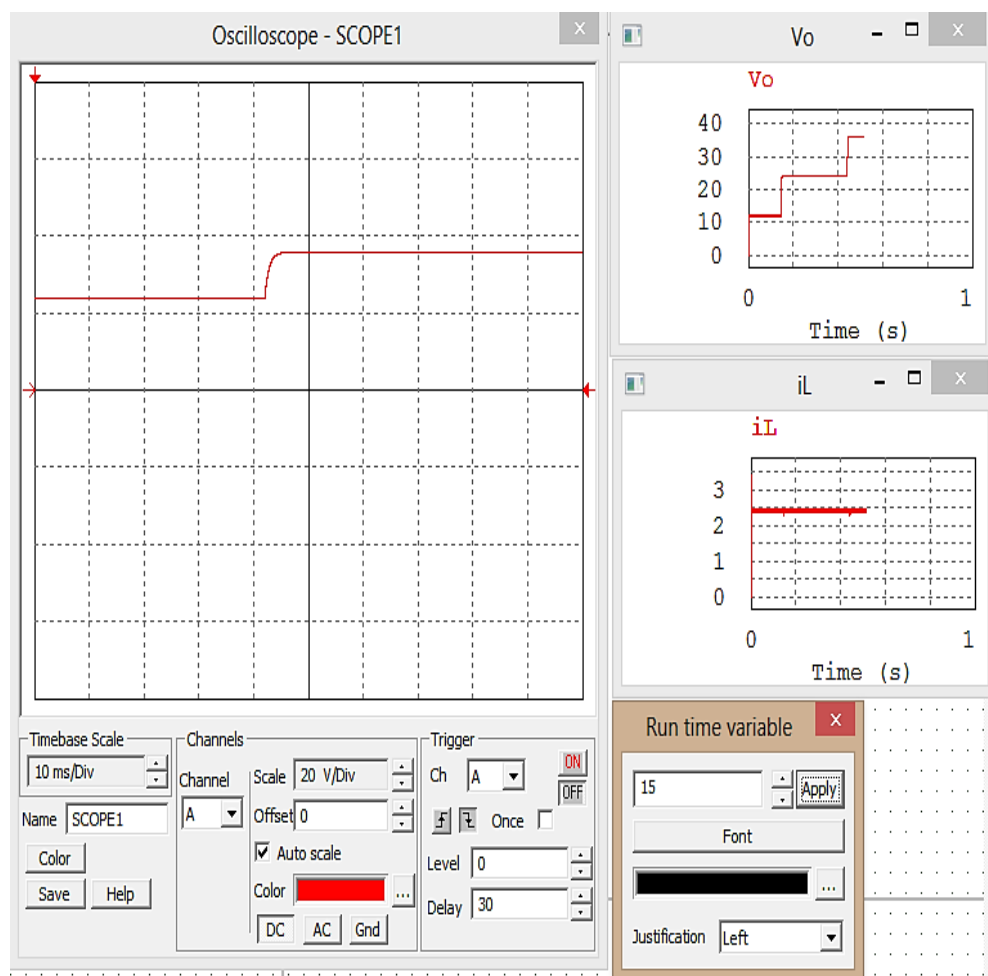


(شکل ۱۷.۵): مدار تکمیل شده



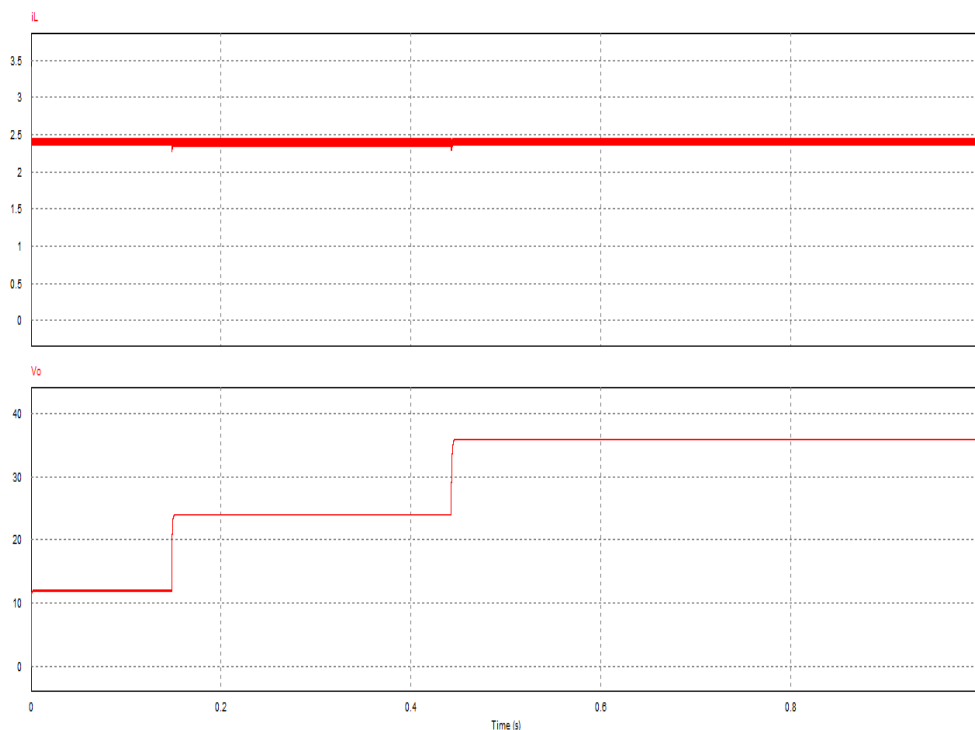
(شکل ۱۸.۵): بلوک تنظیم زمان اجرا

با استفاده از فلش‌های موجود یا با درج مقاومت در کادر مربوطه و زدن Apply می‌توان مقدار مقاومت را در حین شبیه‌سازی تغییر داد (با این روش می‌توان مقادیر سایر المان‌ها را نیز در طول شبیه‌سازی تغییر داد). حال شبیه‌سازی را اجرا کرده و در حین شبیه‌سازی مقدار مقاومت را تغییر می‌دهیم. اگر تیک مربوط به Runtime graph در پروب‌های ولتاژ زده شده باشد و اسیلوسکوپ نیز باز باشد می‌توان تغییرات شکل موج‌های خروجی را مشاهده کرد.



(شکل ۱۹.۵): تغییرات شکل موج‌های خروجی

پس از اتمام شبیه‌سازی پنجره‌ی Simview نیز باز شده و می‌توان شکل موج‌های خروجی را رسم کرد. در ادامه امواج مربوط به ولتاژ مقاومت و جریان سلف رسم شده‌اند.



(شکل ۲۰.۵): ولتاژ مقاومت و جریان سلف

همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر مقاومت، ولتاژ دوسر آن نیز تغییر می‌کند ولی

جریان سلف همواره در  $2/4$  آمپر ثابت باقی می‌ماند.

در این فصل یک مبدل DC به DC کاهنده با استفاده از کنترل‌کننده‌ی جریان

شبیه‌سازی شد. برای چنین مبدل‌هایی عمدتاً از ترانزیستور IGBT یا MOSFET استفاده

می‌شود. لازم به ذکر است که عملکرد ترانزیستور MOSFET نیز مشابه IGBT است. عموماً

برای کنترل چنین کلیدهایی، یک سیگنال مناسب (سینوسی، DC و ...) با سیگنال مثلی

مقایسه می‌شود تا پالس‌های کلیدزنی مناسب تولید گردد. هم‌چنین در این فصل با نحوه‌ی کار اسیلوسکوپ و نحوه‌ی تغییر پارامترها در طول شبیه‌سازی آشنا شدید.



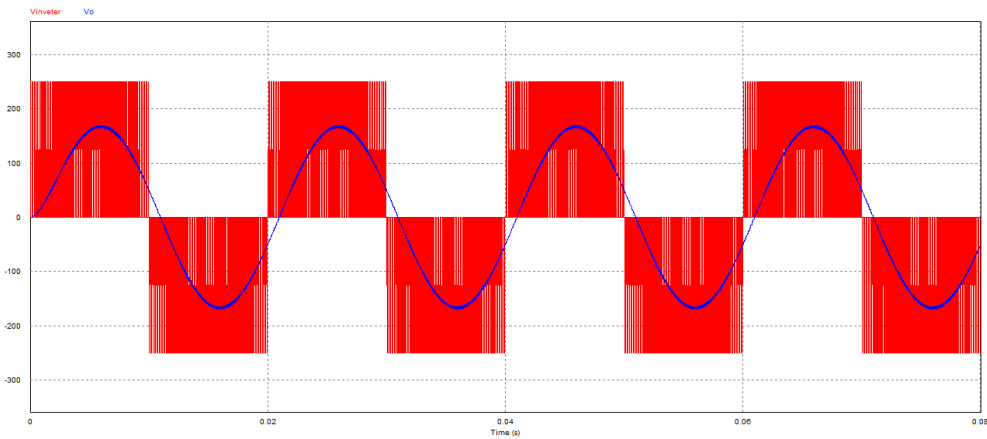
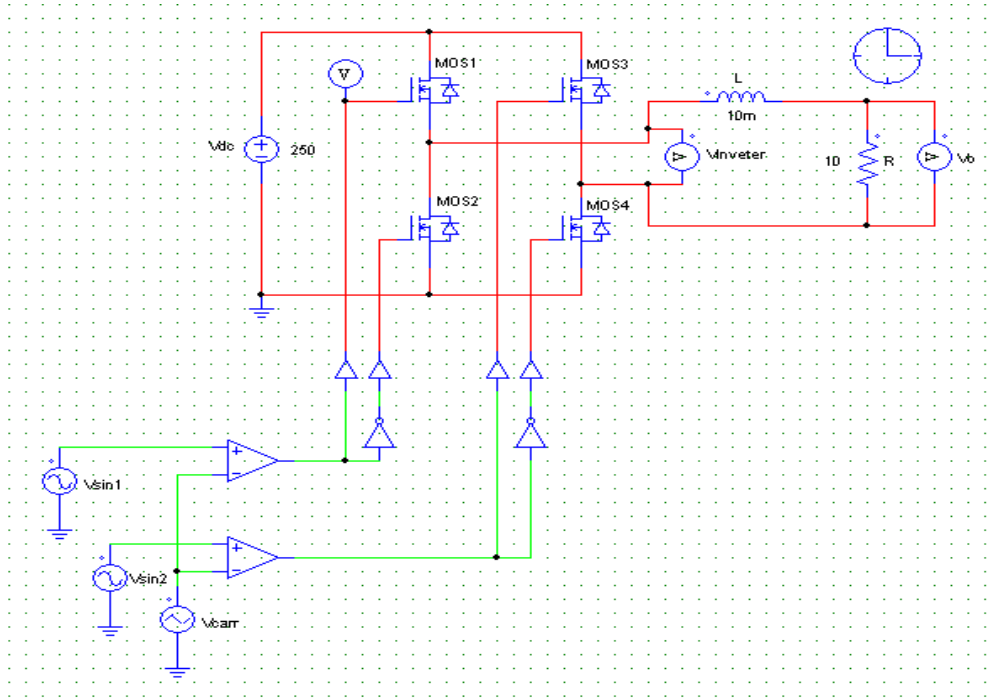
## فصل ششم

# شبیه‌سازی اینورتر منبع ولتاژ تک‌فاز

### ۶- مقدمه

در این فصل با ترانزیستور MOSFET و نحوه‌ی تولید پالس (Pulse Width Modulation) آشنا خواهیم شد و هماهنگی ترانزیستورها برای تولید خروجی سینوسی توضیح داده خواهد شد.

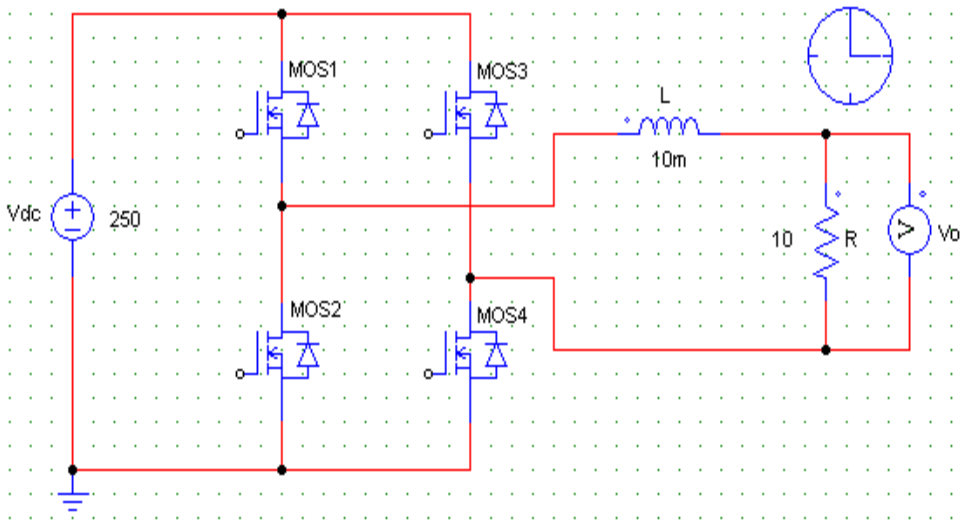
## ۶-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۶): شمای کلی مدار

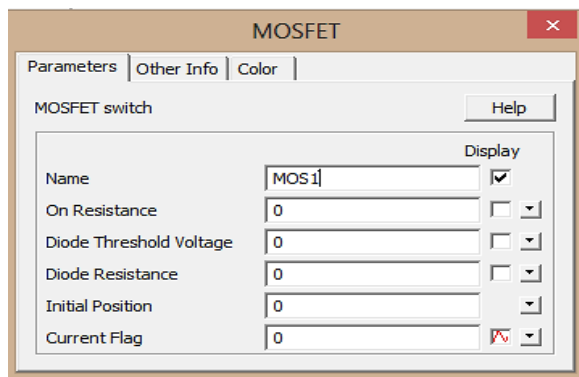
## ۶-۲-۱ اجرای شبيه‌سازی

برای شبيه‌سازی یک اينورتر تک‌فاز به یک منبع DC و چهار سوئیچ احتياج داریم. در اين‌جا از ترانزیستور MOSFET به عنوان سوئیچ استفاده خواهیم کرد. بنابراین مدار شکل زیر را در نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۶): اينورتر تک‌فاز

مقادير سلف، مقاومت و منبع DC را طبق اعداد درج شده روی شکل تنظيم کنید. با دو بار کلیک روی ترانزیستور MOSFET پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



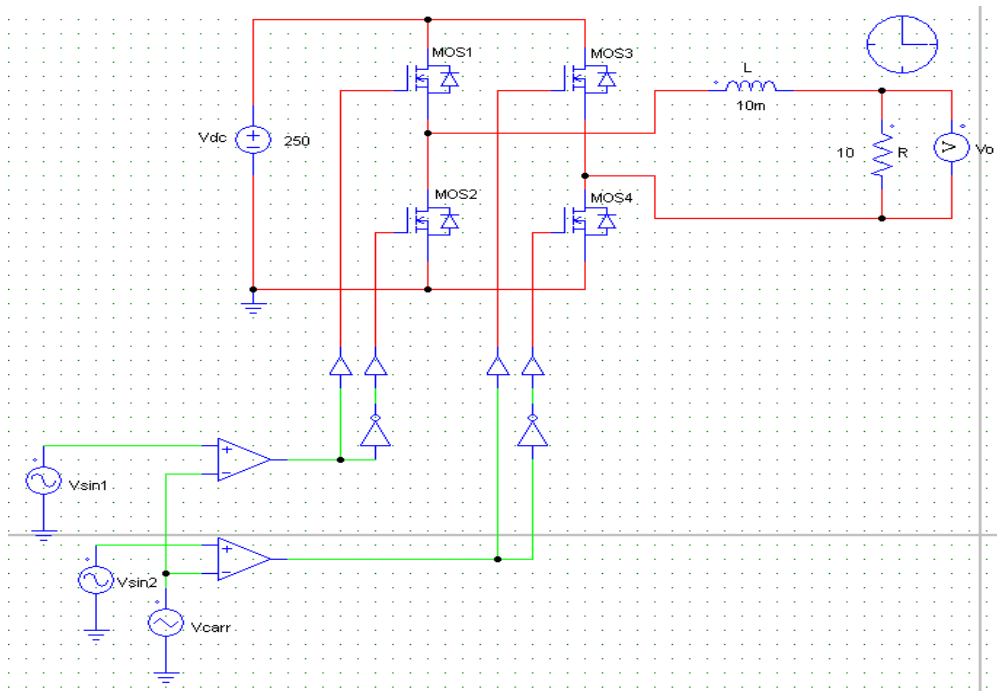
(شکل ۳.۶): تنظیمات MOSFET

پارامترهای موجود در این پنجره به‌صورت زیر هستند:

On Resistance: مقاومت ترانزیستور در زمان روشن بودن
Diode Threshold Voltage: ولتاژ آستانه‌ی هدایت دیود معکوس و موازی
Diode Resistance: مقاومت دیود در زمان هدایت
Initial Position: موقعیت اولیه‌ی ترانزیستور (صفر برای خاموش و یک برای روشن)

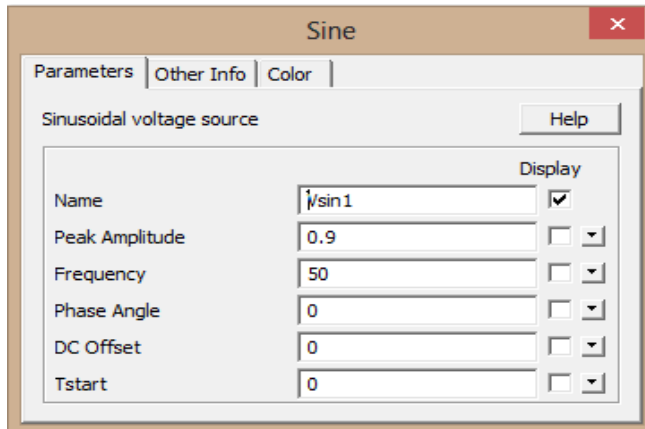
نحوه‌ی عملکرد ترانزیستور MOSFET نیز دقیقاً شبیه ترانزیستور IGBT است. برای تکمیل این مدار باید پالس‌های مناسب جهت روشن و خاموش شدن ترانزیستورها به گونه‌ای تولید شوند که در خروجی ولتاژ سینوسی حاصل شود. یکی از روش‌های تولید این پالس‌ها روش PWM است. در این روش یک موج سینوسی مناسب با موج مثلی مقایسه شده و پالس‌های مناسب برای سوئیچ‌ها تولید می‌شود.

نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که ترانزیستور موجود در یک ستون، نباید هم‌زمان با هم روشن شوند. برای این منظور پالس‌های اعمالی به ترانزیستورهای پایینی باید NOT ترانزیستور بالایی در همان ستون باشد. پالس‌های مربوط به ترانزیستور شماره‌ی یک از مقایسه‌ی سینوسی با یک موج مثلثی حاصل می‌شود. برای تولید پالس‌های مربوط به ترانزیستور شماره‌ی سه نیز موج سینوسی باید ۱۸۰ درجه اختلاف فاز داشته باشد و با همان موج مثلثی مقایسه شود. بنابراین برای تولید پالس‌های PWM مدار را به صورت زیر تکمیل می‌کنیم.

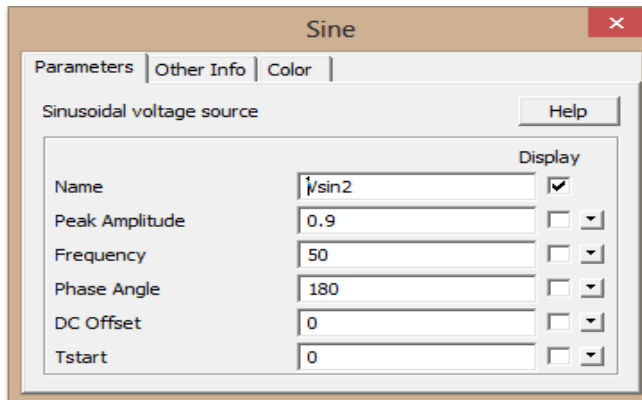


(شکل ۴.۶): اضافه کردن قسمت کنترل آتش به مدار

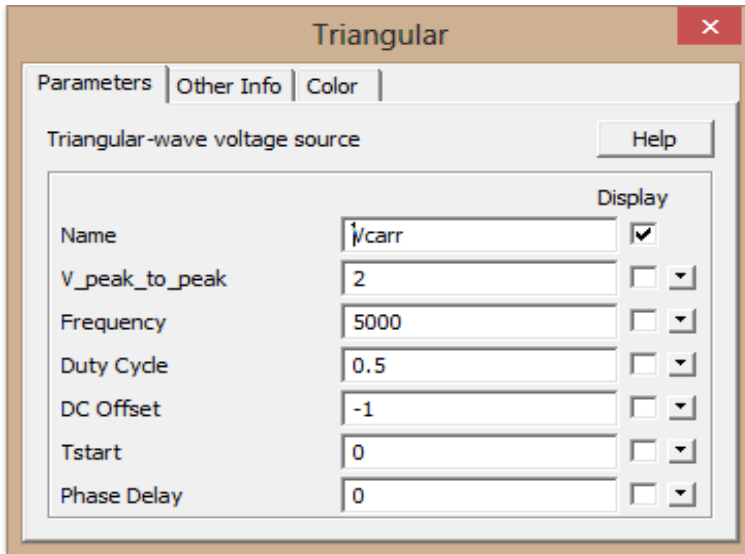
همانطور که مشاهده می‌شود از خروجی هر مقایسه‌گر به همراه NOT آن برای تولید پالس‌های مناسب برای ترانزیستورهای موجود در یک بازو استفاده شده است. تنظیمات مربوط به منابع سینوسی و منبع مثلثی به صورت زیر هستند.



(شکل ۵.۶): تنظیمات منبع سینوسی

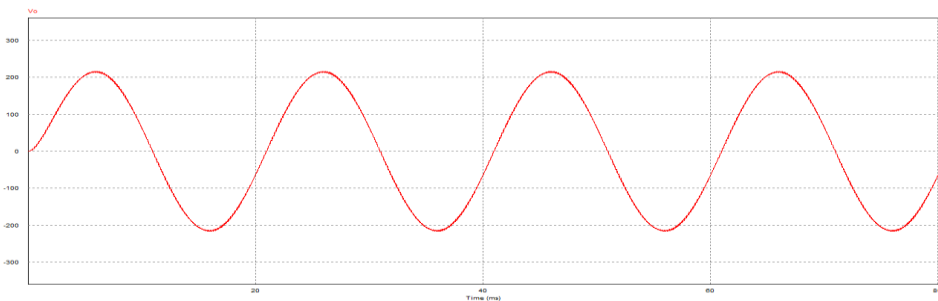


(شکل ۶.۶): تنظیمات منبع سینوسی



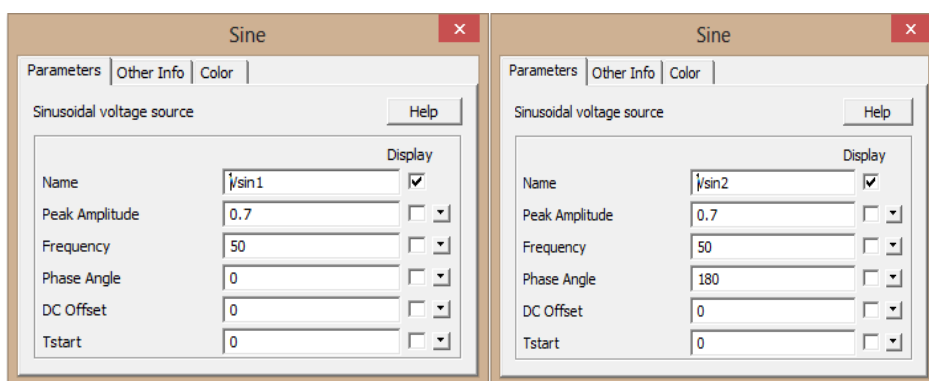
(شکل ۷.۶): تنظیمات منبع مثلثی

لازم به ذکر است که فرکانس سیگنال مثلثی همان فرکانس کلید زنی است و هرچه این فرکانس بالاتر باشد خروجی سینوسی‌تر خواهد بود. زمان شبیه‌سازی را  $0.08$  ثانیه در نظر گرفته و آن را اجرا می‌کنیم، شکل زیر ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد.



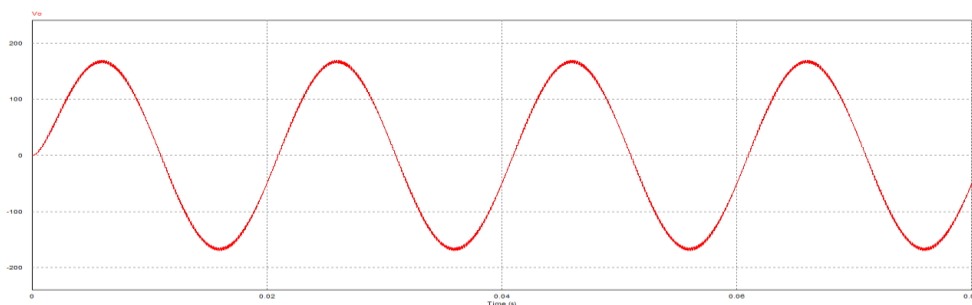
(شکل ۸.۶): ولتاژ خروجی

همانطور که مشاهده می‌شود خروجی سینوسی بوده و فرکانس آن برابر فرکانس منبع سینوسی (۵۰ هرتز) است. دامنه‌ی ولتاژ خروجی توسط دامنه‌ی منابع سینوسی تنظیم می‌شود. برای مثال در اینجا دامنه‌ی منابع سینوسی را به  $0/7$  ولت تغییر داده و شبیه‌سازی را دوباره اجرا می‌کنیم.



(شکل ۱۰.۶): تنظیمات منبع سینوسی

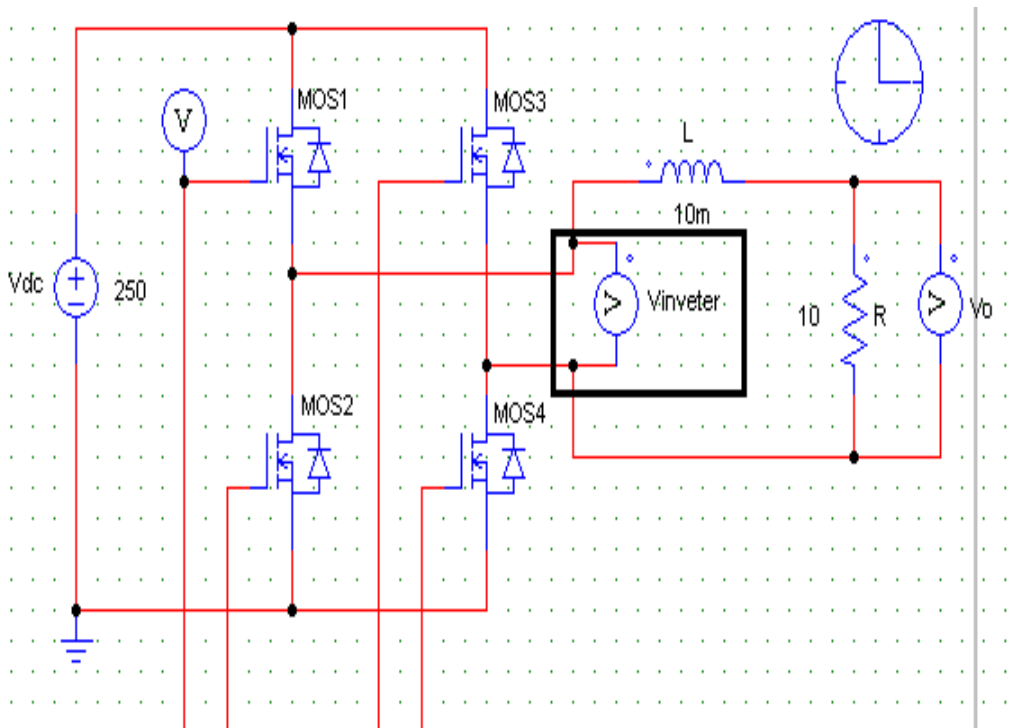
ولتاژ خروجی به‌صورت زیر خواهد بود.





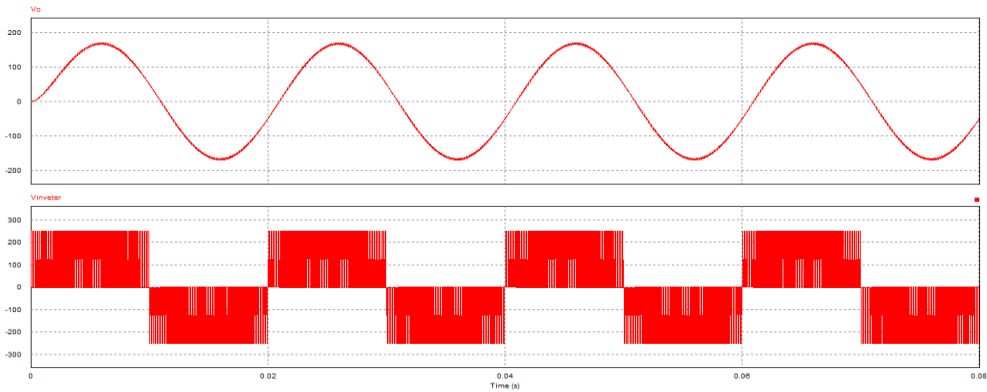
(شکل ۱۱.۶): ولتاژ خروجی

در این حالت دامنه‌ی ولتاژ خروجی نسبت به حالت قبل کاهش داشته است. نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره کرد در خصوص نقش سلف در این مدار است. در اینجا سلف همانند یک فیلتر عمل کرده و ریبیل‌های موجود در ولتاژ را کاهش می‌دهد. برای مشاهده‌ی تاثیر سلف طبق شکل زیر یک ولتمتر در خروجی اینورتر قرار داده و شبیه‌سازی را دوباره اجرا کنید.



(شکل ۱۲.۶): اعمال ولتمتر در خروجی اینورتر

در خروجی ولتاژهای  $V_o$  و  $V_{inveter}$  را رسم می‌کنیم. همانطور که مشاهده می‌شود قبل از سلف، ولتاژ دارای بریدگی‌های متعددی ناشی از روشن و خاموش شدن کلیدهاست در حالی که بعضی از این بریدگی‌ها توسط سلف فیلتر می‌شود.



(شکل ۱۳.۶): ولتاژهای  $V_o$  -  $V_{inveter}$

در این شبيه‌سازي با ترانزیستور IGBT آشنا شدید و نحوه‌ی تولید پالس PWM و هماهنگی ترانزیستورها را در یک اینورتر تک‌فاز فرا گرفتید.

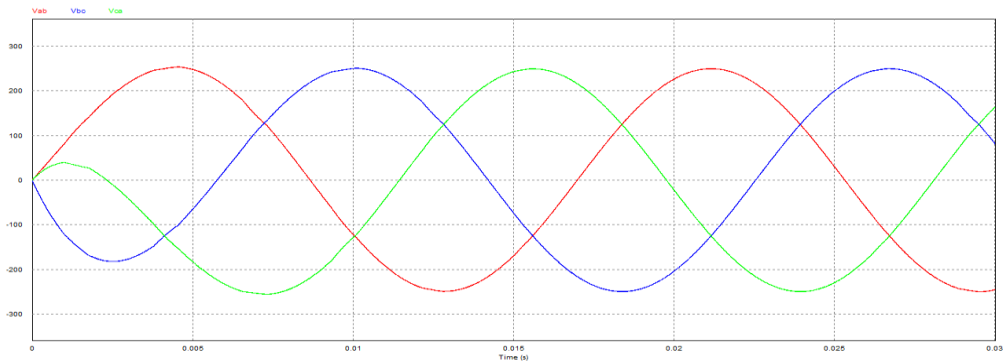
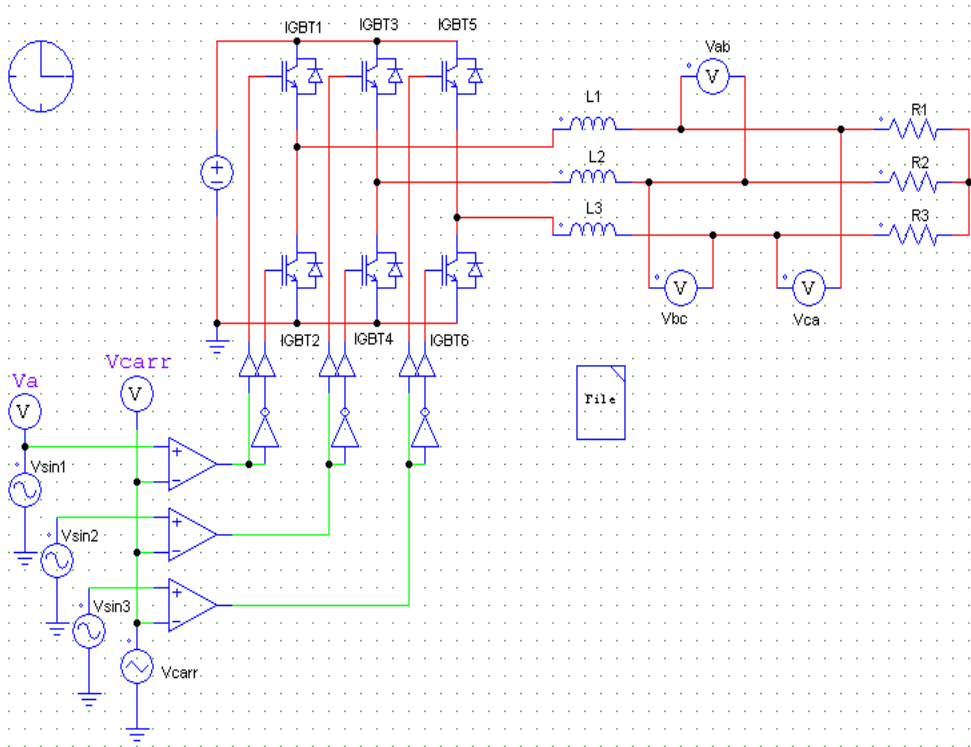
## فصل هفتم

# شبیه‌سازی اینورتر منبع ولتاژ سه‌فاز

### ۷- مقدمه

در این فصل نحوه‌ی تولید پالس PWM برای یک اینورتر سه‌فاز و معرفی بلوک Parameter File مطرح خواهد شد.

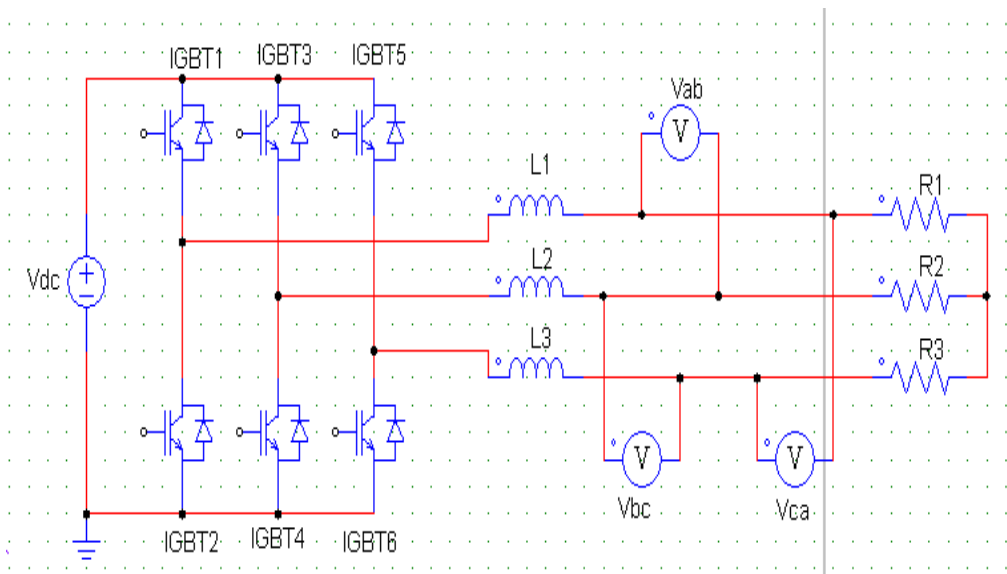
## ۷-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۷): شمای کلی مدار

## ۷-۲-۱ اجرای شبیه‌سازی

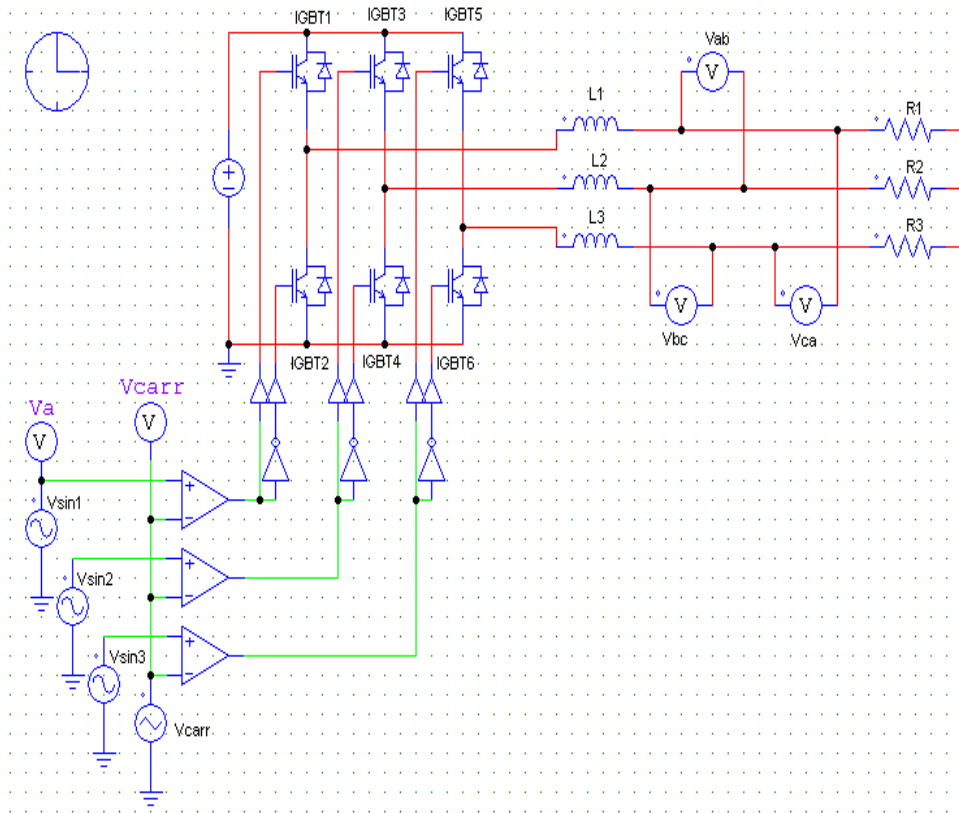
برای شبیه‌سازی یک اینورتر سه‌فاز به یک منبع DC و شش سوئیچ احتیاج داریم. در این‌جا از ترانزیستور IGBT به عنوان سوئیچ استفاده خواهیم کرد. بنابراین مدار شکل زیر را در نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۷): پیاده‌سازی اینورتر سه‌فاز

برای یک اینورتر سه‌فاز نیز نحوه‌ی تولید پالس PWM همانند یک اینورتر تک‌فاز است با این تفاوت که سیگنال‌های سینوسی باید با یکدیگر  $120^\circ$  درجه اختلاف فاز داشته باشند. کلیدهای موجود در یک بازو نیز نباید هم‌زمان روشن شوند، از این رو به کلیدهای

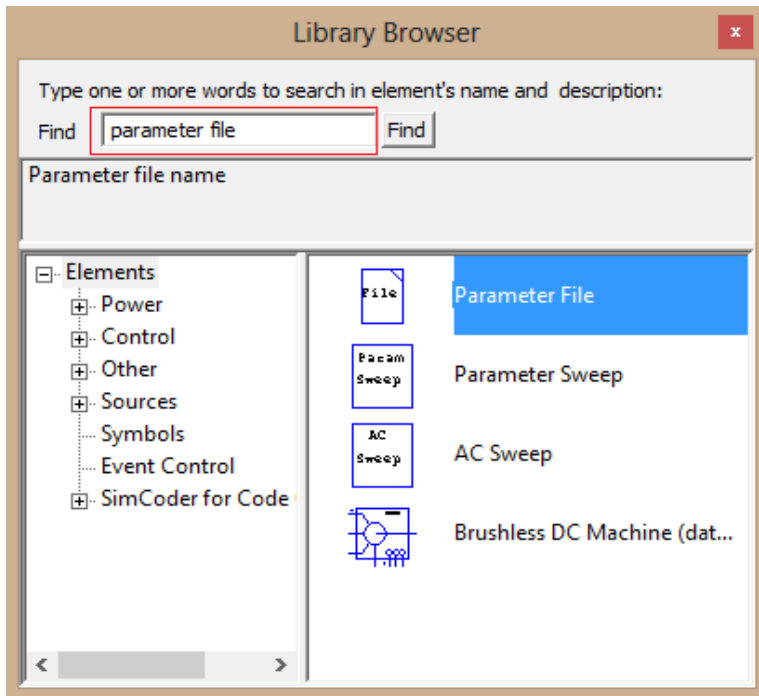
پایینی NOT سیگنال اعمالی به ترانزیستور بالایی در همان ستون اعمال می‌شود، شکل زیر مدار کامل شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۳.۷): مدار کامل به همراه پالس های آتش

همانطور که گفته شد برای تولید پالس PWM در یک اینورتر سه‌فاز باید سه سیگنال سینوسی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه با یک سیگنال مثلثی مقایسه شوند. حال باید پارامترهای مربوط به المان‌های موجود در مدار را تنظیم کنیم. در این شبیه‌سازی

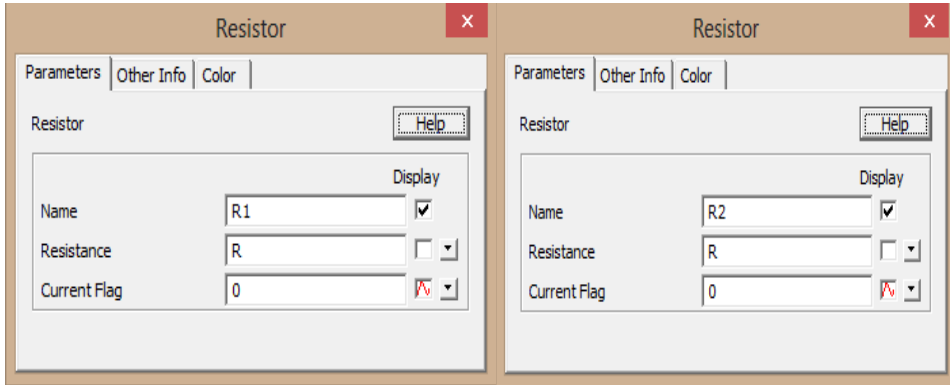
می‌خواهیم از بلوک Parameter File استفاده کنیم. این بلوک را می‌توان با جستجوی عبارت parameter file در کتابخانه‌ی نرم‌افزار پیدا کرد.



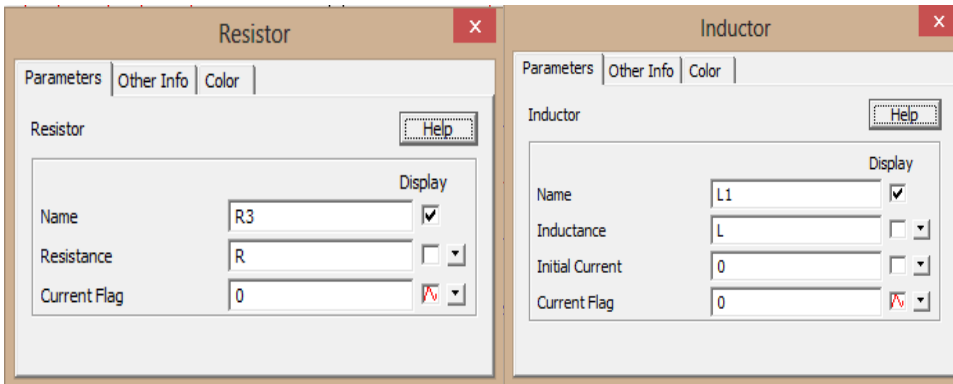
(شکل ۴.۷): کتابخانه

این بلوک را به مدار اضافه می‌کنیم. در این بلوک می‌توان مقادیر پارامتر المان‌ها را ذخیره کرد. برای مثال اندازه‌ی یک مقاومت را می‌توان  $R_1$  تعریف کرد و در این بلوک مقدار  $R_1$  را مشخص کرد. در این شبیه‌سازی مقادیر المان‌های مختلف به‌صورت زیر تعریف شده است.

مقدار مقاومت‌ها R و مقدار سلف‌ها L در نظر گرفته شده است.

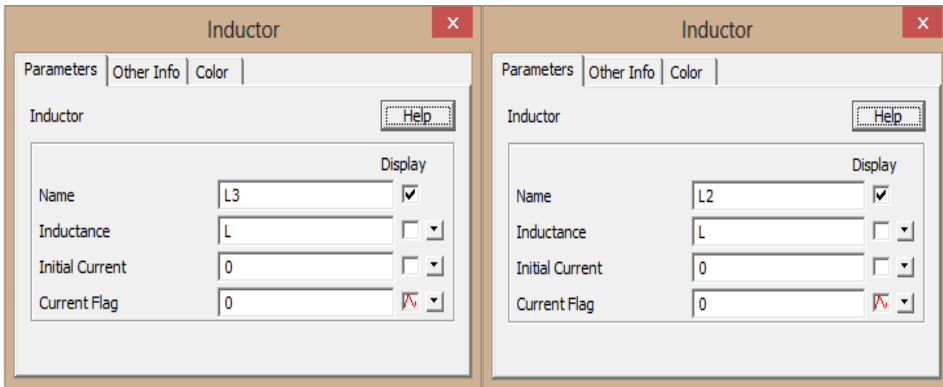


(شکل ۵.۷): تنظیم مقاومت‌ها



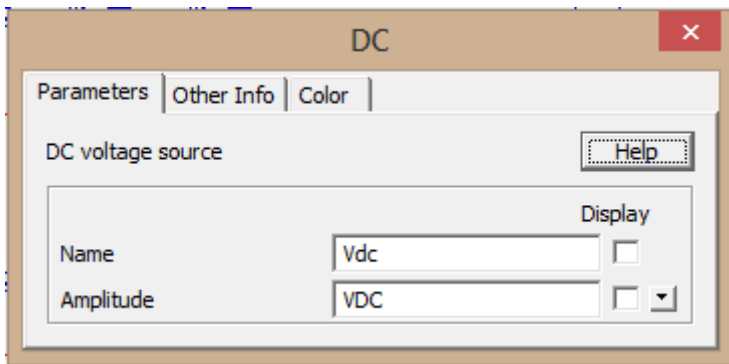
(شکل ۶.۷): تنظیم مقاومت و سلف





(شکل ۷.۷): تنظیم سلف‌ها

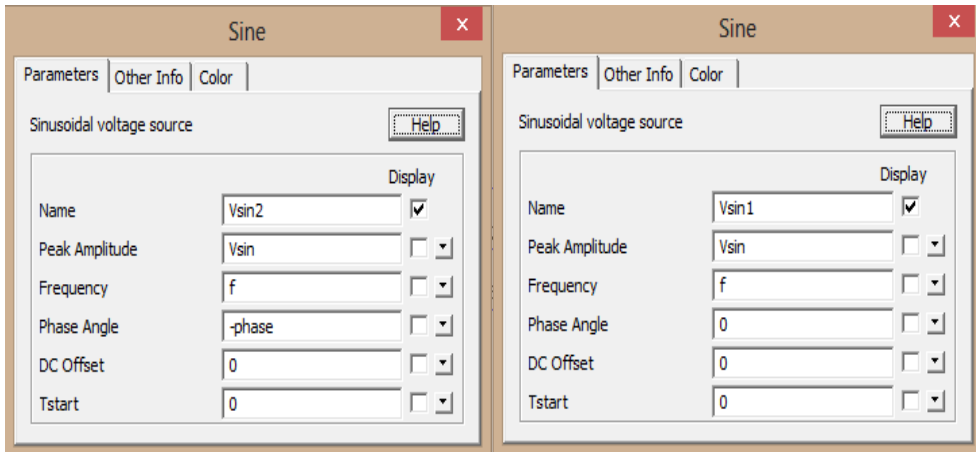
مقدار منبع DC نیز به صورت VDC تعریف شده است.



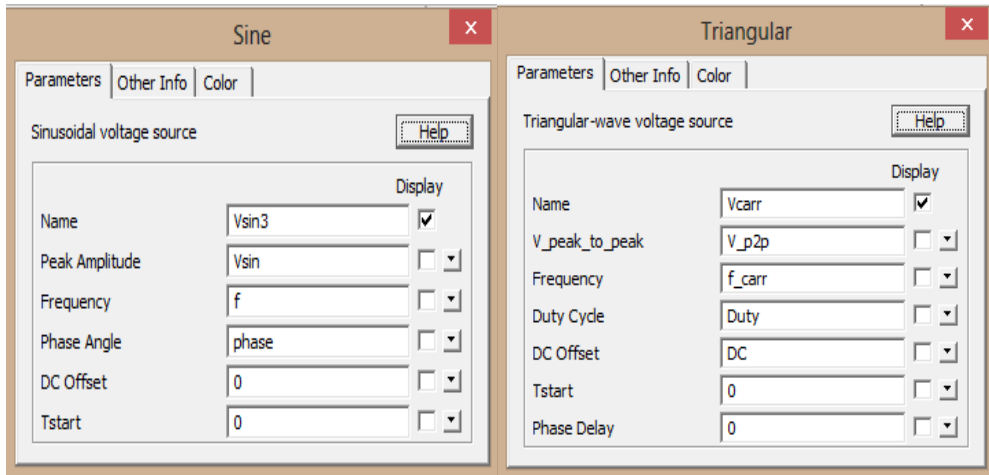
(شکل ۸.۷): منبع ولتاژ ثابت

منابع سینوسی و منبع مثلثی نیز با توجه به شکل‌های زیر به صورت پارامتری تعریف

شده‌اند.



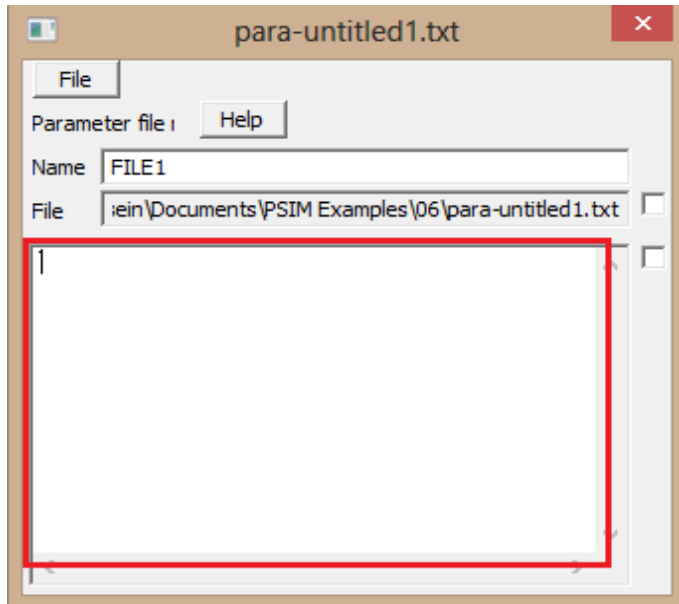
(شکل ۹.۷): تنظیم منبع سینوسی



(شکل ۱۰.۷): تنظیم منبع مثلثی

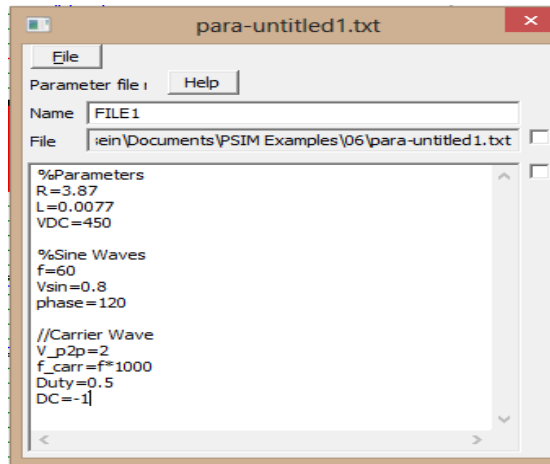
حال باید این پارامترها در بلوک Parameter File تعریف کنیم. برای این کار روی این

بلوک دوبار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی زیر باز شود.



(شکل ۱۱.۷): بلوک تعریف پارامترهای المان‌ها

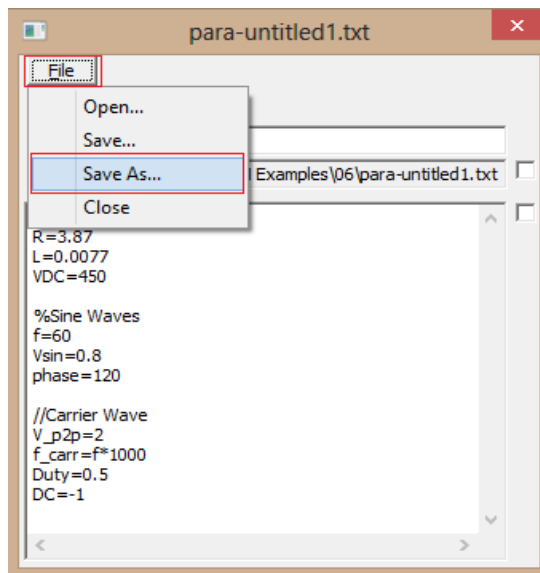
در پنجره‌ی فوق در داخل کادر قرمز می‌توان پارامترهای المان‌های مدار را تعریف کرد. تعریف پارامترها هم می‌تواند به‌صورت عددی باشد و هم می‌توان از عبارتهای ریاضی استفاده کرد. شکل زیر نحوه‌ی تعریف پارامترها در این بلوک را نشان می‌دهد. عبارتهایی که بعد از علامتهای % یا // قرار می‌گیرند توسط نرم‌افزار به عنوان توضیحات در نظر گرفته می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌کنید پارامترهایی مثل R و L به‌صورت عددی تعریف شده‌اند و پارامتر  $f_{carr}$  به‌صورت یک جمله‌ی ریاضی وارد شده است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که فرکانس سیگنال حامل معمولاً مضرب صحیحی از فرکانس سیگنال سینوسی تعریف می‌شود.



(شکل ۱۲.۷): نحوه تعریف پارامترها

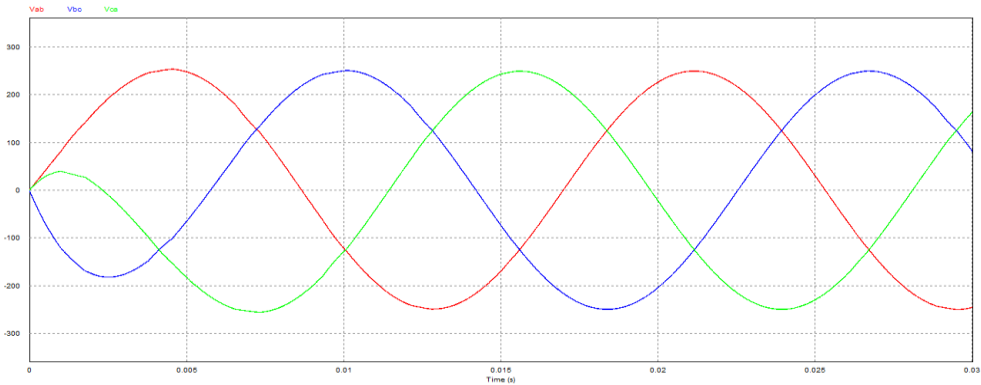
حال با استفاده از گزینه‌ی File، فایل متنی (\*.txt) ایجاد شده توسط بلوک

Parameter File را در مسیر شبیه‌سازی ذخیره می‌کنیم.



(شکل ۱۳.۷): مسیر ذخیره‌سازی فایل متنی

زمان شبیه‌سازی را در  $0.3$  ثانیه تنظیم کرده و شبیه‌سازی را اجرا می‌کنیم. شکل زیر ولتاژهای خروجی خط به خط را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۴.۷): ولتاژهای خروجی خط به خط

در این فصل با نحوه‌ی تولید پالس PWM برای یک اینورتر سه‌فاز آشنا شدید. هم‌چنین فراگرفتید که چگونه می‌توان پارامترهای المان‌های مختلف را در یک فایل پارامتر تعریف کرد. در شبیه‌سازی‌های پیچیده استفاده از فایل پارامتر، کمک شایانی به نظم شبیه‌سازی خواهد کرد.



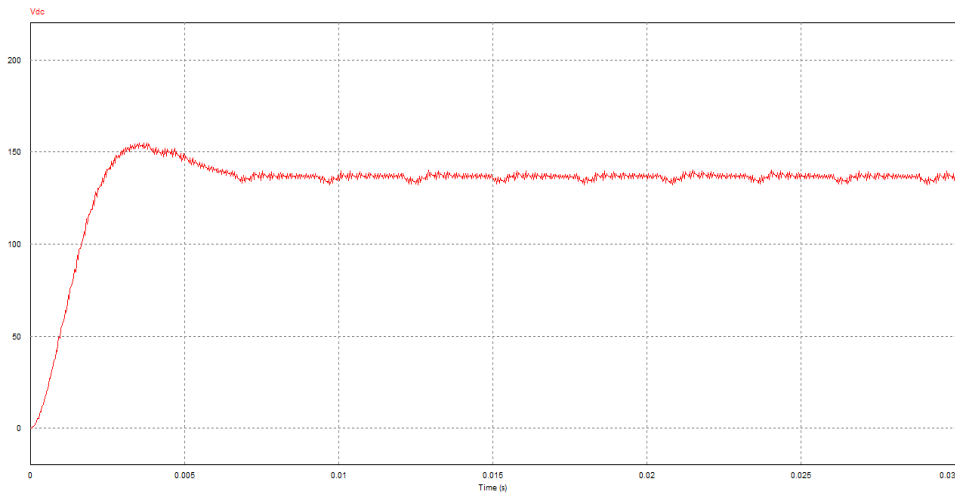
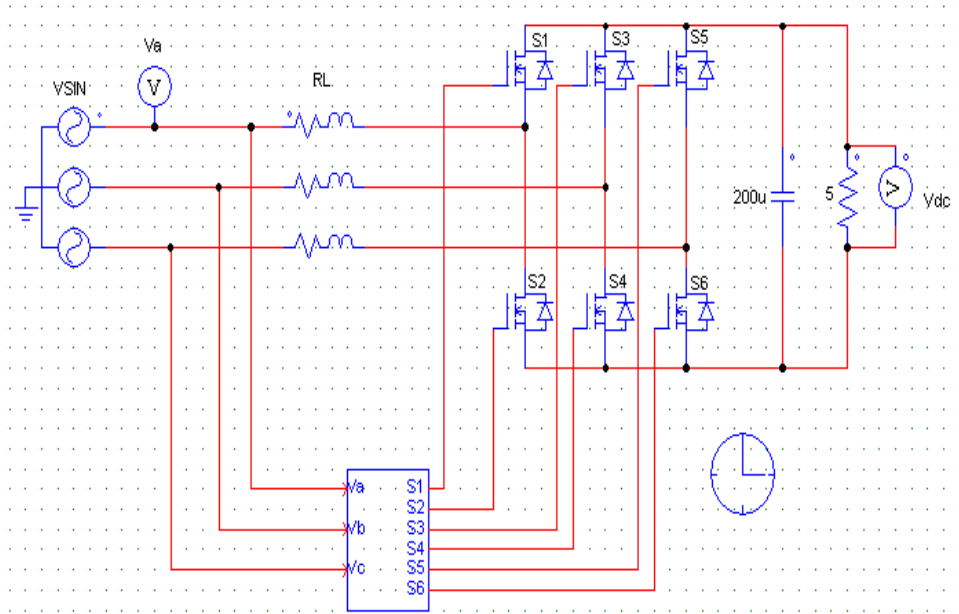
## فصل هشتم

# شبیه‌سازی یکسوساز PWM سه فاز

### ۸- مقدمه

در این فصل طراحی یکسوساز با استفاده از کلید MOSFET معرفی شده و نحوه‌ی تولید پالس PWM و ایجاد زیرسیستم را خواهید آموخت.

## ۸-۱- طرح مدار



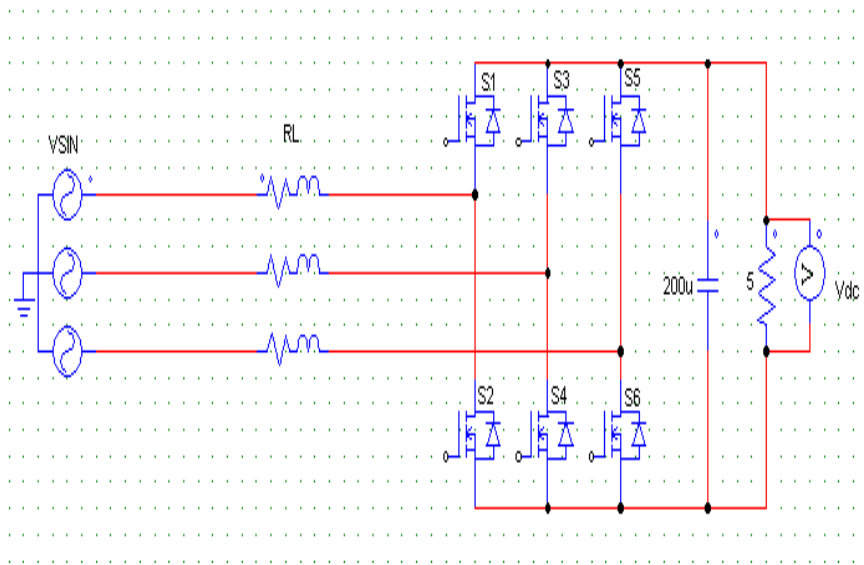
(شکل ۱.۸): شمای کلی مدار



## ۸-۲-۱ اجرای شبه‌سازی

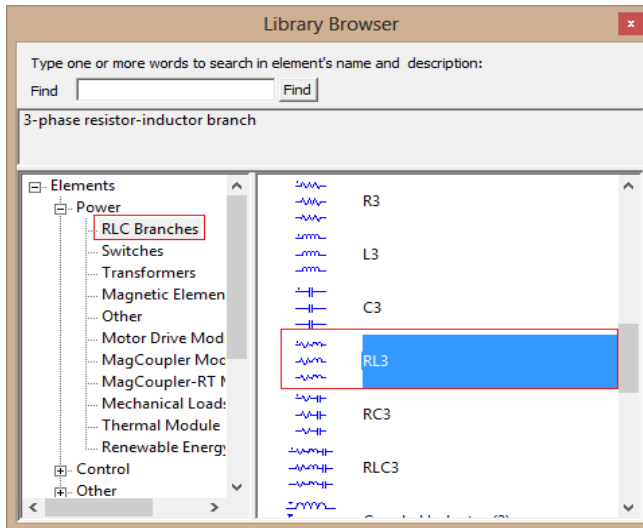
مدار شکل زیر را با استفاده منبع سینوسی سه‌فاز، مقاومت، خازن، کلیدهای

MOSFET و یک سه‌فاز طراحی می‌کنیم.



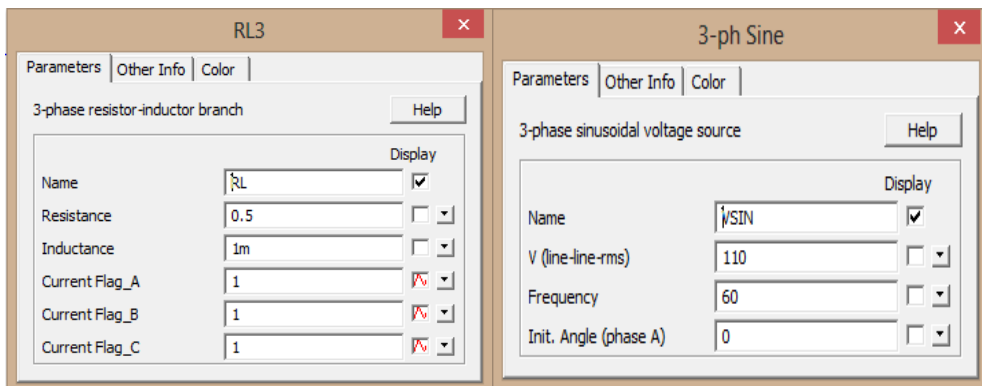
(شکل ۲.۸): پیاده‌سازی مدار

RL سه‌فاز را می‌توان از مسیر شکل (۳.۸) در کتابخانه‌ی نرم‌افزار به مدار اضافه کرد.



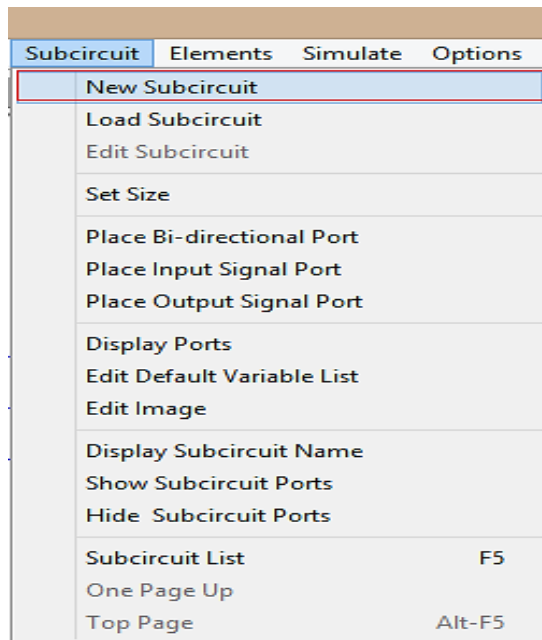
(شکل ۳.۸): کتابخانه نرم‌افزار

مقدار مقاومت را ۵ اهم و مقدار خازن را ۲۰۰ میکروفاراد در نظر می‌گیریم. پارامترهای منبع و RL سه‌فاز نیز به صورت زیر تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۴.۸): منبع ولتاژ سه‌فاز و پارامتر RL

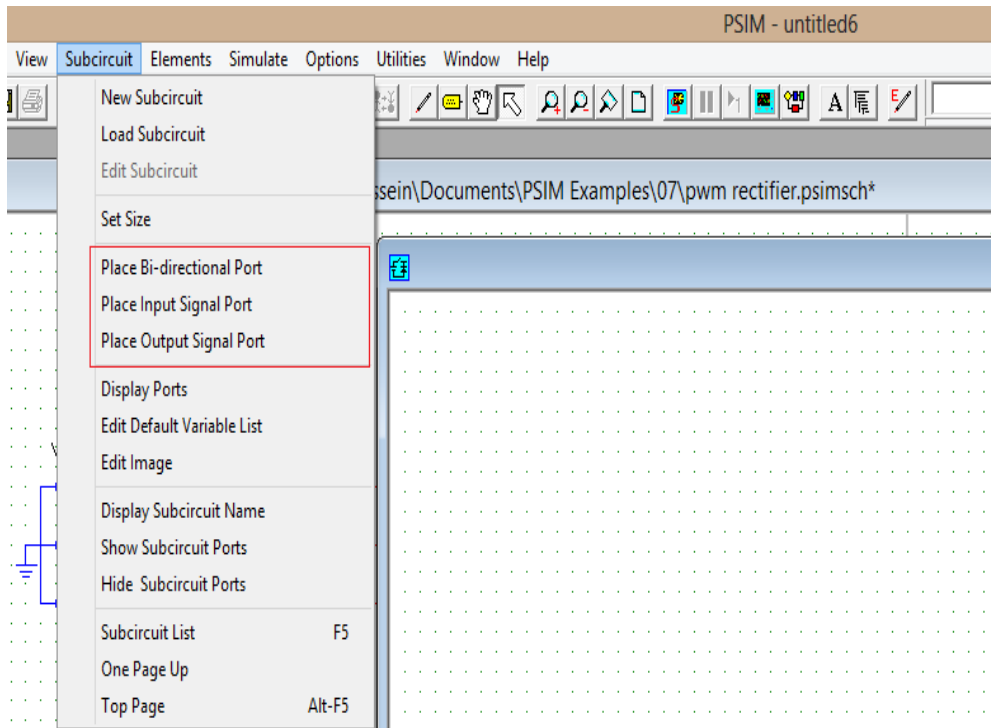
حال یک زیرسیستم ایجاد می‌کنیم تا مدار مربوط به پالس‌های PWM را در داخل آن رسم کنیم. برای این کار از منوی Subcircuit گزینه‌ی New Subcircuit را انتخاب می‌کنیم. با این کار شکل ماوس به یک مستطیل تبدیل می‌شود. با کلیک کردن در نقطه‌ی مورد نظر یک زیرسیستم در مدار اصلی ایجاد می‌شود.



(شکل ۵.۸): ایجاد زیرسیستم

با استفاده از گزینه‌ی Load Subcircuit می‌توان مدارهای دیگر را به صورت زیرسیستم وارد این شبیه‌سازی کرد. حال روی زیرسیستم دوبار کلیک می‌کنیم، با این کار یک صفحه‌ی جدید باز می‌شود. هر مداری که در این جا رسم شود در داخل زیرسیستم در

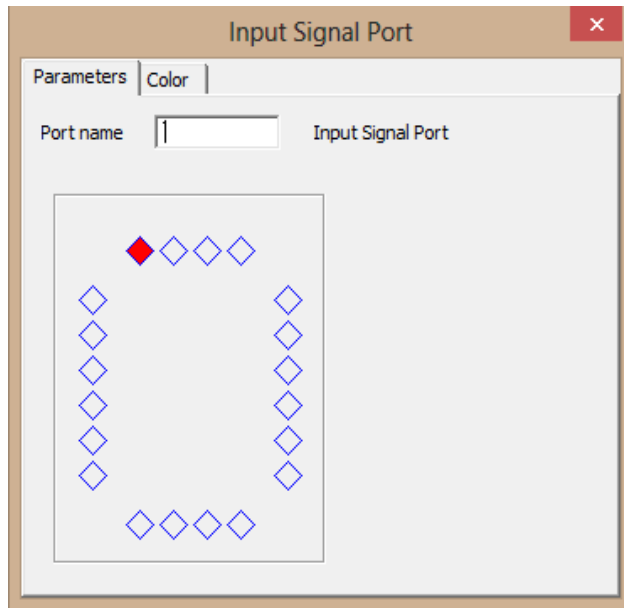
نظر گرفته خواهد شد. حال باید پورت‌های ورودی و خروجی را برای زیر سیستم تعریف کنیم، برای این کار منوی Subcircuit را باز می‌کنیم. دقت کنید که در این حالت حتماً باید صفحه‌ی مربوط به زیرسیستم انتخاب شده باشد.



(شکل ۶.۸): پورت‌های ورودی و خروجی زیرسیستم

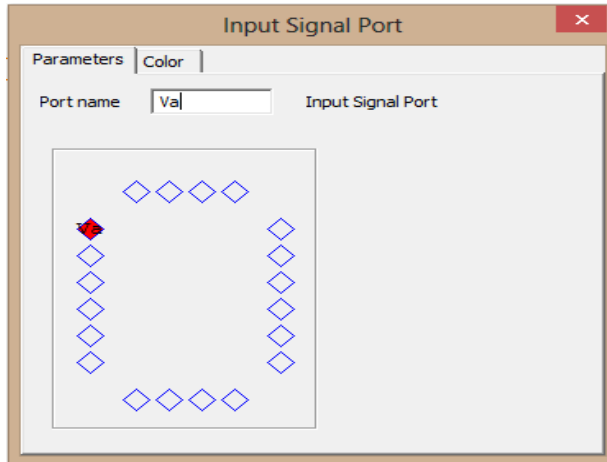
سه نوع پورت را می‌توان به یک زیر سیستم اضافه کرد. پورت دوجهته برای مدارهای قدرت استفاده می‌شود و پورت‌های ورودی و خروجی در مدارهای کنترلی به کار می‌روند. برای این زیرسیستم به سه پورت ورودی برای اندازه‌گیری ولتاژهای فاز و شش پورت

برای انتقال سیگنال‌های PWM به کلیدها احتیاج داریم. از این منو گزینه‌ی Place Input Signal Port را انتخاب می‌کنیم. با قرار دادن این پورت روی صفحه، پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



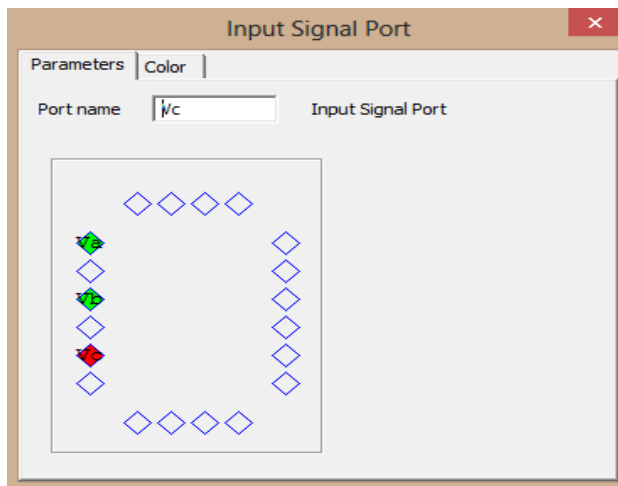
(شکل ۷.۸): پورت سیگنال ورودی

در این پنجره نام پورت و محل نمایش آن در بلوک زیر سیستم که در مدار اصلی قرار گرفته است، وارد می‌شود. محل پورت با کلیک ماوس روی اشکال لوزی تعیین می‌شود و پس از انتخاب به رنگ قرمز در می‌آید. این پورت را با نام  $V_a$  در محلی که در شکل زیر نشان داده شده است ذخیره می‌کنیم.



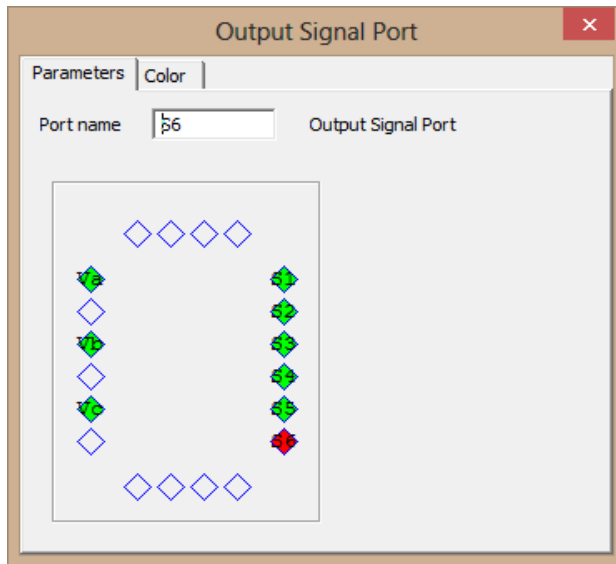
(شکل ۸.۸): پورت سیگنال ورودی

دو پورت ورودی دیگر نیز از منوی Subcircuit به صفحه‌ی زیرسیستم با نام‌های  $V_b$  و  $V_c$  اضافه می‌کنیم.



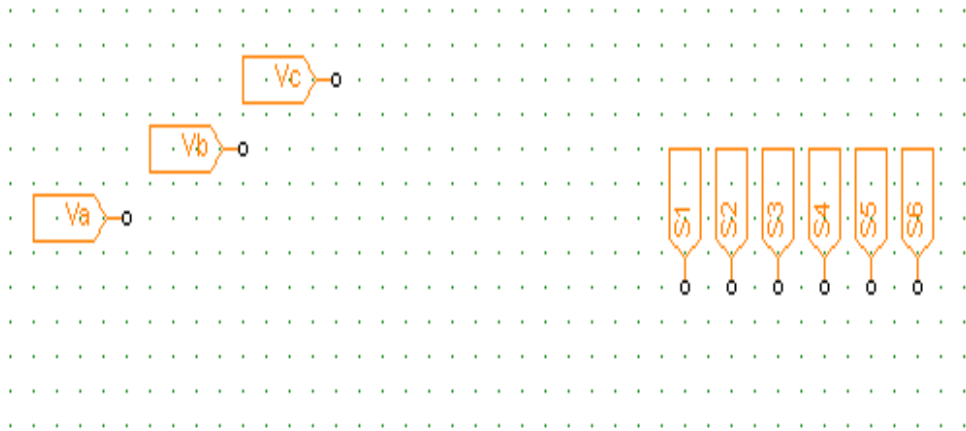
(شکل ۹.۸): پورت سیگنال ورودی

حال از منوی Subcircuit گزینه‌ی Place Output Signal Port را انتخاب می‌کنیم تا پورت‌های خروجی را نیز وارد مدار کنیم. در اینجا شش پورت خروجی به مدار اضافه شده است.



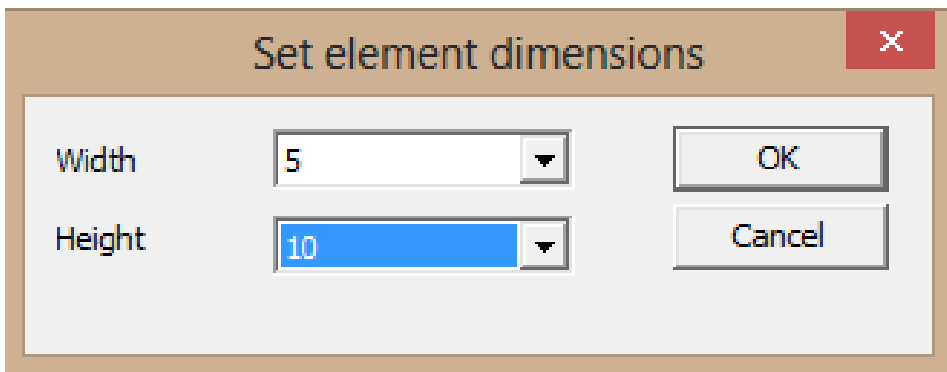
(شکل ۱۰.۸): پورت سیگنال خروجی

شکل (۱۱.۸) این پورت‌ها را در صفحه‌ی زیرسیستم نشان می‌دهد.



(شکل ۱۱.۸): پورت‌های سیگنال‌های ورودی و خروجی

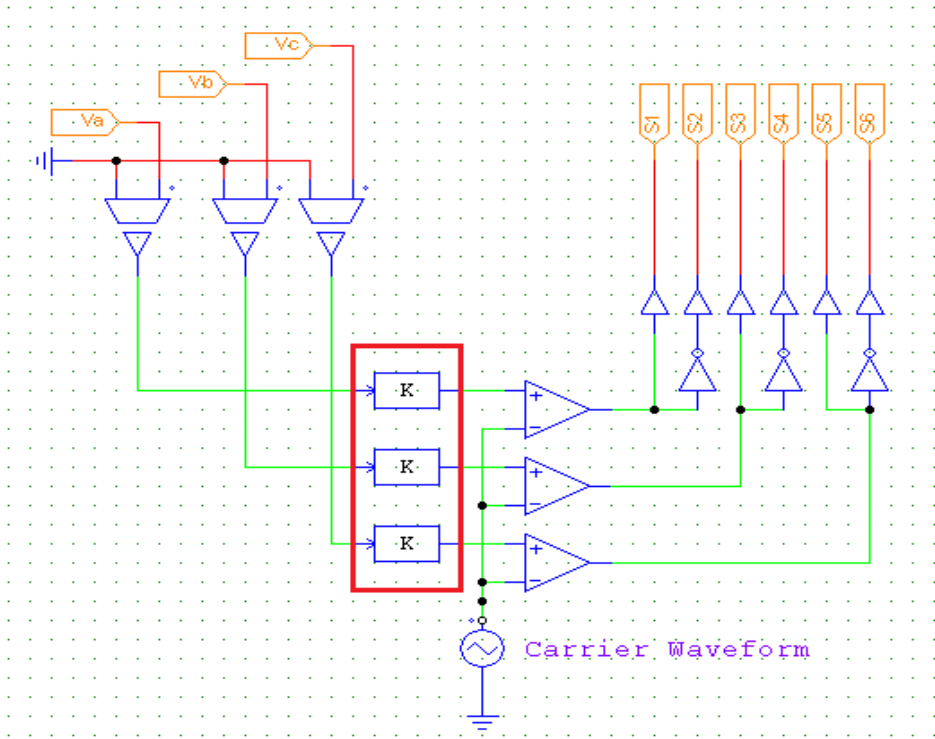
برای وارد کردن تعداد بیشتری پورت می‌توان از منوی Subcircuit گزینه‌ی Set Size را انتخاب کرده و اندازه‌ی زیرسیستم را تعیین کرد. لازم به ذکر است که برای این کار حتما باید در صفحه‌ی زیرسیستم باشیم نه صفحه‌ی مدار اصلی.



(شکل ۱۲.۸): تعیین اندازه زیرسیستم



حال مدار کنترلی را به صورت شکل زیر در زیرسیستم رسم می‌کنیم.



(شکل ۱۳.۸): مدار کنترلی

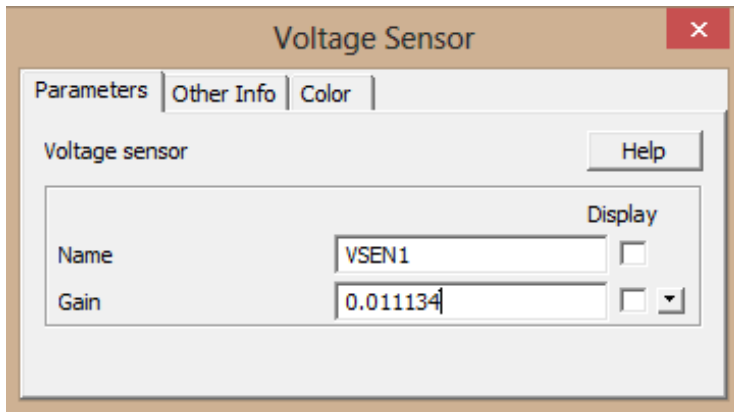
بلوک‌های داخل کادر قرمز بلوک‌های تناسبی هستند که می‌توان آن‌ها را از از نوار ابزار

المان‌ها به مدار اضافه کرد.



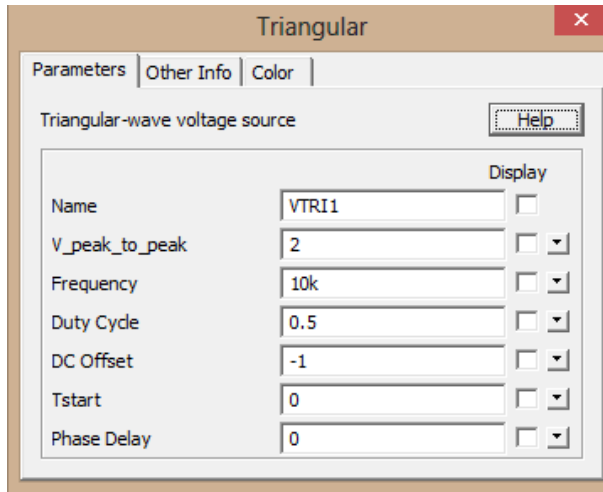
(شکل ۱۴.۸): نوار ابزار المان‌ها

با دوبار کلیک روی سنسور ولتاژ پنجره‌ی زیر باز می‌شود که می‌توان در آن بهره‌ی سنسور را تعیین کرد. در این صورت ورودی سنسور در این بهره ضرب شده و به خروجی انتقال داده می‌شود. بهره را طوری انتخاب می‌کنیم که ولتاژ در خروجی سنسور بر حسب پریونیت نمایش داده شود. بنابراین بهره‌ی همه‌ی سنسورها را  $\frac{\sqrt{3}}{110 \times \sqrt{2}}$  در نظر می‌گیریم.



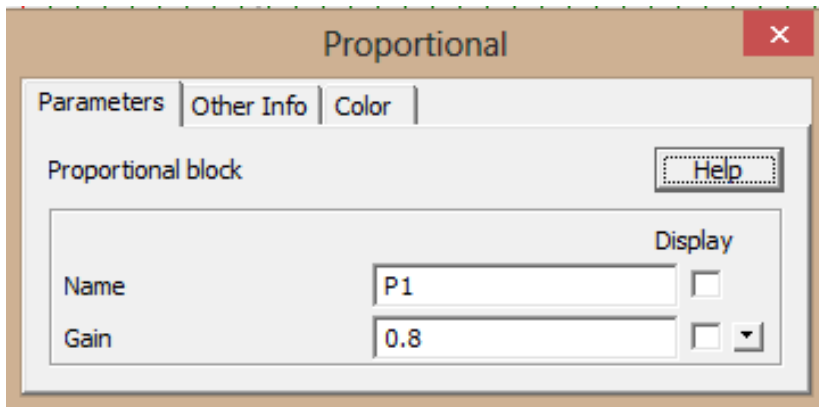
(شکل ۱۵.۸): سنسور ولتاژ

با این کار دامنه‌ی سیگنال خروجی سنسورها برابر یک خواهد شد. در این یکسوساز با استفاده از ولتاژ هر فاز منبع، سیگنال سینوسی مناسب جهت مقایسه با سیگنال مثلثی تولید می‌شود. سیگنال‌های PWM تولید شده با این روش باعث می‌شود که در خروجی، ولتاژ DC داشته باشیم. منبع مثلثی را نیز به صورت زیر تنظیم می‌کنیم.



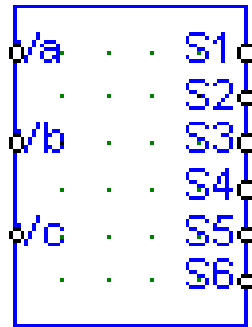
(شکل ۱۶.۸): منبع مثلثی

حال با استفاده از بهره‌ی بلوک‌های تناسبی می‌توان دامنه‌ی ولتاژ خروجی را تنظیم کرد. در این‌جا بهره‌ی همه‌ی بلوک‌های تناسبی در  $0.8$  تنظیم شده‌اند.



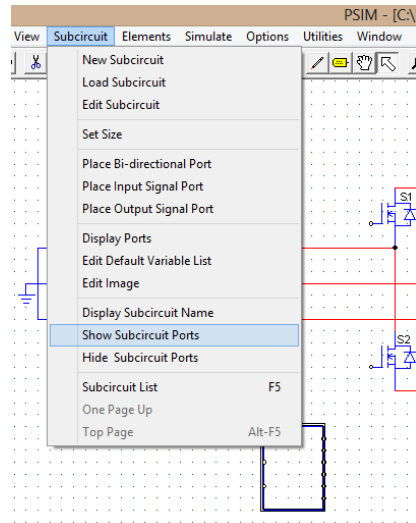
(شکل ۱۷.۸): تنظیم بهره بلوک‌های تناسبی

مدار کنترلی در این جا تکمیل شده است. زیرسیستم را در مسیر دلخواه ذخیره کرده و پنجره‌ی مربوط به آن را می‌بندیم. شکل زیرسیستم در پنجره‌ی مدار اصلی به صورت زیر خواهد بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نام پورت‌ها به همان صورتی که تعریف شده بود روی آن درج شده است.



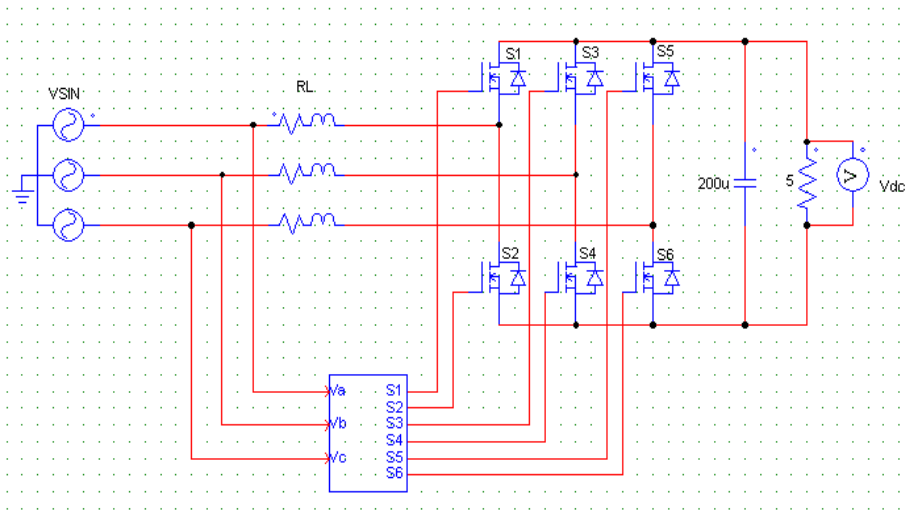
(شکل ۱۸.۸): زیرسیستم

اگر نام پورت‌ها روی بلوک زیرسیستم نمایش داده نشد، می‌توانید در پنجره‌ی مدار اصلی از منوی Subcircuit گزینه‌ی Show Subcircuit Port را انتخاب کنید.



(شکل ۱۹.۸): تنظیمات زیرسیستم

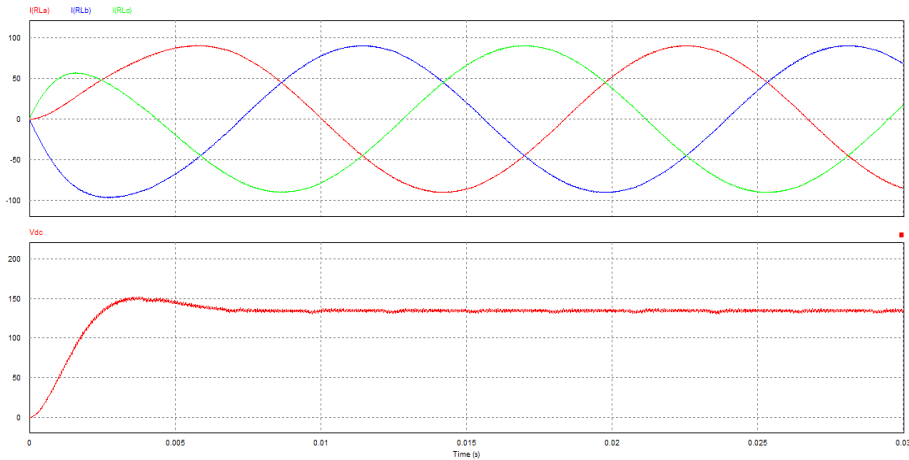
حال ورودی‌ها و خروجی‌های بلوک زیر سیستم را به صورت زیر به مدار اصلی متصل می‌کنیم.



(شکل ۲۰.۸): اضافه کردن زیرسیستم به مدار

حال شبيه‌سازی را اجرا می‌کنیم. در خروجی ولتاژ  $V_{dc}$  و جریان عبوری از سلف‌ها را

رسم می‌کنیم.



(شکل ۲۱.۸): ولتاژ  $V_{dc}$  و جریان عبوری از سلف‌ها

همانطور که ملاحظه می‌کنید در خروجی ولتاژ DC داریم.

در این فصل یک یکسوساز سه‌فاز با استفاده از پالس‌های PWM شبيه‌سازی شد.

نحوه‌ی تولید پالس‌های PWM را فراگرفتید، هم‌چنین در این فصل نحوه‌ی ایجاد یک

زیرسیستم آموزش داده شد.

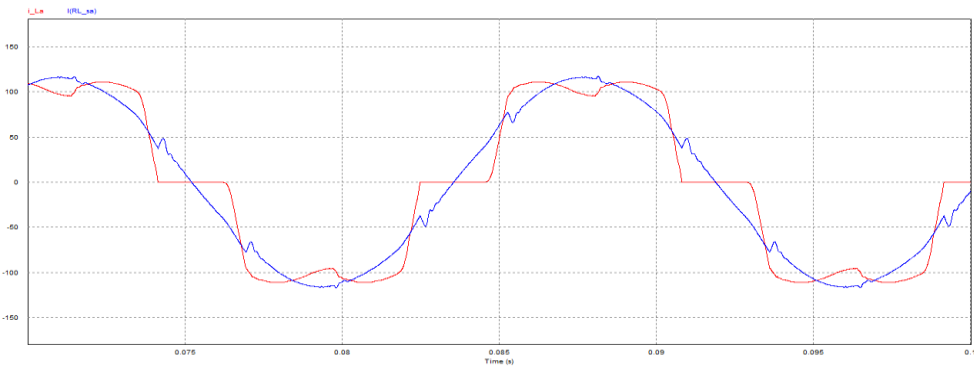
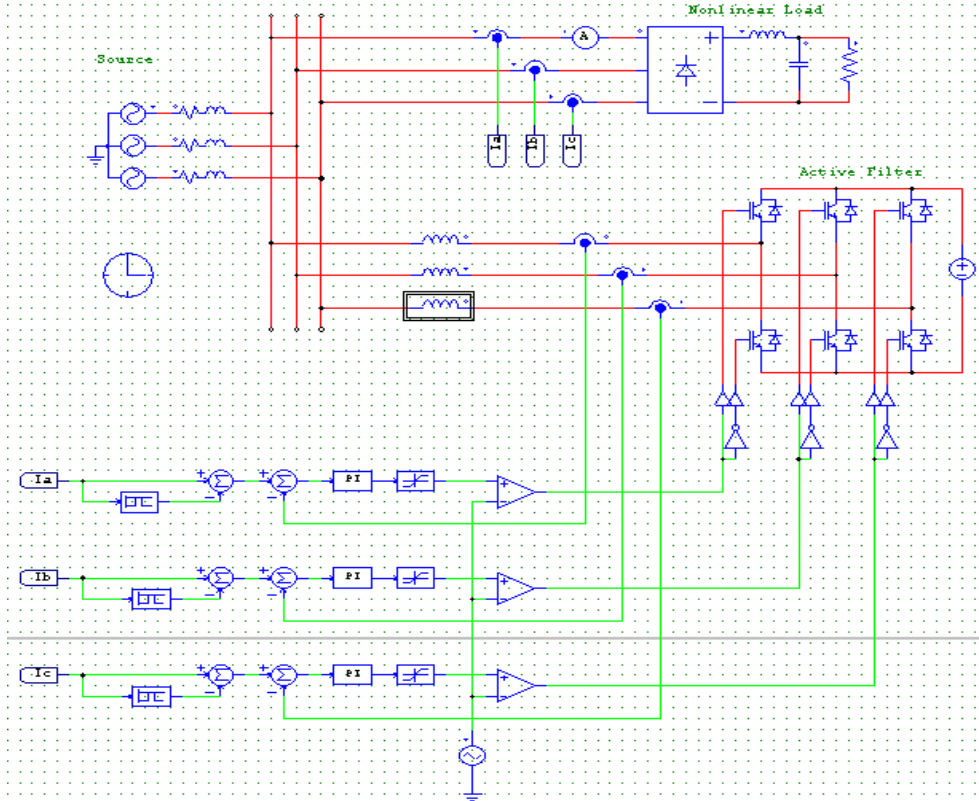
## فصل نهم

# شبیه‌سازی یک فیلتر اکتیو سه‌فاز

### ۹- مقدمه

در این فصل یک فیلتر اکتیو به منظور جبران‌سازی هارمونیک‌های ناشی از جریان‌های غیر خطی ناشی از بارهای غیرخطی شبیه‌سازی و معرفی می‌گردد.

## ۹-۱- طرح مدار

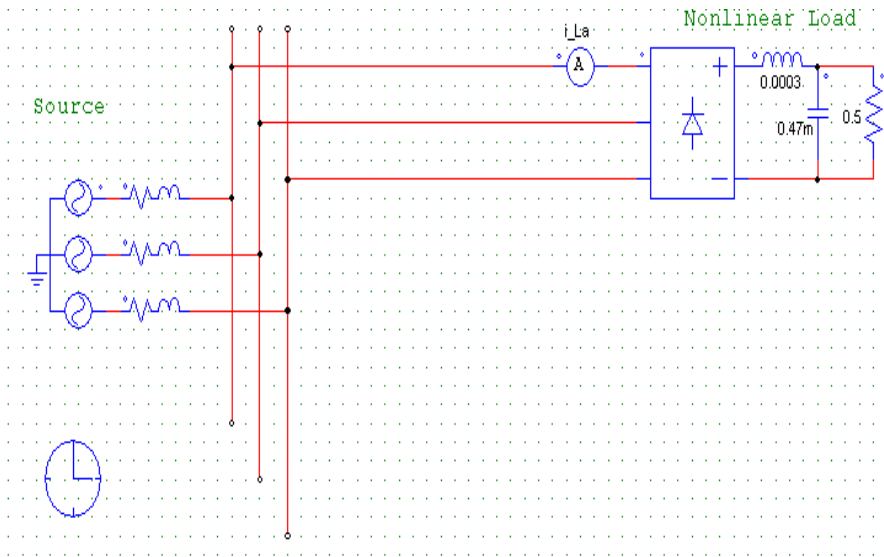


(شکل ۱.۹): شمای کلی مدار



## ۹-۲- اجرای شبه‌سازی

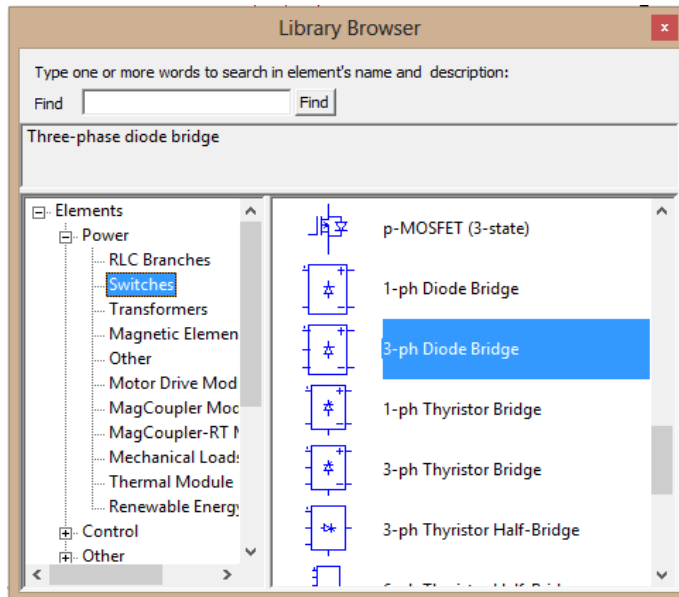
ابتدا مدار شکل زیر را در محیط نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۹): پیاده‌سازی مدار

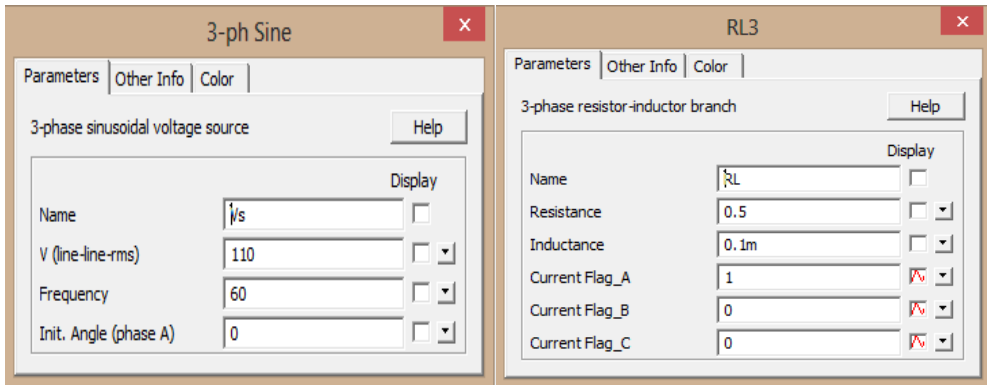
در این شبه‌سازی از یک یکسوساز سه‌فاز تمام پل به عنوان بار غیر خطی استفاده

شده است. بلوک یکسوساز دیودی را می‌توان از مسیر زیر به مدار اضافه کرد.



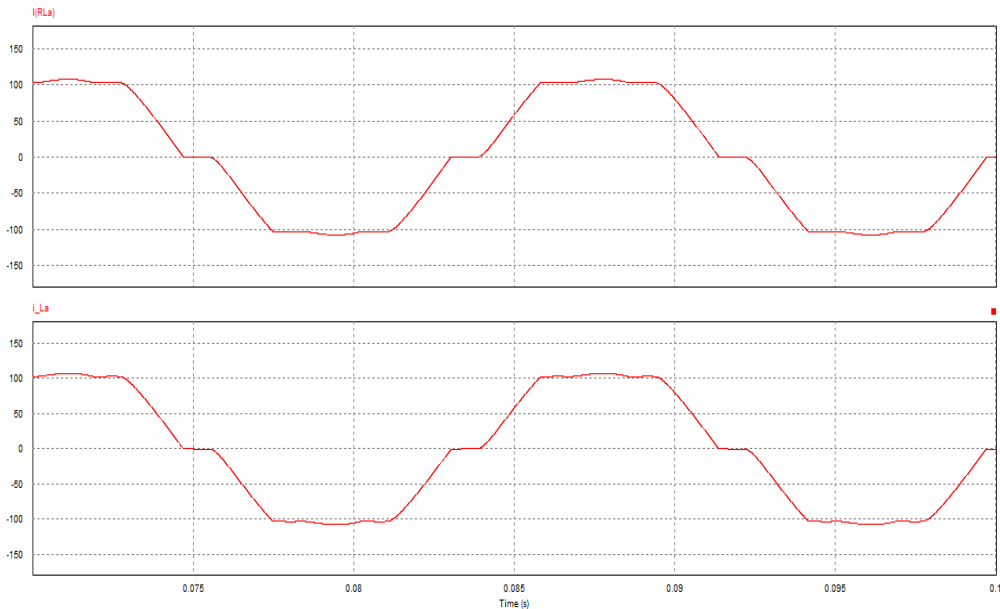
(شکل ۳.۹): کتابخانه نرم‌افزار

تنظیمات منبع ولتاژ و RL سه‌فاز به صورت زیر انجام شده‌اند.



(شکل ۴.۹): تنظیمات المان‌ها

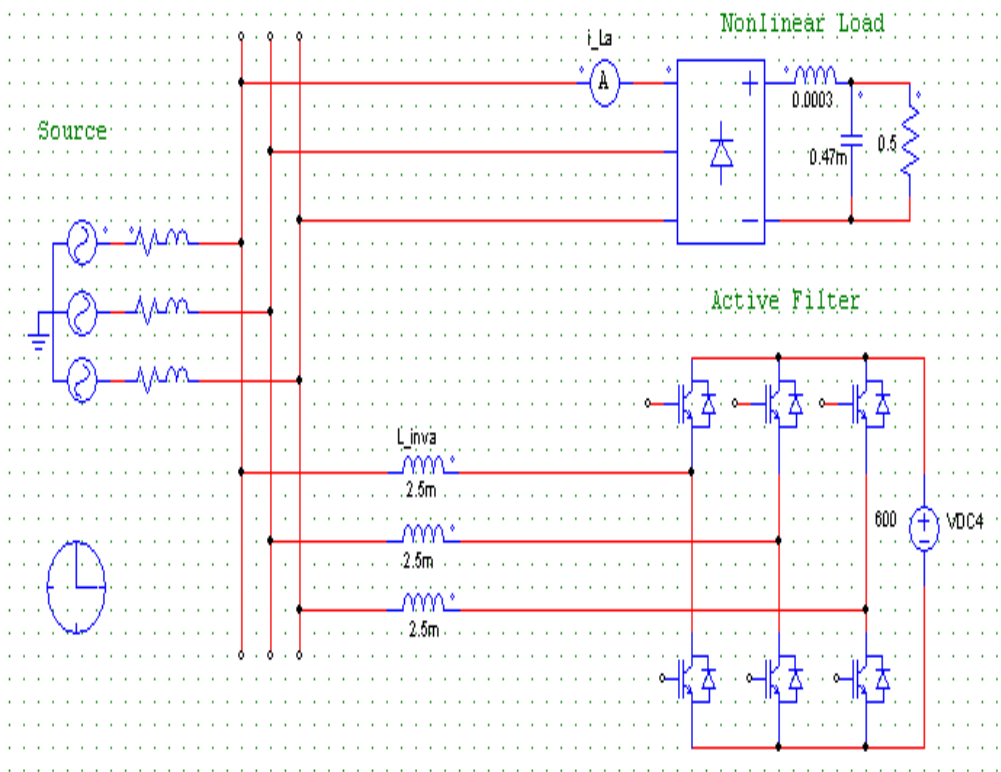
در تنظیمات RL سه‌فاز Current Flag مربوط به فاز a را نیز یک کرده‌ایم تا در خروجی جریان فاز a منبع نیز نمایش داده شود. سایر تنظیمات روی شکل مدار درج شده است. زمان شبهه‌سازی را در ۰/۱ ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی جریان‌های عبوری از منبع و بار غیرخطی را رسم می‌کنیم.



(شکل ۵.۹): جریان‌های عبوری از منبع و بار غیرخطی

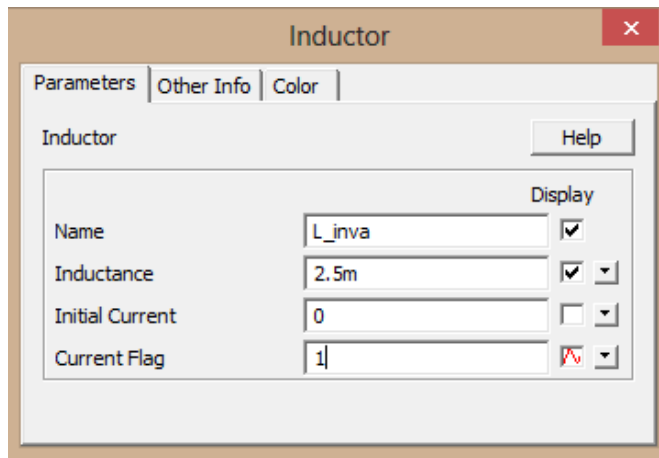
همانطور که ملاحظه می‌شود جریان یکسوساز دارای هارمونیک بوده و کل این جریان نیز وارد شبکه می‌شود. برای فیلتر کردن بخش هارمونیکی جریان یکسوساز می‌توان یک فیلتر اکتیو را با بار غیرخطی موازی کرد. فیلتر اکتیو از یک مبدل DC به AC تشکیل

شده است که در آن اینورتر به‌گونه‌ای کنترل می‌شود که در خروجی، معکوس جریان هارمونیک بار غیرخطی را تولید کند. در این صورت مولفه‌های هارمونیک بار غیرخطی، فیلتر شده و جریان شبکه سینوسی باقی می‌ماند. بنابراین طبق شکل زیر یک اینورتر موازی با بار خطی به مدار اضافه می‌کنیم.



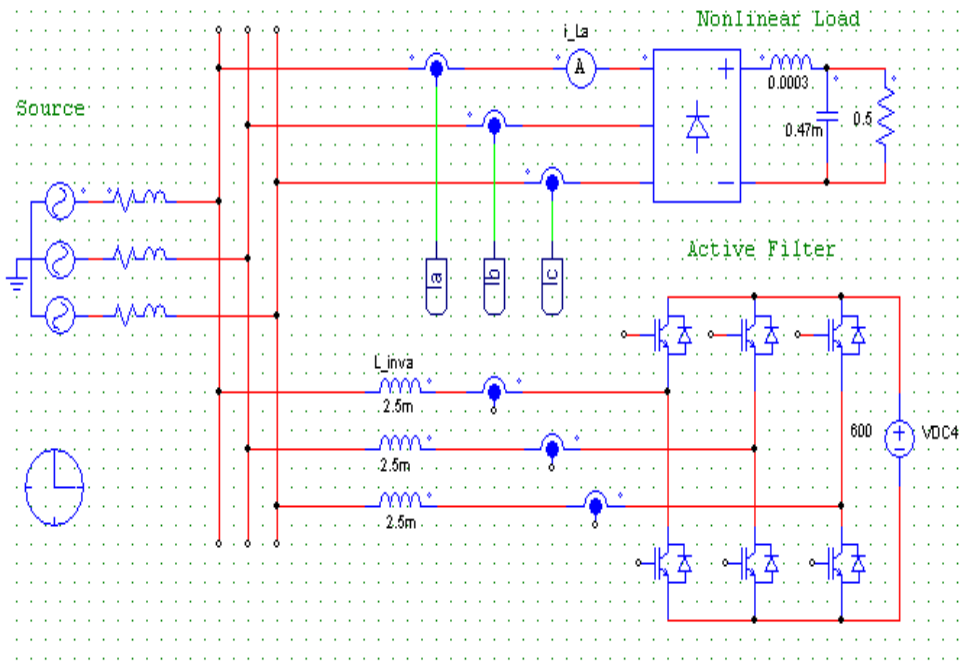
(شکل ۶.۹): اضافه کردن اینورتر به مدار

کلیدهای استفاده شده در این اینورتر از نوع IGBT هستند. اندازه‌ی منبع DC برابر ۶۰۰ ولت است و سلف‌های خروجی اینورتر نیز در ۲/۵ میلی‌هائری تنظیم شده‌اند. Current Flag مربوط به سلف بالایی را نیز یک می‌کنیم تا در خروجی بتوانیم جریان اینورتر را نیز نمایش دهیم.



(شکل ۷.۹): تنظیمات سلف

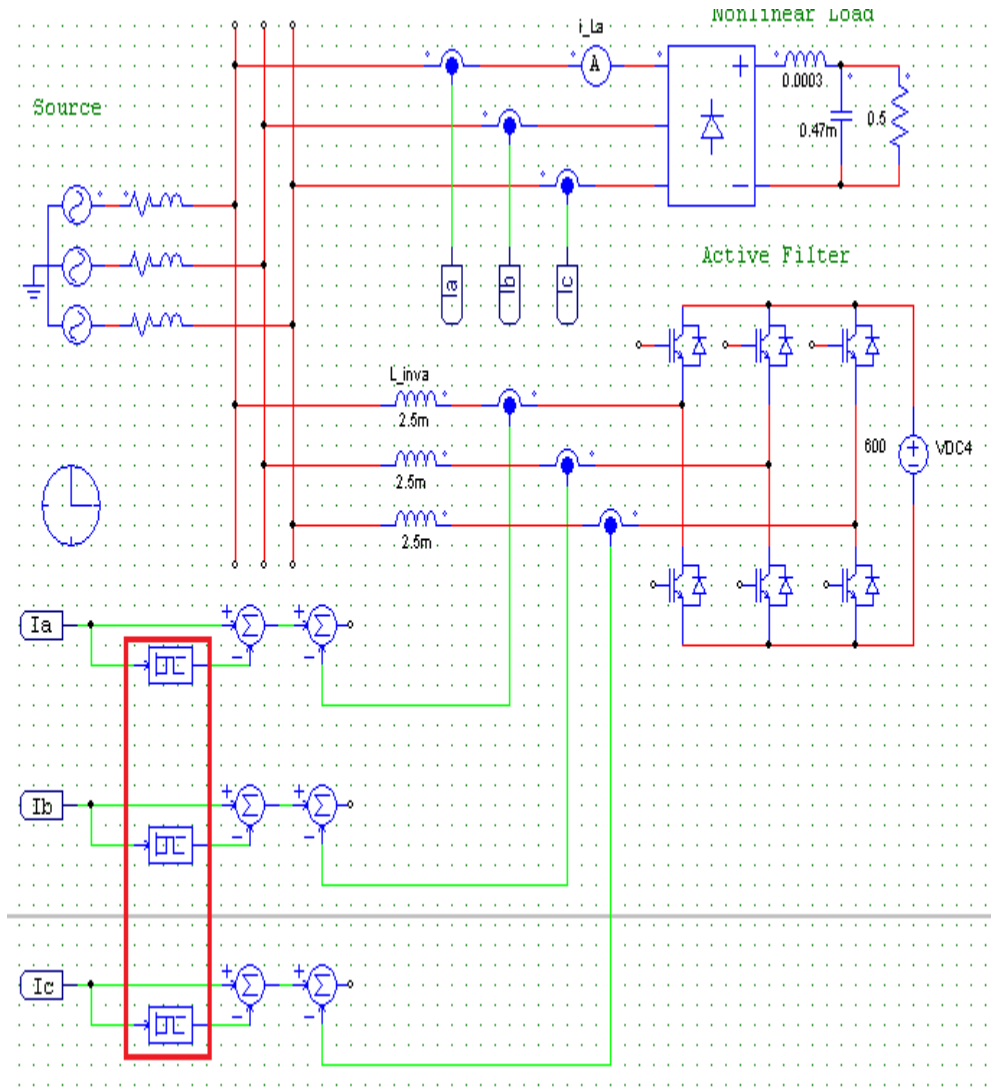
برای اینکه بتوان جریان هارمونیک بار غیرخطی را توسط اینورتر تولید کرد باید جریان هارمونیک بار غیرخطی با جریان خروجی اینورتر مقایسه شود تا پالس PWM مناسب برای اعمال به کلیدها تولید گردند. برای این منظور سنسورهای جریان را طبق شکل زیر در مدار قرار می‌دهیم. سنسورهای مربوط به بار غیرخطی با برچسب نام‌گذاری شده‌اند تا بتوانیم از آن‌ها بدون سیم‌کشی اضافی در مدار کنترلی استفاده کنیم.



(شکل ۸.۹): اعمال سنسورهای جریان به مدار

به جهت سر نقطه‌دار در سنسورهای جریان توجه کنید. سر مثبت سنسورها در بار غیرخطی سمت چپ و در اینورتر در سمت راست قرار دارد، چرا که فرض شده است جریان به بار غیرخطی وارد و از اینورتر خارج می‌شود. بنابراین برای جبران هارمونیک‌ها، مولفه‌های هارمونیکی جریان بار غیرخطی باید توسط اینورتر تولید شود. برای این منظور ابتدا باید مولفه‌های هارمونیکی جریان از مولفه‌ی اصلی آن جدا شود. بنابراین ابتدا باید مولفه‌ی مربوط به فرکانس اصلی جریان یکسوساز را از جریان کلی کم کنیم تا فقط بخش هارمونیکی جریان باقی بماند. این بخش هارمونیکی باید توسط اینورتر تولید شود.

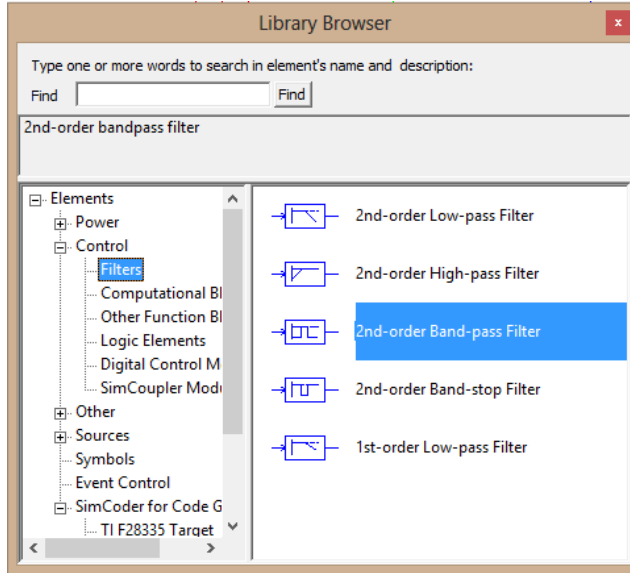
بنابراین از مولفه‌های هارمونیکی جریان یکسوساز به عنوان سیگنال مرجع استفاده می‌شود تا جریان‌های خروجی اینورتر با آن‌ها مقایسه شود.



(شکل ۹.۹): روند تکمیل مدار

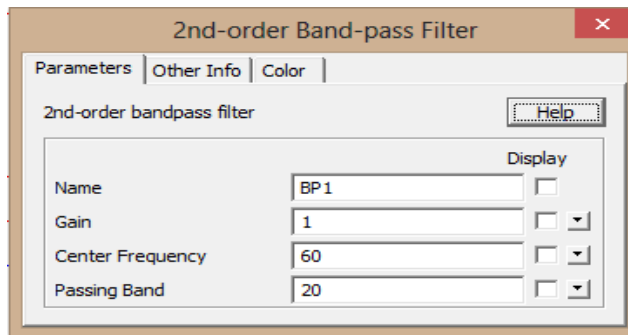
بلوک‌های داخل کادر قرمز فیلترهای میان‌گذر هستند. این فیلترها را می‌توان از مسیر

زیر به مدار اضافه کرد.



(شکل ۱۰.۹): کتابخانه نرم‌افزار

با دو بار کلیک روی این فیلترها پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۱۱.۹): تنظیم فیلتر



پارامترهای موجود در این فیلتر به شرح زیر هستند:

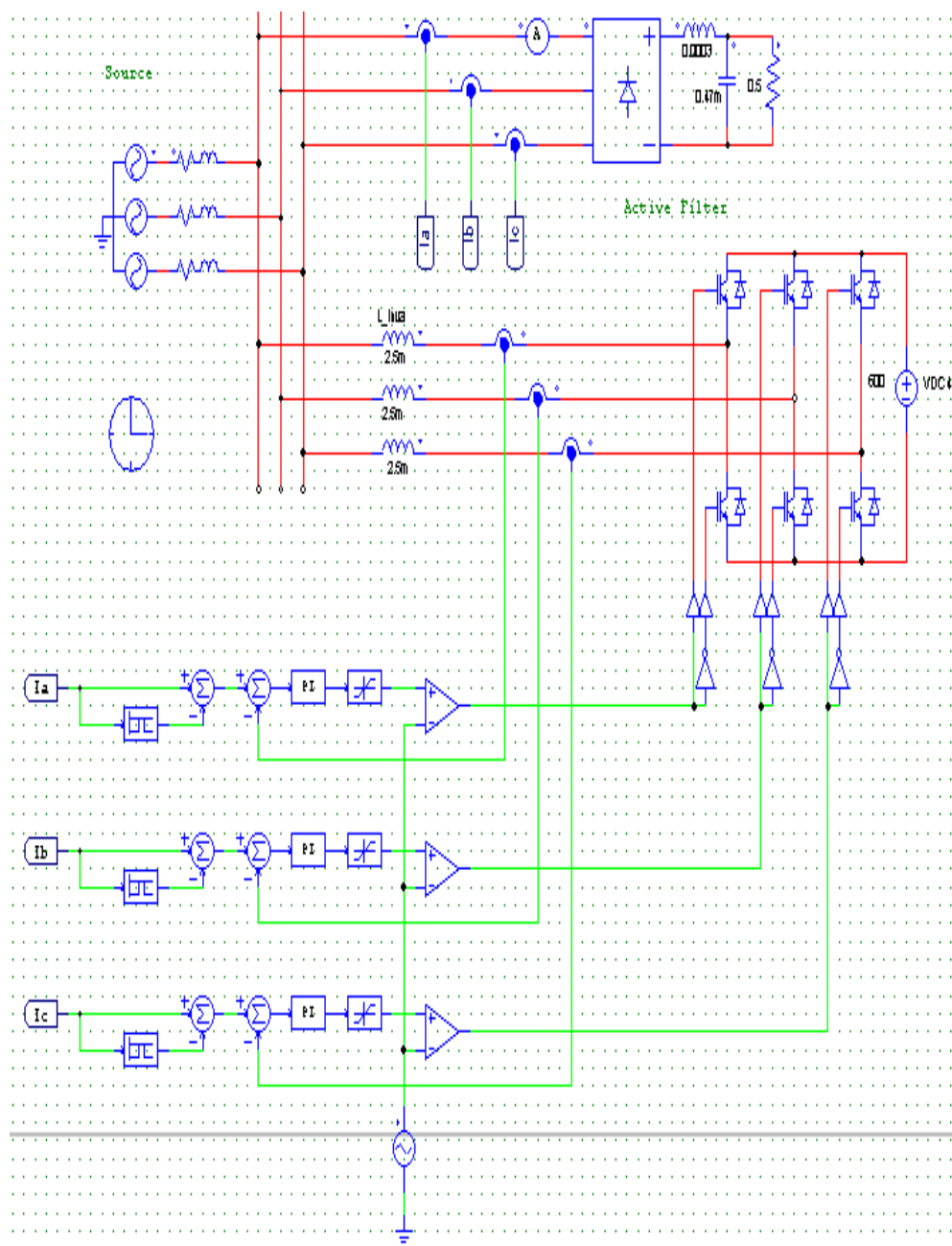
Gain: بهره‌ی فیلتر
Center Frequency: فرکانس مرکزی $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$
Passing Band: پهنای باند عبور فیلتر $(f_b = \frac{B}{2\pi})$

تابع تبدیل این فیلتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(s) = \frac{kBs}{s^2 + Bs + \omega_c^2}$$

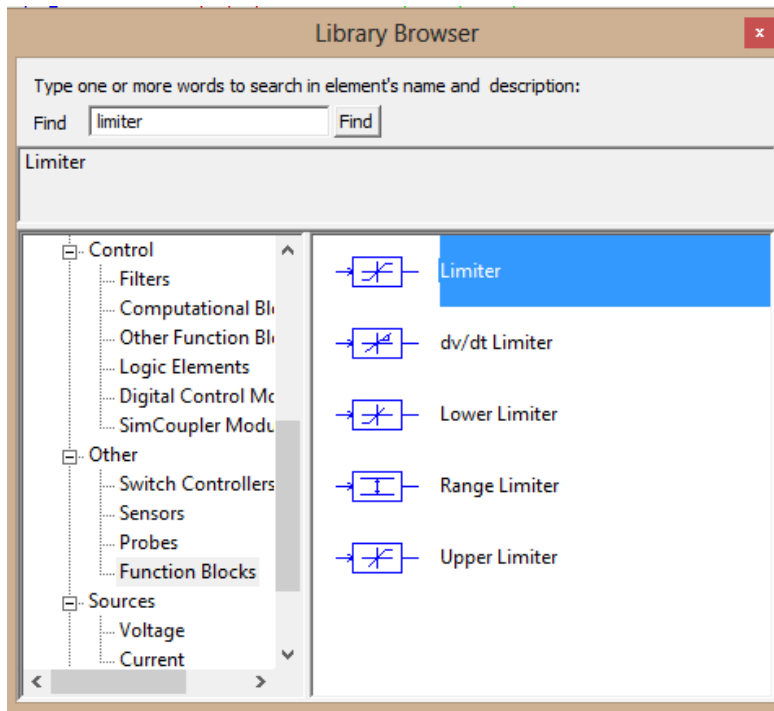
در اینجا فرکانس مرکزی روی ۶۰ هرتز و پهنای باند عبور روی ۲۰ هرتز تنظیم شده‌اند تا فقط مولفه‌ی مربوط به فرکانس اصلی از فیلتر عبور کند. با کم کردن مولفه‌ی اصلی از کل جریان، فقط مولفه‌های هارمونیک باقی می‌مانند که از آن‌ها به عنوان سیگنال مرجع استفاده می‌شود. جریان‌های خروجی از اینورتر نیز با این سیگنال‌های مرجع مقایسه می‌شوند تا سیگنال خطا تولید شود.

با عبور دادن این سیگنال‌های خطا از یک کنترل‌کننده‌ی PI سیگنال‌های مناسب جهت مقایسه با سیگنال مثلی تولید می‌شود، مدار را به صورت شکل زیر کامل می‌کنیم.



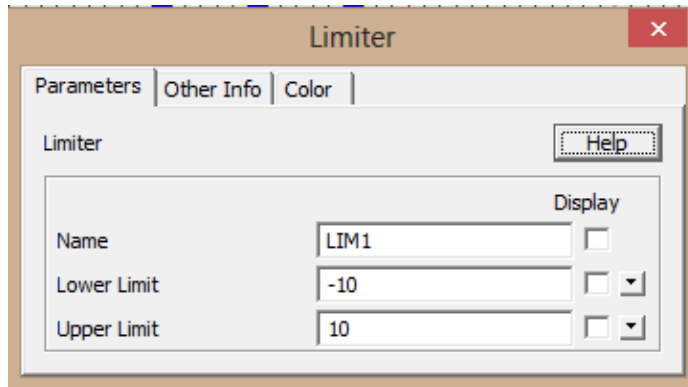
(شکل ۱۲.۹): اضافه نمودن قسمت کنترلی به مدار

در خروجی کنترل‌کننده‌ی PI یک محدود‌کننده قرار داده شده است تا خروجی آن را بین مقادیر تنظیم‌شده محدود کند. محدود‌کننده را می‌توان با جستجوی عبارت Limiter در کتابخانه‌ی نرم‌افزار به مدار افزود.



(شکل ۱۳.۹): کتابخانه نرم‌افزار

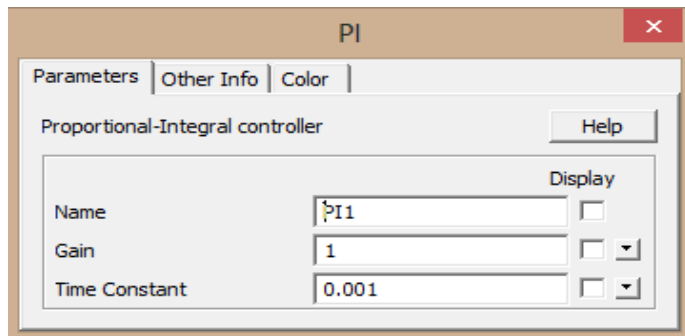
با دوبار کلیک روی محدود‌کننده، پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۱۴.۹): تنظیم محدودکننده

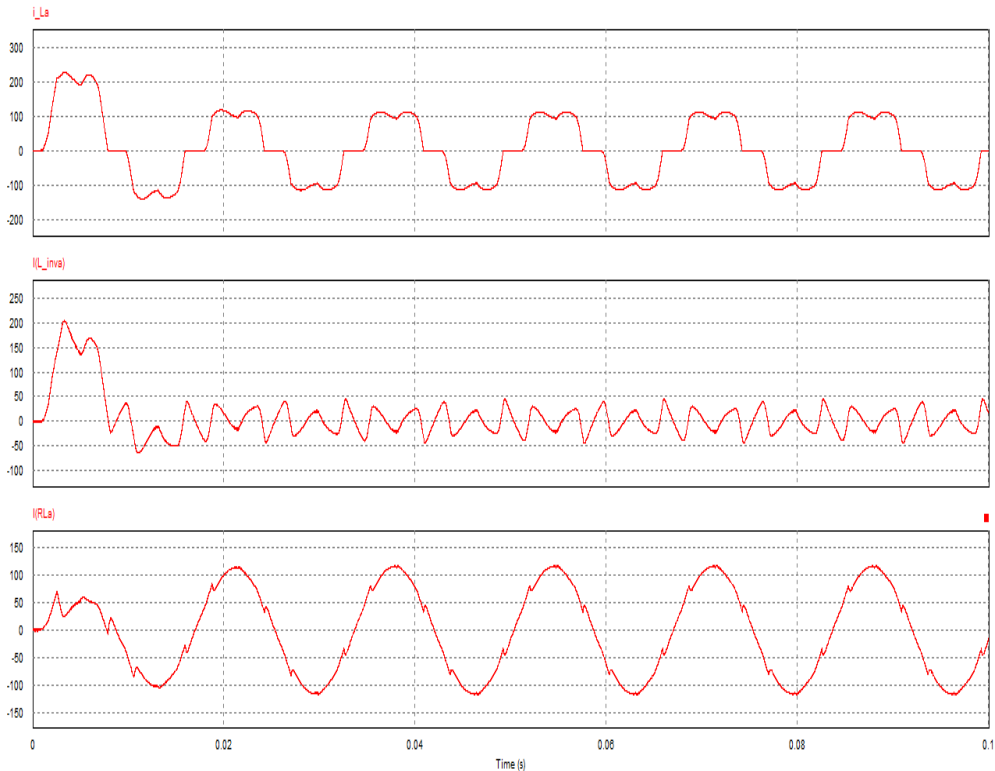
حد پایین و بالا را در هر سه محدودکننده به ترتیب  $-10$  و  $10$  در نظر می‌گیریم. در این صورت اگر ورودی محدودکننده از حد پایین (یا بالا) تجاوز کند در خروجی کران پایین (یا بالا) ظاهر می‌شود؛ در غیر این صورت ورودی عیناً به خروجی محدودکننده منتقل می‌شود.

هر سه کنترل کننده‌ی PI به صورت زیر تنظیم شده‌اند:



(شکل ۱۵.۹): تنظیم کنترل کننده‌ی PI

حال مدار آماده‌ی شبه‌سازی است، زمان شبه‌سازی را در  $0/1$  ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. نمودارهای مربوط به جریان بار غیرخطی، جریان خروجی اینورتر و جریان کشیده‌شده از منبع، در شکل زیر نمایش داده شده است.



(شکل ۱۶.۹): جریان بار غیرخطی، جریان خروجی اینورتر و جریان کشیده‌شده از منبع

نمودار بالایی مربوط به جریانی است که یکسوساز می‌کشد. نمودار وسط جریان تولیدی توسط اینورتر است که در آن هارمونیک‌های بار غیرخطی تولید می‌شود. نمودار

---

پایینی نیز جریان کشیده‌شده از منبع می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود فیلتر اکتیو جریان کشیده‌شده از منبع را سینوسی می‌کند.

در این فصل یک فیلتر اکتیو شبیه‌سازی شد تا با استفاده از آن هارمونیک‌های بار غیر خطی جبران شود. همچنین با نحوه‌ی تولید پالس‌های PWM برای این فیلتر آشنا شدید. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که فیلتر اکتیو در حذف هارمونیک‌های موجود در جریان منبع می‌تواند نقش به‌سزایی را ایفا کند.

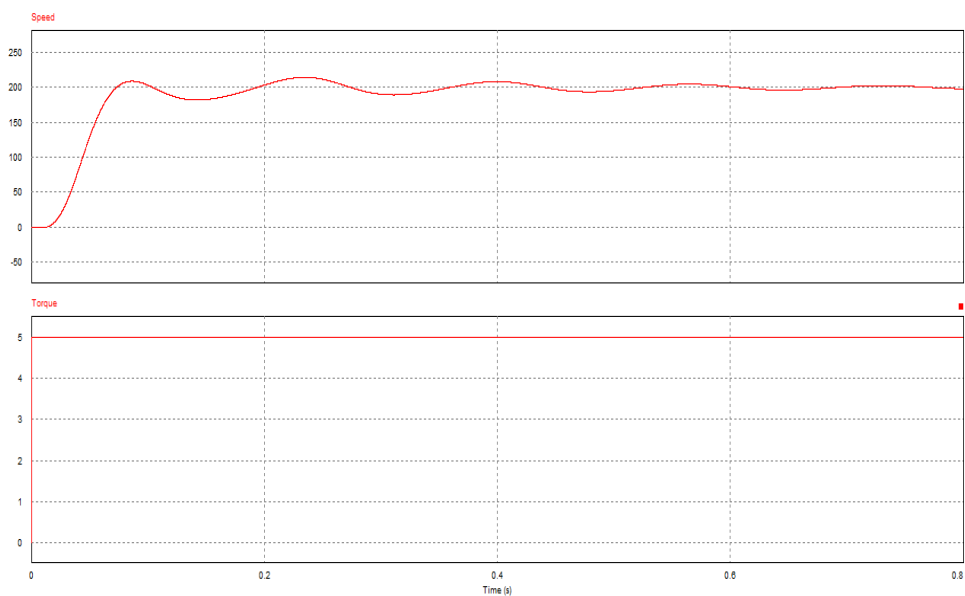
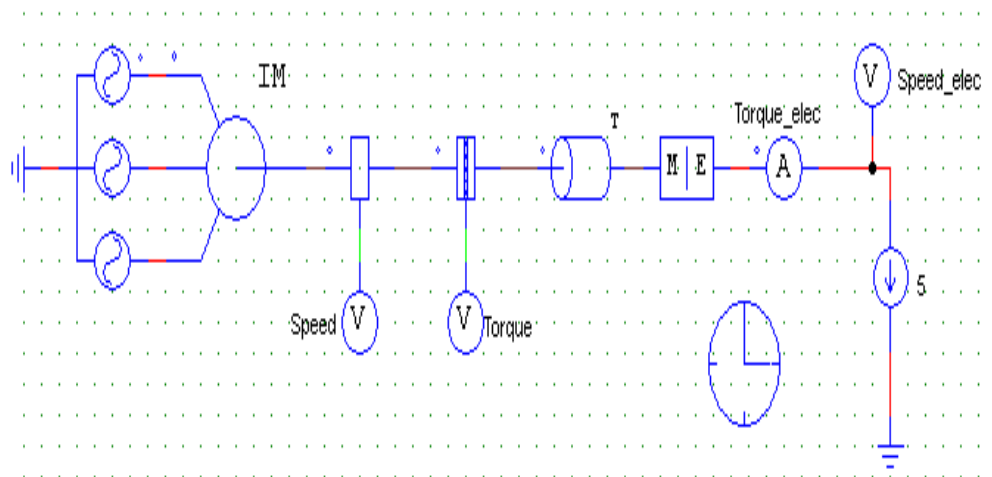
## فصل دهم

# آشنایی با بارها و سنسورهای مکانیکی

### ۱۰- مقدمه

در این فصل به نحوه عملکرد بارها و سنسورهای مکانیکی و معرفی بلوک رابط الکتریکی - مکانیکی پرداخته می‌شود.

## ۱۰-۱- طرح مدار

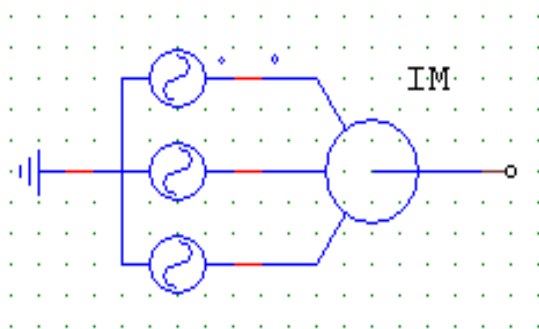


(شکل ۱۰.۱): شمای کلی مدار



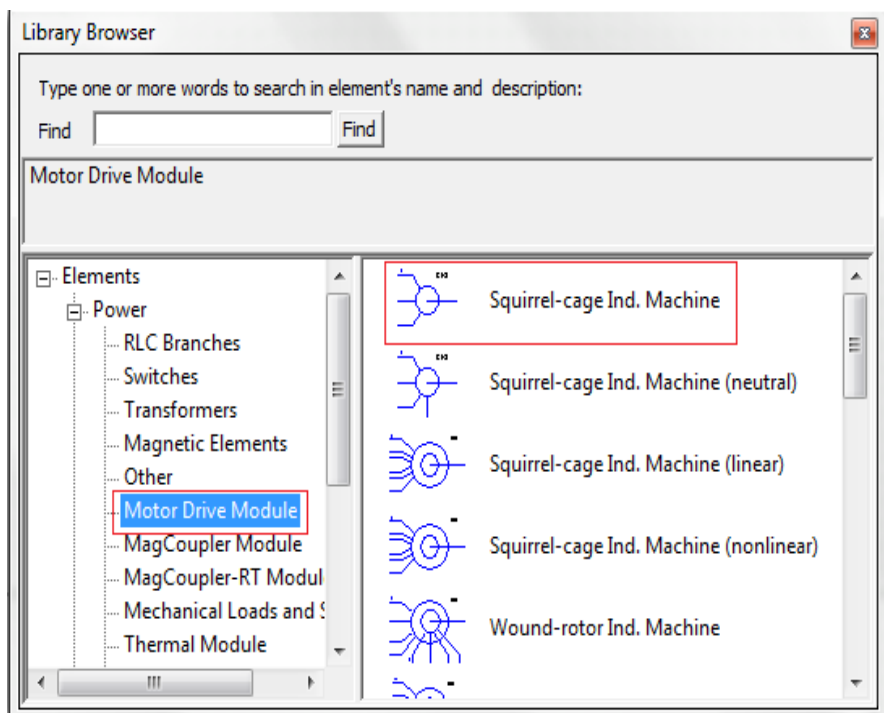
## ۱۰-۲- اجرای شبیه‌سازی

مدار شکل زیر را با استفاده از یک منبع سه‌فاز سینوسی و یک موتور القایی قفسه سنجایی در محیط نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۱۰): پیاده‌سازی مدار

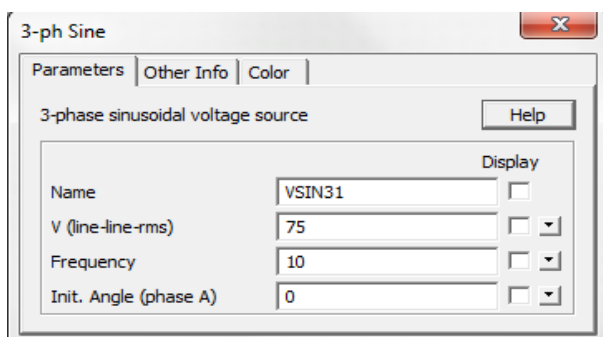
موتور القایی را می‌توان با توجه به شکل زیر از قسمت Motor Drive Module کتابخانه‌ی نرم‌افزار به شبیه‌سازی اضافه کرد.



(شکل ۳.۱۰): کتابخانه نرم افزار

در قسمت Motor Drive Module مدل‌های مربوط به ماشین‌های الکتریکی مختلف از قبیل انواع ماشین‌های قفسه سنجابی، روتور سیم‌پیچی شده، ماشین‌های DC و ماشین‌های سنکرون تعبیه شده است که از آنها می‌توان در شبیه‌سازی‌های مختلف استفاده نمود.

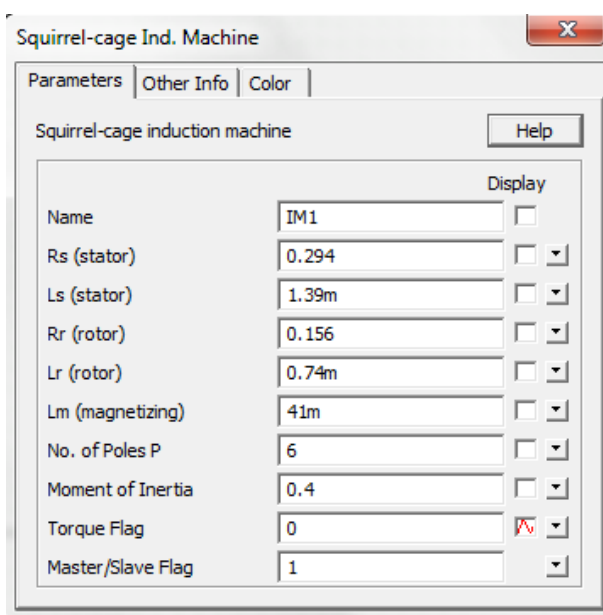
منبع ولتاژ سینوسی را به صورت شکل (۴.۱۰) تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۴.۱۰): منبع ولتاژ سینوسی

با دوبار کلیک روی موتور القایی پنجره‌ی مربوط به تنظیمات آن به صورت زیر باز

می شود.



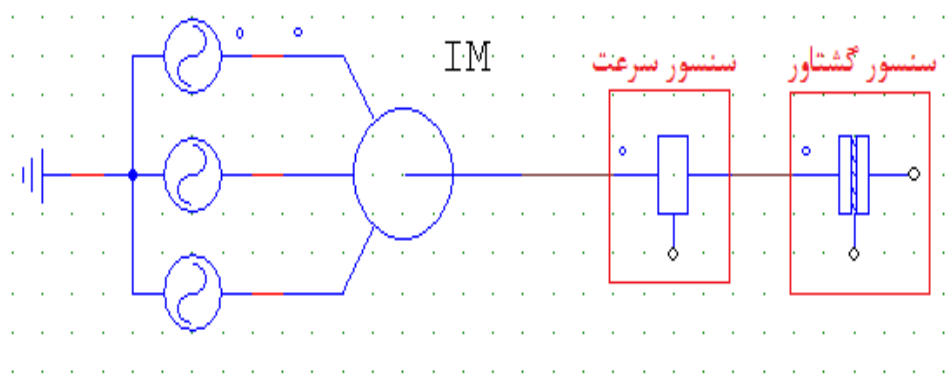
(شکل ۵.۱۰): تنظیمات موتور القایی

پارامترهای موجود در این پنجره به صورت زیر هستند:

Rs (stator): مقاومت سیم پیچی استاتور (اهم)
Ls (stator): اندوکتانس ناشی سیم پیچی استاتور (هانری)
Rr (rotor): مقاومت سیم پیچی روتور (اهم)
Lr (rotor): اندوکتانس ناشی سیم پیچی روتور (هانری)
Lm (magnetizing): اندوکتانس مغناطیس کننده (هانری)
No. of Poles P: تعداد قطبها (برای مثال برای یک جفت قطب باید عدد ۲ قرار گیرد)
Moment of Inertia: ممان اینرسی بر حسب $\text{kg}\times\text{m}\times\text{m}$
Torque Flag: پرچم خروجی برای نمایش گشتاور الکترومکانیکی داخلی (در صورتی که این پرچم برابر یک باشد، گشتاور داخلی موتور را می توان در خروجی رسم کرد)

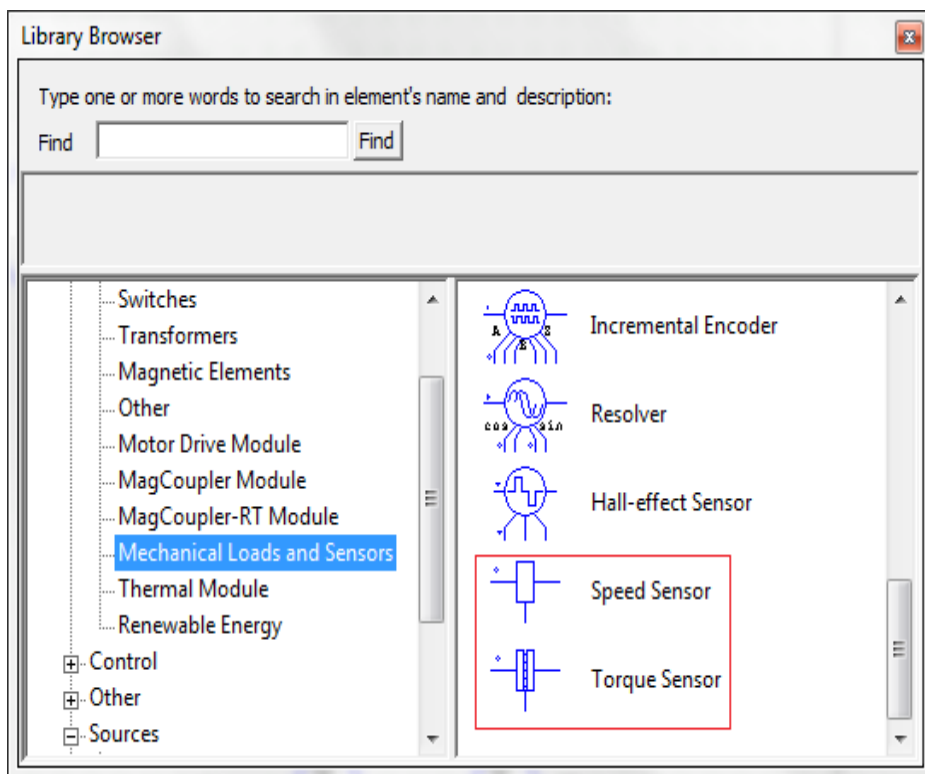
لازم به ذکر است که نرم افزار، تمامی پارامترهای فوق را از دید استاتور در نظر می گیرد و سیم پیچی استاتور نیز دارای اتصال ستاره است. برای سایر ماشینها نیز تنظیمات مربوطه به همین صورت وجود دارد و با استفاده از گزینهی Help موجود در پنجره ی تنظیمات می توان اطلاعات مفیدی در مورد آنها به دست آورد.

تنظیمات مربوط به موتور القایی را به همان صورت پیش فرض رها می‌کنیم. بارها و سنسورهای مکانیکی را می‌توان به قسمت سمت راست مدل موتور (شفت) افزود. برای این منظور ابتدا دو سنسور مکانیکی طبق شکل زیر جهت اندازه‌گیری سرعت و گشتاور به شفت موتور متصل می‌کنیم.



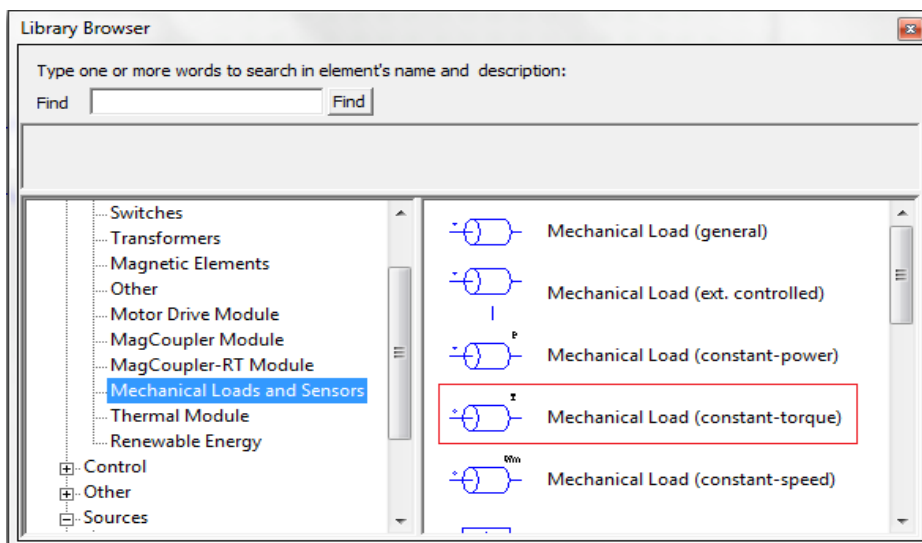
(شکل ۶.۱۰): اعمال سنسورهای مکانیکی به مدار

این دو سنسور را می‌توان از قسمت Mechanical Loads and Sensors در کتابخانه‌ی نرم‌افزار به شبیه‌سازی اضافه کرد.



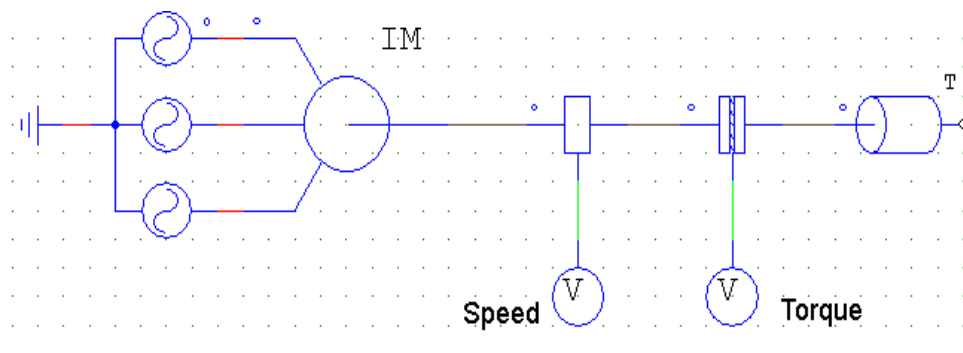
(شکل ۷.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

در قسمت بالای همین پنجره می‌توان به انواع بارهای مکانیکی دسترسی پیدا کرد. از جمله این بارها می‌توان به بارهای مکانیکی کنترل شده، توان ثابت، گشتاور ثابت، سرعت ثابت و غیره اشاره کرد. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد هر یک از این بارها می‌توان به Help مربوط به تنظیمات آنها مراجعه نمود.



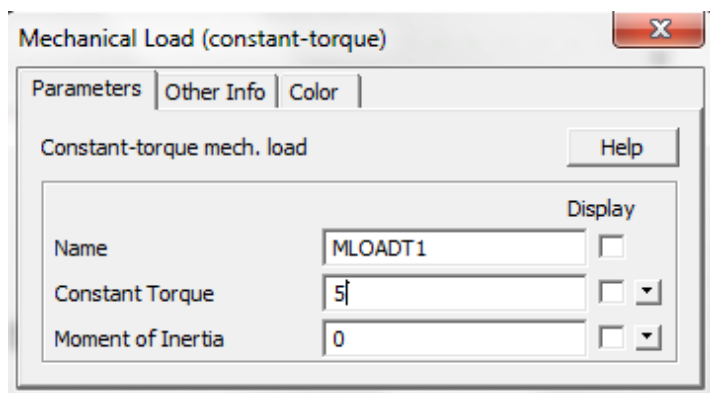
(شکل ۸.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

در این شبیه‌سازی از یک بار با گشتاور ثابت استفاده خواهیم کرد. از این رو بار Mechanical Load (constant-torque) را انتخاب کرده و طبق شکل زیر به مدار اضافه می‌کنیم.



(شکل ۹.۱۰): اعمال بار مکانیکی به مدار

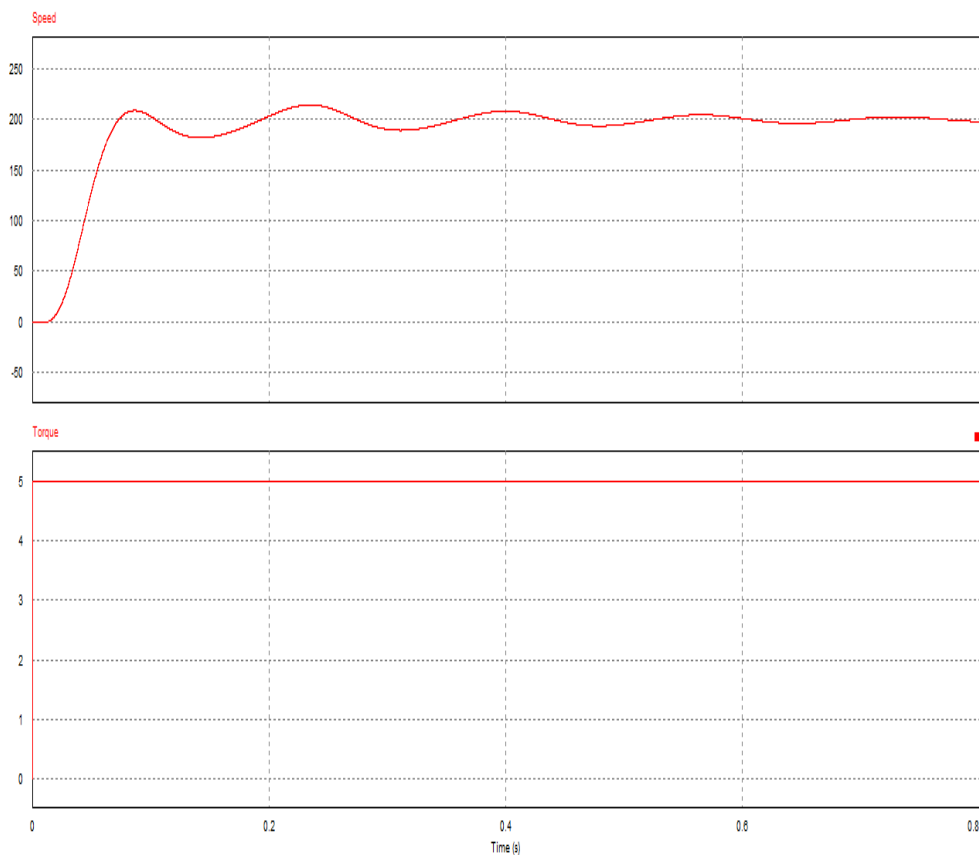
لازم به ذکر است که برای نمایش خروجی سنسورها باید از پروب‌های ولتاژ استفاده کرد. با دوبار کلیک روی بار با گشتاور ثابت، پنجره‌ی تنظیمات آن به صورت زیر باز می‌شود که در آن می‌توان گشتاور و ممان اینرسی بار را تعریف نمود. در اینجا گشتاور بار را ۵ N.m و ممان اینرسی را صفر در نظر می‌گیریم.



(شکل ۱۰.۱۰): تنظیم بار مکانیکی

از منوی Simulation Control → Simulation زمان شبیه‌سازی را در ۰/۸ ثانیه تنظیم، شبیه‌سازی را اجرا کرده و در خروجی سرعت و گشتاور موتور را رسم می‌کنیم.

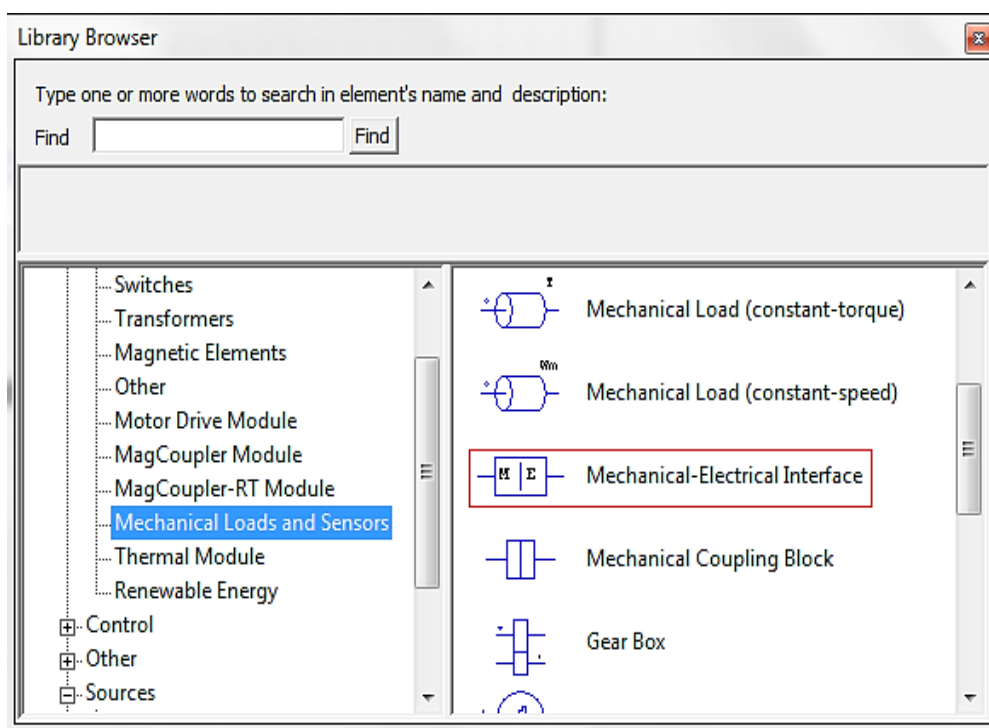




(شکل ۱۱.۱۰): سرعت و گشتاور موتور

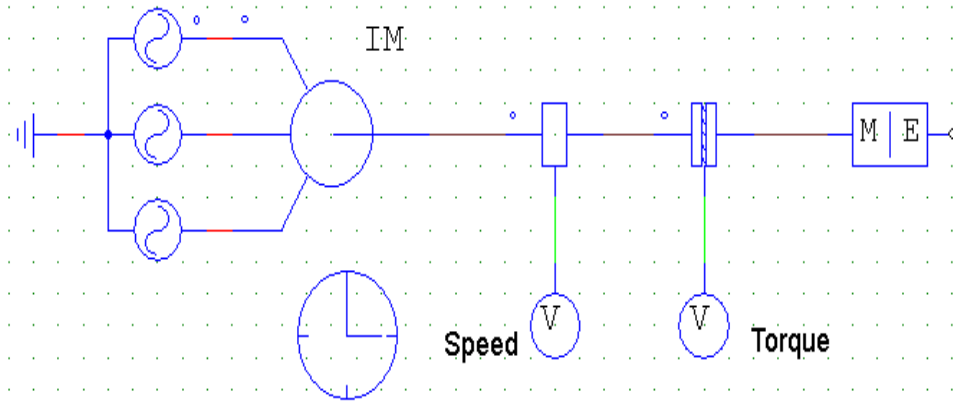
همان‌طور که انتظار می‌رفت گشتاور اندازه‌گیری‌شده برابر است با  $5 \text{ N.m}$  و سرعت شفت در  $200$  تثبیت می‌شود. باید در نظر داشت که خروجی سنسور سرعت بر حسب rpm می‌باشد، بنابراین واحد سرعت نمایش داده شده در اینجا دور در دقیقه خواهد بود.

در این قسمت می‌خواهیم به جای بار مکانیکی از مدار الکتریکی معادل آن استفاده کنیم. برای این کار باید بین بخش مکانیکی و الکتریکی ارتباط برقرار کنیم که این هدف با استفاده از بلوک رابط الکتریکی- مکانیکی محقق می‌شود. این بلوک در قسمت بارها و سنسورهای مکانیکی کتابخانه نرم‌افزار وجود دارد.



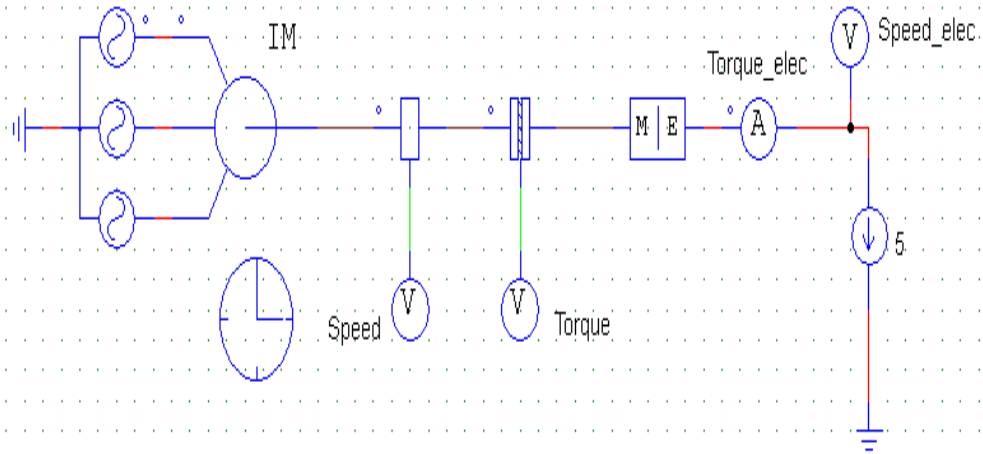
(شکل ۱۲.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

حال بار مکانیکی را حذف کرده و این بلوک را به جای آن اضافه می‌کنیم.



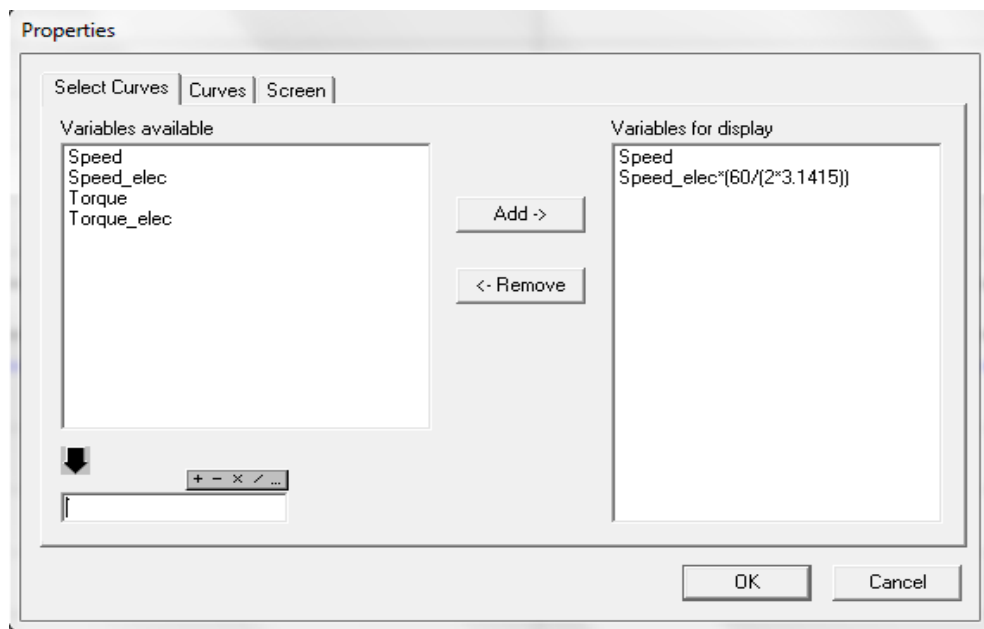
(شکل ۱۳.۱۰): مدار الکتریکی معادل بار مکانیکی

سمت راست این بلوک به مدار الکتریکی متصل شده و با استفاده از این بلوک رابطه‌ی ولتاژ - جریان به رابطه‌ی سرعت - گشتاور تبدیل می‌شود. به این صورت که سرعت یک رادیان بر ثانیه در سمت شفت برابر است با ولتاژ یک ولت در سمت الکتریکی و گشتاور یک نیوتن‌متر در سمت مکانیکی برابر خواهد بود با جریان یک آمپر در سمت الکتریکی. از این رو برای اینکه یک بار مکانیکی با گشتاور ثابت ۵ Nm داشته باشیم، باید یک منبع جریان مستقیم ۵ آمپری طبق شکل زیر در سمت الکتریکی متصل کنیم. مقدار اندازه‌گیری شده توسط آمپر متر معادل گشتاور مکانیکی و مقدار اندازه‌گیری شده توسط پروب ولتاژ، برابر سرعت مکانیکی بر حسب رادیان بر ثانیه است.



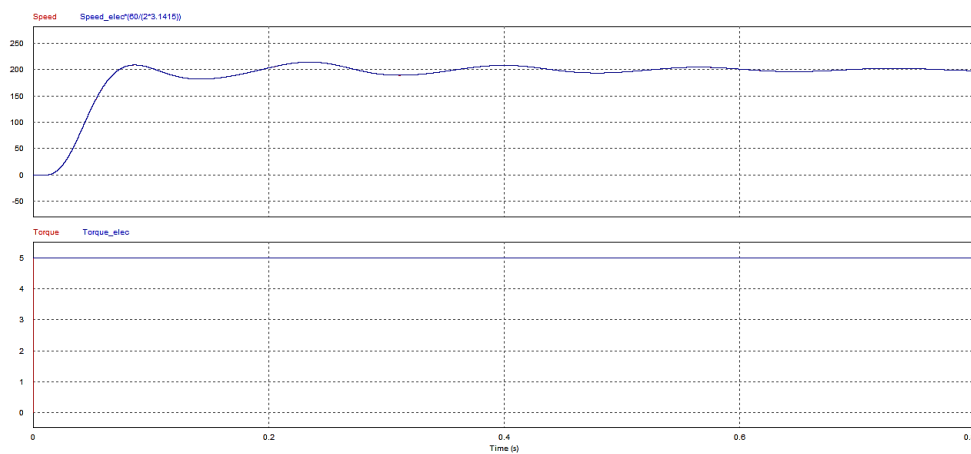
(شکل ۱۴.۱۰): روند تکمیل مدار

حال شبیه‌سازی را اجرا کرده و نمودارهای Speed و Speed\_elec را باهم در یک نمودار و Torque و Torque\_elec را باهم در یک نمودار دیگر رسم می‌کنیم. از آنجایی که خروجی سنسور سرعت بر حسب rpm است و خروجی پروب ولتاژ، معادل سرعت بر مکانیکی بر حسب رادیان بر ثانیه می‌باشد، نمودار Speed\_elec را ابتدا در عدد  $\frac{60}{2\pi}$  ضرب کرده و سپس به همراه نمودار Speed رسم می‌کنیم تا واحد هر دو یکسان (بر حسب rpm) شود. شکل (۱۵.۱۰) این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵.۱۰: تنظیمات Properties

در شکل‌های زیر سرعت و گشتاور نشان داده شده است.



شکل ۱۶.۱۰: شکل موج سرعت و گشتاور

---

همانطور که مشخص می باشد، نمودارهای ولتاژ و جریان در سمت الکتریکی به ترتیب بر نمودارهای سرعت و گشتاور در سمت مکانیکی منطبق هستند.

در این فصل یک موتور القایی ساده به همراه یک بار مکانیکی شبیه سازی شد که با نحوه ای ازصالات بخش مکانیکی آشنا شدید و همچنین فراگرفتید که چگونه می توان از یک مدار الکتریکی به عنوان بار مکانیکی استفاده کرد. همچنین باید در نظر داشت سنسورهای سرعت و گشتاور در سمت مکانیکی، باید قبل از بار مکانیکی، به شفت موتور متصل شوند.

## فصل یازدهم

### شبیه‌سازی همزمان کنترل جریان

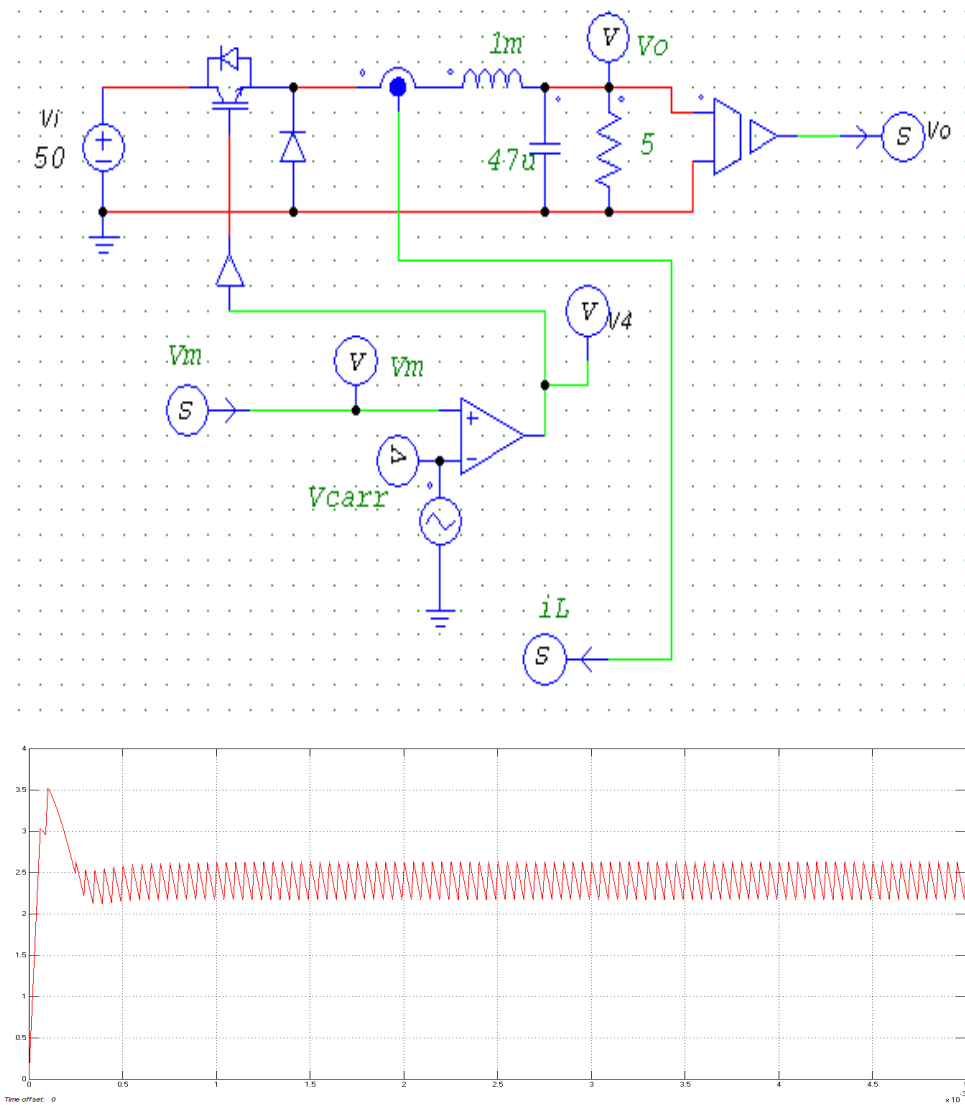
### متوسط در PSIM و MATLAB

#### ۱۱- مقدمه

در این فصل بلوک Simcoupler به منظور اجرای همزمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSIM

و MATLAB توضیح داده خواهد شد.

## ۱۱-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۱۱): شمای کلی مدار

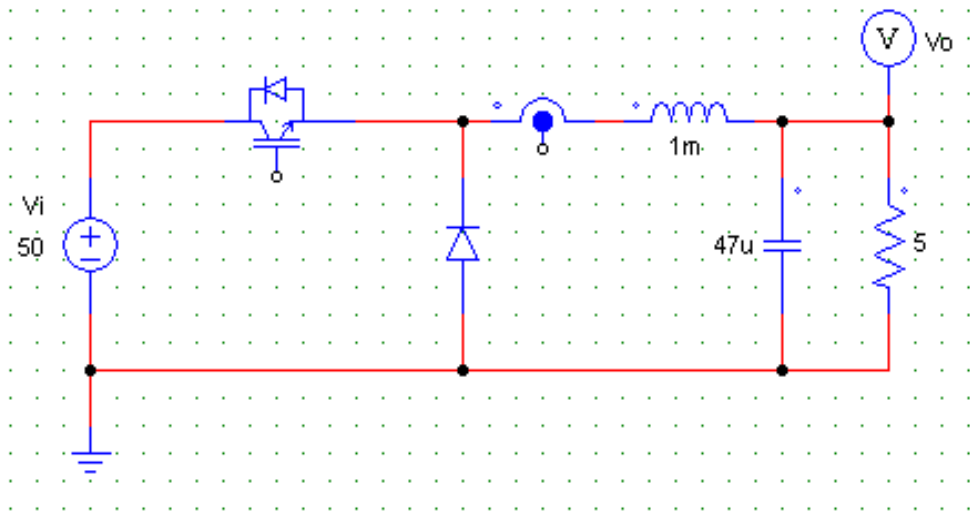


## ۱۱-۲- اجرای شبیه‌سازی

مدار شکل زیر قبلا با نام Average\_Current\_Mode\_Ctrl در فصل شبیه‌سازی مبدل DC به DC با کنترل جریان متوسط ایجاد شده است. در این فصل نیز از همان مدار با تنظیمات مشابه استفاده خواهد شد.



(شکل ۲.۱۱): نوار ابزار

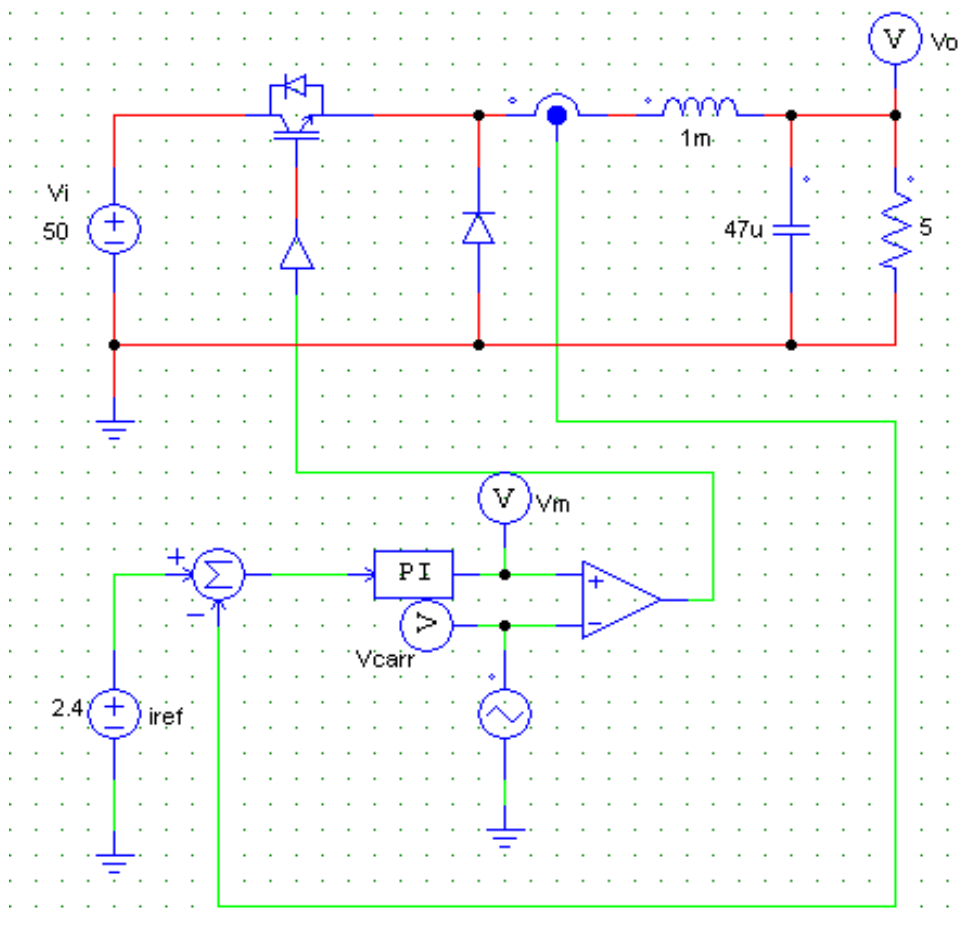


(شکل ۳.۱۱): پیاده‌سازی مدار


مدار کنترلی را نیز به‌طور مشابه با استفاده از المان‌های زیر رسم می‌کنیم.



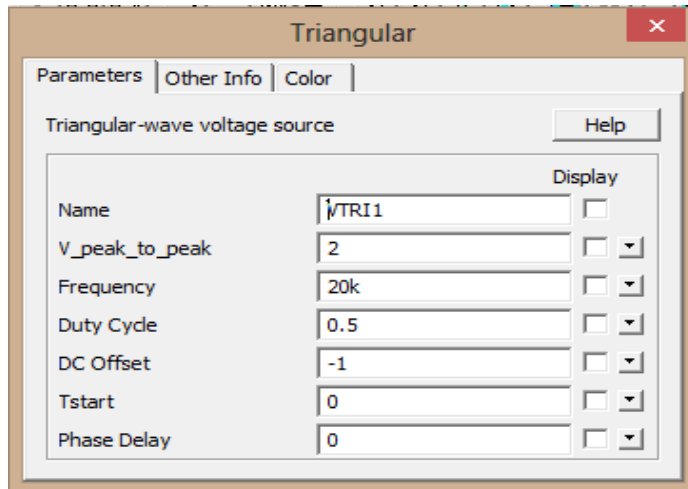
(شکل ۴.۱۱): نوار ابزار



(شکل ۵.۱۱): اضافه کردن قسمت کنترلی مدار

در مدار کنترلی فوق، جریان عبوری از سلف با مقدار مرجع مقایسه شده و سیگنال خطا تولید می‌شود. این سیگنال خطا از یک کنترل‌کننده‌ی PI عبور می‌کند تا سیگنال مناسب جهت مقایسه با سیگنال حامل (سیگنال مثلثی) تولید شود. در خروجی مقایسه‌گر، پالس‌های مناسب جهت روشن و خاموش شدن کلید به‌گونه‌ای تولید می‌شود که جریان سلف در مقدار مرجع تنظیم شود. باید توجه کرد از آنجایی که سیگنال خروجی مقایسه‌گر یک سیگنال کنترلی است، نمی‌توان آن را مستقیماً به گیت ترانزیستور متصل کرد. از این رو باید از یک کنترل‌کننده‌ی سوئیچ (  ) استفاده کرد تا سیگنال کنترلی را به سیگنال مناسب برای گیت ترانزیستور تبدیل کند.

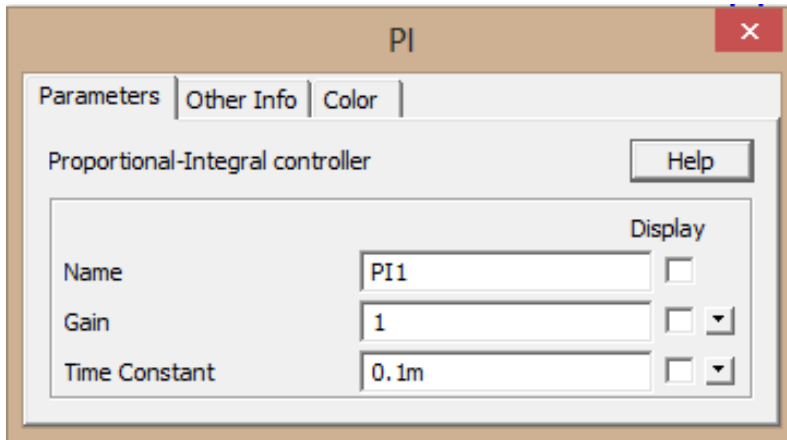
تنظیمات مربوط به منبع مثلثی به‌صورت زیر انجام شده است:



(شکل ۶.۱۱): تنظیم منبع مثلثی

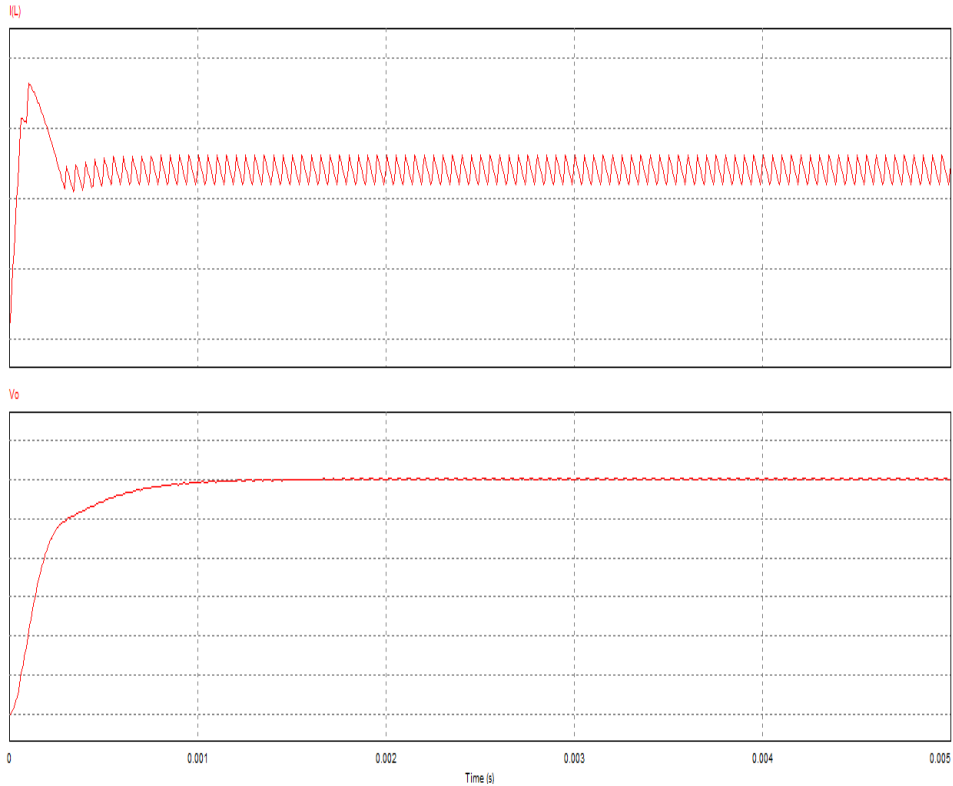
کنترل‌کننده‌ی PI را نیز به صورت زیر تنظیم می‌کنیم. این تنظیمات طبق تابع تبدیل کنترل‌کننده‌ی PI صورت می‌پذیرد.

$$G(s) = K * (1 + sT)/(sT)$$

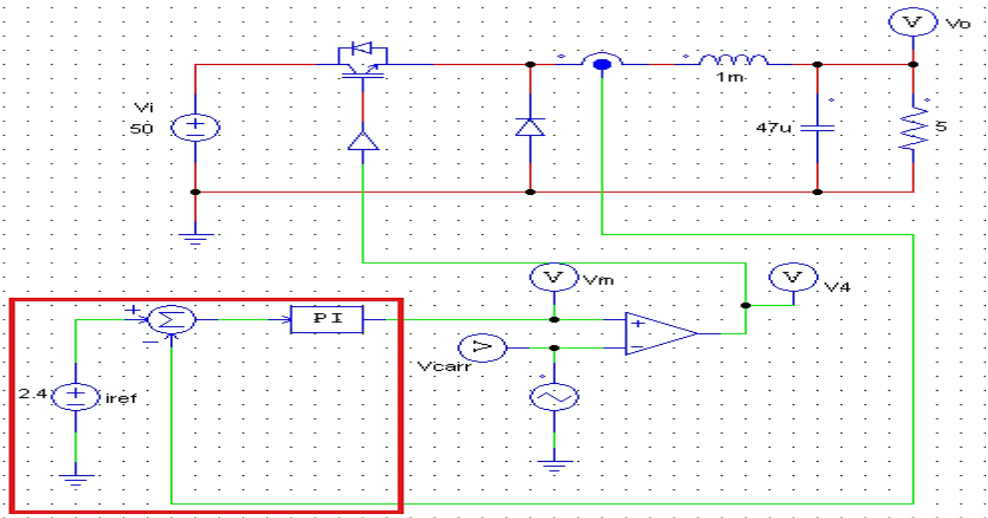


(شکل ۷.۱۱): تنظیم کنترل‌کننده PI

پیش از شبیه‌سازی، Current Flag مربوط به سلف را یک می‌کنیم تا در خروجی جریان سلف نیز نمایش داده شود. زمان شبیه‌سازی را ۵ میلی‌ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی نمودارهای  $V_o$  و  $I(L)$  را رسم می‌کنیم. شکل زیر این خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

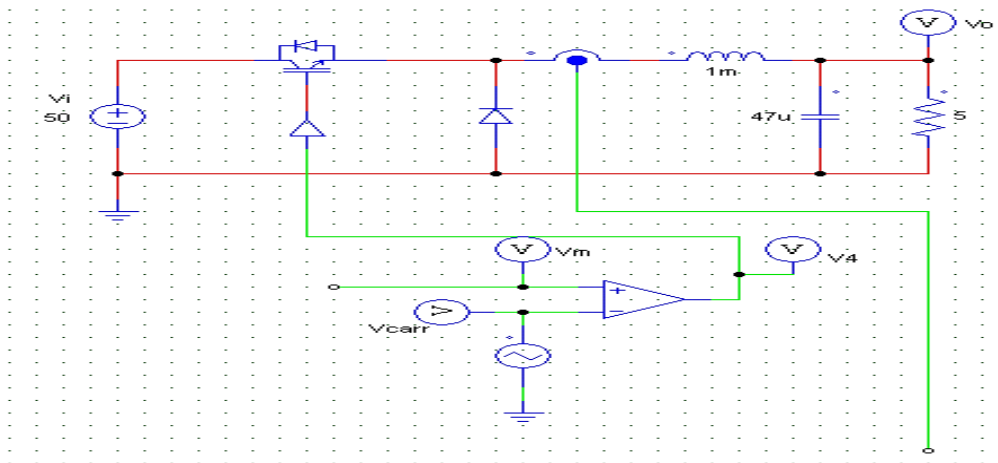
(شکل ۸.۱۱): نمودارهای  $V_o$  و  $I(L)$ 

حال می‌خواهیم با استفاده از بلوک SimCoupler بین نرم‌افزارهای PSIM و سیمولینک MATLAB ارتباط برقرار کنیم تا بتوانیم شبیه‌سازی همزمان انجام دهیم، به این صورت که بخشی از مدار در PSIM شبیه‌سازی شده و بخش دیگر در سیمولینک اجرا می‌شود. در شکل زیر این دو بخش مشخص شده است. قسمت داخل مستطیل قرمز در سیمولینک MATLAB و مابقی توسط PSIM به‌طور همزمان شبیه‌سازی می‌شود.



(شکل ۹.۱۱): روند تکمیل مدار

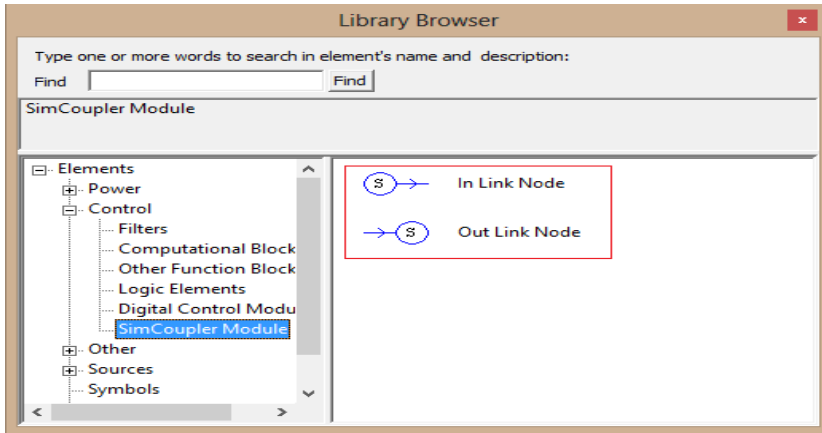
برای این منظور مدار را به شکل زیر اصلاح می‌کنیم.



(شکل ۱۰.۱۱): روند تکمیل مدار

برای ایجاد ارتباط بین نرم‌افزار PSIM و سیمولینک MATLAB باید از بلوک‌های

SimCoupler که در کتابخانه‌ی نرم‌افزار PSIM موجود هستند، استفاده کرد.

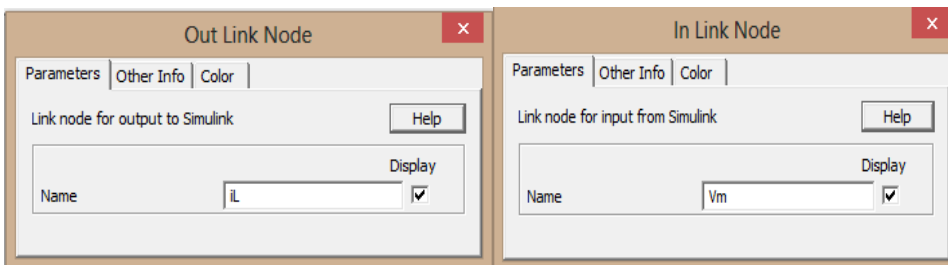


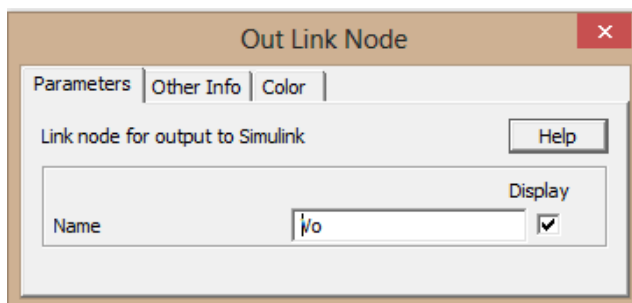
(شکل ۱۱.۱۱): کتابخانه نرم‌افزار

بلوک Out Link Node را به خروجی سنسور جریان و بلوک In Link Node را به

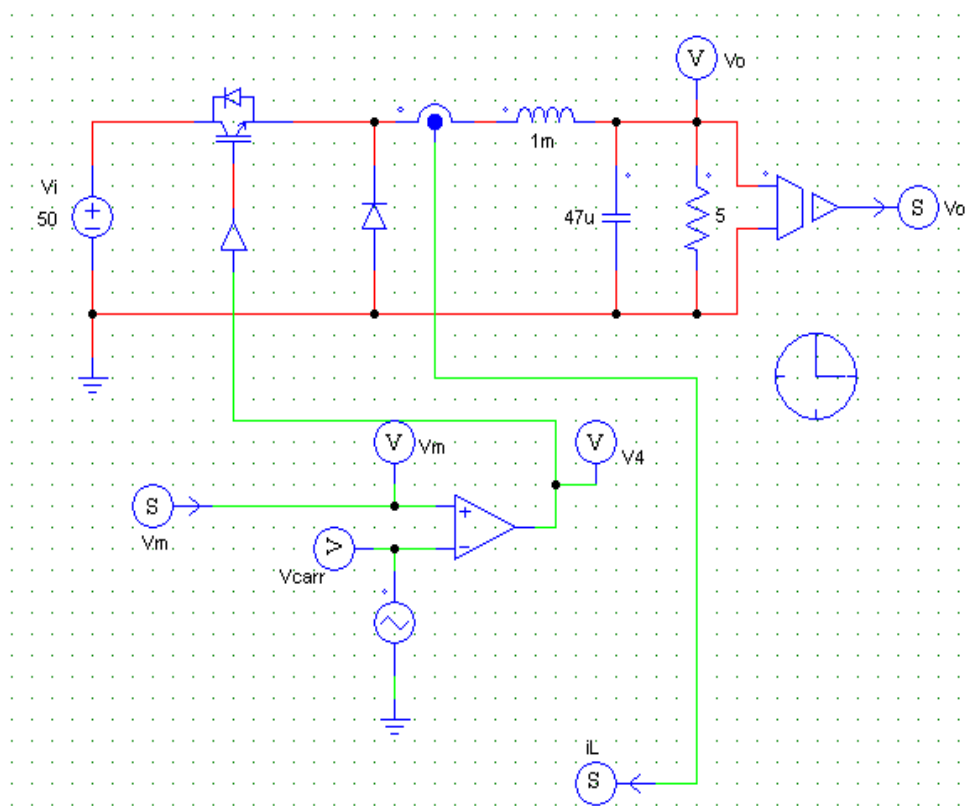
ورودی مقایسه‌گر متصل می‌کنیم. با دوبار کلیک کردن روی بلوک‌ها نام آن‌ها را مطابق

شکل زیر تغییر می‌دهیم.





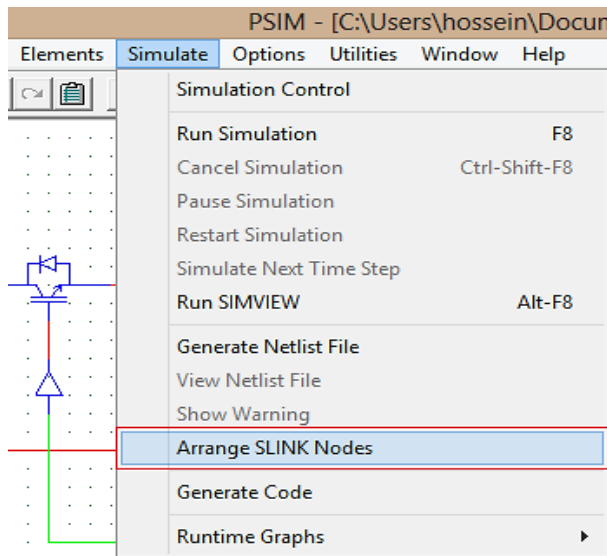
شکل (۱۲.۱۱): تنظیم بلوک‌های SimCoupler



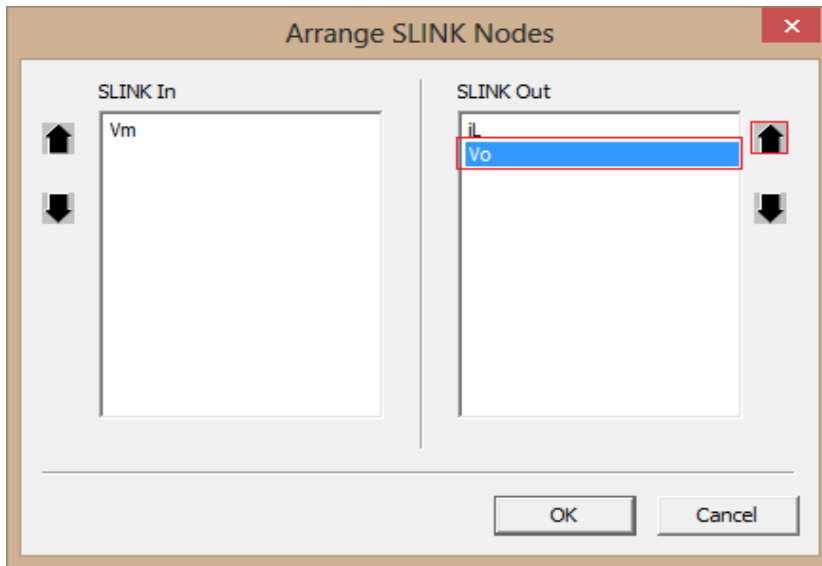
شکل (۱۳.۱۱): روند تکمیل مدار



لازم به ذکر است که بلوک In Link Node سیگنال‌ها را از سیمولینک دریافت کرده و با استفاده از بلوک Out Link Node سیگنال‌ها به سیمولینک ارسال می‌شود. در یک شبیه‌سازی می‌توان از چندین In/Out Link Node به منظور تبادل مقادیر بین نرم‌افزارهای PSIM و سیمولینک استفاده کرد. برای مثال در شکل فوق یک Out Link Node نیز به خروجی سنسور ولتاژ مقاومت متصل شده است تا این ولتاژ نیز به سیمولینک ارسال شود. در چنین حالتی که چندین In Link Node یا Out Link Node وجود دارد، می‌توان به ترتیب از مسیر زیر تنظیمات را صورت داد. ورودی‌ها و خروجی‌ها در بلوک SimCoupler در محیط سیمولینک MATLAB به همین ترتیب ظاهر می‌شوند.

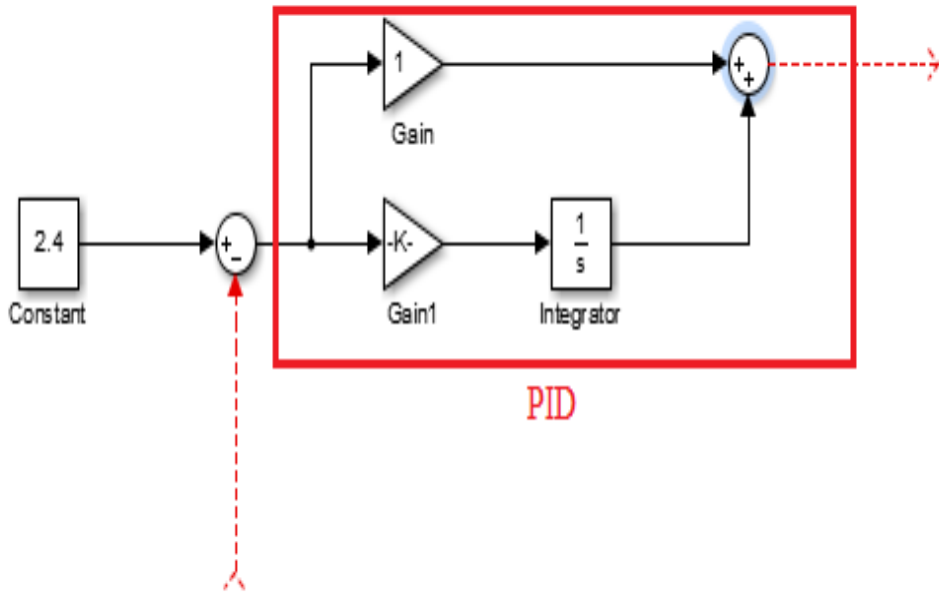


(شکل ۱۴.۱۱): تنظیم SimCoupler



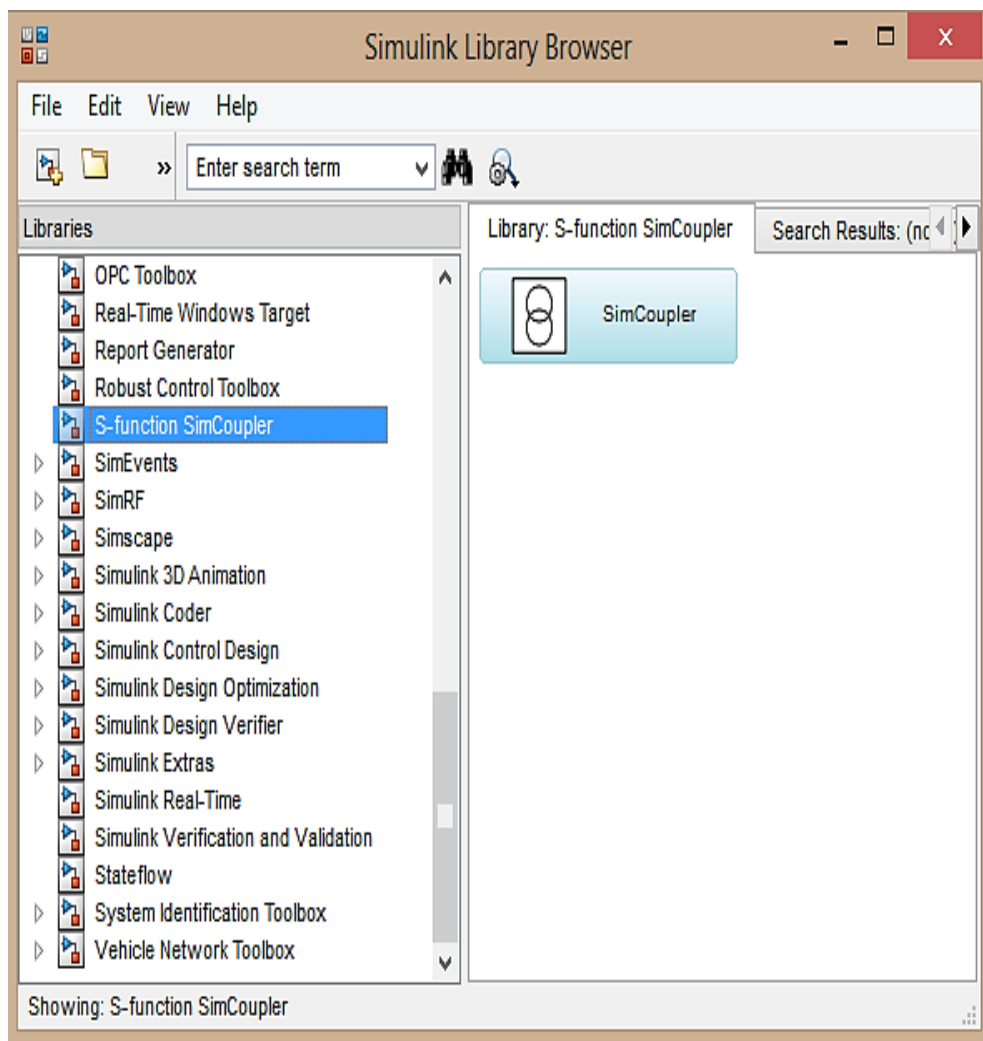
شکل (۱۵.۱۱): تنظیمات Arrange SLINK Nodes

برای جابجایی ترتیب گره‌ها، آن‌ها را انتخاب کرده و سپس با استفاده از فلش‌های بالا یا پایین آن‌ها را جابجا می‌کنیم. در این جا ترتیب گره‌ها به صورت شکل فوق تنظیم شده‌اند (IL در بالا و Vo در پایین). حال مدار را با نام Average\_Current\_Mode\_PSM.psimsch ذخیره می‌کنیم. در اینجا بخش مربوط به نرم‌افزار PSIM کامل شده است و باید مدار کنترلی را در نرم‌افزار MATLAB رسم کنیم. برای این کار نرم‌افزار MATLAB را باز کرده و در Command Window عبارت Simulink را تایپ می‌کنیم. با زدن کلید Enter محیط سیمولینک باز می‌شود. یک مدل جدید ایجاد کرده و مدار کنترلی زیر را در آن رسم می‌کنیم.



(شکل ۱۶.۱۱): کنترل‌کننده‌ی PID

مدار داخل کادر قرمز همان کنترل‌کننده‌ی PID است. مقدار بلوک  $Gain^1$  در  $(1, 0, e-)$  در  $1/3$  تنظیم شده است. مدار فوق را با نام `Average_Current_Mode_MS.mdl` در همان مسیر فایل `Average_Current_Mode_PSM.psim` ذخیره می‌کنیم. حال برای تکمیل شبیه‌سازی باید بلوک `SimCoupler` را به مدار فوق اضافه کنیم. برای این کار به کتابخانه‌ی سیمولینک رفته و از منوی `SimCoupler S-function` بلوک `Simcoupler` را به مدار اضافه می‌کنیم.

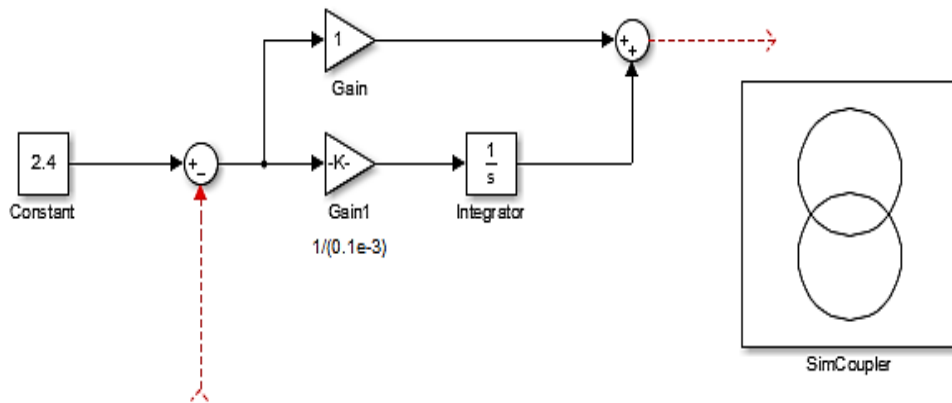


(شکل ۱۷.۱۱): کتابخانه مدار

توجه داشته باشید که منوی `s-function SimCoupler` در هنگام نصب نرم‌افزار PSIM به‌طور خودکار به کتابخانه‌ی سیمولینک MATLAB افزوده می‌شود. در صورتی

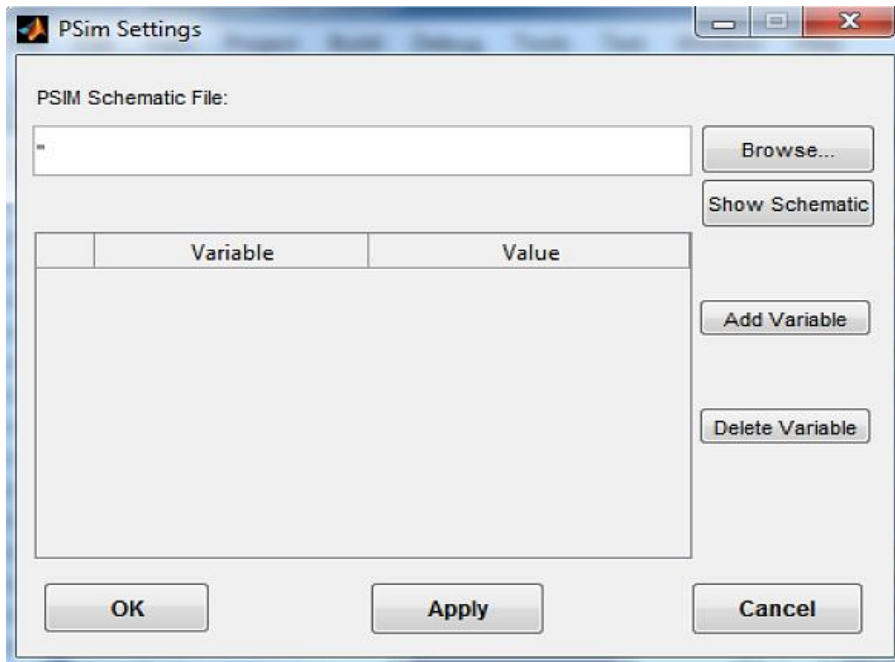
که این بلوک در کتابخانه‌ی سیمولینک وجود نداشته می‌توان آن را از مسیر Utilities SimCoupler Setup → (در نرم‌افزار PSIM) به کتابخانه‌ی سیمولینک افزود. باید توجه کرد که تنظیمات فوق زمانی قابل اعمال است که نرم‌افزارهای PSIM و MATLAB هر دو در یک پوشه نصب شده باشند. برای مثال در این شبیه‌سازی این دو نرم‌افزار هر دو در پوشه‌ی Program Files نصب شده‌اند.

در شکل زیر بلوک SimCoupler به سیمولینک اضافه شده است.



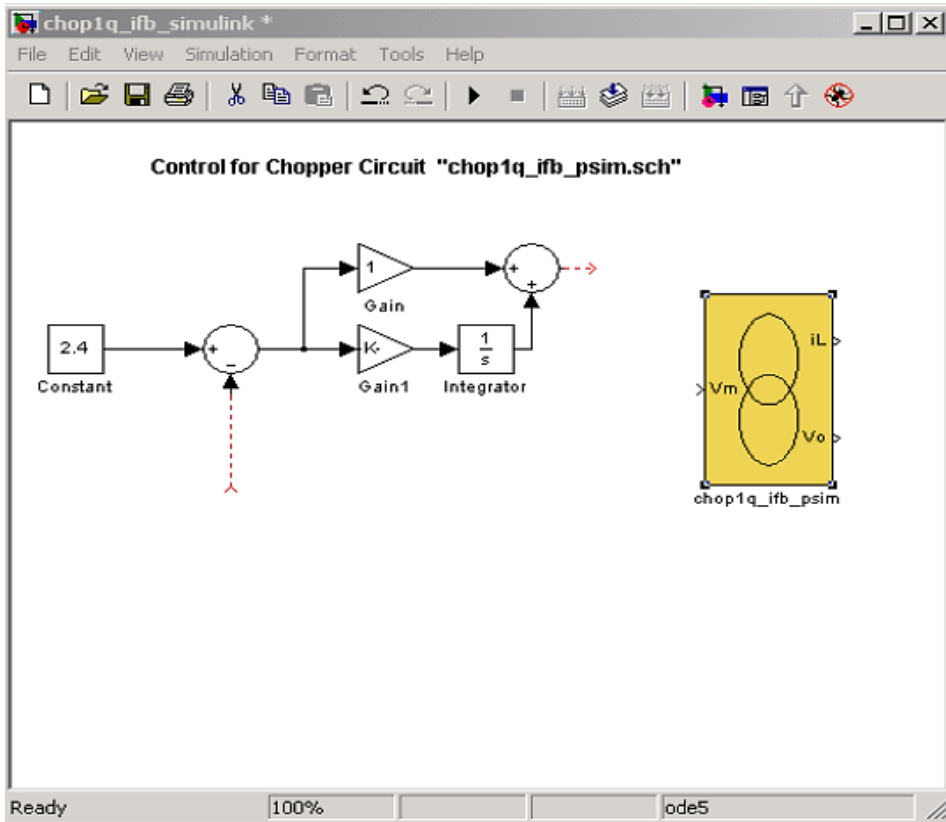
(شکل ۱۸.۱۱): اضافه کردن بلوک SimCoupler

با دوبار کلیک روی بلوک SimCoupler پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۱۹.۱۱): تنظیمات بلوک SimCoupler

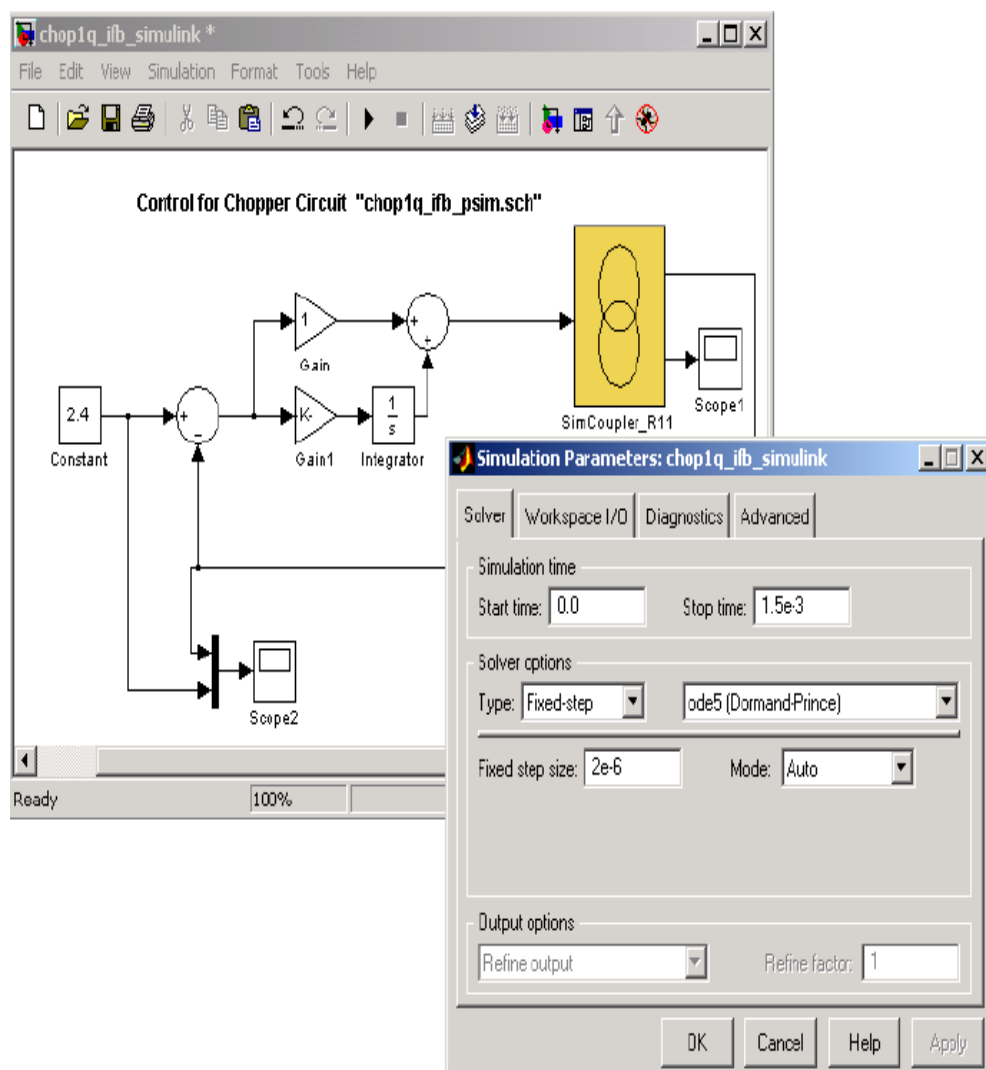
حال روی Browse کلیک کرده و فایل Average\_Current\_Mode\_PSM.psimsch را در مسیری که ذخیره کرده‌ایم، انتخاب می‌کنیم. با کلیک روی دکمه‌ی OK پنجره‌ی فوق را می‌بندیم. با این کار شکل بلوک SimCoupler به‌گونه‌ای تغییر می‌کند تا تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها با تعداد In/Out Link Nodes در طرح PSIM برابر شوند که در اینجا یک ورودی و دو خروجی خواهیم داشت. نام پورت‌ها نیز طبق نام‌گذاری صورت گرفته در طرح PSIM نشان داده می‌شوند. به منظور ایجاد تمایز بین بلوک SimCoupler با سایر المان‌ها، رنگ آن به زرد تغییر می‌کند.



(شکل ۲۰.۱۱): روند تکمیل مدار

اگر بعداً تعداد گره‌ها در طرح PSIM تغییر کرد، در اینجا نیز می‌توان با رفتن به منوی Edit و انتخاب Update Diagram، تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها را در بلوک SimCoupler با طرح PSIM مطابقت داد. اتصالات را تکمیل کرده و سپس به منوی Simulation می‌رویم و Simulation Parameters را انتخاب می‌کنیم. در قسمت Solver Option می‌توان یکی از دو روش حل Fixed-Step و یا Variable-Step را انتخاب کرد. اگر روش

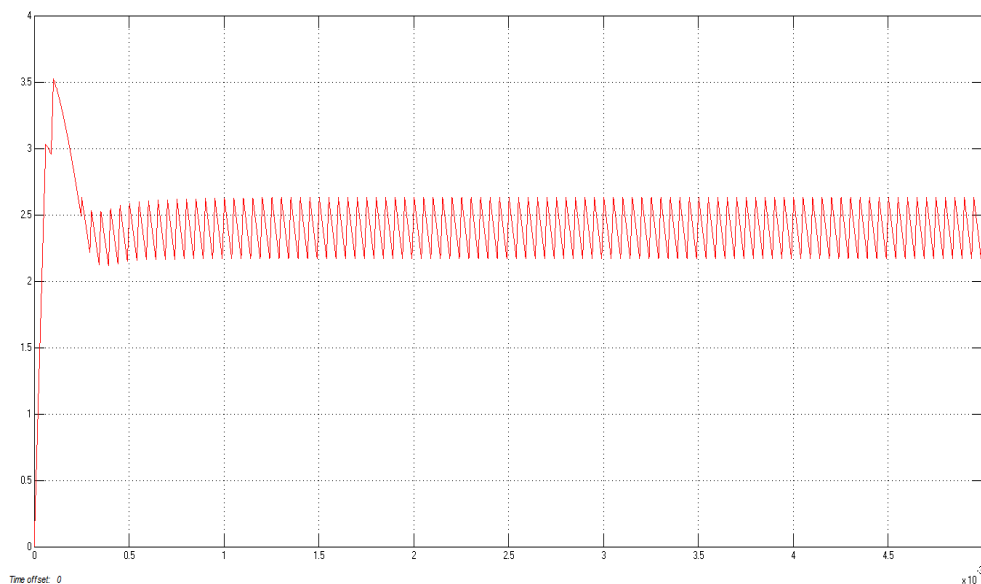
حل با گام ثابت انتخاب شود، گام‌های شبیه‌سازی با مقدار تنظیم شده در طرح PISIM مشابه خواهد بود. مدار سیمولینک مشابه شکل زیر خواهد شد:



(شکل ۲۱.۱۱): تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی

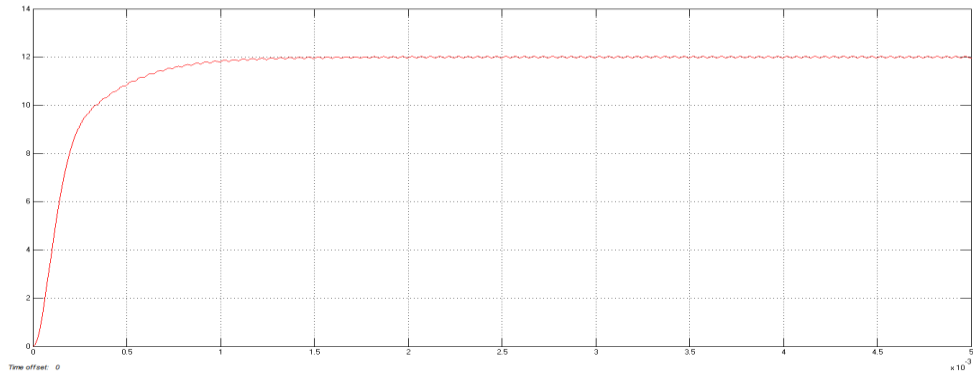


در اینجا طراحی مدار در محیط سیمولینک MATLAB نیز کامل می‌شود. حال می‌توان شبیه‌سازی را در محیط سیمولینک با رفتن به منوی Simulink و انتخاب Start انجام داد. خروجی‌های  $i_L$  و  $V_o$  در سیمولینک MATLAB به صورت زیر هستند، شکل زیر خروجی  $i_L$  را نمایش می‌دهد.



(شکل ۲۲.۱۱):  $i_L$  در سیمولینک MATLAB

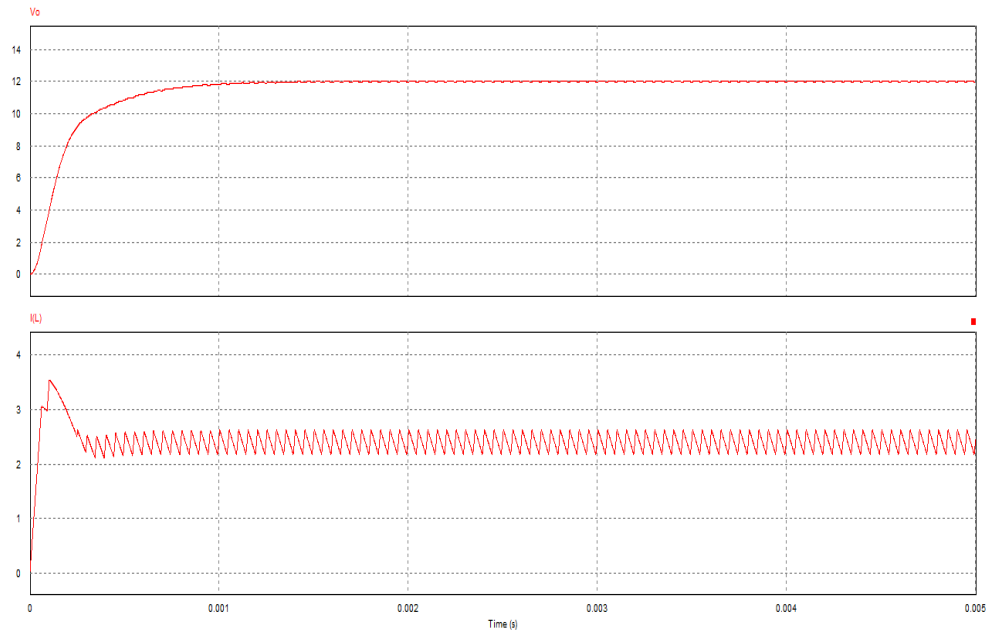
در شکل زیر نیز خروجی  $V_o$  در محیط سیمولینک شبیه‌سازی شده است.



(شکل ۲۳.۱۱):  $V_o$  در سیمولینک MATLAB

اشکال زیر همان خروجی‌ها را که در محیط PSIM شبیه‌سازی شده‌اند را نشان

می‌دهد.



(شکل ۲۴.۱۱):  $V_o$  و  $i_L$  در محیط psim

---

همانطور که ملاحظه می‌کنید، شبیه‌سازی همزمان با MATLAB با شبیه‌سازی صورت گرفته توسط PSIM یکسان است.

در این فصل فراگرفتیم که چگونه یک شبیه‌سازی را به‌طور همزمان با استفاده از نرم‌افزارهای PSIM و MATLAB انجام دهیم. دقت کنید که در این شبیه‌سازی فقط سیستم کنترلی در سیمولینک MATLAB شبیه‌سازی می‌شود و شبیه‌سازی بخش قدرت در PISIM صورت می‌پذیرد. همانطور که گفته شد برای این کار باید در نرم‌افزار PSIM از گره‌های ورودی و خروجی استفاده کرد و در سیمولینک نیز بلوک SimCoupler وظیفه‌ی ایجاد ارتباط با نرم‌افزار PISIM را برعهده دارد.



## فصل دوازدهم

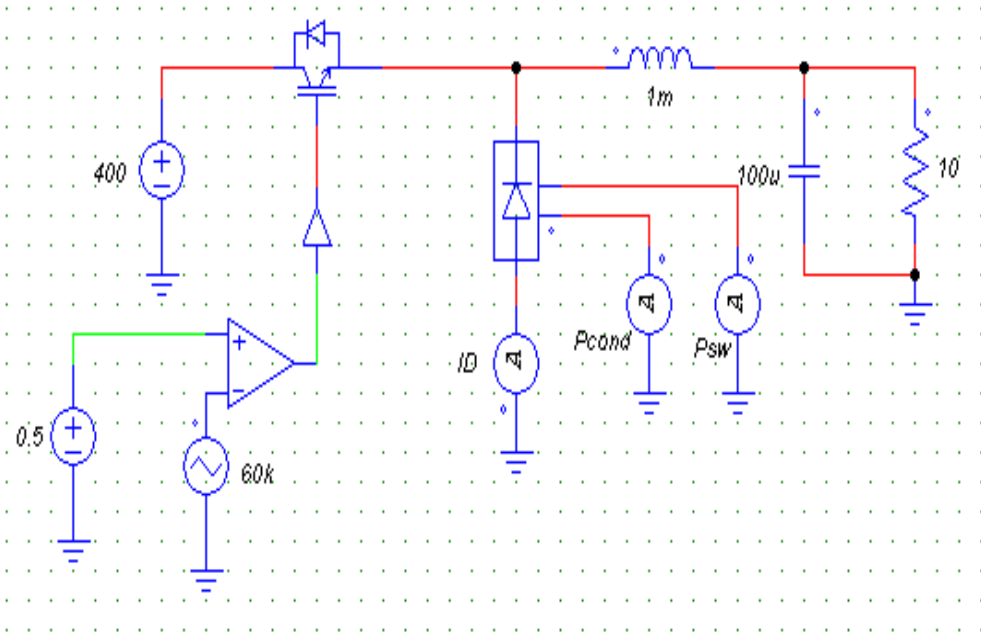
# تجزیه و تحلیل حرارتی برای یک دیود

### ۱۲- مقدمه

در این فصل محاسبه تلفات هدایتی و کلیدزنی دیود (با مشخصه  $150\text{EBU}04$ ) در

محیط نرم افزار PSIM توضیح داده خواهد شد.

## ۱۲-۱- طرح مدار

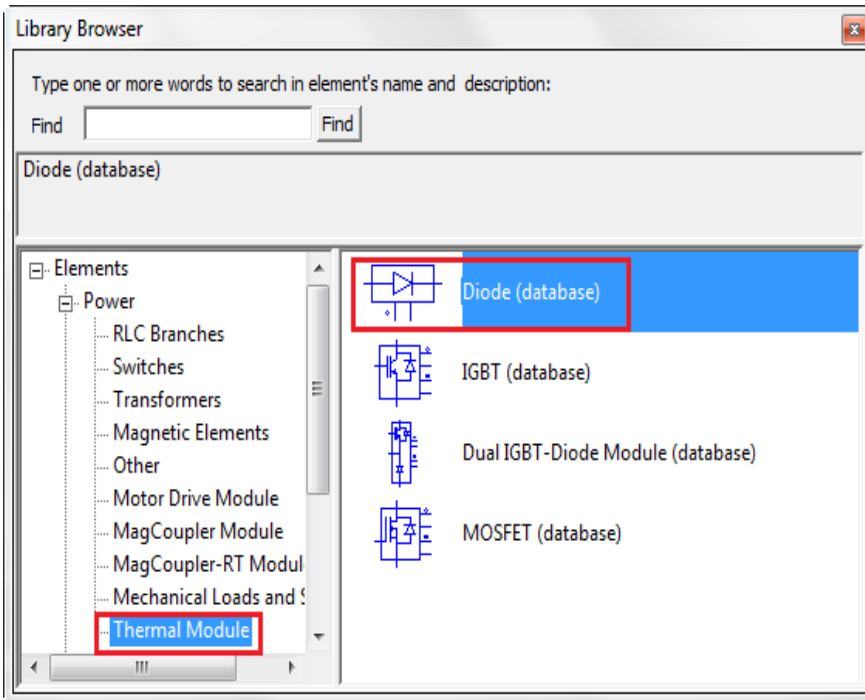


(شکل ۱۲.۱): شمای کلی مدار

## ۱۲-۲- اجرای شبیه‌سازی

برای محاسبه‌ی تلفات حرارتی یک دیود، از کتابخانه‌ی نرم‌افزار در قسمت Thermal

Module یک دیود انتخاب کرده و به مدار اضافه می‌کنیم.

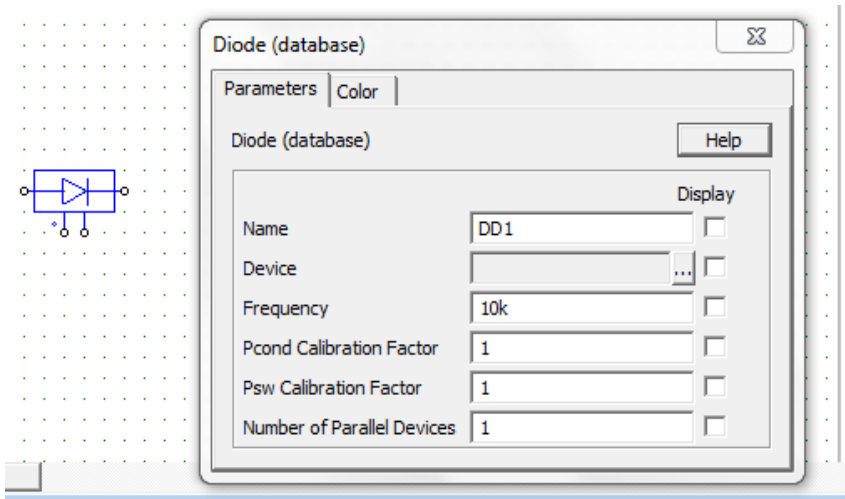


(شکل ۲.۱۲): کتابخانه نرم‌افزار

دقت کنید که در این قطعه، چهار پایه وجود دارد. دو پایه‌ی مقابل هم برای استفاده در مدار اصلی است و دو پایه‌ی کنار هم (که روی یکی از آن‌ها نقطه قرار دارد) برای محاسبه‌ی تلفات استفاده می‌شود. پایه‌ای که کنار آن نقطه است برای محاسبه‌ی تلفات هدایتی (Pcond) و پایه‌ی بدون نقطه، تلفات ناشی از کلیدزنی (Psw) را محاسبه می‌کند. این تلفات برحسب وات می‌باشد و به صورت جریان در مدار ظاهر می‌شود. بنابراین برای

اندازه‌گیری تلفات باید در مسیر پایه‌ها یک آمپر متر قرار داده و سر دیگر آمپر متر را به زمین متصل کرد.

با دوبار کلیک روی دیود، پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۳.۱۲): تنظیم دیود

در این پنجره بخش‌های زیر مشاهده می‌شود:

Device: قطعه (دیود) مشخصی که از دیتابیس موجود در نرم‌افزار انتخاب می‌شود

Frequency: فرکانسی که قرار است در آن تلفات محاسبه شود

Pcond Calibration Factor: ضریب اصلاح Kcond در تلفات هدایتی

Psw Calibration Factor: ضریب اصلاح Ksw در تلفات کلید زنی

Number of Parallel Devices: تعداد دیودهای ایده‌آل موازی



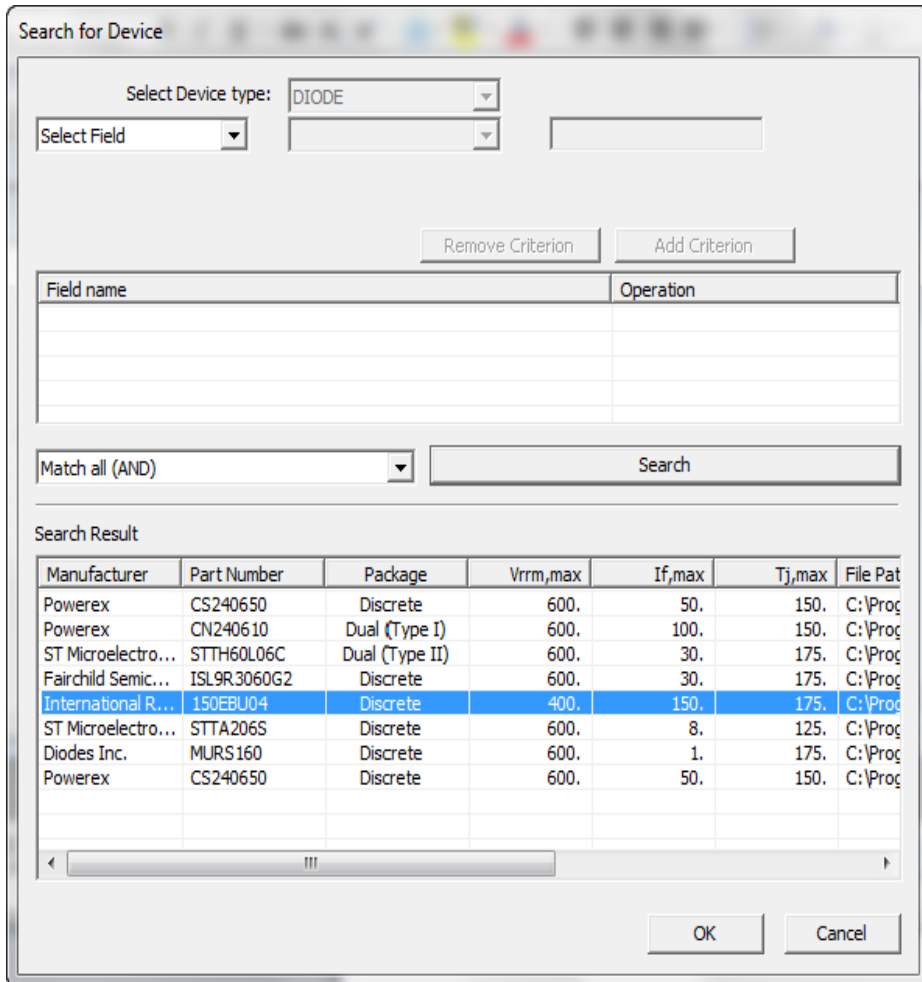
پارامتر Frequency مربوط به فرکانسی است که قرار است در آن تلفات دیود محاسبه شود. برای مثال اگر قطعه در فرکانس کلیدزنی ۱۰ kHz عمل می‌کند، این پارامتر نیز باید در همان مقدار تنظیم شود. در این حالت، تلفات برای یک دوره‌ی کلیدزنی محاسبه می‌شود. هرچند اگر این پارامتر مثلاً در ۶۰ هرتز تنظیم شود، تلفات برای یک دوره از فرکانس ۶۰ هرتز محاسبه می‌گردد. پارامتر Pcond Calibration Factor یک ضریب اصلاح برای تلفات هدایتی است. برای مثال اگر تلفات هدایتی محاسبه شده قبل از اصلاح Pcond\_cal باشد، داریم:

$$P_{cond} = K_{cond} * P_{cond\_cal}$$

به‌طور مشابه پارامتر Psw calibration Factor نیز ضریب اصلاح تلفات کلیدزنی است، برای مثال اگر تلفات کلیدزنی محاسبه شده قبل از اصلاح Psw\_cal باشد، داریم:

$$P_{sw} = K_{sw} * P_{sw\_cal}$$

قبل از انجام شبیه‌سازی باید دیود مورد نظر را از دیتابیس نرم‌افزار انتخاب کنیم. برای این کار روی علامت سه نقطه در کنار پارامتر Device کلیک می‌کنیم و پنجره‌ی زیر باز می‌شود.

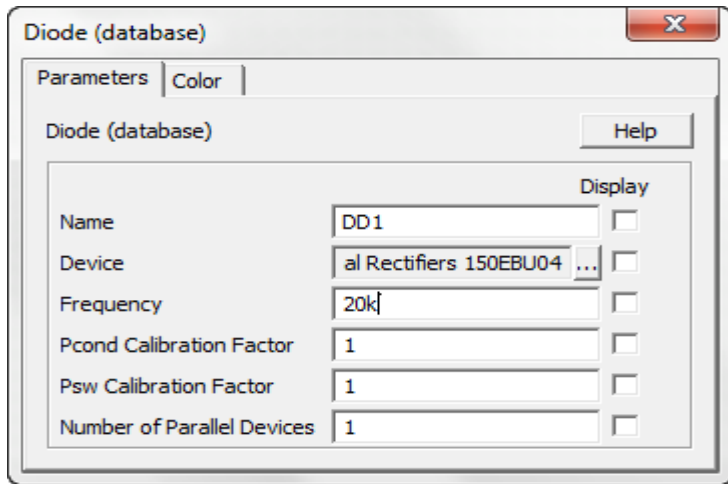


(شکل ۴.۱۲): انتخاب دیود از دیتابیس نرم‌افزار

در این پنجره دیود مورد نظر را انتخاب می‌کنیم. به عنوان مثال در این شبیه‌سازی از

دیود ۰۴ EBU ۱۵۰ استفاده شده است. در تنظیمات دیود برای پارامتر Frequency عدد

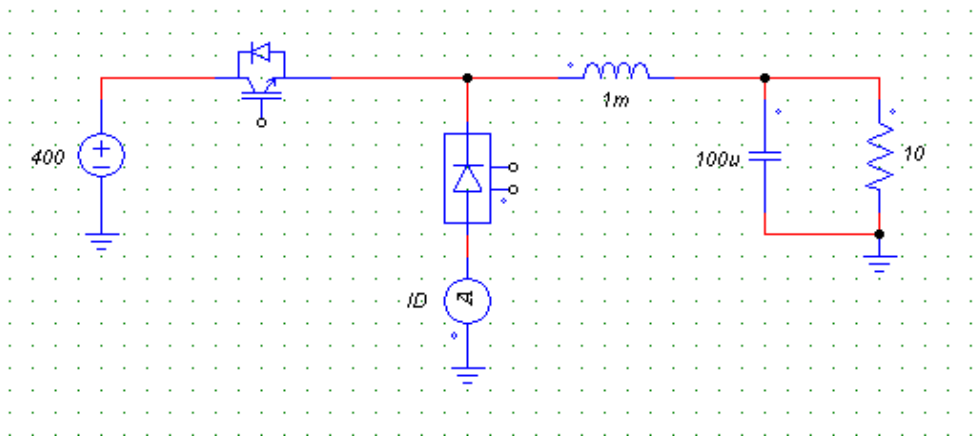
۲۰ کیلوهرتز را وارد می‌کنیم.



(شکل ۵.۱۲): تنظیمات دیود

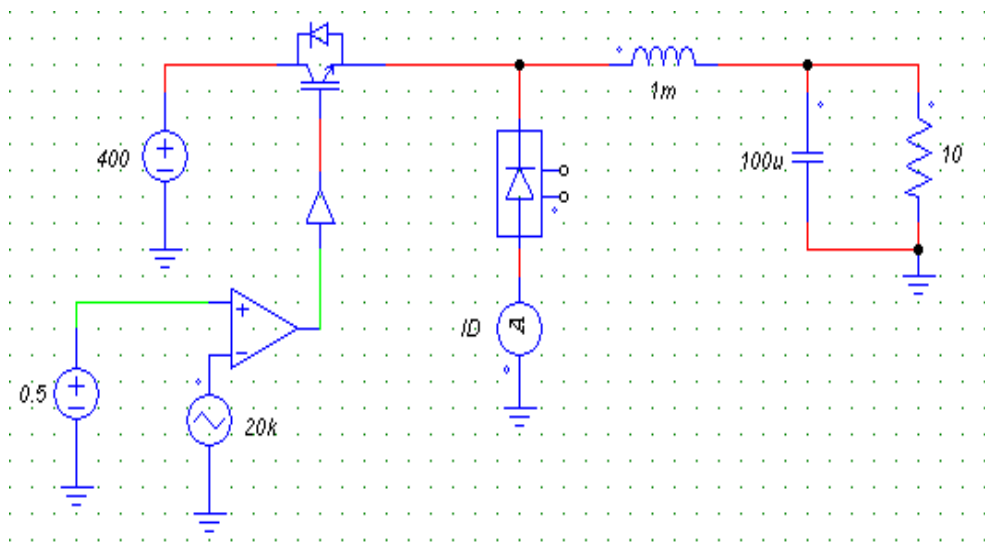
سایر تنظیمات از قبیل ضرایب اصلاح را در حالت پیش فرض در نظر می‌گیریم. حال

مدار را به صورت زیر تکمیل می‌نماییم.



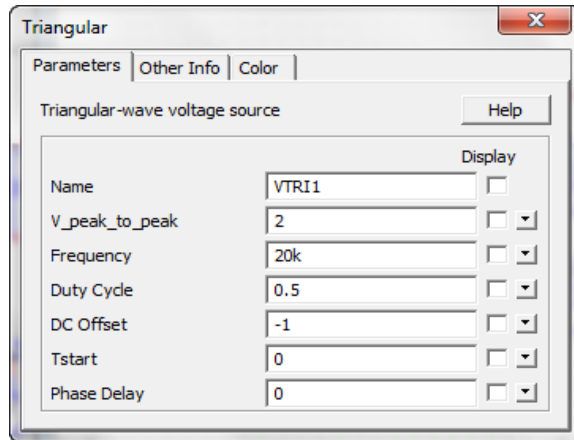
(شکل ۶.۱۲): پیاده‌سازی مدار

اندازه‌ی المان‌ها را طبق مقادیر نشان داده‌شده روی شکل تنظیم می‌کنیم. حال باید مدار مربوط به سویچ IGBT را تکمیل کنیم. برای این کار از مدار ساده‌ی زیر استفاده می‌کنیم که در آن یک مقدار ثابت با سیگنال مثلثی مقایسه می‌شود تا پالس‌های مناسب برای کلید زنی تولید گردد.



(شکل ۷.۱۲): اعمال پالس IGBT

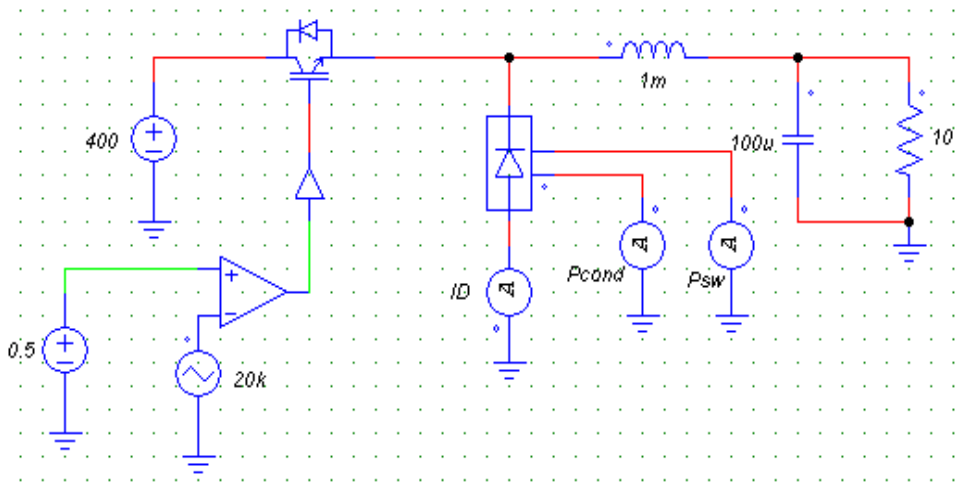
دقت کنید که فرکانس سیگنال مثلثی نیز در مقدار ۲۰ کیلوهرتز تنظیم شده است. سایر پارامترهای مربوط به این سیگنال نیز به صورت زیر است.



(شکل ۸.۱۲): تنظیم منبع مثلثی

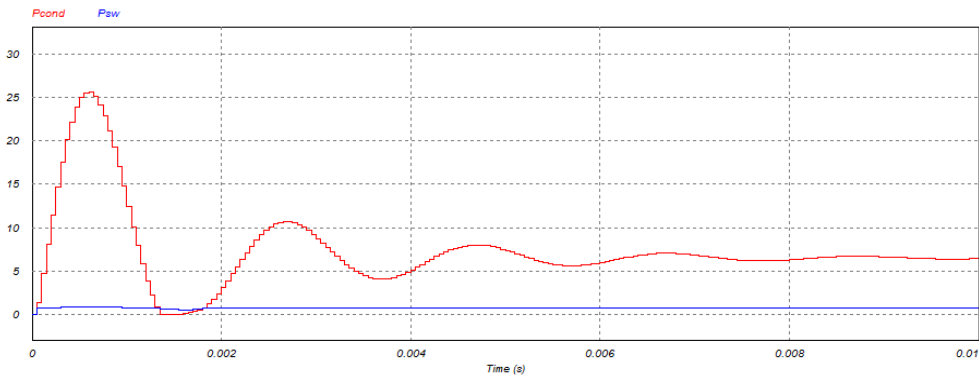
حال کافی است که در مسیر پایه‌های مربوط به تلفات دیود، یک آمپر متر قرار دهیم تا

بتوانیم تلفات محاسبه شده را رسم نماییم.



(شکل ۹.۱۲): روند تکمیل مدار

حال گام زمانی را در  $10^{-8}$  و زمان کل شبیه‌سازی را  $0.1$  ثانیه در Simulation Control تنظیم کرده و شبیه‌سازی را اجرا می‌کنیم. پس از اجرای شبیه‌سازی نمودارهای مربوط به Psw و Pcond را رسم می‌کنیم.



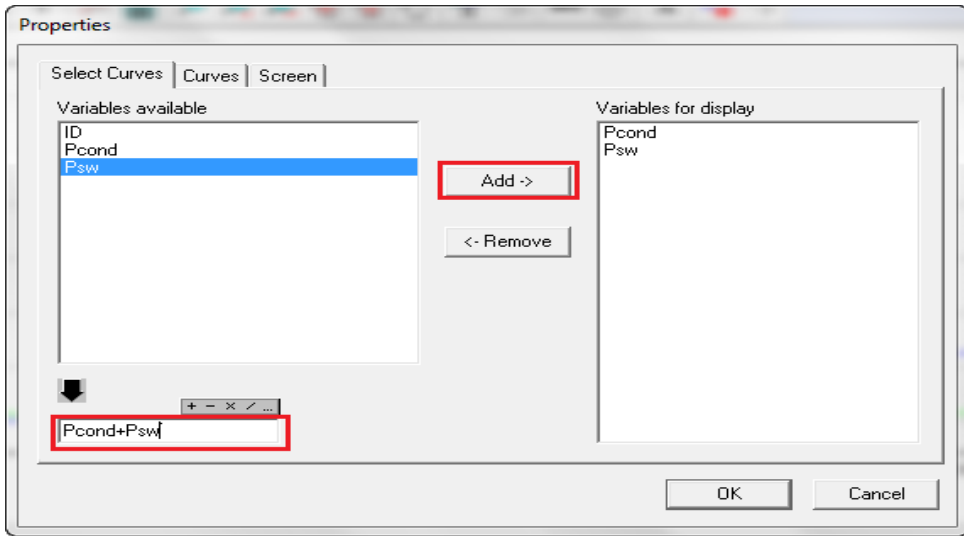
(شکل ۱۰.۱۲): Psw و Pcond

برای به دست آوردن تلفات کل باید دو نمودار را باهم جمع کنیم. از این رو ابزار Add Curve را انتخاب می‌کنیم.



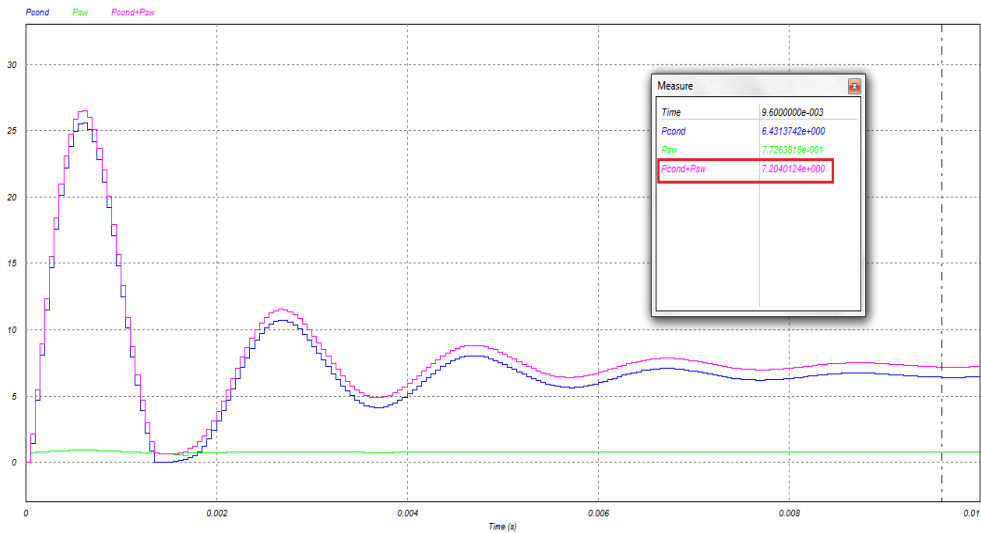
(شکل ۱۱.۱۲): نوار ابزار

سپس در پنجره‌ی باز شده جمع دو نمودار Pcond و Psw را برای رسم انتخاب می‌کنیم.



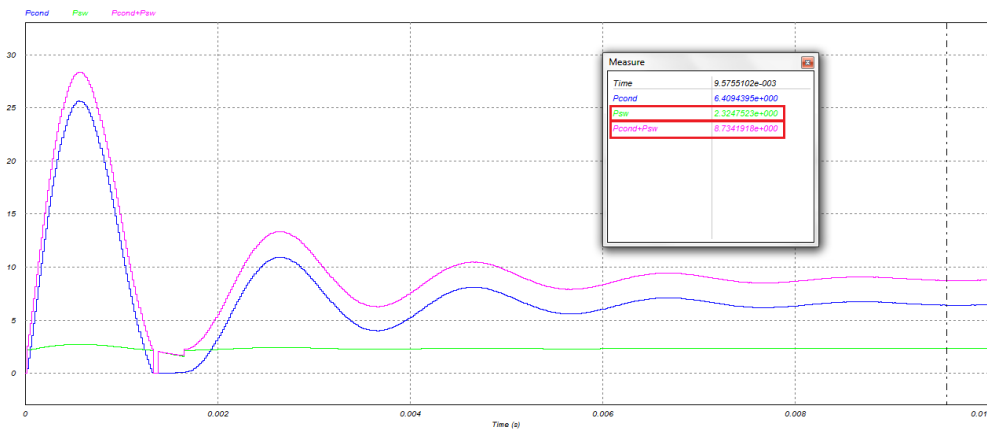
شکل ۱۲.۱۲: تنظیمات Properties

با زدن OK نمودار به صورت زیر رسم می شود.



شکل ۱۳.۱۲: شکل موجهای خروجی

همانطور که ملاحظه می‌کنید در کل تلفات در حالت پایدار برابر  $7/2$  وات است. اگر فرکانس کلیدزنی یعنی فرکانس مربوط به سیگنال مثلثی را  $60$  کیلوهرتز انتخاب کنیم، تلفات محاسبه‌شده به‌صورت زیر خواهد بود. دقت کنید که حتما باید پارامتر فرکانس دیود نیز در  $60$  کیلوهرتز تنظیم شود.



(شکل ۱۴.۱۲): تغییر فرکانس سیگنال مثلثی و تاثیر آن در تلفات

همانطور که ملاحظه می‌کنید تلفات کل افزایش یافته و به عدد  $8/7$  وات رسیده است. همانطور که از نمودار مشخص است، این افزایش فقط ناشی از افزایش تلفات مربوط به کلیدزنی است و تلفات هدایتی با افزایش فرکانس کلیدزنی تقریباً تغییری نکرده است.

در این فصل فرا گرفتیم که چگونه تلفات حرارتی مربوط به یک دیود واقعی را شبیه‌سازی کنیم.



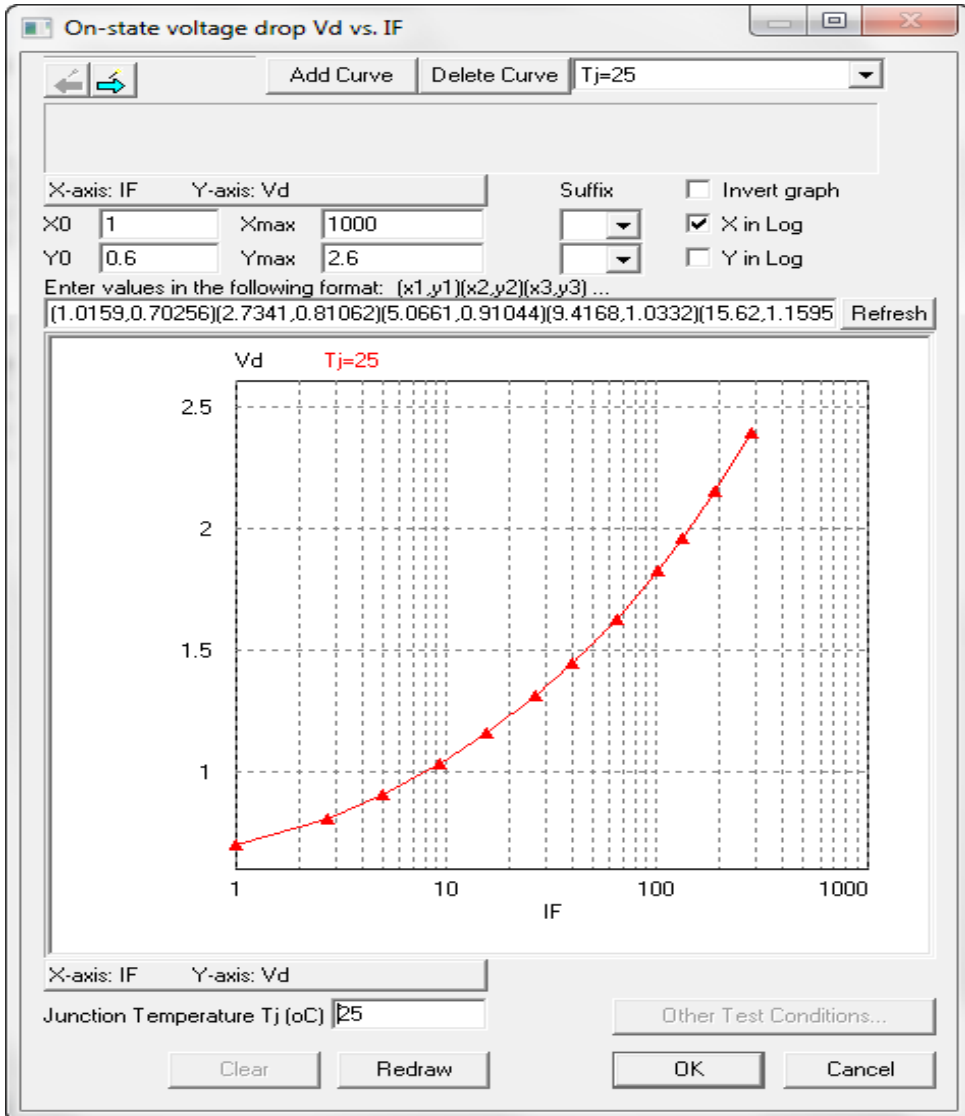
# فصل سیزدهم

## تعریف قطعه‌ی جدید برای تجزیه و تحلیل حرارتی

### ۱۳- مقدمه

در این فصل با نحوه وارد کردن اطلاعات دیود CS۲۴۰۶۵۰ از روی دیتاشیت مربوطه در دیتابیس PcdEditor جهت تجزیه و تحلیل حرارتی آشنا خواهید شد.

## ۱۳-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۱۳): شمای کلی مدار

## ۱۳-۲-۱۳ اجرای شبیه‌سازی

برای تجزیه و تحلیل حرارتی از یک مدول یا واحد اضافی در نرم‌افزار PSIM استفاده می‌شود که یک روش سریع برای پیش‌بینی تلفات نیمه‌هادی‌ها را فراهم می‌کند. بخش اصلی واحد حرارتی را پایگاه داده<sup>۱</sup>ی قطعات تشکیل می‌دهد. می‌توان از قطعاتی که در پایگاه داده‌ها هستند به‌منظور شبیه‌سازی محاسبات تلفات استفاده کرد. همچنین با استفاده از مدول حرارتی می‌توان قطعات جدید را به پایگاه داده‌ها افزود.

فرایند چگونگی استفاده از یک قطعه‌ی موجود در دیتابیس و شبیه‌سازی تلفات در زیر توضیح داده شده است:

✓ از مدل رفتار قطعه در شبیه‌سازی استفاده می‌شود، مدل رفتار قطعه شامل مشخصه‌ی پایدار قطعه از قبیل افت ولتاژ مستقیم، مقاومت حالت روشن و غیره است.

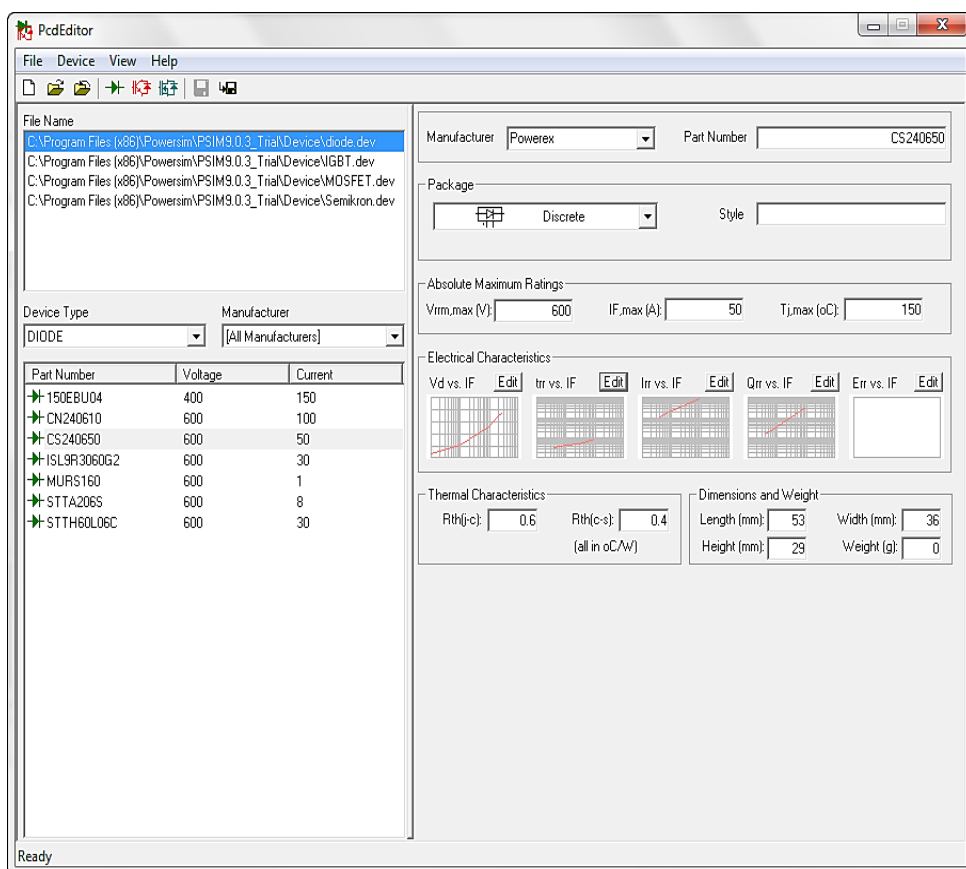
✓ بر اساس مقادیر ولتاژ، جریان و دمای پیوند<sup>۲</sup> به‌دست آمده از شبیه‌سازی، نرم‌افزار PSIM به دیتابیس قطعه دسترسی یافته و تلفات هدایتی یا تلفات کلیدزنی محاسبه می‌شود.

<sup>۱</sup> Database

<sup>۲</sup> Junction Temperature

## ۱۳-۳- ویرایش دیتابیس قطعات

در نرم‌افزار PSIM می‌توان قطعات جدیدی را برای تجزیه و تحلیل حرارتی اضافه کرد و یا داده‌های مربوط به قطعات موجود را ویرایش نمود. برای این کار به منوی Utilities رفته و Device Database Editor را انتخاب می‌کنیم، با این کار پنجره‌ای به شکل زیر باز می‌شود.



(شکل ۲.۱۳): ویرایش دیتابیس قطعات

در سمت چپ بالا فایل‌های مربوط به دیتابیس قطعات و در سمت چپ پایین لیستی از قطعات نمایش داده شده است. لیست قطعات را می‌توان براساس نوع قطعه ( Device Type) و یا کارخانه‌ی سازنده (Manufacturer) مرتب کرده و نمایش داد. در قسمت راست پنجره، اطلاعات مربوط به هر قطعه نمایش داده شده است که شامل اطلاعات زیر هستند.

Manufacturer and Part Number: کارخانه‌ی سازنده و شماره قطعه
Package type: نوع بسته
Absolute maximum ratings: مقادیر نامی حداکثر
Electrical characteristics: مشخصات الکتریکی
Thermal characteristics: مشخصات حرارتی
Dimension and weight: ابعاد و وزن

برای ایجاد یک قطعه‌ی جدید، به منوی Device رفته و با توجه به نوع قطعه یکی از گزینه‌های New MOSFET، New IGBT-Diod، New IGBT، New Diod را انتخاب می‌کنیم.

## ۱۳-۴- افزودن یک قطعه به دیتابیس

در ادامه مراحل گام به گام اضافه کردن دیود (۶۰۰V, ۵۰A) CS۲۴۰۶۵۰ به فایل دیتابیس جدید diod\_new.dev توضیح داده شده است.

✓ ابتدا در منوی File گزینه‌ی New Device File را انتخاب کرده و یک فایل با نام diode\_new.dev ایجاد کنید.

✓ در قسمت File Name فایل Diode\_New را انتخاب می‌کنیم. حال از منوی Device گزینه‌ی New Diode را کلیک می‌کنیم. با این کار یک دیود با نام New به لیست قطعات اضافه می‌شود.

✓ با استفاده از دیتاشیت دیود CS۲۴۰۶۵۰ اطلاعات زیر را در PcdEditor وارد می‌کنیم.

Manufacturer: Powerex

Part Number: CS240650

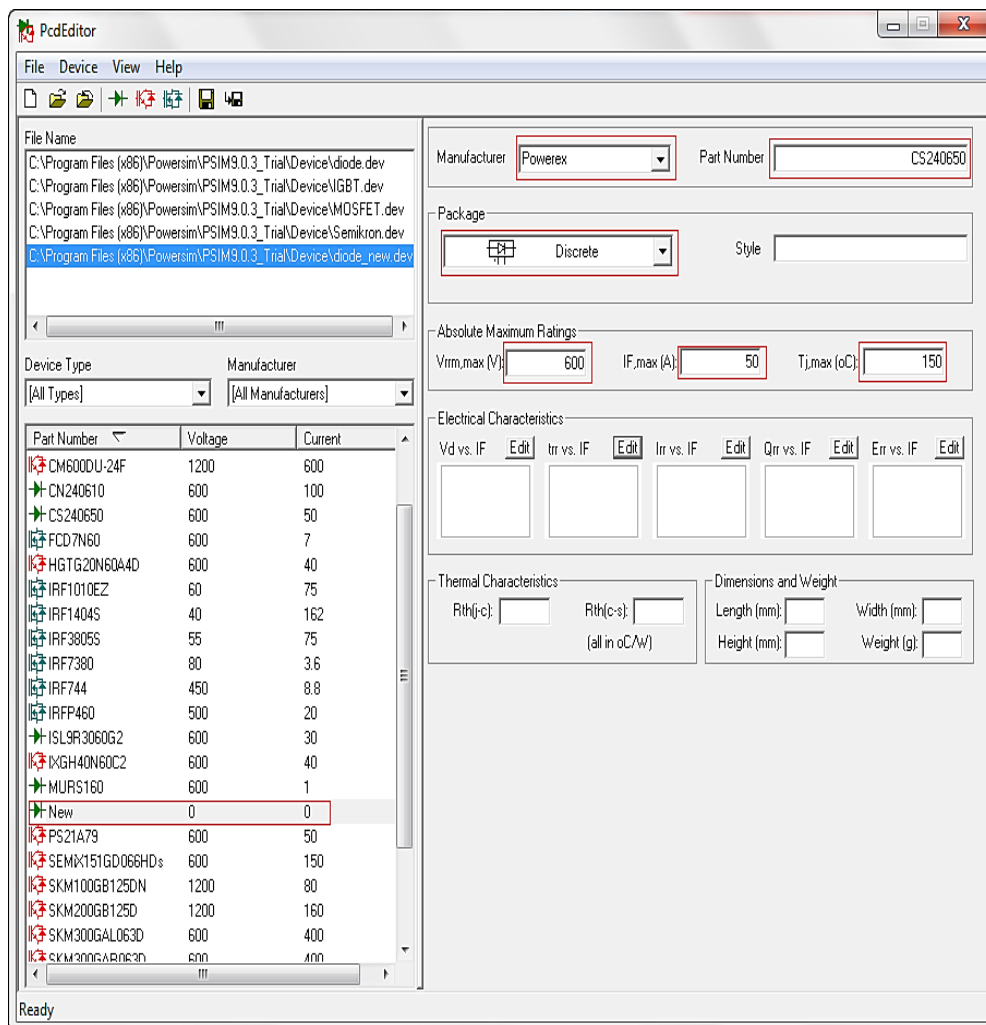
Package: Discrete

و در قسمت Absolute Maximum Ratings نیز مقادیر زیر را وارد می‌کنیم:

Vrrm,max (V): 600

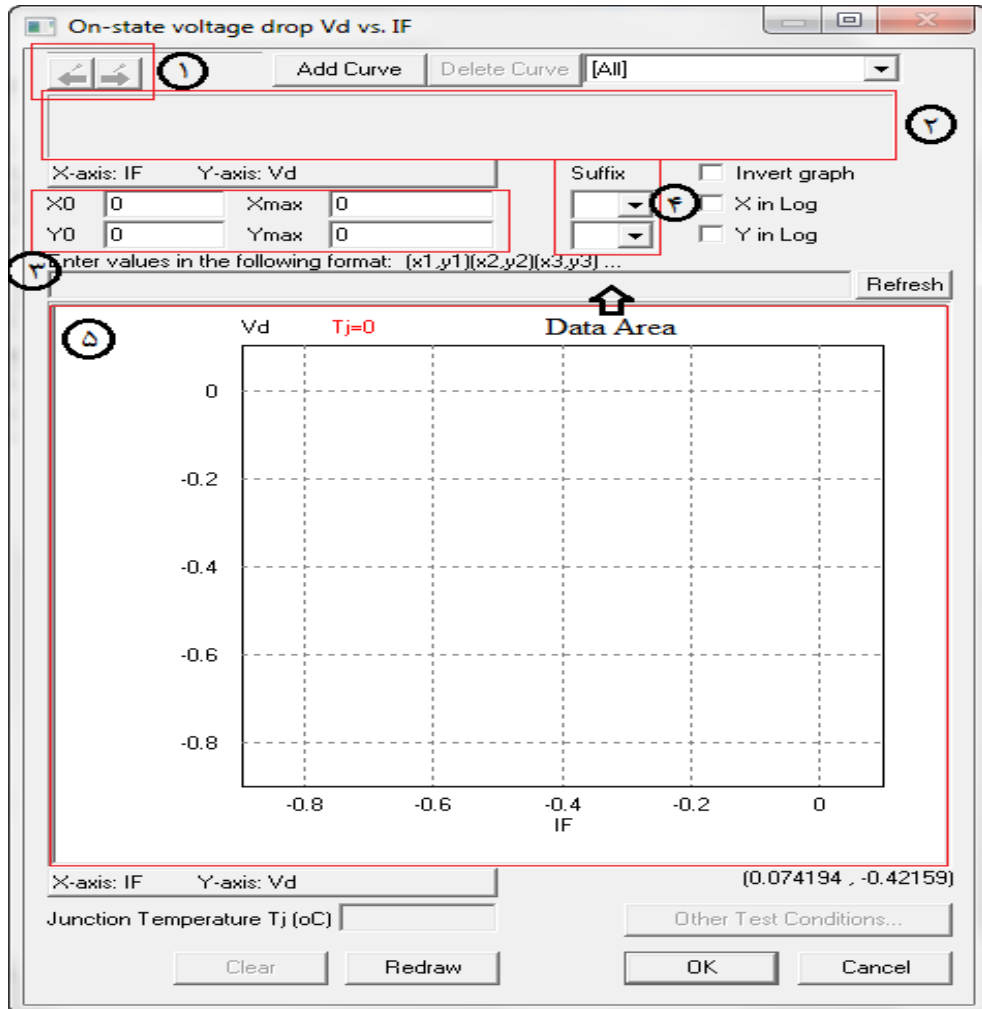
$I_{F,max}$  (A): 50

$T_{j,max}$  (oC): 150



(شکل ۳.۱۳): ویرایش دیتابیس قطعات

حال م‌شخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ ) را در قسمت مشخصات الکتریکی با کلیک روی گزینه‌ی Edit تعریف می‌کنیم. با این کار پنجره‌ی شکل زیر ظاهر می‌شود.



(شکل ۴.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )



قسمت‌های مختلف پنجره‌ی باز شده به صورت زیر هستند:

۱	ابزارهای مربوط به رسم گراف (Graph Wizard)
۲	ناحیه‌ی Help
۳	تنظیمات مربوط به محورهای X و Y
۴	ضرایب مربوط به محورهای X و Y
۵	ناحیه‌ی رسم گراف

برای رسم گراف دو روش وجود دارد، یکی از روش‌ها وارد کردن نقاط گراف به صورت دستی است. روش دیگر استفاده از ابزارهای مربوط به رسم گراف برای گرفتن گراف به طور مستقیم از عکس دیتاشیت می‌باشد. تعریف دستی گراف معمولاً زمانی صورت می‌گیرد که تعداد نقاط داده کم باشد. اگر تصویر گراف در دسترس باشد، راه ساده‌تر استفاده از همان تصویر برای رسم گراف است.

## ۱۳-۵- رسم گراف به صورت دستی

با توجه به حداکثر مشخصات حالت روشن دیود در دیتاشیت، مقادیر محورهای X/Y

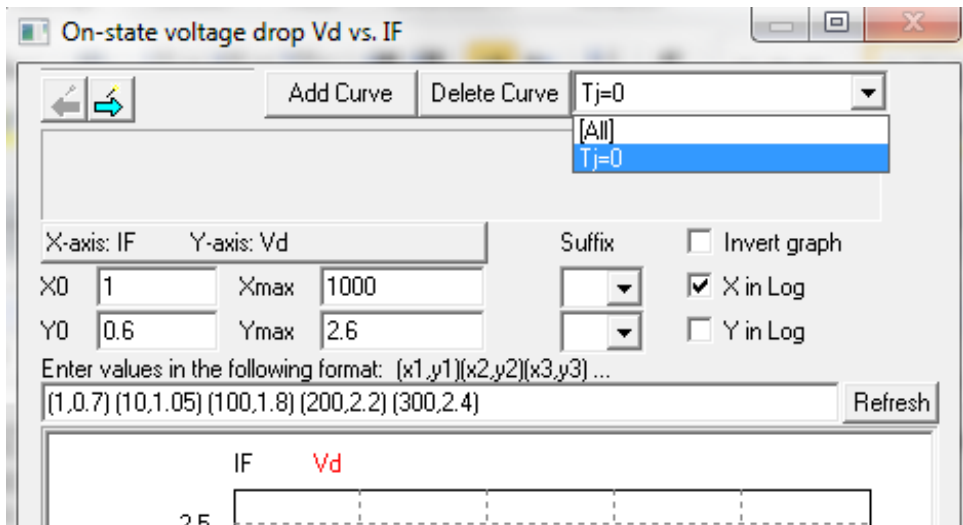
به صورت زیر تنظیم می‌شوند:

X0: 1  
 Xmax: 1000  
 Y0: 0.6  
 Ymax: 2.6  
 X in log: checked

برای رسم کامل منحنی نیاز به نقاط بیشتری هست که این نقاط را به صورت زیر در

Data Area وارد می‌کنیم (دقت کنید که برای این کار باید از لیست کشویی بالا سمت

راست،  $T_j=0$  انتخاب شود):

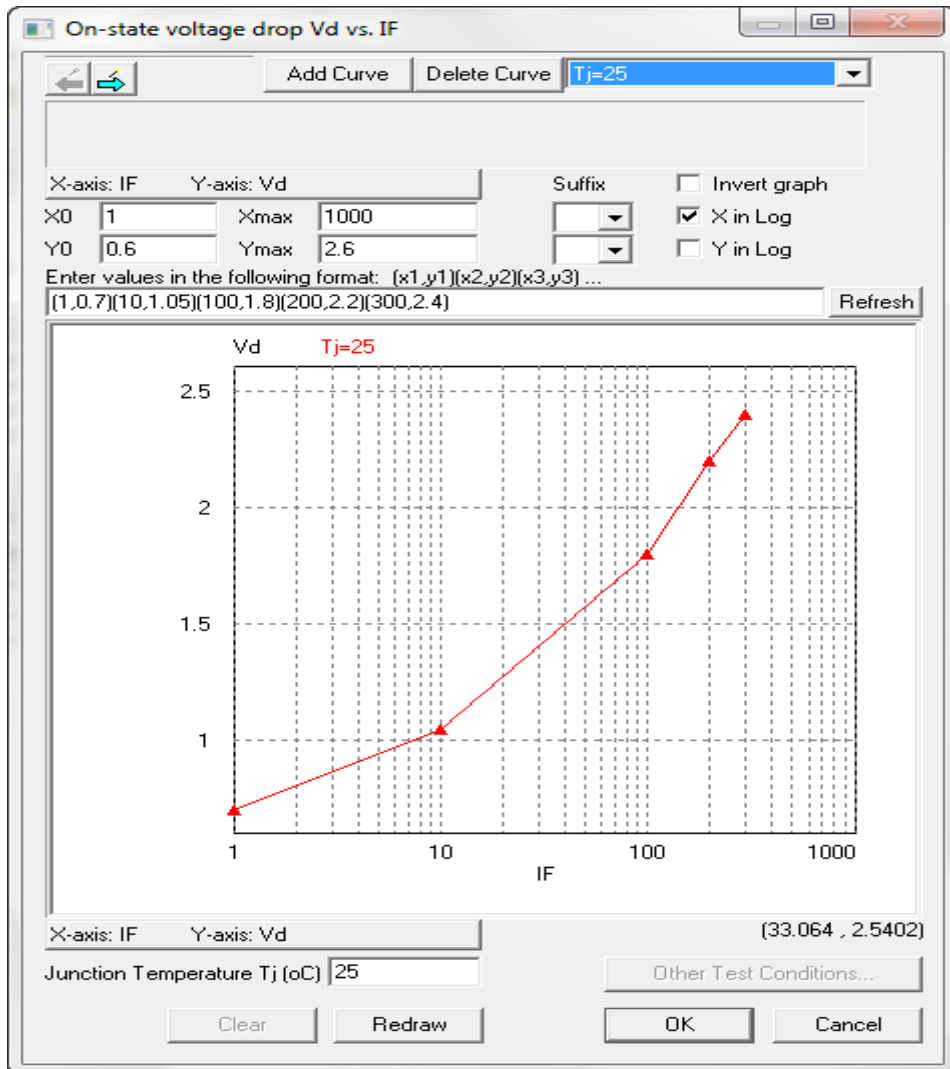


(شکل ۵.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

نقاط:  $(1, 0.7)$   $(10, 1.05)$   $(100, 1.8)$   $(200, 2.2)$   $(300, 2.4)$

حال در قسمت پایین Junction Temperature را در ۲۵ تنظیم کرده و با زدن روی

دکمه‌ی Refresh منحنی رسم می‌شود.

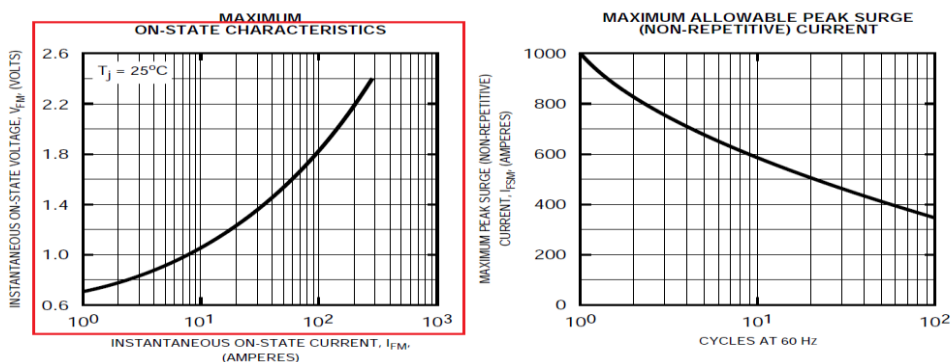


(شکل ۶.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

## ۱۳-۶- رسم گراف با استفاده از Graph Wizard

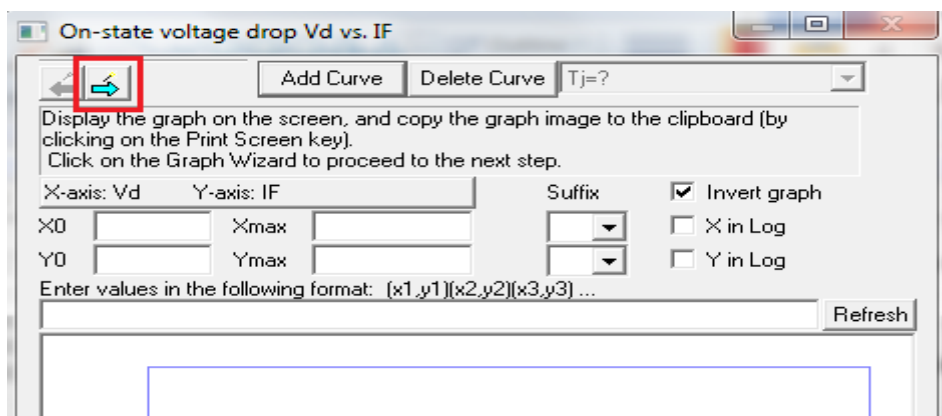
روی دکمه‌ی Add Curve کلیک می‌کنیم. سپس در دیتاشیت دیود، از منحنی مربوط

به  $V_d$  در برابر  $I_F$  پرینت اسکرین می‌گیریم.



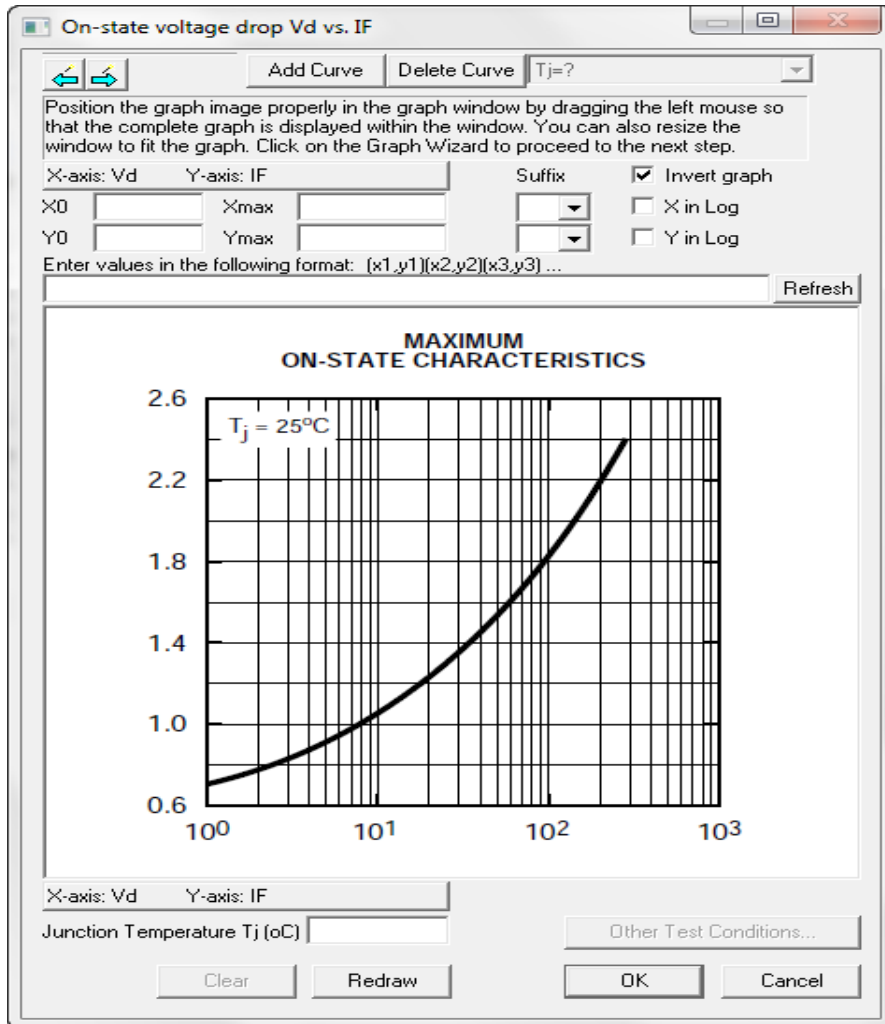
(شکل ۷.۱۳): منحنی  $V_d$  در برابر  $I_F$

حال از ابزارهای Graph Wizard دکمه‌ی Next را انتخاب می‌کنیم.



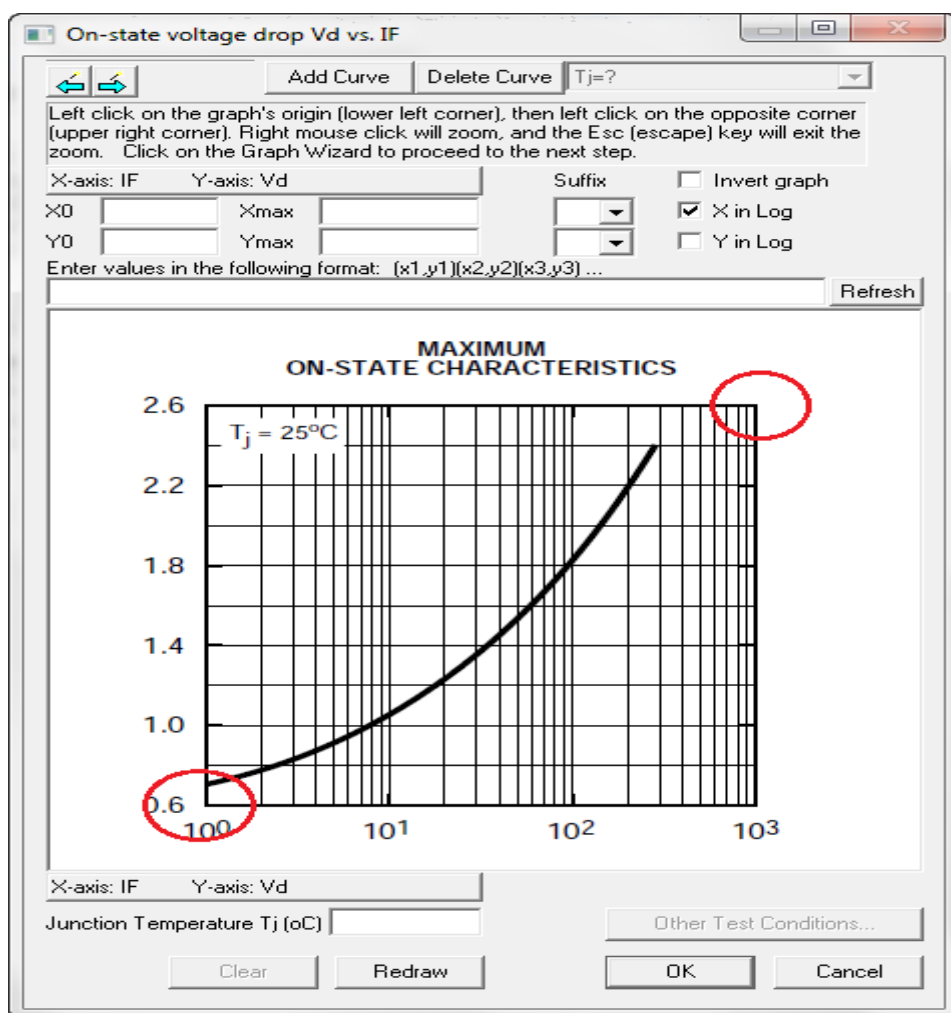
(شکل ۸.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

با انتخاب این دکمه، منحنی در قسمت پایین کپی می‌شود:



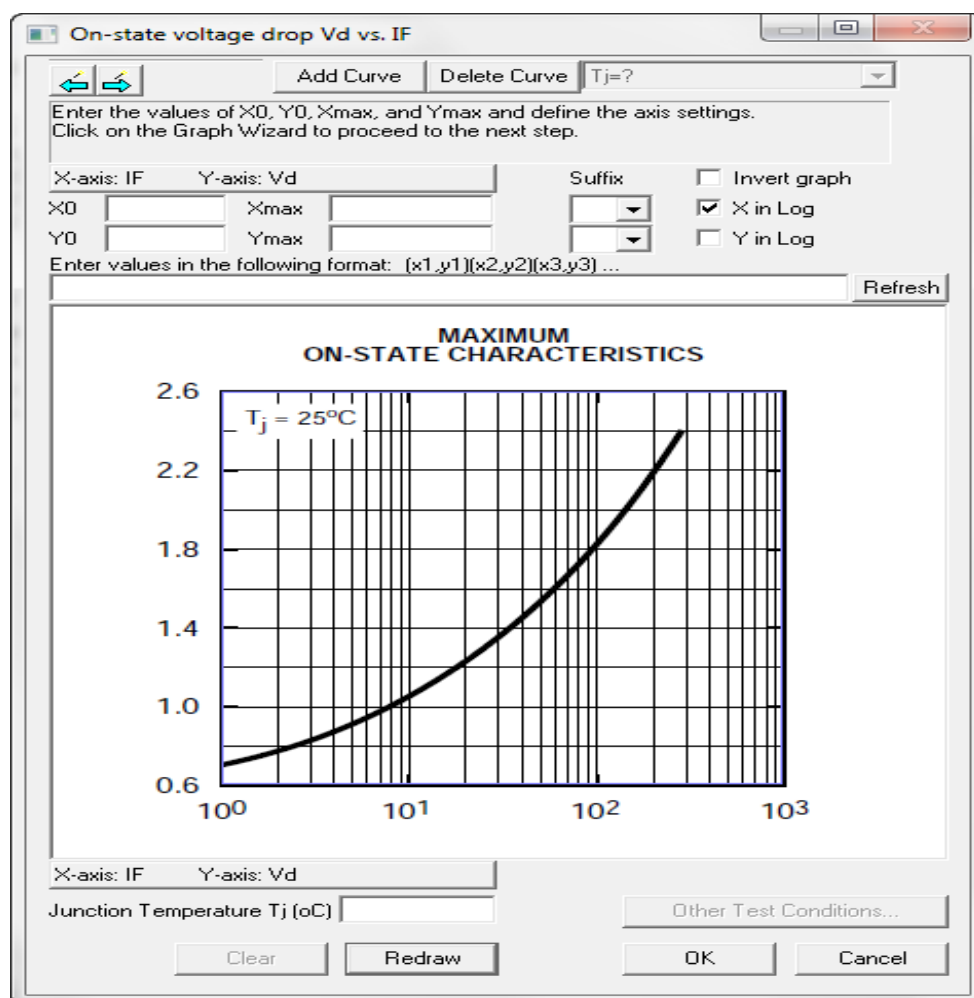
(شکل ۹.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

پس از اینکه منحنی نمایش داده شد، دوباره روی ابزار Next Step کلیک میکنیم. در این گام باید گوشه‌های منحنی را مشخص کنیم که معمولا گوشه‌ی چپ پایین و گوشه‌ی راست بالا انتخاب می‌شوند.



(شکل ۱۰.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

برای انتخاب گوشه‌ها ابتدا در هر گوشه کلیک راست را فشار می‌دهیم تا گوشه‌ی منحنی بزرگنمایی شود سپس با کلیک چپ موس آن گوشه را انتخاب می‌کنیم. با این کار یک کادر آبی دور کادر منحنی ایجاد می‌شود.



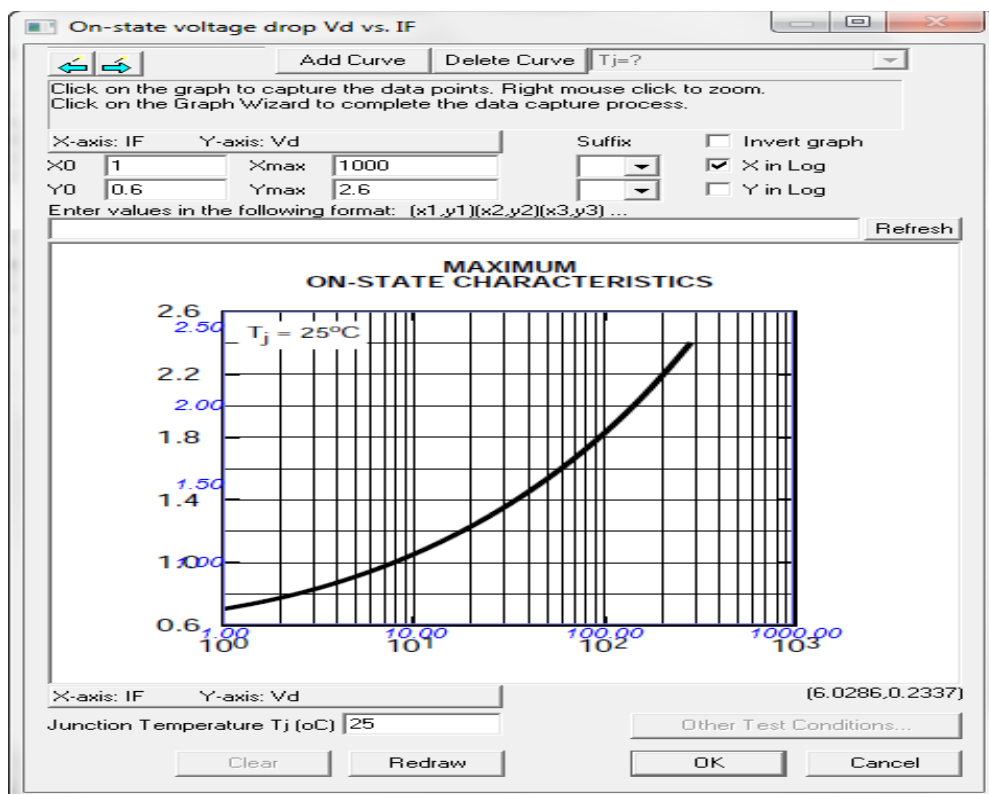
(شکل ۱۱.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

حال باید مقادیر مربوط به محورها را به صورت زیر تنظیم کنیم:

X0: 1  
 Xmax: 1000  
 Y0: 0.6  
 Ymax: 2.6  
 X in log: checked

پس از اعمال تنظیمات فوق روی ابزار Next Step کلیک می‌کنیم. Junction

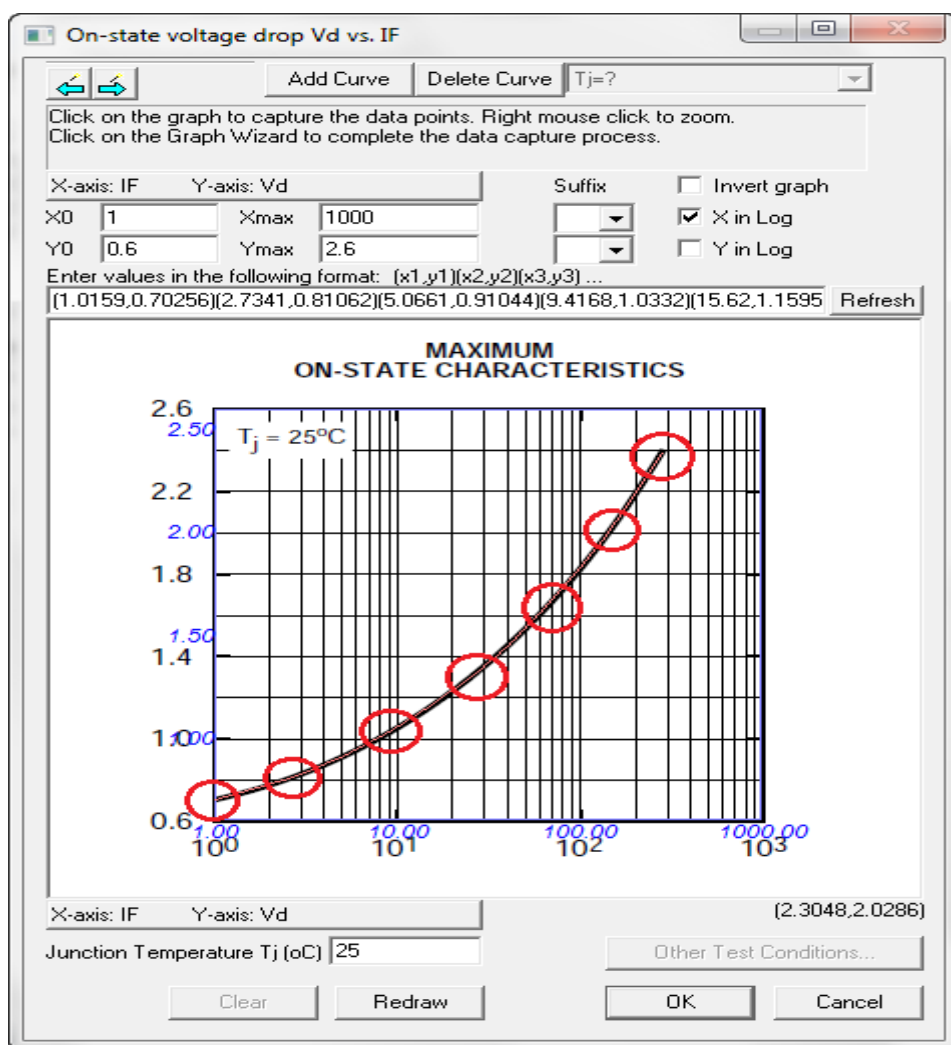
Temperature را نیز در ۲۵ تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۱۲.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )



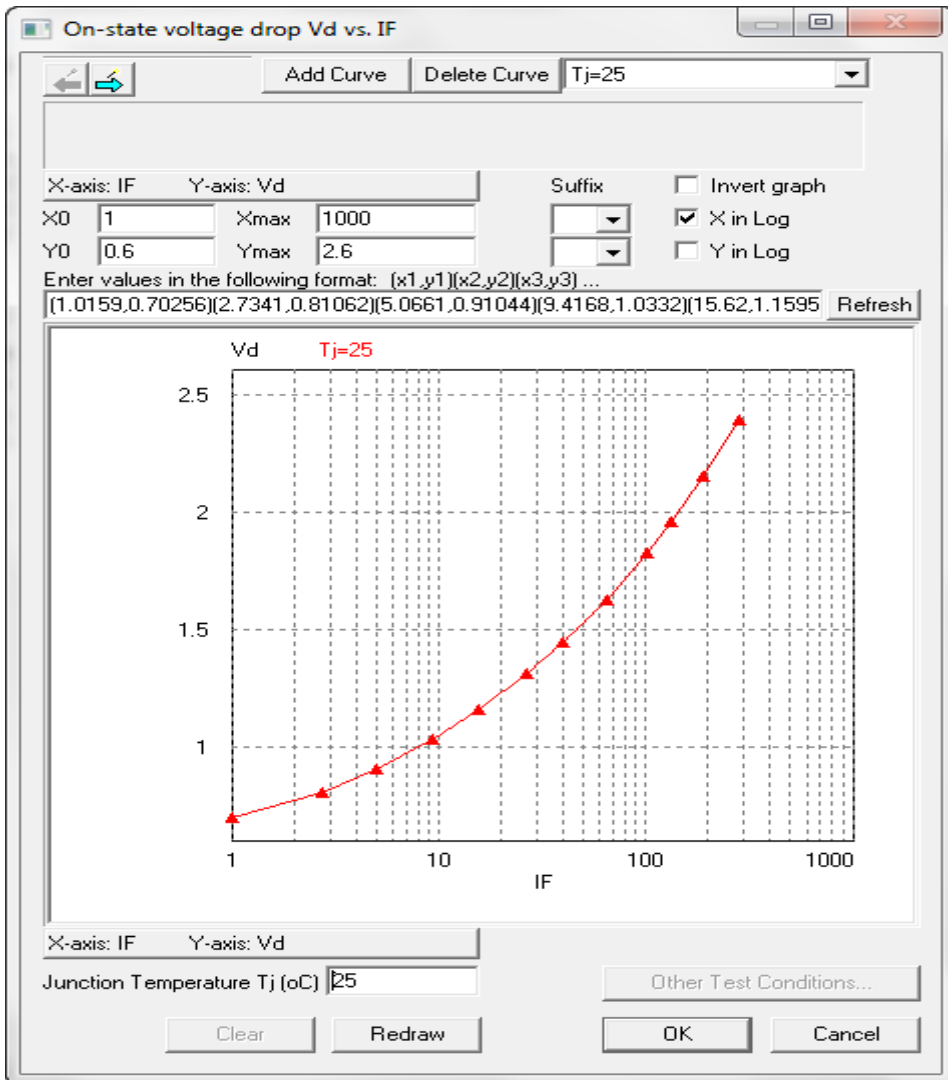
حال دوباره روی ابزار Next Step کلیک می‌کنیم. در این مرحله باید برای رسم کامل، نقاطی را روی منحنی انتخاب کنیم. توجه داشته باشید که تعداد نقاط انتخابی محدودیتی ندارد.



(شکل ۱۳.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم (Vd) در برابر جریان (IF)

پس از انتخاب نقاط مورد نظر روی ابزار Next Step کلیک می‌کنیم. با این کار منحنی

به صورت زیر رسم می‌شود.



(شکل ۱۴.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم ( $V_d$ ) در برابر جریان ( $I_F$ )

اگر برای دماهای مختلف، منحنی‌های مختلفی وجود داشته باشد؛ با زدن دکمه‌ی Add Curve و طی کردن مسیری مشابه می‌توان برای سایر دماها نیز منحنی مربوطه را رسم کرد. با روند مشابهی می‌توان منحنی‌های مربوط به  $t_{\pi}-I_F$ ،  $I_{\pi}-I_F$  و  $Q_{\pi}-I_F$  را نیز رسم کرد.

حال در قسمت Thermal Characteristics مقادیر را با توجه به دیتاشیت به صورت زیر وارد می‌کنیم:

Rth(j-c): 0.6

Rth(c-s): 0.4

مقادیر مربوط به وزن و ابعاد نیز به صورت زیر تکمیل می‌شوند:

Length (mm): 53

Width (mm): 36

Height (mm): 29

حال با انتخاب Save Device از منوی Device اطلاعات مربوط به قطعه الکترونیکی را ذخیره می‌کنیم.

در این فصل فرا گرفتیم که چگونه اطلاعات مربوط به یک دیود را با استفاده از دیتاشیت مربوط به آن جهت تجزیه و تحلیل حرارتی در دیتابیس نرم‌افزار ذخیره کنیم.



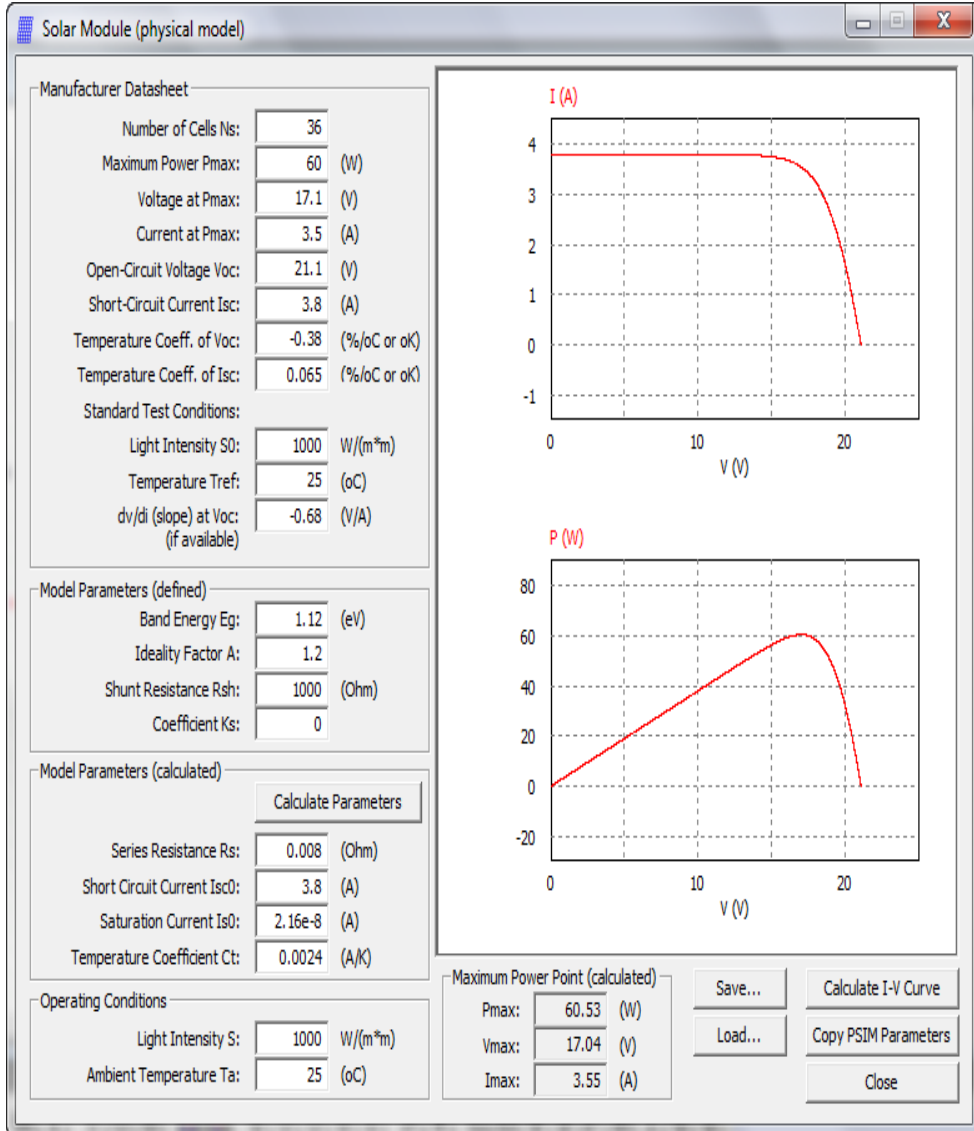
# فصل چهاردهم

## معرفی مدل‌های مربوط به سلول‌های خورشیدی

### ۱۴- مقدمه

در این فصل دو مدل فیزیکی و کاربردی برای سلول‌های خورشیدی معرفی شده است. هم‌چنین برای تخمین بهتر پارامترها برای مدل فیزیکی، ابزار Solar Module بیان می‌شود.

## ۱۴-۱- طرح مدار

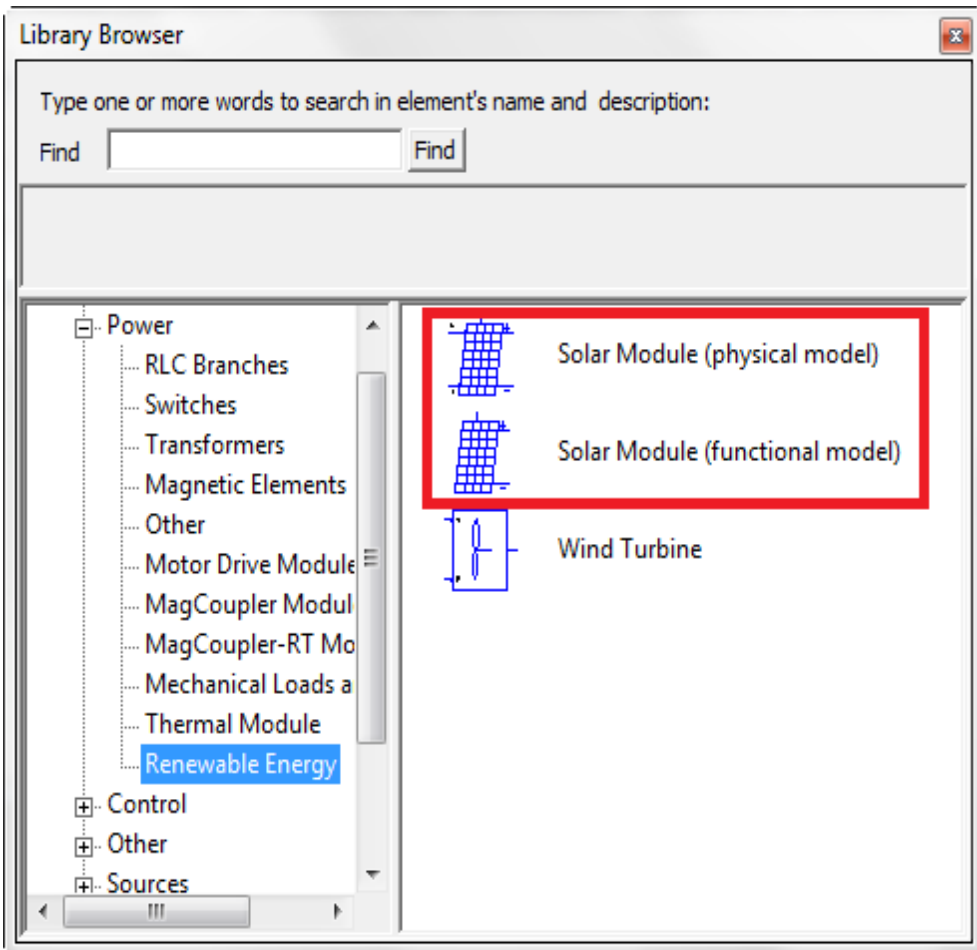


شکل (۱.۱۴): تنظیمات Solar Module

## ۱۴-۲- اجرای شبیه‌سازی

در نرم‌افزار PSIM دو نوع مدل برای سلول‌های خورشیدی فراهم شده است: مدل

فیزیکی و مدل کاربردی.



(شکل ۲.۱۴): کتابخانه نرم‌افزار

تفاوت بین مدل فیزیکی و مدل کاربردی در این است که مدل فیزیکی می‌تواند رفتار سلول خورشیدی را دقیق‌تر شبیه‌سازی کند و همچنین شدت تابش و تغییرات دمایی را نیز در شبیه‌سازی لحاظ کند. از طرف دیگر، در مدل کاربردی نمی‌توان شدت تابش و تغییرات دمایی را لحاظ کرد اما در آن حداقل پارامترهای ورودی برای انجام شبیه‌سازی نیاز است که در نتیجه استفاده از آن را ساده‌تر می‌کند.

پارامترهایی که در مدل فیزیکی می‌توان تعریف کرد به صورت زیر هستند:

Parameter	Value	Display
Name	SCP1	<input type="checkbox"/>
Number of Cells Ns	36	<input type="checkbox"/>
Standard Light Intensity S0	1000	<input type="checkbox"/>
Ref. Temperature Tref	25	<input type="checkbox"/>
Series Resistance Rs	0.008	<input type="checkbox"/>
Shunt Resistance Rsh	1000	<input type="checkbox"/>
Short Circuit Current Isc0	3.8	<input type="checkbox"/>
Saturation Current Is0	2.16e-8	<input type="checkbox"/>
Band Energy Eg	1.12	<input type="checkbox"/>
Ideality Factor A	1.2	<input type="checkbox"/>
Temperature Coefficient Ct	0.0024	<input type="checkbox"/>
Coefficient Ks	0	<input type="checkbox"/>

(شکل ۳.۱۴): تنظیمات سلول خورشیدی، مدل فیزیکی



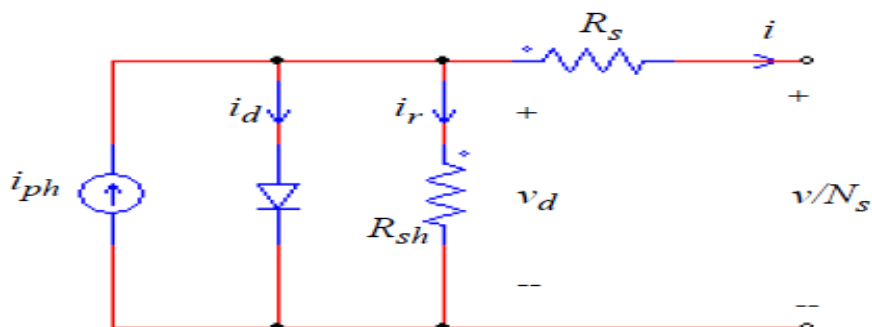
Number of Cells $N_s$ : تعداد سلول‌های خورشیدی که به صورت سری هستند.
Standard Light Intensity $S_0$ : شدت تابش تحت شرایط تست استاندارد بر حسب $W/m^2$ که معمولاً این مقدار در دیتاشیت برابر $1000 W/m^2$ است.
Ref. Temperature $T_{ref}$ : دمای $T_{ref}$ تحت شرایط تست استاندارد بر حسب $^{\circ}C$ .
Series Resistance $R_s$ : مقاومت سری هر سلول خورشیدی بر حسب اهم.
Shunt Resistance $R_{sh}$ : مقاومت شنت (موازی) هر سلول خورشیدی بر حسب اهم.
Short Circuit Current $I_{sc}$ : جریان اتصال کوتاه هر سلول خورشیدی در دمای مرجع $T_{ref}$ بر حسب آمپر.
Saturation Current $I_s$ : جریان اشباع دیود هر سلول خورشیدی در دمای مرجع $T_{ref}$ بر حسب آمپر.
Band Energy $E_g$ : انرژی باند هر سلول خورشیدی بر حسب الکترون-ولت (eV)؛ که این مقدار برای سیلیکون کریستالی حدود $1/12$ و برای سیلیکون غیر بلوری حدود $1/75$ الکترون-ولت است.

Idenity Factor A: ضریب ایده‌آلی هر سلول خورشیدی که ضریب تابش<sup>۳</sup> نیز نامیده می‌شود. مقدار آن برای سیلیکون بلوری حدود ۲ و برای سیلیکون غیر بلوری کم‌تر از ۲ است.

Temperature Coefficient  $C_t$ : ضریب دمایی  $C_t$  بر حسب  $A/^\circ C$  یا  $A/K$ .

Coefficient  $K_s$ : ضریب  $K_s$  که چگونگی تاثیر شدت نور بر دمای سلول خورشیدی را مشخص می‌کند.

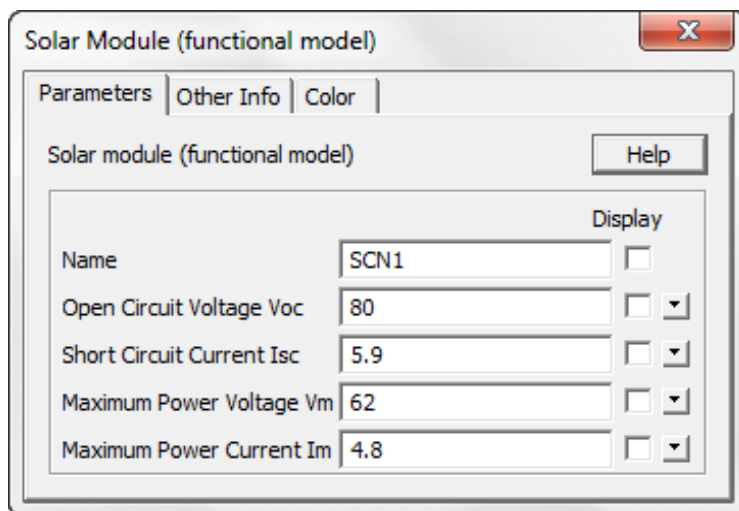
دقت کنید که یک واحد خورشیدی شامل  $N_s$  سلول خورشیدی به صورت سری است. مدار معادل مدل فیزیکی یک سلول خورشیدی در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۴.۱۴): مدار معادل مدل فیزیکی سلول خورشیدی

<sup>۳</sup> Emission coefficient

حال به معرفی پارامترهای مدل کاربردی می‌پردازیم.



(شکل ۵.۱۴): تنظیمات مدل خورشیدی

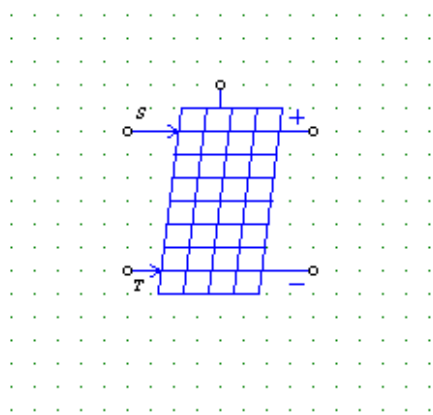
Open Circuit Voltage Voc: ولتاژ اندازه‌گیری شده بر حسب ولت وقتی که ترمینال‌های سلول خورشیدی مدار باز هستند.

Short Circuit Current Isc: جریان اندازه‌گیری شده بر حسب آمپر وقتی که ترمینال‌های سلول خورشیدی اتصال کوتاه هستند.

Maximum Power Voltage Vm: ولتاژ ترمینال سلول خورشیدی بر حسب ولت وقتی که توان خروجی حداکثر است.

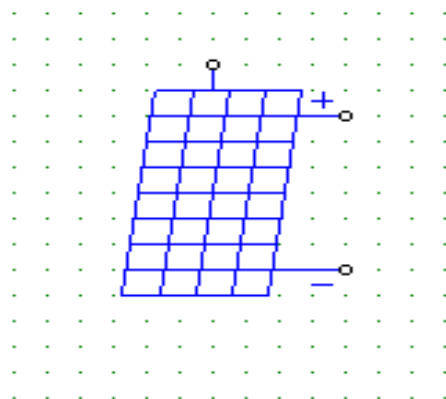
Maximum Power Current Im: جریان ترمینال سلول خورشیدی بر حسب آمپر وقتی که توان خروجی حداکثر است.

در مدل فیزیکی سلول خورشیدی که در زیر نشان داده شده است، گره‌های با علامت + و - ترمینال‌های مثبت و منفی هستند. گره با حرف S مربوط به شدت تابش ورودی بر حسب  $W/m^2$  است؛ و گره با حرف T مربوط به دمای پیرامون بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد است. گره قرار گرفته در بالای مدل برای حداکثر توان داده‌شده در شرایط بهره‌برداری (بر حسب وات) است. دقت کنید که گره‌های مرتبط به ترمینال‌های مثبت و منفی گره‌های مربوط به مدار قدرت و سایر گره‌ها همگی گره‌های کنترلی هستند.



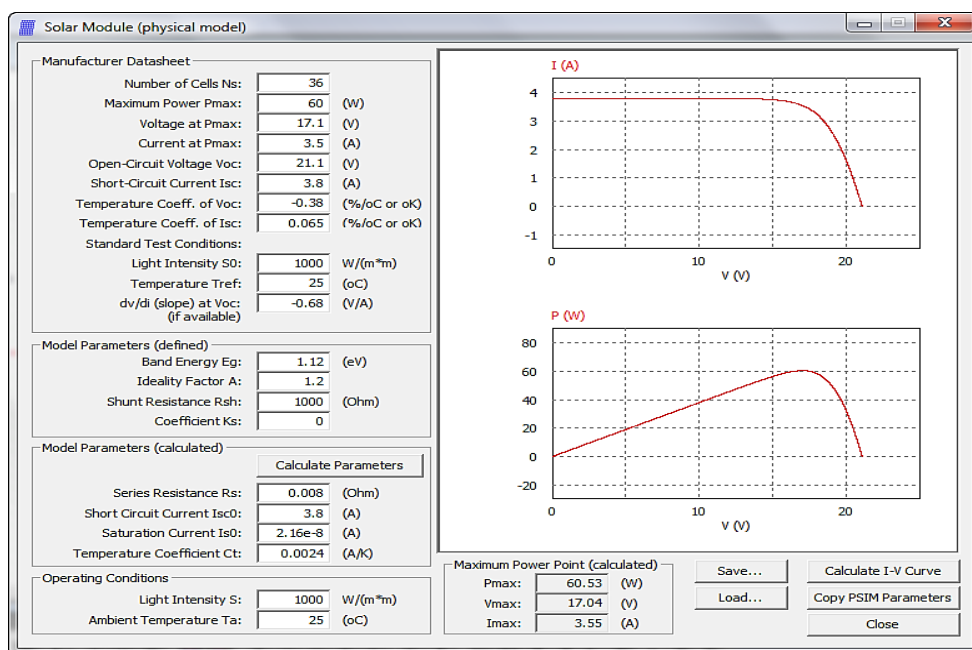
(شکل ۶.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

به‌طور مشابه در مدل کاربردی سلول خورشیدی، گره‌های با علامت + و - همان ترمینال‌های مثبت و منفی خروجی هستند. گره‌ای که در بالای مدل قرار گرفته نیز مربوط به حداکثر توان تئوری داده‌شده در شرایط بهره‌برداری است.



(شکل ۷.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

همانطور که گفته شد در مدل فیزیکی سلول خورشیدی تغییرات شدت تابش و دمای محیط نیز در نظر گرفته شده است، هرچند که این مدل نیازمند پارامترهای ورودی بیشتری است. بعضی از این پارامترها را می‌توان از دیتاشیت‌ها به دست آورد در حالی که برای به‌دست آوردن مابقی پارامترها نیاز به آزمون و خطاست. در نرم افزار PSIM یک ابزار کاربردی به نام Solar Module (physical model) در منوی Utility تعبیه شده است که بوسیله‌ی آن می‌توان با روش ساده‌تری پارامترهای یک سلول خورشیدی مشخص را تعریف کرد. در ادامه با این ابزار بیشتر آشنا خواهیم شد.



(شکل ۸.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

برای توضیح چگونگی کاربرد این ابزار از دیتاشیت سلول خورشیدی مدل BP MSX-

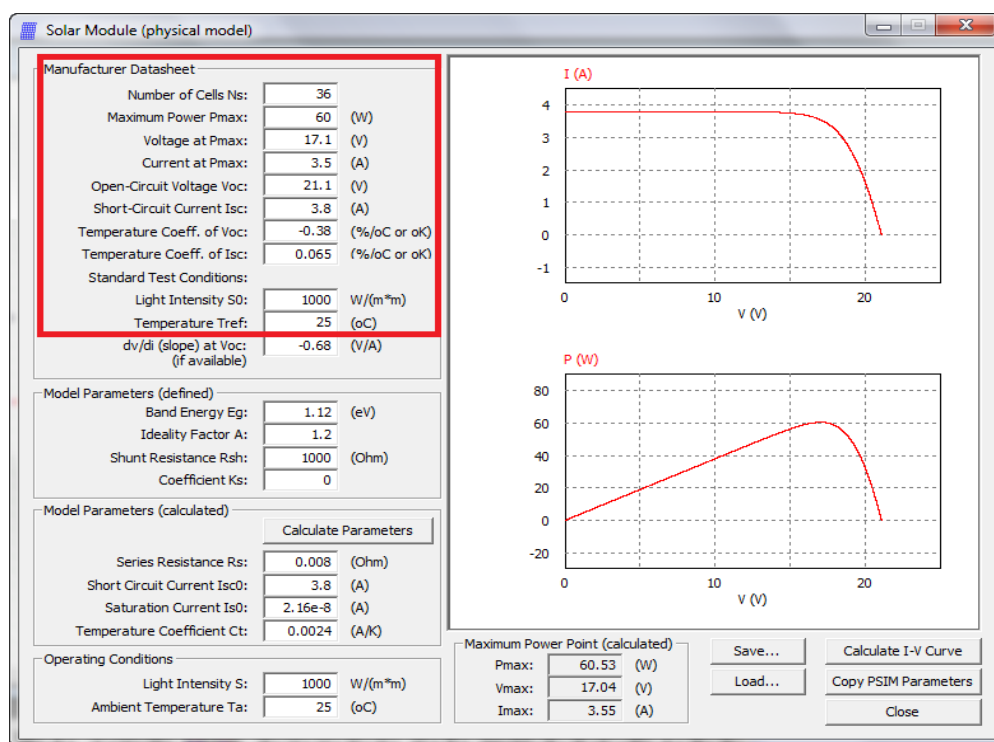
۶۰ استفاده شده است. این کار شامل فرآیند زیر است:

- ✓ وارد کردن اطلاعات از دیتاشیت
- ✓ حدس اولیه برای برخی از پارامترهای مشخص
- ✓ به دست آوردن منحنی‌های I-V و P-V و نقطه‌ی توان حداکثر و مقایسه‌ی نتایج
- به دست آمده از آزمایش با داده‌های موجود در دیتاشیت به منظور اصلاح پارامترها.

## ۱۴-۳-۱- مرحله‌ی اول - وارد کردن اطلاعات دیتاشیت

اطلاعات مورد نیاز مشخص شده در بخش زیر (به جز  $dv/di$ ) را می‌توان مستقیماً از

روی دیتاشیت به دست آورد.



(شکل ۹.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

اطلاعات درج شده روی دیتاشیت که برای تکمیل این قسمت مورد نیاز است، در شکل

زیر آورده شده است:

## Typical Electrical Characteristics<sup>1</sup>

	<b>MSX-64</b>	<b>MSX-60</b>
Maximum power ( $P_{max}$ )	64W	60W
Voltage @ $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	17.5V	17.1V
Current @ $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum $P_{max}$	62W	58W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	... .. $-(80 \pm 10) \text{mV}/^\circ\text{C}$ ... ..	
Temperature coefficient of short-circuit current	... .. $(0.065 \pm 0.015) \%/^\circ\text{C}$ ... ..	
Temperature coefficient of power	... .. $-(0.5 \pm 0.05) \%/^\circ\text{C}$ ... ..	
NOCT <sup>2</sup>	... .. $47 \pm 2^\circ\text{C}$ ... ..	

### NOTES:

- (1) These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in a solar simulator at Standard Test Conditions (STC), which are:
- illumination of  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;
  - cell temperature of  $25^\circ\text{C}$  or as otherwise specified (on curves).
- Operating characteristics in sunlight may differ slightly. To determine the characteristics of modules in 6V configuration, divide the 12V voltage characteristics by 2 and multiply current characteristics by 2. Power values are unchanged.
- (2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of  $20^\circ\text{C}$ , solar irradiation of  $0.8 \text{ kW}/\text{m}^2$ , and wind speed of 1 m/s.

(شکل ۱۰.۱۴): اطلاعات دیتاشیت

دقت کنید که در دیتاشیت ضریب دمایی ولتاژ مدار باز با واحد  $\text{mV}/^\circ\text{C}$  بیان شده

است که باید به  $\%/^\circ\text{C}$  به صورت زیر تبدیل شود:

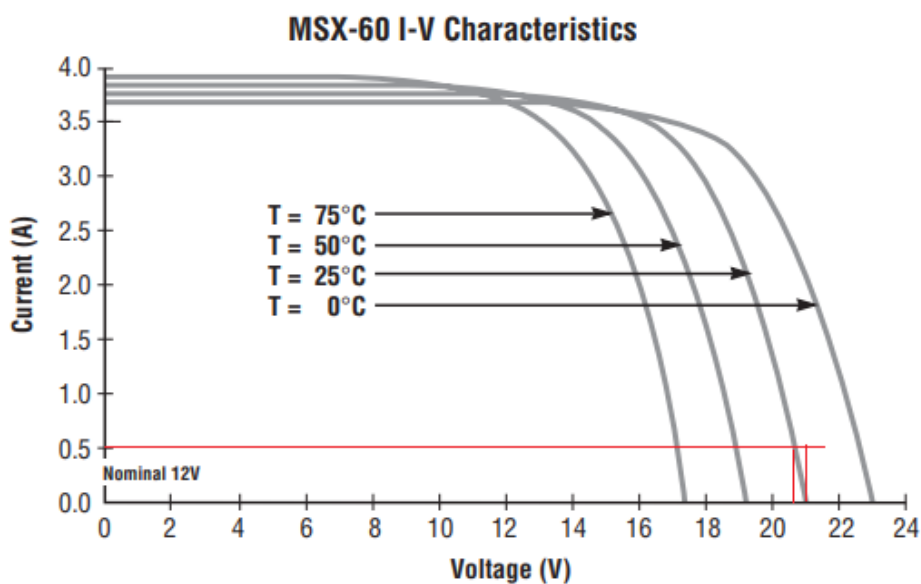


$$-۸ \cdot \frac{mV}{^{\circ}C} = -۸ \cdot \frac{۱۰^{-۳}V}{V_{oc} \times ^{\circ}C} \times ۱۰۰ = -\frac{۸}{۲۱.۱} \% = -۰.۳۸ \frac{\%}{^{\circ}C}$$

مقدار Voc همان شیب مشخصه‌ی I-V در ولتاژ مدار باز (یعنی

۲۱/۱ ولت) است. این مقدار را می‌توان از روی گراف و محاسبه‌ی تقریبی شیب به دست

آورد:



(شکل ۱۱.۱۴): مشخصه ولتاژ جریان

$$\frac{dv}{di} = \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{-۰.۳۴}{۰.۵} = -۰.۶۸$$

اگر منحنی I-V در دسترس نبود، این مقدار را در صفر رها می‌کنیم.

## ۱۴-۳-۴ - مرحله‌ی دوم - پیش‌بینی مقادیر پارامترهای

### $K_s$ و $R_{sh}$ ، $A$ ، $E_g$

معمولا این چهار پارامتر در دیتاشیت وجود ندارند و آن‌ها را باید پیش‌بینی کرد. یک حدس اولیه‌ی خوب برای  $E_g$  حدود  $1/12$  الکترون - ولت برای سیلیکون بلوری و حدود  $2$  الکترون - ولت برای سیلیکون غیر بلوری است. یک حدس اولیه‌ی خوب برای  $A$  حدود  $2$  برای سیلیکون بلوری و کم‌تر از  $2$  برای سیلیکون غیر بلوری است؛ و هم‌چنین یک حدس اولیه‌ی خوب برای مقاومت موازی چندین هزار اهم است.  $K_s$  را در صورت نامعلوم بودن می‌توان در صفر تنظیم کرد.

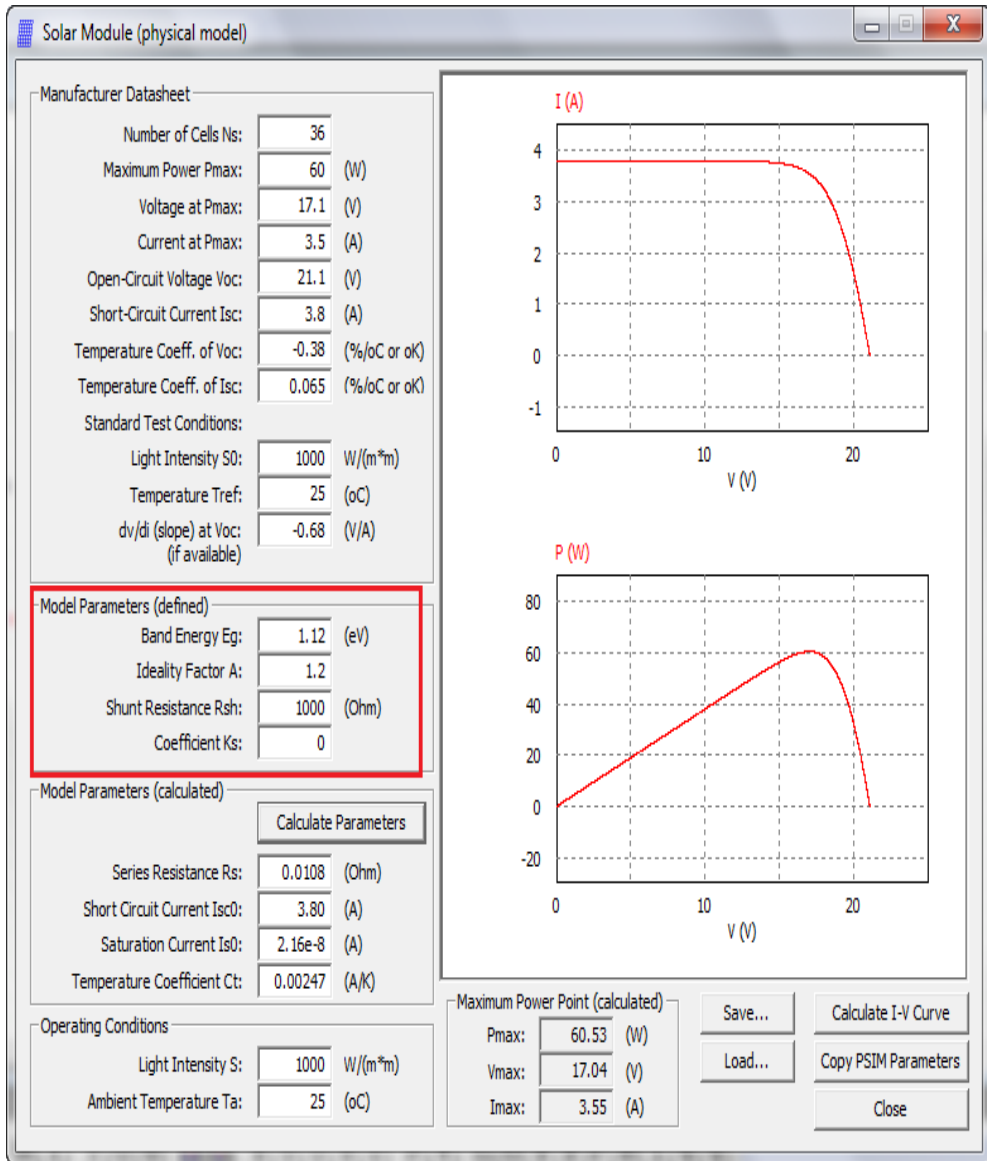
در این مثال داریم:

$$E_g = 1.12$$

$$A = 1.2$$

$$R_{sh} = 1000$$

$$K_s = 0$$



(شکل ۱۲.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

## ۱۴-۳-۳ - مرحله‌ی سوم - محاسبه‌ی پارامترهای $R_s$

$I_{sc}$ ،  $I_s$  و  $C_t$

براساس اطلاعات وارد شده از دیتا شیت و حدس‌های اولیه برای  $E_g$ ،  $A$ ،  $R_{sh}$  و  $K_s$

پارامترهای فوق با کلیک روی دکمه‌ی Calculate Parameters قابل محاسبه هستند. با

این کار اعداد زیر نمایش داده می‌شوند:

$$R_s = 0.0108$$

$$I_{sc} = 3.8$$

$$I_s = 2.16 \times 10^{-8}$$

$$C_t = 0.00247$$

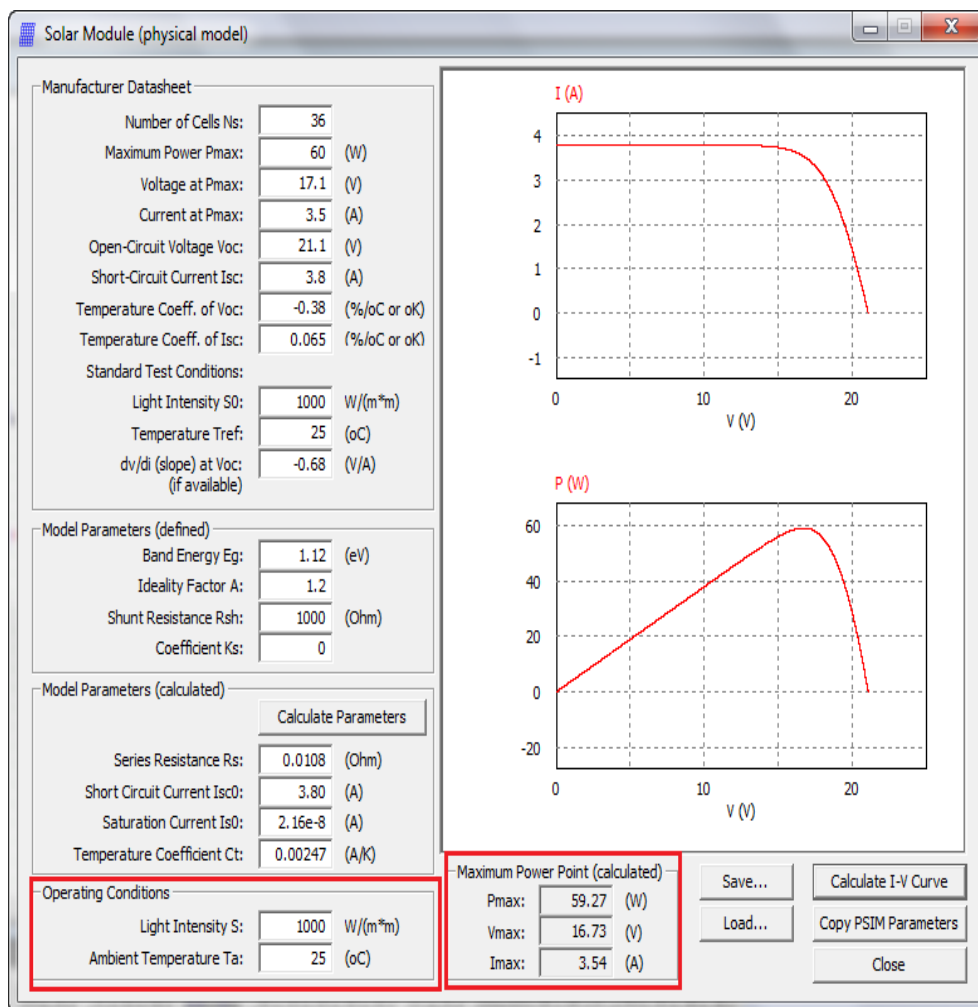
دقت داشته باشید که این محاسبات تقریبی هستند و کاربر برای تطبیق منحنی

محاسبه‌شده با منحنی داده‌شده در دیتاشیت، می‌تواند آن‌ها را تغییر دهد.

## ۱۴-۳-۴ - مرحله‌ی چهارم - تنظیم دقیق پارامترها

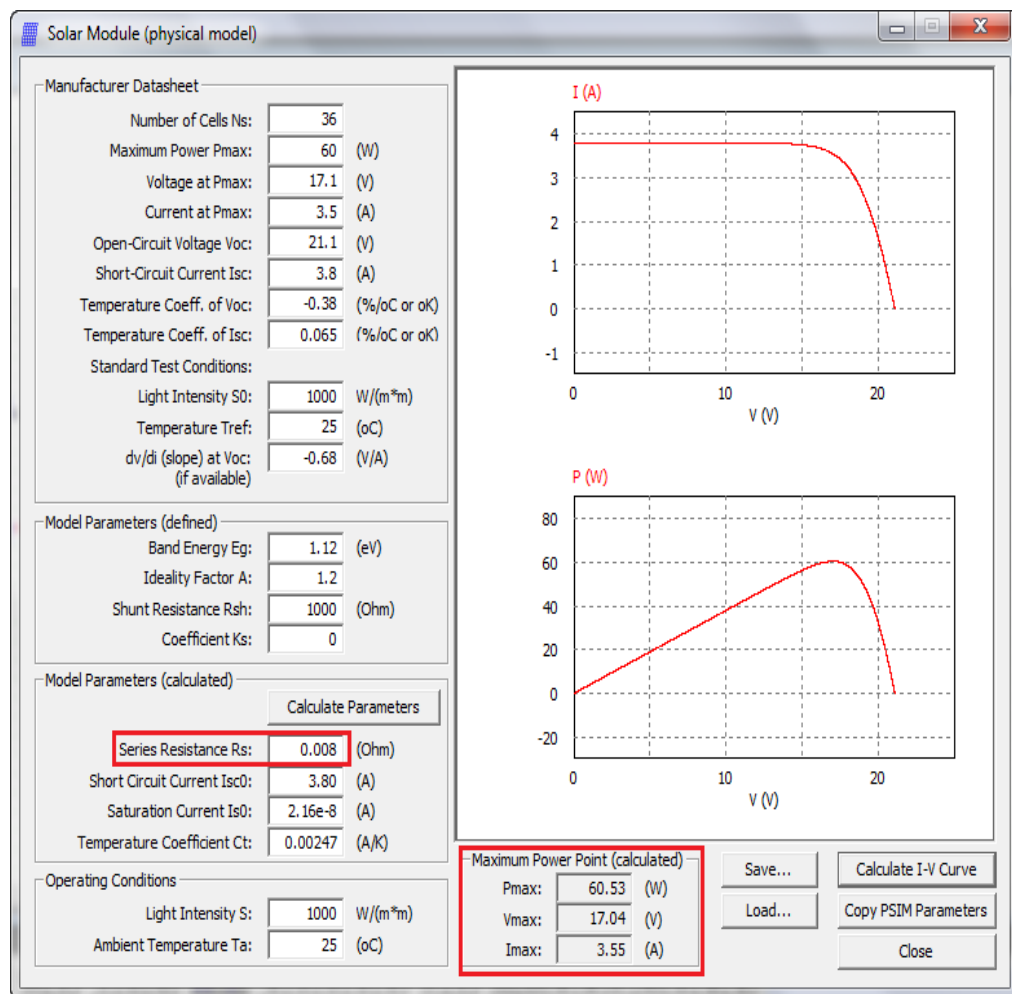
تحت شرایط بهره‌برداری داده شده برای شدت تابش  $S$  و دمای پیرامون  $T_a$ ، می‌توان با کلیک روی دکمه‌ی Calculate I-V Curve منحنی‌های I-V و P-V را به دست آورد. با این کار نقطه‌ی توان حداکثر نیز محاسبه می‌شود.

اگر  $S=1000 \text{ W/m}^2$  و  $T_a=25 \text{ }^\circ\text{C}$  باشد، توان، ولتاژ و جریان حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم به ترتیب  $59/27$  وات،  $16/73$  ولت و  $3/54$  آمپر محاسبه خواهند شد که هم توان حداکثر و هم ولتاژ حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم از مقادیر درج شده در دیتاشیت که برای شدت تابش  $1000$  و دمای  $25$  درج شده است، کم‌تر هستند (مقادیر درج شده در دیتاشیت برابر است با  $60$  وات و  $17/1$  ولت). برای به‌دست آوردن تطبیق بهتر باید مقادیر پارامترهای  $E_g$ ،  $A$ ،  $R_{sh}$ ،  $K_s$ ،  $R_s$ ،  $I_{s0}$  و  $C_t$  را تغییر دهیم.



شکل ۱۳.۱۴: تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

در این مثال اگر مقاومت سری را به  $0.008 \Omega$  اهم تغییر دهیم، توان، ولتاژ و جریان حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم به ترتیب برابر  $60.54$  وات،  $17.04$  ولت و  $3.55$  آمپر محاسبه خواهند شد که به مقادیر دیتاشیت نزدیک‌تر است.



(شکل ۱۴.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

شاید تعداد زیادی تکرار و آزمون و خطا نیاز باشد تا به یک تطبیق خوب با مقادیر

دیتاشیت برسیم. پس از نهایی شدن پارامترها روی دکمه‌ی Copy PSIM Parameters

کلیک کنید تا مقادیر محاسبه‌شده به پارامترهای مدل منتقل شود.

---

در این فصل با دو مدل فیزیکی و کاربردی برای سلول‌های خورشیدی آشنا شدید. هم‌چنین فراگرفتید که پارامترهای مورد نیاز در مدل فیزیکی زیاد است و ممکن است که تمامی آن‌ها در دیتاشیت مربوطه موجود نباشند. بنابراین برای تخمین سایر پارامترهای مورد نیاز از ابزار Solar Module واقع در منوی Utilities استفاده می‌شود تا با رسم نمودار در شرایط بهره‌برداری مختلف و مقایسه‌ی آن‌ها با نمودارهای موجود در دیتاشیت، پارامترهای اضافی نیز تخمین زده شوند. تخمین این پارامترهای اضافی از طریق آزمون و خطا صورت می‌پذیرد.



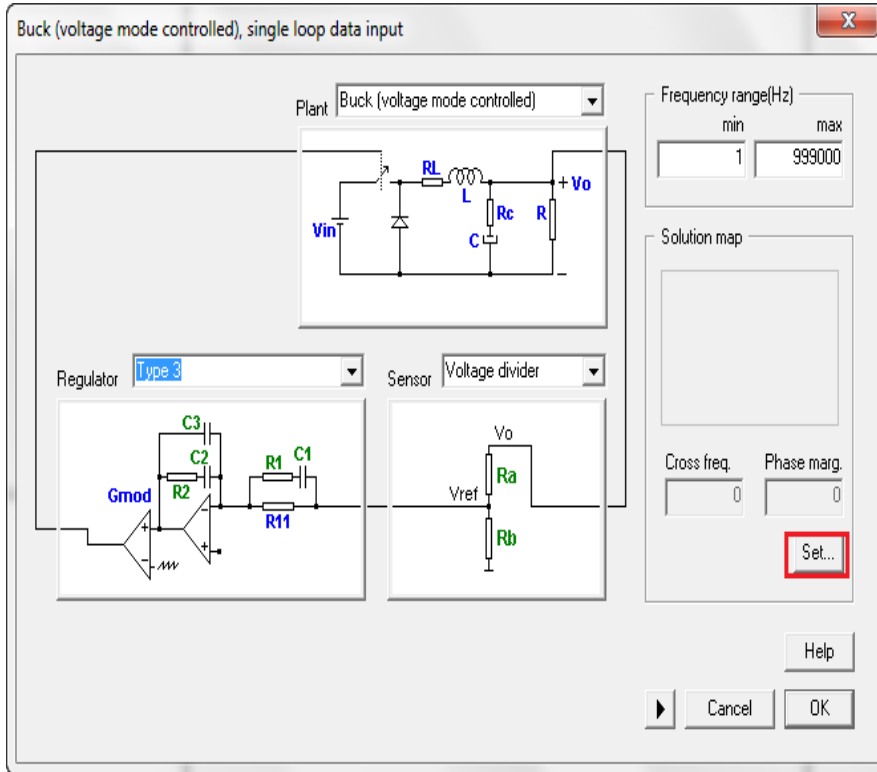
## فصل پانزدهم

# آشنایی با ابزار SmartCtrl

### ۱۵- مقدمه

در این فصل با ابزار SmartCtrl جهت طراحی سیستم‌های کنترلی برای مدارات رایج الکترونیک قدرت آشنا می‌شوید.

## ۱۵-۱- طرح مدار



(شکل ۱۰.۱۵): شمای کلی مدار

## ۱۵-۲- اجرای شبیه‌سازی

اسمارت کنترل (SmartCtrl) یک ابزار طراحی کنترل برای مدارات الکترونیک قدرت است. این ابزار یک رابط کاربری ساده را برای طراحی حلقه‌های کنترلی فراهم می‌کند.

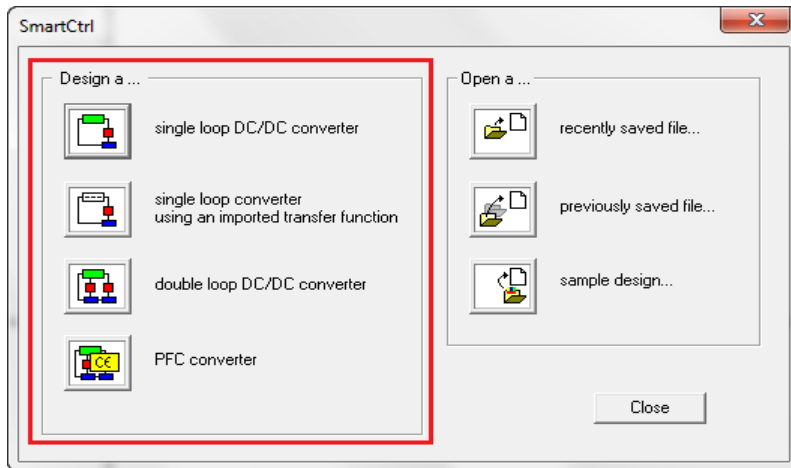
SmartCtrl شامل توابع تبدیل برخی از رایج‌ترین مدارات الکترونیک قدرت مثل مبدل‌های DC-DC و AC-DC است. با استفاده از این ابزار می‌توان یک تخمینی از نقاط پایدار برای پارامترها به دست آورد.

برای دسترسی به ابزار SmartCtrl باید روی ابزار مربوطه در نرم‌افزار PSIM کلیک کرد. این ابزار در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۲.۱۵): نوار ابزار

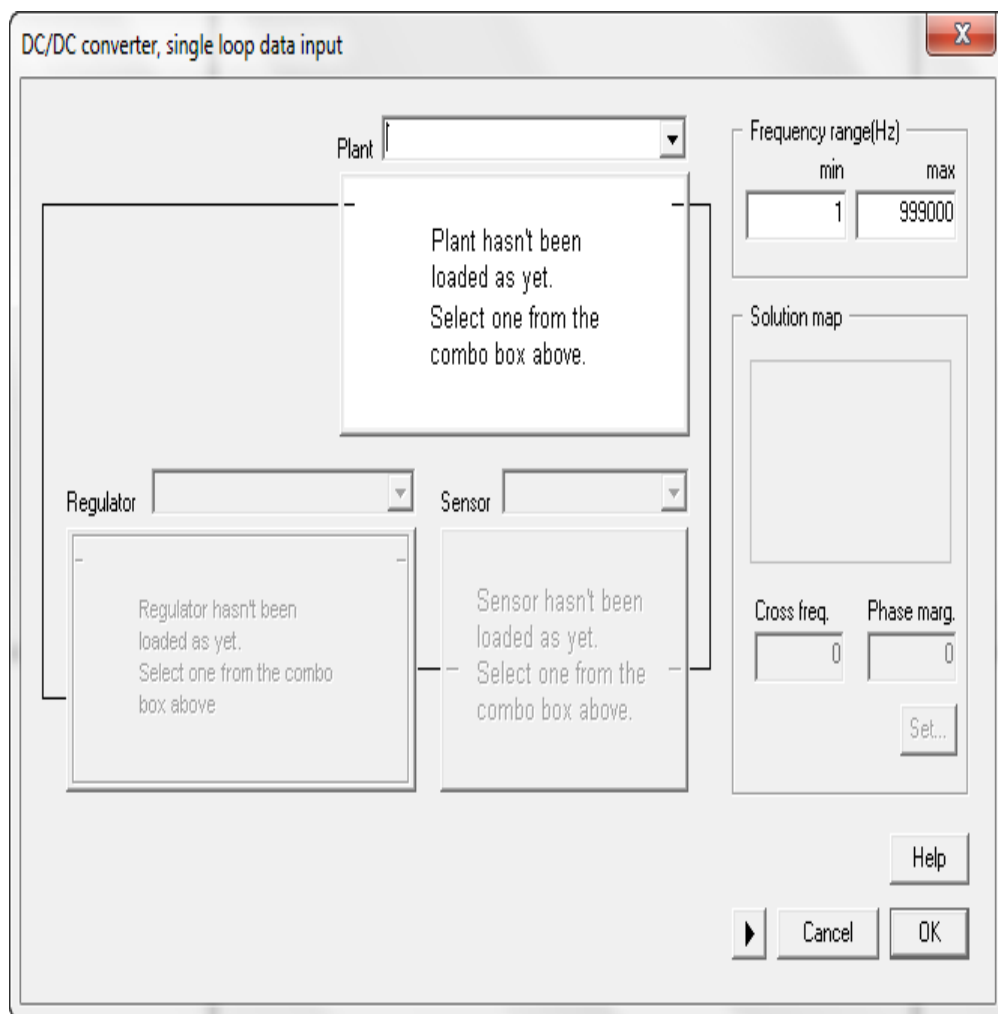
با کلیک روی این گزینه پنجره‌ی شکل (۳.۱۵) باز می‌شود:



(شکل ۳.۱۵): تنظیم SmartCtrl

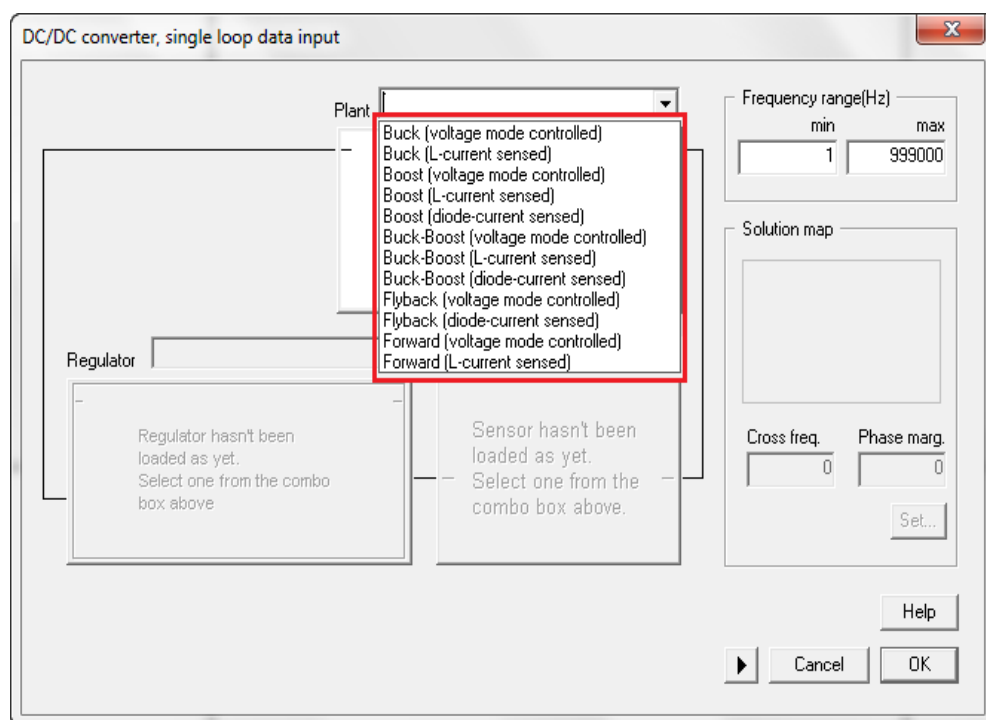
برای شروع کار با این ابزار روی ابزار مربوط به Single loop DC-DC Converter

کلیک میکنیم. با این کار پنجره‌ی زیر باز می‌شود:



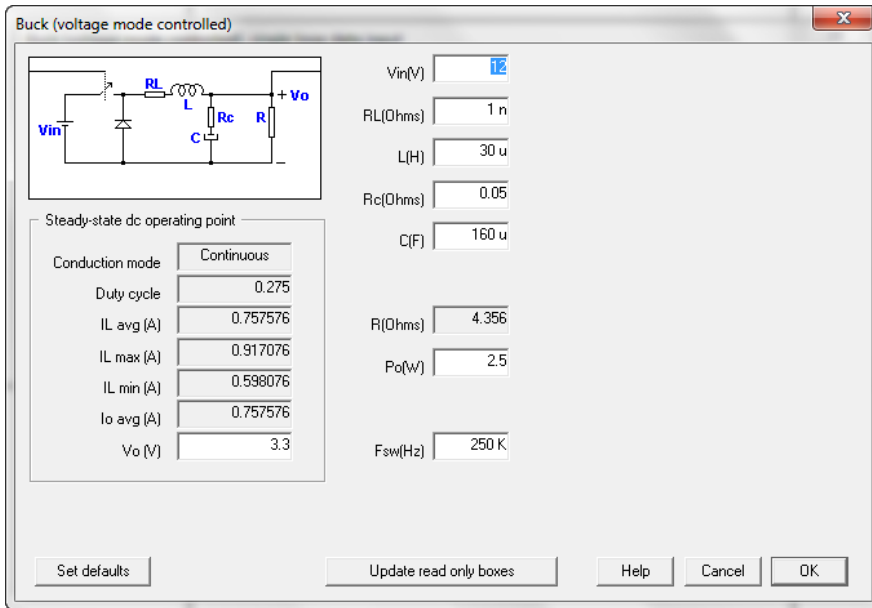
(شکل ۴.۱۵): تنظیم Single loop DC-DC Converter

این کنترل تک حلقه‌ای از سه تابع تبدیل جداگانه تشکیل شده است: سیستم، سنسورها و تنظیم‌کننده‌ها که باید به ترتیب انتخاب شوند. گام اول تعریف سیستم است که در بخش Plant صورت می‌پذیرد. با باز کردن لیست کشویی مقابل نوشته‌ی Plant تعدادی از سیستم‌های از پیش تعریف شده نمایش داده می‌شوند:



شکل ۵.۱۵: تنظیم Single loop DC-DC Converter

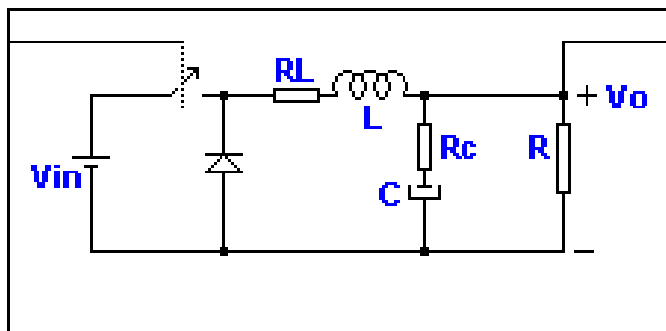
در اینجا سیستم Buck (Voltage mode controlled) را انتخاب می‌کنیم. با این کار پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



شکل ۶.۱۵: تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

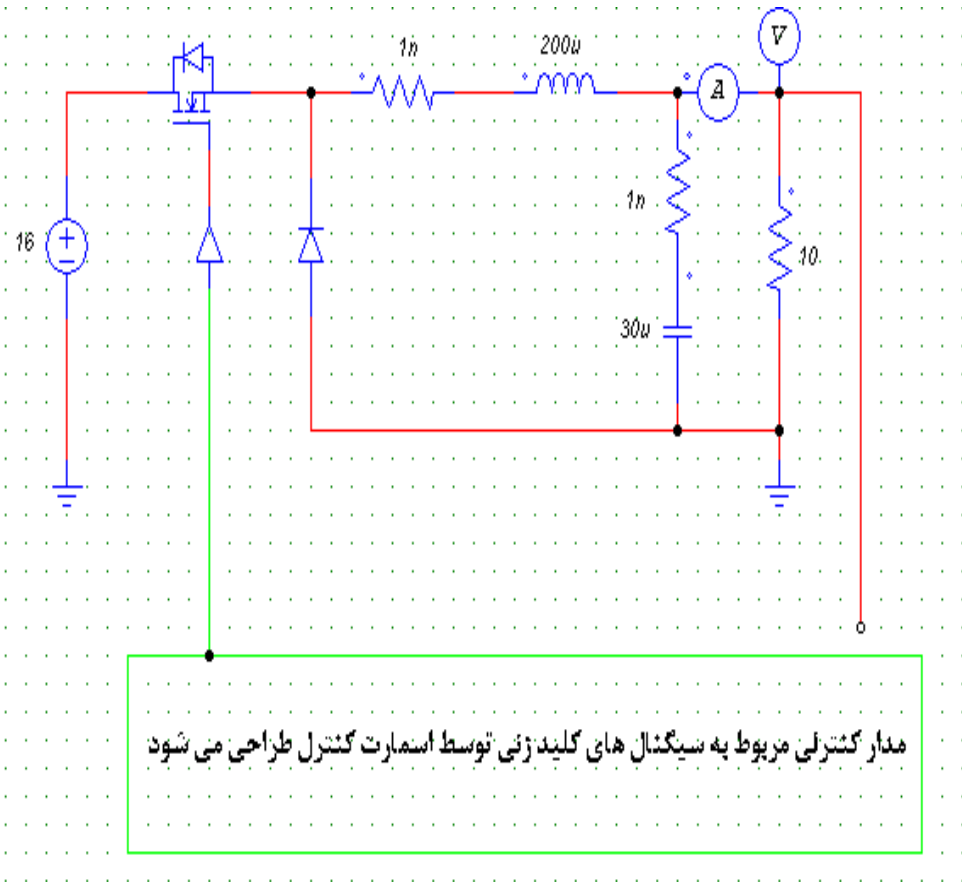
دقت کنید که در اینجا مدارها به صورت پیش فرض هستند بنابراین مدار طراحی شده

در محیط PSIM نیز باید مطابق شکل زیر باشد.



شکل ۷.۱۵: مدار پیش فرض

بنابراین در محیط PSIM نیز این مدار را طراحی می‌کنیم.

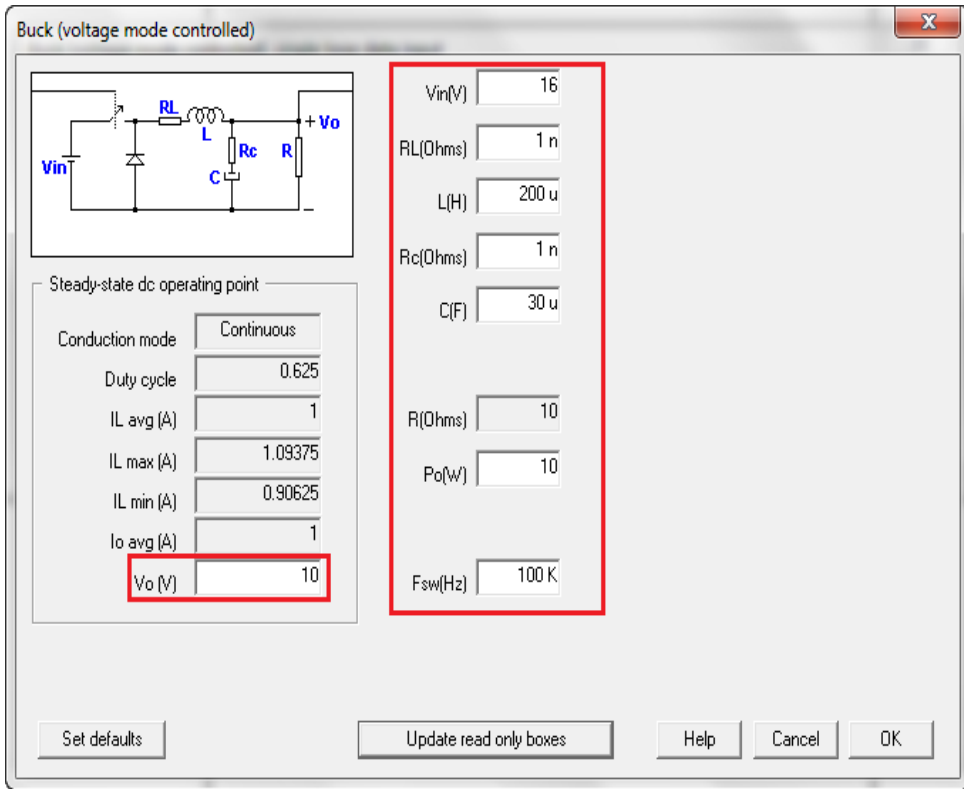


مدار کنترلی مربوط به سیگنال‌های کلیدزنی توسط اسنمارت کنترل طراحی می‌شود

(شکل ۸.۱۵): پیاده‌سازی مدار

حال باید مقادیر مربوط به پارامترها را در SmartCtrl مطابق مدار طراحی شده تغییر

می‌دهیم:

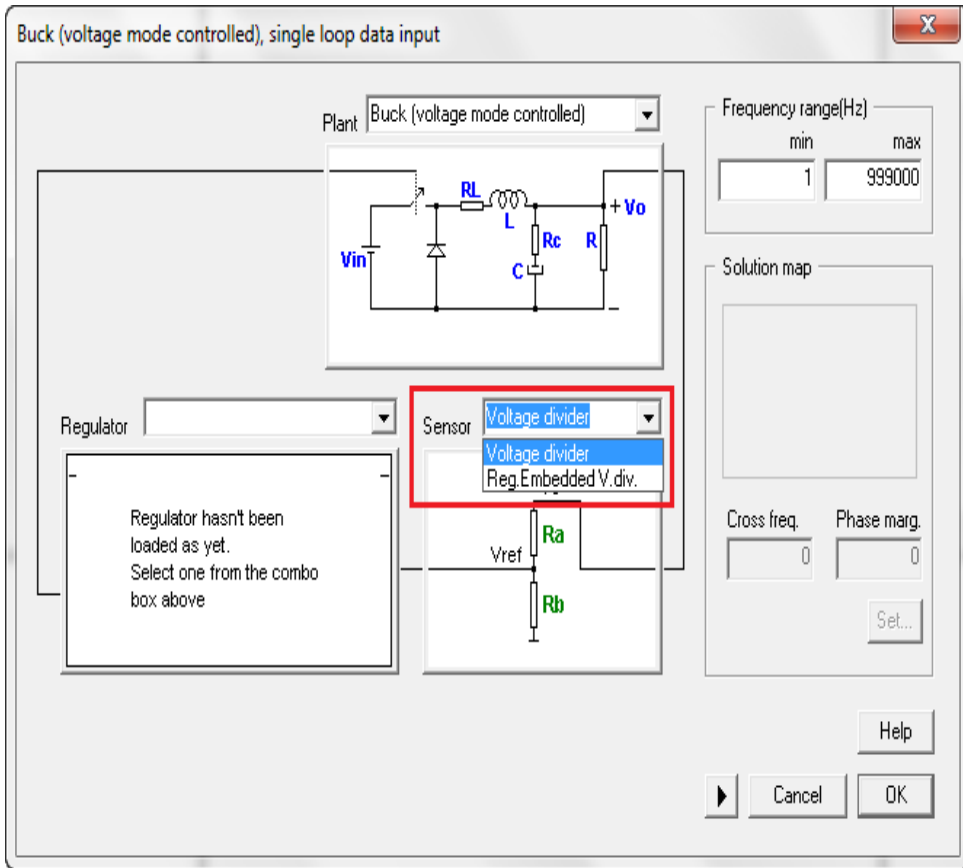


(شکل ۹.۱۵): تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

با تایید این پنجره مقادیر مربوط به سیستم تنظیم می‌شود. حال نوبت تعریف نوع

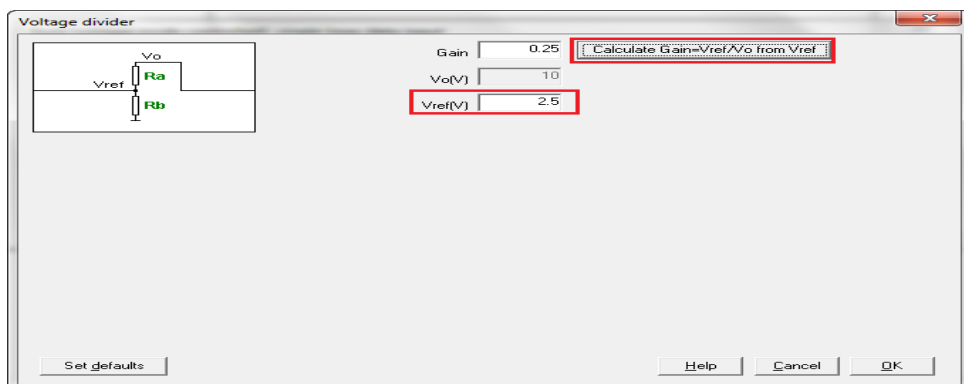
سنسور است.





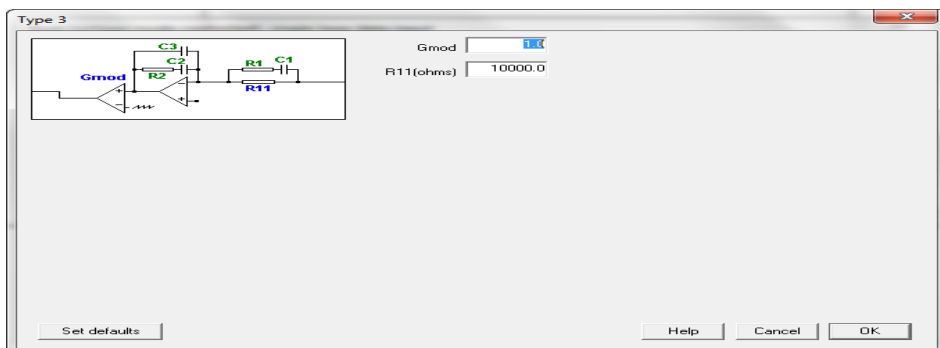
شکل ۱۰.۱۵: تنظیم (Buck (Voltage mode controlled)

سنسور را از نوع تقسیم‌کننده ولتاژ انتخاب می‌کنیم تا به سیستم کنترلی ولتاژ کمتری وارد شود. با انتخاب این سنسور پنجره‌ی زیر باز می‌شود که در آن می‌توان با تعریف  $V_{ref}$  و زدن دکمه‌ی محاسبه، بهره را تنظیم کرد.



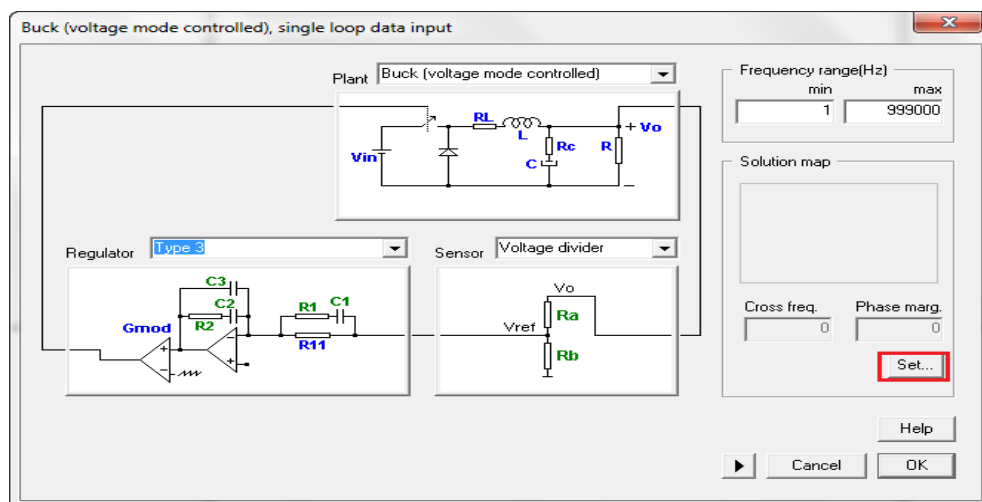
(شکل ۱۱.۱۵): تنظیمات تقسیم‌کننده ولتاژ

با تایید این پنجره نیز دوباره به پنجره‌ی قبلی بازمی‌گردیم. حال نوبت انتخاب نوع کنترل‌کننده است که در اینجا کنترل‌کننده‌ی نوع ۳ (Type 3) را انتخاب می‌کنیم. انتخاب نوع کنترل‌کننده مربوط به بحث کنترل است که توضیح آن در اینجا منجر خارج شدن از بحث اصلی می‌شود. با انتخاب کنترل‌کننده نیز پنجره‌ای مشابه شکل زیر باز می‌شود که پارامترها را در حالت پیش‌فرض رها می‌کنیم.



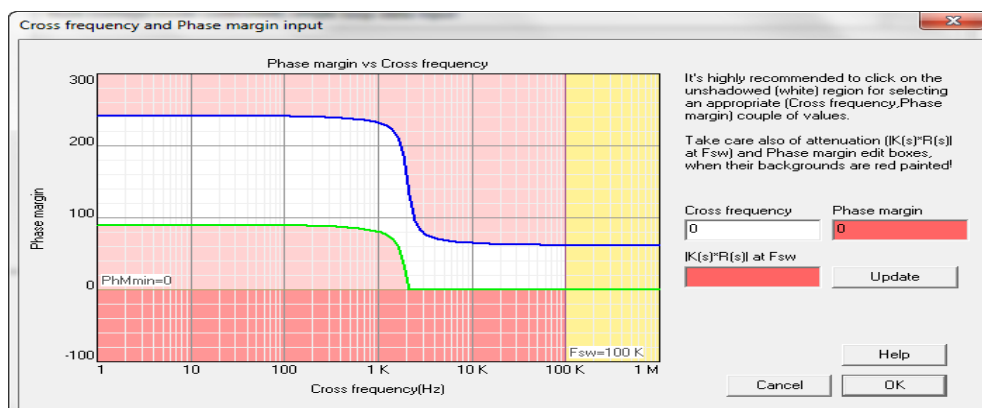
(شکل ۱۲.۱۵): انتخاب کنترل‌کننده

با تایید این قسمت شکل پنجره‌ی اصلی به صورت زیر خواهد بود:



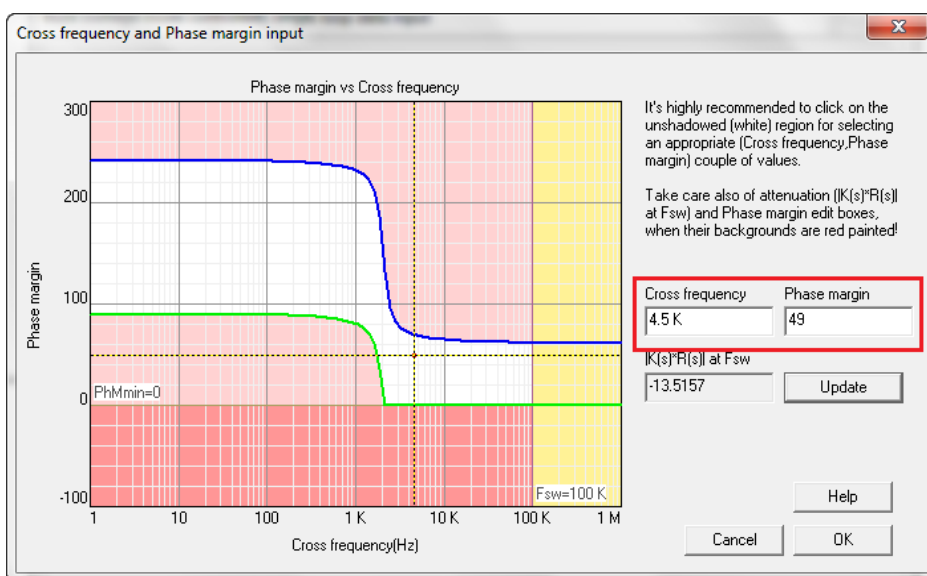
شکل ۱۳.۱۵: تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

حال با زدن دکمه‌ی Set پنجره‌ی زیر باز می شود:



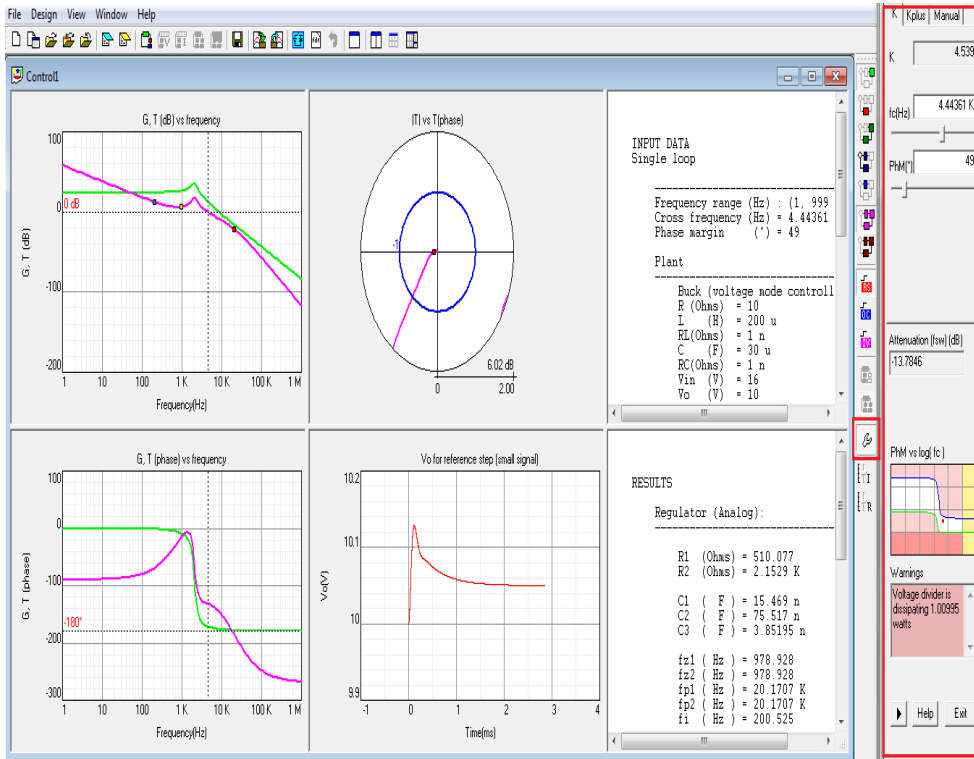
شکل ۱۴.۱۵: تنظیم Cross frequency و Phase margin

در این پنجره باید Cross frequency و Phase margin را به گونه‌ای تنظیم کنیم که نقطه‌ی انتخابی در داخل ناحیه‌ی سفید قرار بگیرد. این ناحیه همان ناحیه‌ی پایدار سیستم است. انتخاب نقطه بستگی به طراحی مدار کنترلی دارد، در اینجا نقطه‌ای با مشخصات زیر انتخاب شده است.



(شکل ۱۵.۱۵): تنظیم Cross frequency و Phase margin

حال این پنجره را تایید می‌کنیم. با این کار مجدداً پنجره زیر باز می‌شود که در آن نمودارهای بود، نایکویست و پاسخ زمانی نشان داده شده‌اند.

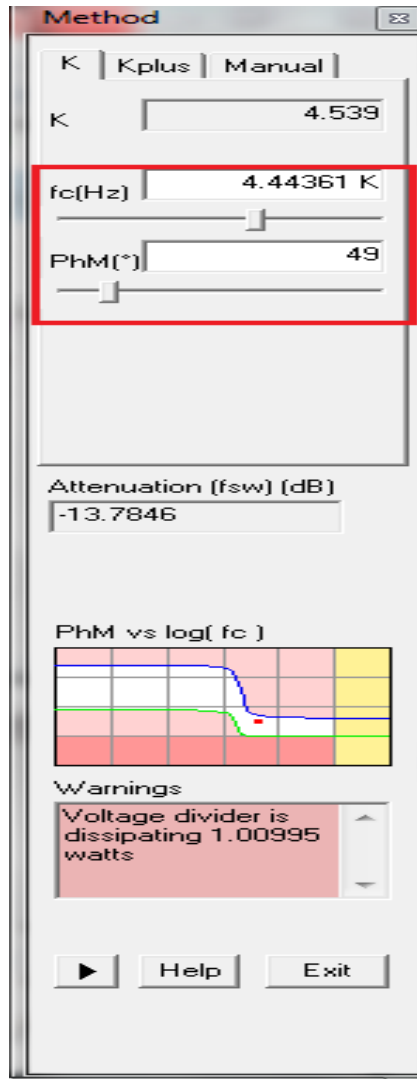


(شکل ۱۶.۱۵): نمودارهای بود، نایکویست و پاسخ زمانی

پنجره‌ی سمت راست که به پنجره‌ی Method معروف است با کلیک بر روی ابزار

قابل دسترسی است. از این پنجره می‌توان برای مشاهده‌ی وابستگی و تغییر

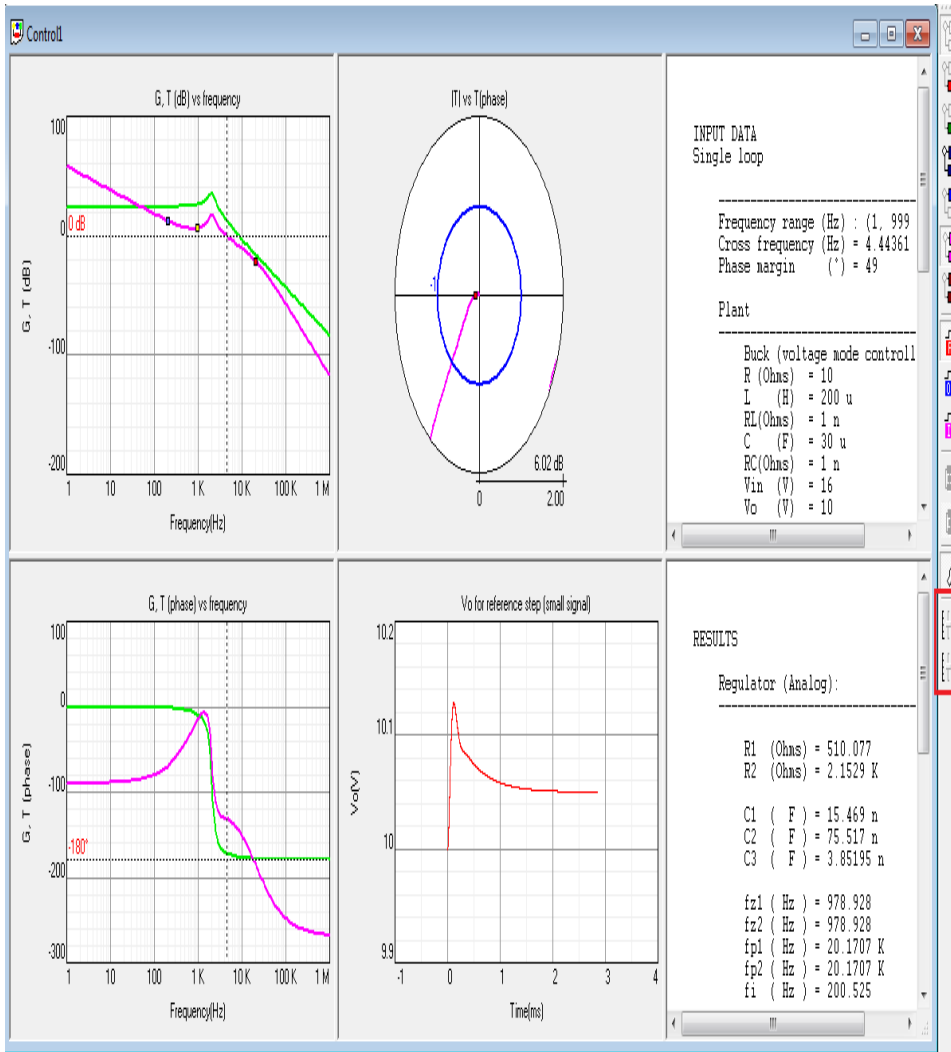
نمودارها با تغییر پارامترها یا رسیدن به مقادیر مورد نظر استفاده کرد.



(شکل ۱۷.۱۵): تنظیمات Method

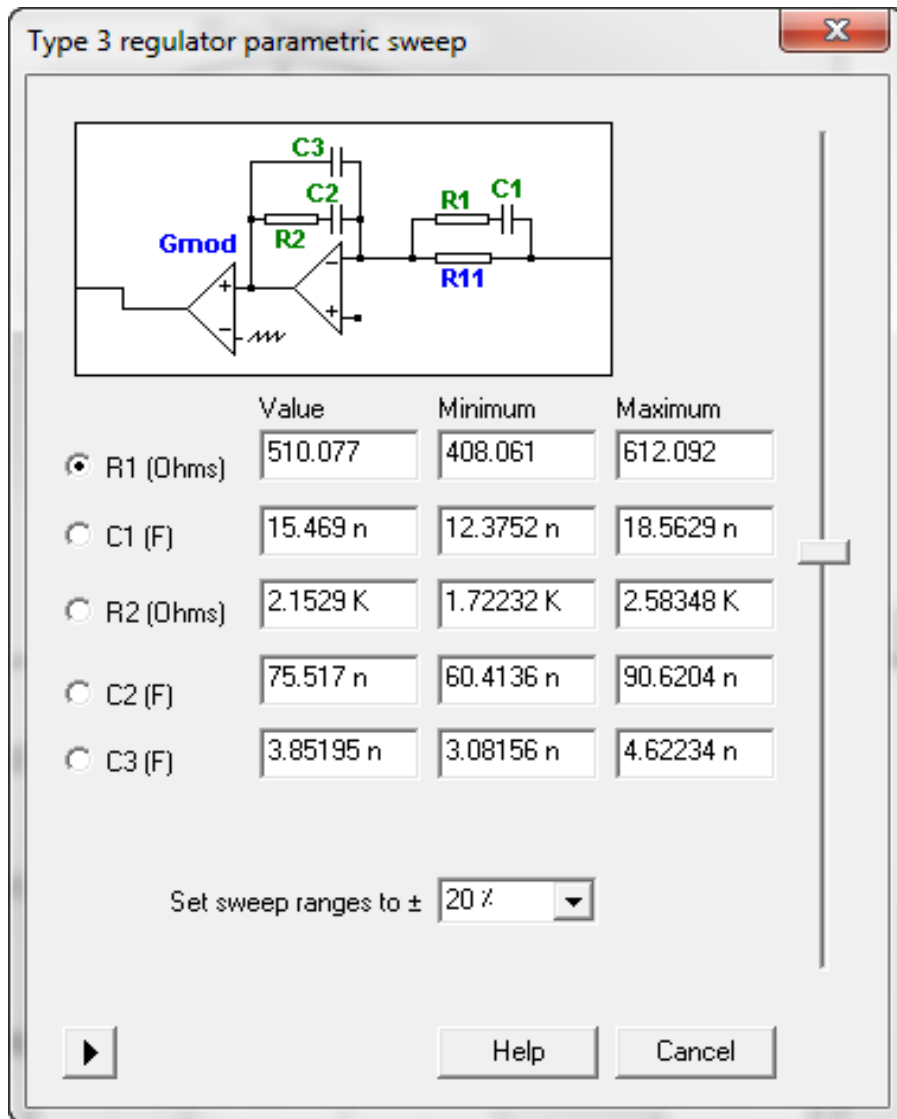
همچنین در پنجره‌ی اصلی دو ابزار دیگر قرار دارند که بوسیله‌ی آن‌ها می‌توان دیگر تغییرات را که نمودارها به آن‌ها وابسته هستند را مشاهده کرد. این دو ابزار، تغییر

پارامترهای ورودی و همچنین رگولاتور را شامل می‌شود که در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۸.۱۵: ابزار نمایش نمودارهای خروجی

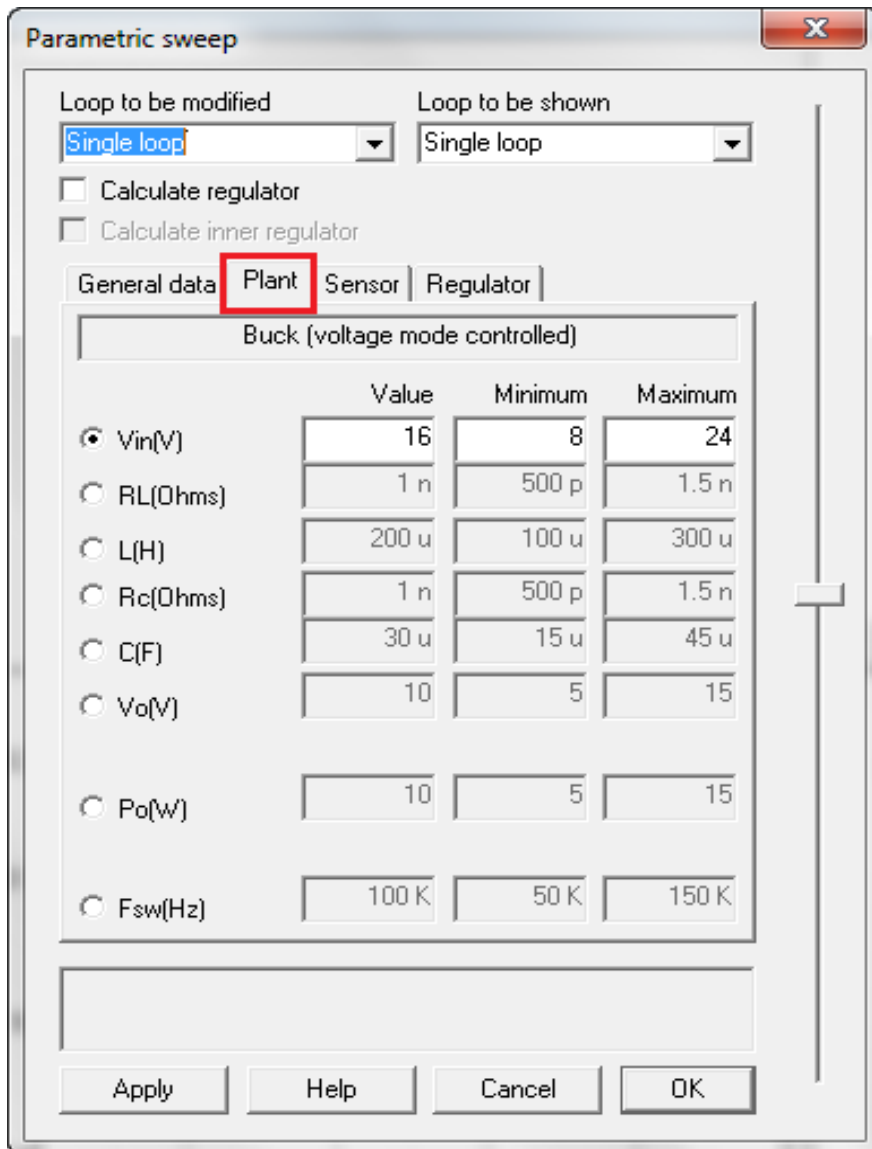
با انتخاب ابزار مربوط به پارامترهای رگولاتور، پنجره زیر باز می‌شود:



(شکل ۱۹.۱۵): تنظیم پارامترهای رگولاتور

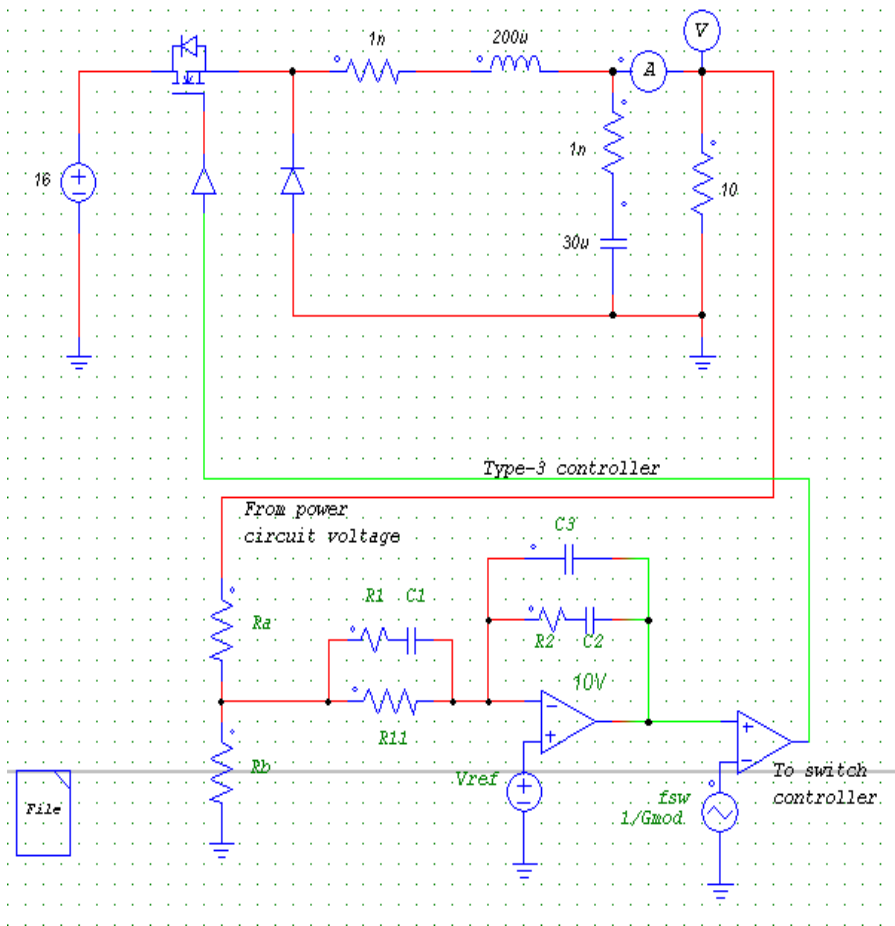


و با انتخاب ابزار مربوط به پارامترهای ورودی پنجره زیر نمایش داده می‌شود:



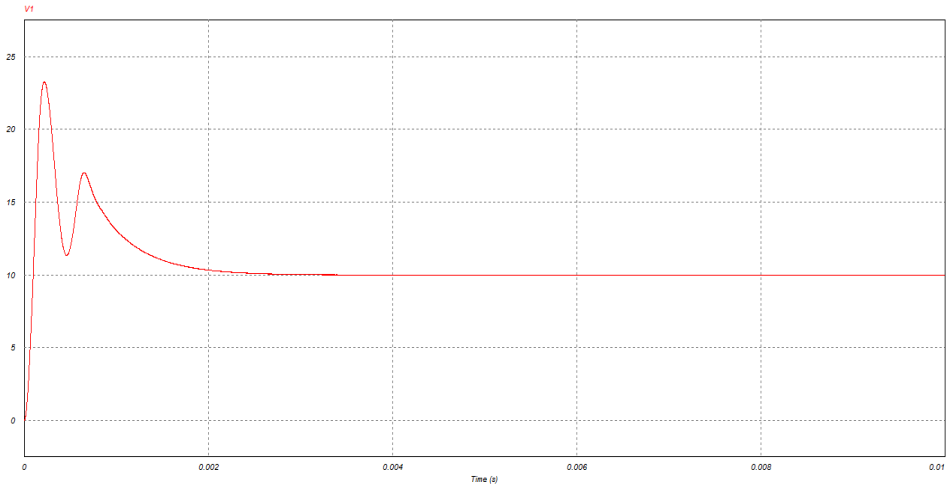
(شکل ۲۰.۱۵): تنظیم پارامترهای رگولاتور

حال با کلیک روی ابزار Exports Regulator to PSIM که در شکل زیر نیز نشان داده شده است، سیستم کنترلی طراحی شده وارد محیط PSIM می‌گردد. با این کار پنجره‌ای باز می‌شود که در آن باید فایل‌ی را که مدار مورد نظر در آن ذخیره شده است، انتخاب کنیم تا سیستم کنترلی به آن مدار اعمال شود.



شکل ۲۱.۱۵: اعمال سیستم کنترلی به مدار

با انجام شبیه‌سازی و رسم ولتاژ خروجی خواهیم داشت:



(شکل ۲۲.۱۵): ولتاژ خروجی

همانطور که ملاحظه می‌شود ولتاژ خروجی در ۱۰ ولت تثبیت شده است.

در این فصل به‌طور مختصر با نحوه‌ی کار SmartCtrl آشنا شدید و فرا گرفتید که چگونه

می‌توان برای مبدل‌های رایج DC-DC و AC-DC سیستم‌های کنترلی مناسب برای

کلیدزنی طراحی کرد.



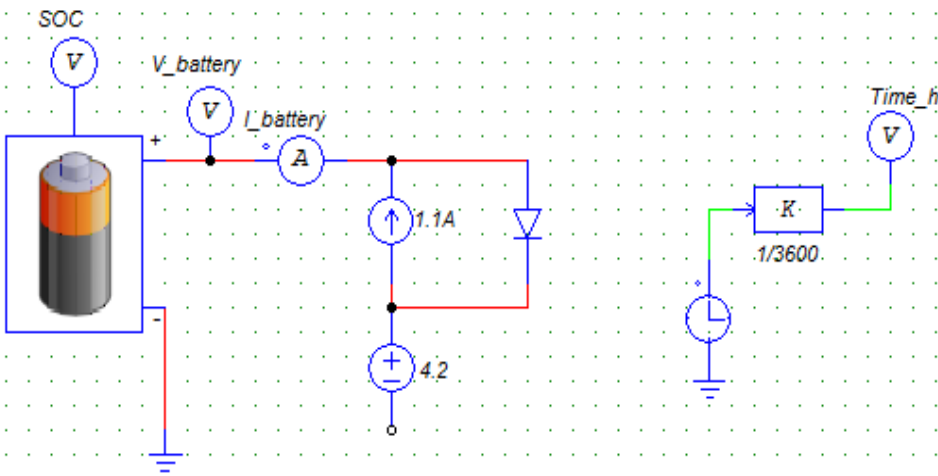
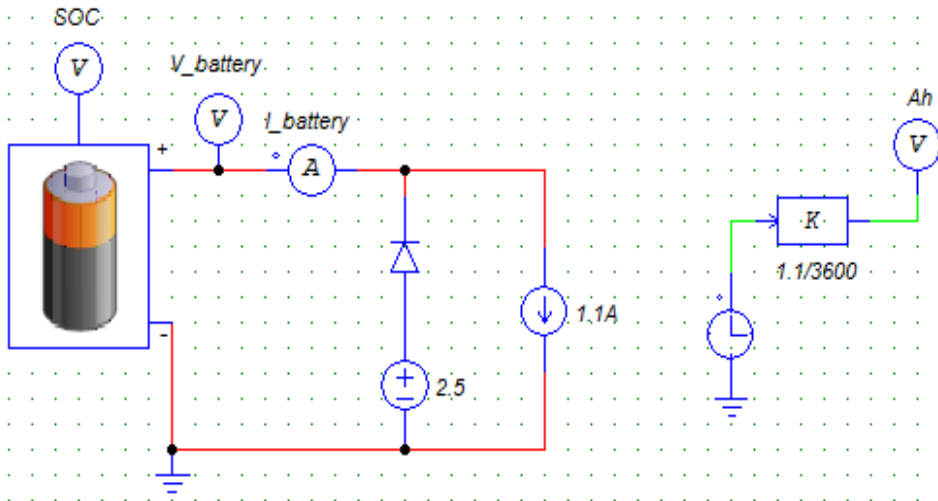
## فصل شانزدهم

### مدل باتری لیتیوم یونی

#### ۱۶- مقدمه

در این فصل با مدل باتری لیتیوم یونی و چگونگی به دست آوردن پارامترهای مربوط به آن از روی دیتاشیت آشنا خواهید شد.

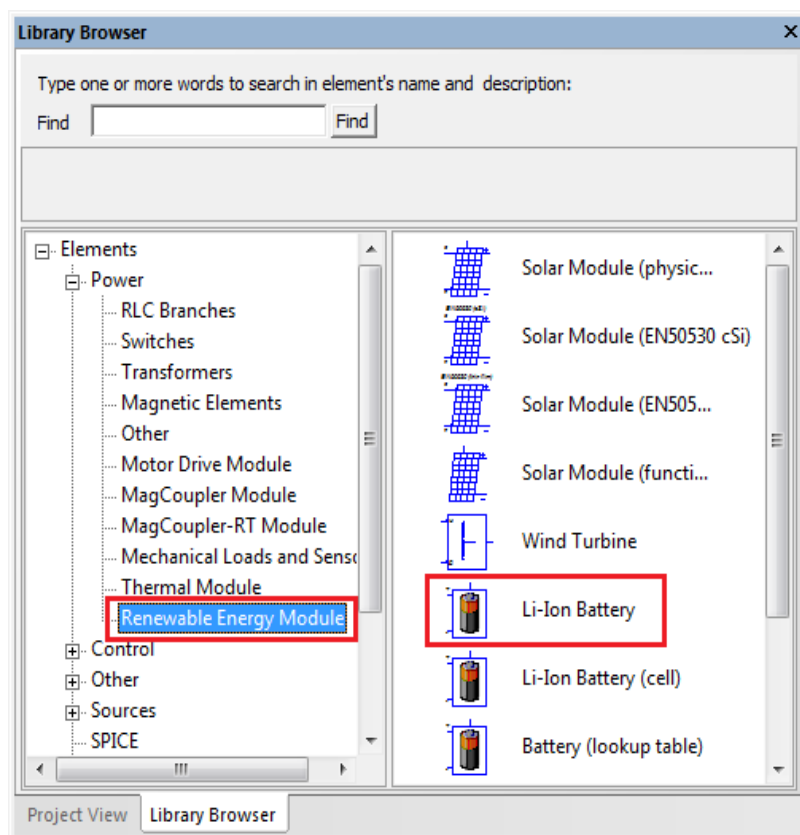
## ۱۶-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۱۶): شمای کلی مدار

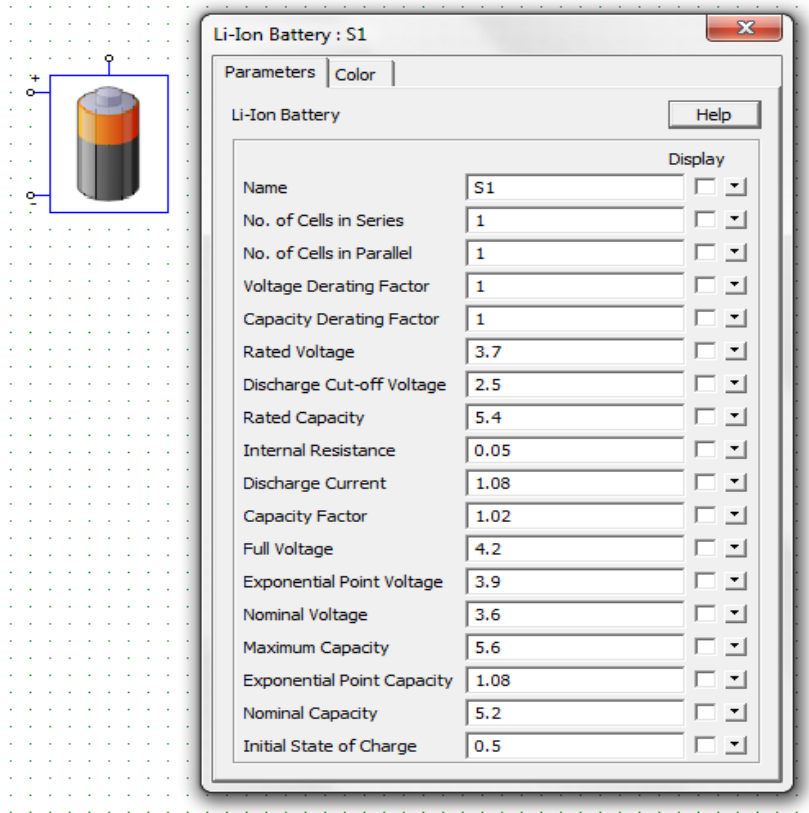
## ۱۶-۲- اجرای شبیه‌سازی

برای وارد کردن باتری لیتیوم یونی به محیط نرم‌افزار PSIM، در کتابخانه‌ی نرم‌افزار به قسمت Renewable Energy Module رفته و باتری لیتیوم یونی را به مدار اضافه می‌کنیم.



(شکل ۲.۱۶): کتابخانه نرم‌افزار

با دوبر کلیک روی باتری، پنجره‌ی پارامترهای آن به صورت زیر باز می‌شود.



(شکل ۳.۱۶): تنظیم پارامترهای باتری

برخی از این پارامترها را می‌توان از روی دیتاشیت باتری به دست آورد در حالی که برای به دست آوردن مابقی باید از آزمون و خطا و مقایسه با نمودارهای موجود در دیتاشیت استفاده نمود. در این مثال چگونگی به دست آوردن این پارامترها شرح داده می‌شود.



پامترهایی که برای مدل لازم هستند عبارتند از:

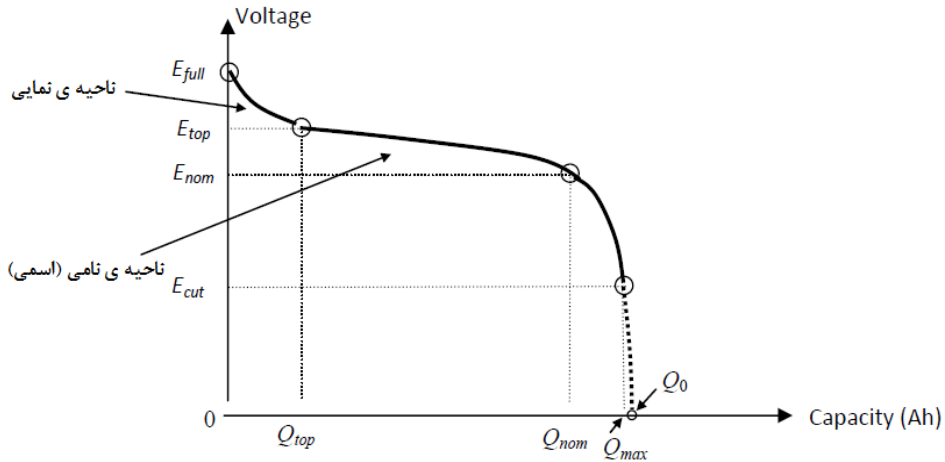
No. of Cells in Series: تعداد سلول‌های سری در یک باتری ( $N_s$ ).
No. of Cells in Parallel: تعداد سلول‌های موازی در یک باتری ( $N_p$ ).
Voltage Derating Factor: ضریب کاهش حد مجاز ولتاژ ( $K_s$ ) که عددی بین صفر تا یک است.
Capacity Derating Factor: ضریب کاهش حد مجاز ظرفیت ( $K_p$ ) که عددی بین صفر تا یک است.
Rated Voltage: ولتاژ نامی ( $E_{rated}$ ) سلول باتری برحسب ولت.
Discharge Cut-off Voltage: ولتاژ قطع باتری ( $E_{cut}$ ) مطابق با ظرفیت حداکثر برحسب ولت.
Rated Capacity: ظرفیت نامی ( $Q_{rated}$ ) سلول باتری برحسب Ah.
Internal Resistance: مقاومت داخلی باتری ( $R_{batt}$ ) بر حسب اهم.
Discharge Current: جریان تخلیه‌ی منحنی‌ای ( $I_{dischg}$ ) که در آن پارامترهای مدل به‌دست آمده‌اند (بر حسب آمپر).
Capacitor Factor: ضریب ظرفیت ( $K_c$ ).
Full Voltage: ولتاژ باتری در حالت کاملاً پر ( $E_{full}$ ).

Exponential Point Voltage: ولتاژ باتری در انتهای ناحیه‌ی نمایی در منحنی تخلیه ( $E_{top}$ ).
Nominal Voltage: ولتاژ باتری در انتهای ناحیه‌ی نامی در منحنی تخلیه بر حسب ولت ( $E_{nom}$ ).
Maximum Capacity: حداکثر ظرفیت سلول باتری مطابق با ولتاژ قطع تخلیه بر حسب آمپرساعت ( $Q_{max}$ ).
Exponential Point Capacity: ظرفیت باتری در انتهای ناحیه‌ی نمایی در منحنی تخلیه بر حسب آمپرساعت ( $Q_{top}$ ).
Nominal Capacity: ظرفیت باتری در انتهای ناحیه‌ی نامی در منحنی تخلیه بر حسب آمپرساعت ( $Q_{nom}$ ).
Initial State of Charge: حالت شارژ اولیه‌ی باتری که عددی بین صفر تا یک است.

پارامترهای  $E_{rated}$ ،  $E_{cut}$  و  $Q_{rated}$  را می‌توان مستقیماً از دیتا شیت به دست آورد. برخی

دیگر از پارامترها را نیز می‌توان از روی منحنی تخلیه‌ی باتری خواند.

شکل زیر یک منحنی تخلیه‌ی کلی را نشان می‌دهد:



(شکل ۴.۱۶): منحنی تخلیه‌ی

از روی منحنی تخلیه می‌توان مقادیر  $E_{full}$ ،  $E_{top}$ ،  $E_{nom}$ ،  $Q_{top}$ ،  $Q_{nom}$  و  $Q_{max}$  را به دست آورد. دقت کنید که مقادیر  $E_{top}$ ،  $Q_{top}$ ،  $E_{nom}$  و  $Q_{nom}$  دقیقاً با نقاط انتقالی برابر نیستند و اغلب به طور دقیق مشخص نشده‌اند. برای به دست آوردن آن‌ها می‌توان مقادیر مختلف را امتحان کرد به گونه‌ای که مشخصه‌ی مدل با مشخصه‌ی واقعی تطبیق پیدا کند. ضریب ظرفیت تقریباً نسبت بین  $Q_0$  (ظرفیت در ولتاژ صفر) و  $Q_{max}$  است که مقدار آن نزدیک به یک است و باید به گونه‌ای تنظیم شود که در  $SOC=0$  ولتاژ باتری با  $E_{cut}$  برابر شود. برای پارامترهایی که در دیتا شیت وجود ندارند باید ابتدا یک حدس اولیه زد و با آزمون و خطا آن‌ها را اصلاح نمود.

در این فصل از باتری لیتیوم یونی قابل شارژ، مدل VL34570 استفاده شده است تا چگونگی تعریف پارامترها برای تعریف دقیق مدل شرح داده شود. این فرایند شامل گام‌های زیر است:

- ✓ ورود اطلاعات از دیتاشیت
- ✓ زدن حدس اولیه برای پارامترهایی که در منحنی دشارژ موجود در دیتاشیت مشخص هستند
- ✓ به دست آوردن منحنی‌های شارژ و دشارژ برای شرایط کاری مختلف و مقایسه‌ی آن با دیتاشیت و تنظیم دقیق پارامترها

## ۱۶-۳-۱- گام اول - وارد کردن اطلاعات موجود در

### دیتاشیت

تصویر شکل (۵.۱۶) دیتاشیت مربوط به باتری مورد نظر را نشان می‌دهد. گام اول استخراج پروفیل باتری براساس دیتاشیت است. دقت کنید که تعداد سلول‌ها و ضرایب  $K_p$  و  $K_s$  در مقدار پیش‌فرض که همان یک است، رها می‌شوند.

Cell size references		R20 - D
<b>Electrical characteristics</b>		
Nominal voltage (under 1.1 A at 20°C)	Erated	3.7 V
Typical capacity 20°C (under 1.1 A at 20°C 2.75 V cut-off)	Qrated	5.4 Ah
<b>Mechanical characteristics</b> (sleeved, without tabs)		
Diameter (max)	34.20 mm [1.346 in]	
Height (max)	59.43 mm [2.340 in]	
Typical weight	125 g [4.3 oz]	
Lithium equivalent content	1.62 g	
Nominal energy	20.0 Wh	
<b>Operating conditions</b>		
Charge method	Constant Current/Constant Voltage	
Maximum charge voltage	4.20 +/- 0.05 V	
Maximum recommended charge current**	5.4 A (-C rate)	
Charge temperature range*	-20°C to +60°C [-4°F to +140°F]	
Time at 20°C	To be set as a function of the charge current: C rate → 2 to 3 h C/2 rate → 3 to 4 h C/5 rate → 6 to 7 h	
Maximum continuous discharge current***	11 A (-2C rate)	
Pulse discharge current	up to 21 A (-4C rate)	
Discharge cut-off voltage	Ecut	2.5 V
Discharge temperature range	-50°C to +60°C [-58°F to +140°F]	

(شکل ۵.۱۶): دیتاشیت باتری

مقادیر نامی که مستقیماً از روی دیتاشیت قابل دستیابی هستند عبارتند از:

$$E_{rated} = 3.7 \text{ V}$$

$$Q_{rated} = 5.4 \text{ Ah}$$

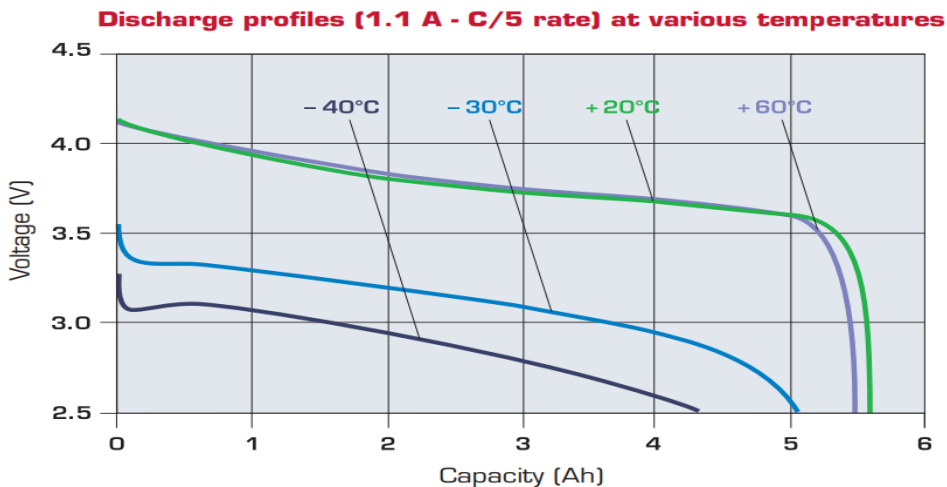
$$E_{cut} = 2.5 \text{ V}$$

در دیتاشیت مربوط به این باتری به مقاومت داخلی باتری اشاره‌ای نشده است. در این حالت می‌توان با توجه به سایر باتری‌های لیتیوم یونی با مقادیر نامی مشابه، یک تخمین اولیه زد. در این جا مقاومت داخلی باتری  $R_{batt}=0.065 \text{ Ohm}$  فرض شده است.

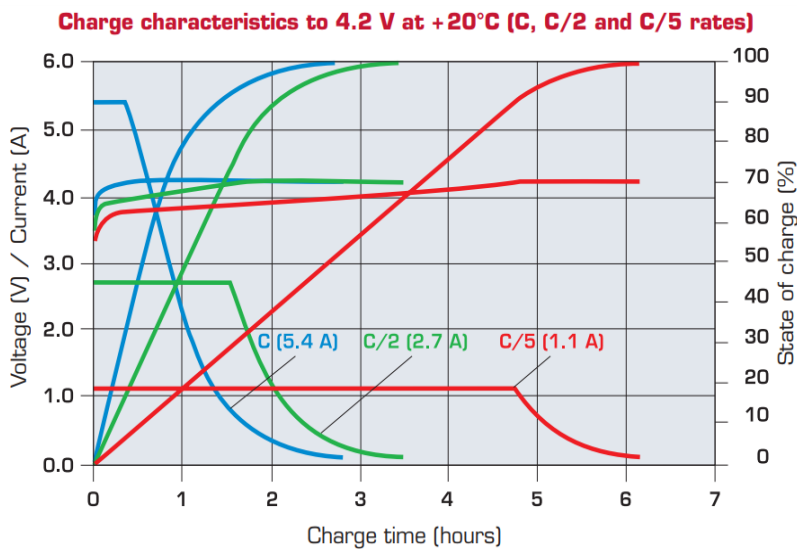
## ۱۶-۳-۲- گام دوم - تخمین مقادیر پارامترها از روی

### منحنی تخلیه‌ی باتری

منحنی تخلیه‌ی باتری که در دیتاشیت باتری موجود است، در شکل زیر نمایش داده شده است. از روی این منحنی می‌توان برای پارامترها تخمینی اولیه زد.



(شکل ۱۶.۶): منحنی تخلیه‌ی باتری



(شکل ۷.۱۶): مشخصه‌های شارژ

با استفاده از منحنی تخلیه در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (۱/۱ آمپر)، مقادیر زیر

برای پارامترها به‌دست می‌آیند:

$$E_{full} = 4,2V$$

$$E_{top} = 3,75V$$

$$Q_{top} = 2,5Ah$$

$$E_{nom} = 3,6V$$

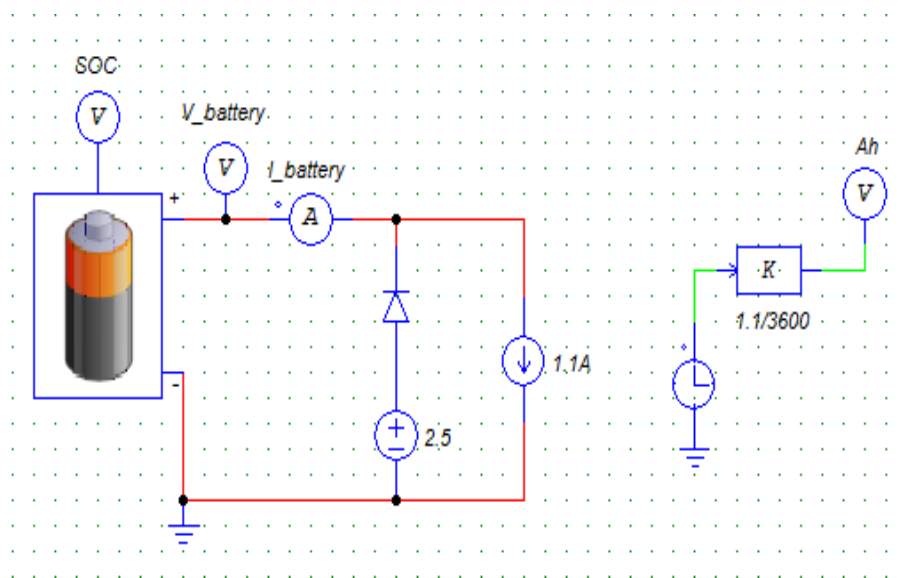
$$Q_{nom} = 5,2Ah$$

$$Q_{\max} = 5,6 \text{ Ah}$$

ضریب  $K_c$  نیز در  $1/0.2$  تنظیم شده است. دقت کنید که به جز  $E_{\text{full}}$  و  $Q_{\max}$  مابقی مقادیر تقریبی هستند. برای تطبیق بهتر منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی با منحنی‌های دیتاشیت، مقادیری که تقریبی هستند باید تنظیم شوند.

## ۱۶-۳-۳- گام سوم - تنظیم دقیق پارامترها

بعد از به دست آوردن پارامترها، باید منحنی‌های شارژ و تخلیه با شبیه‌سازی به دست آیند. مدار زیر مربوط به تخلیه‌ی باتری است.



(شکل ۸.۱۶): مدار تخلیه باتری



پارامترهای مربوط به باتری نیز به صورت زیر تنظیم شده است:

Parameter	Value	Display
Name	S1	<input type="checkbox"/>
No. of Cells in Series	1	<input type="checkbox"/>
No. of Cells in Parallel	1	<input type="checkbox"/>
Voltage Derating Factor	1	<input type="checkbox"/>
Capacity Derating Factor	1	<input type="checkbox"/>
Rated Voltage	3.7	<input type="checkbox"/>
Discharge Cut-off Voltage	2.5	<input type="checkbox"/>
Rated Capacity	5.4	<input type="checkbox"/>
Internal Resistance	0.065	<input type="checkbox"/>
Discharge Current	1.1	<input type="checkbox"/>
Capacity Factor	1.02	<input type="checkbox"/>
Full Voltage	4.2	<input type="checkbox"/>
Exponential Point Voltage	3.75	<input type="checkbox"/>
Nominal Voltage	3.6	<input type="checkbox"/>
Maximum Capacity	5.6	<input type="checkbox"/>
Exponential Point Capacity	2.5	<input type="checkbox"/>
Nominal Capacity	5.2	<input type="checkbox"/>
Initial State of Charge	1	<input type="checkbox"/>

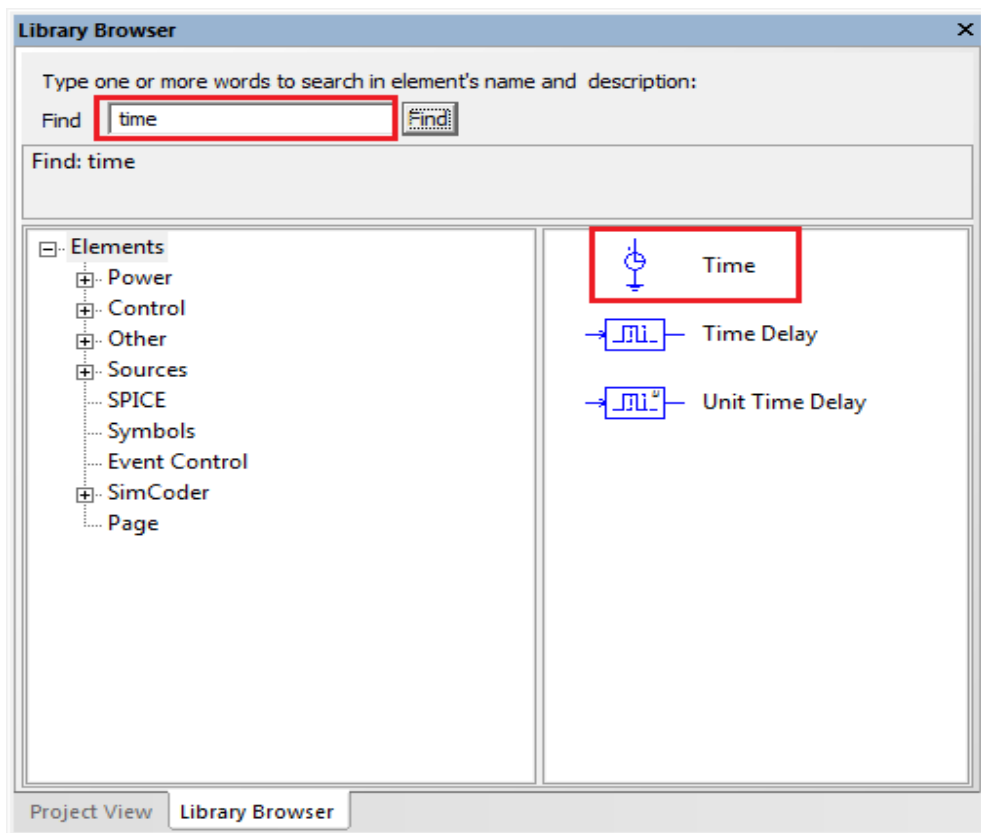
(شکل ۹.۱۶): تنظیمات باتری

در این مدار از یک منبع جریان ۱/۱ آمپر استفاده شده است تا باتری را تخلیه کند.

دقت کنید که در منحنی تخلیه محور افقی برحسب آمپر ساعت است؛ بنابراین زمان که

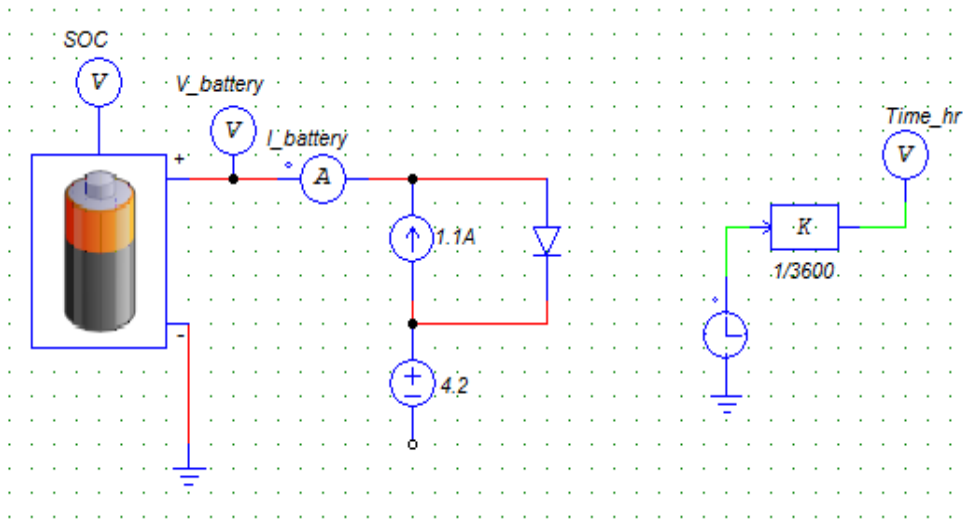
در نرم‌افزار برحسب ثانیه است به ۳۶۰۰ تقسیم شده تا به ساعت تبدیل شود و همچنین در ۱/۱ نیز ضرب شده تا آمپرساعت به دست آید.

المانی که خروجی آن زمان است، با جستجوی Time در کتابخانه‌ی نرم‌افزار قابل دستیابی است:



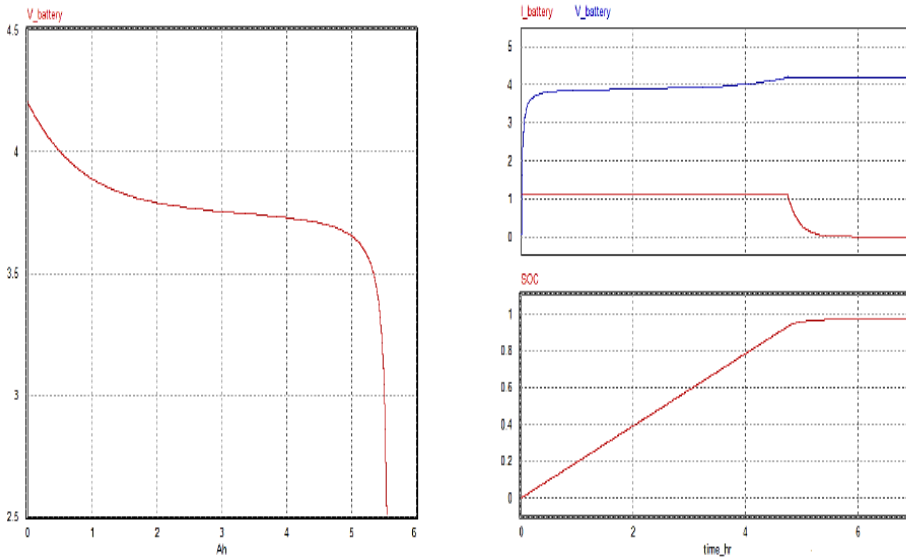
(شکل ۱۰.۱۶): کتابخانه نرم‌افزار

مدار مربوط به شارژ باتری نیز به صورت زیر طراحی می شود:



(شکل ۱۱.۱۶): مدار شارژ باتری

معمولاً مدار واقعی شارژ باتری شامل یک مدار کنترل جریان است که جریان شارژ و ولتاژ باتری را کنترل می کند. مدار فوق شکل بسیار ساده شده ی یک مدار شارژ واقعی است. فرایند شارژ شامل دو مرحله است: شارژ با جریان ثابت و شارژ با ولتاژ ثابت. در مرحله ی اولیه ی شارژ جریان شارژ به  $1/1$  آمپر محدود شده است و زمانی که ولتاژ باتری به  $4/2$  ولت نزدیک شود، مرحله ی شارژ با ولتاژ ثابت آغاز می شود. نمودارهای زیر مشخصه های د شارژ و شارژ باتری را بر اساس پارامترهای اولیه نمایش می دهند که از شبیه سازی به دست آمده اند.



(شکل ۱۲.۱۶): مشخصه‌های دشارژ و شارژ باتری

با توجه به این منحنی‌ها می‌توان نتایج زیر را گرفت:

✓ در منحنی تخلیه، در ناحیه‌ی نامی منحنی نسبت به پروفیل دیتاشیت گردتر

می‌چرخد

✓ در منحنی شارژ، حالت شارژ (SOC) در حدود ۰/۹۷ (۹۷٪) باقی می‌ماند در

حالی که ولتاژ به مقدار شارژ کامل رسیده است. همچنین جریان شارژ در مقایسه

با دیتاشیت با سرعت بیشتری تا صفر کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل

ساده‌سازی بیش از حد مدار شارژ باشد

در حالت ایده‌آل وقتی باتری شارژ می‌شود، ولتاژ اولیه‌ی باتری باید زمانی به مقدار حداکثر برسد که حالت شارژ صد در صد می‌شود و در زمان تخلیه باتری نیز وقتی ولتاژ به صفر برسد حالت شارژ نیز صفر می‌شود. برای تطبیق بهتر منحنی‌های شبیه‌سازی شده با منحنی‌های موجود در دیتاشیت، برخی از پارامترها نیاز به اصلاح دارند.

### ✓ تنظیم نقطه‌ی top که در آن ناحیه‌ی نمایی پایان می‌پذیرد:

برای مقادیر یک‌سان  $Q_{top}$ ، مقدار  $E_{top}$  از روی دیتاشیت به صورت تقریبی خوانده می‌شود. افزایش جزئی  $E_{top}$  سرعت تغییرات ولتاژ را به‌ویژه در شروع فرایند شارژ/تخلیه آهسته‌تر می‌کند.

### ✓ تنظیم نقطه‌ی nom که در آن ناحیه‌ی نامی پایان می‌پذیرد:

در ولتاژ نامی  $E_{nom}$  مقدار  $Q_{nom}$  از روی دیتاشیت به صورت تقریبی خوانده می‌شود. افزایش جزئی مقدار  $Q_{nom}$  سرعت تغییرات ولتاژ را آهسته‌تر خواهد کرد.

### ✓ تنظیم ظرفیت حداکثر:

اگر مقدار  $Q_{max}$  خیلی زیاد تخمین زده شود، منجر به شرایط نادرست می‌شود به این معنی که حتی وقتی که ولتاژ باتری به مقدار حداکثر برسد در آن باتری کامل شارژ نشده است ( $SOC < 100\%$ ). هم‌چنین اگر مقدار  $Q_{max}$  خیلی زیاد یا

مقدار  $Q_{nom}$  خیلی پایین باشد، گوشه‌ی منحنی تخلیه در انتهای ناحیه‌ی نامی  
گرددتر می‌شود در غیر این صورت تیزتر می‌گردد.

### ✓ تنظیم مقاومت داخلی باتری:

مقاومت داخلی باتری زمانی روی منحنی شارژ تاثیر می‌گذارد که شارژ باتری  
شامل دو مرحله‌ی با جریان ثابت و با ولتاژ ثابت باشد. مقاومت بزرگتر نقطه‌ی  
گذار از جریان ثابت به ولتاژ ثابت را به نقطه‌ای انتقال می‌دهد که در آن مقدار  
ولتاژ کم‌تر است که در نتیجه می‌تواند منجر به توقف شارژ باتری قبل از رسیدن  
به شارژ کامل شود.

دقت داشته باشید که شاید برای رسیدن به یک تخمین خوب نیاز به چندین تکرار و  
آزمون و خطا باشد.

در این فصل با مدل باتری لیتیوم یونی و پارامترهای مربوط به آن آشنا شدید و فرا  
گرفتید که چگونه برای یک باتری مشخص، پارامترهای مربوط به آن را به درستی در  
شبیه‌سازی وارد کنید.

- ۱- الکترونیک قدرت – دکتر رشید
- ۲- الکترونیک قدرت – دکتر اریکسون
- ۳- الکترونیک قدرت – دکتر هارت
- ۴- الکترونیک قدرت – دکتر موهان
- ۵- ماشین‌های الکتریکی – دکتر پی‌س‌سن
- ۶- ماشین‌های الکتریکی – دکتر بیم‌بهارا
- ۷- ماشین‌های الکتریکی – دکتر چاپمن
- ۸- ماشین‌های الکتریکی با کاربردهایی از الکترونیک قدرت – دکتر هاواری
- ۹- مبانی الکترونیک جلد ۱ و ۲ – دکتر میرعشقی
- ۱۰- مدارهای الکترونیک – دکتر گری‌می

