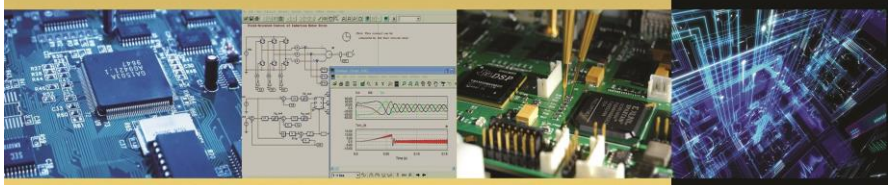
آموزش مقدماتی تا پیشرفته نرم افزار شبیه سازی PSIM

نرم افزار قدرتمند در حوزه الکترونیک قدرت، درایو، الکترونیک



مجتبی اسماعیلی
حسین کاظمی

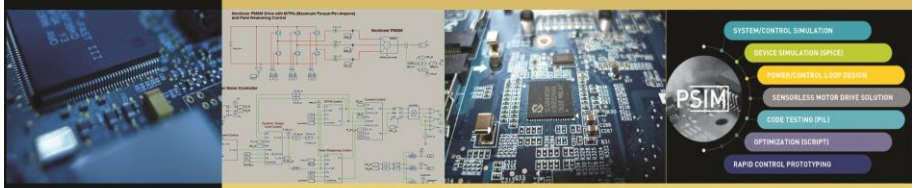
www.powerplantac.com

نرم‌افزار PSIM با Powersim یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی شبیه‌سازی مدارات الکترونیک قدرت نظیر منابع تغذیه (سوئیچینگ، تریستوری، دیودی و ...)، چاپرها، درایو موتور، مبدل‌ها و سیستم‌های کنترل است. به دلیل سرعت و دقت بالای این نرم‌افزار در شبیه‌سازی مدارات الکترونیک قدرت، از آن می‌توان در شبیه سازی مبدل‌های الکترونیک قدرت با هر اندازه‌ای استفاده کرد.

کتابخانه‌ی کنترل نرم‌افزار PSIM لیست جامعی از اجزا و بلوک توابع فراهم می کند که از طریق آن‌ها می‌توان مدارهای کنترلی را در شکل‌های مختلف از قبیل مدار آنالوگ، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه‌ی s، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه‌ی z، کد C یا سیمولینک MATLAB شبیه‌سازی 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 به‌دست آوردن نقاط تلاقی آن‌ها
- قابلیت ایجاد ارتباط با نرم‌افزار 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.



www.powerplantac.com

مقدمه مولف

نرم‌افزار PSIM یا Powersim یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی شبیه‌سازی مدارات الکترونیک قدرت نظیر منابع تغذیه (سوئیچینگ، تریستوری، دیودی و ...)، چاپرها، درایو موتور، مبدل‌ها و سیستم‌های کنترل است. به دلیل سرعت و دقت بالای این نرم‌افزار از آن می‌توان در شبیه‌سازی مبدل‌های الکترونیک قدرت با هر ابعادی استفاده کرد. کتابخانه‌ی کنترل نرم‌افزار PSIM لیست جامعی از اجزا و بلوک توابع فراهم می‌کند که بوسیله‌ی آن‌ها می‌توان مدارهای کنترلی را در شکل‌های مختلف از قبیل مدار آنالوگ، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه‌ی s، نمودار بلوکی تابع تبدیل حوزه‌ی z، کد C یا سیمولینک MATLAB شبیه‌سازی کرد.

سایر ویژگی‌های این نرم‌افزار عبارت‌اند از:

- ✓ 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 به‌دست آوردن نقاط تلاقی آن‌ها
- ✓ قابلیت ایجاد ارتباط با نرم‌افزار MATLAB/Simulink

نرم‌افزار 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 می باشد.

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 تو ضیحات کامل‌تری، برای آموزش نکات اولیه جهت انجام شبیه سازی 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، احســـان 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 بزرگوارم، آقایان عبدالحسین حویزه و سعید نصیری زرندی تقدیر و تشکر فراوان دارم.

مجتبی اسماعیلی

m.esmaeili.ee@gmail.com

پاییز ۱۳۹۷

فهرست

فصل ۱ " محیط نرم افزار" ۱

فصل ۲ " شبیه‌سازی دیود غیر خطی"..... ۱۱

فصل ۳ " کنترل یک سوئیچ تریستوری"..... ۵۱

فصل ۴ " شبیه‌سازی یکسوساز سه‌فاز تریستوری"..... ۷۷

فصل ۵ " شبیه‌سازی مبدل DC به DC با کنترل جریان متوسط"..... ۹۹

فصل ۶ " شبیه‌سازی اینورتر منبع ولتاژ تک‌فاز"..... ۱۱۹

فصل ۷ " شبیه‌سازی اینورتر منبع ولتاژ سه‌فاز"..... ۱۲۹

فصل ۸ " شبیه‌سازی یکسوساز PWM سه‌فاز"..... ۱۴۱

فصل ۹ " شبیه‌سازی یک فیلتر اکتیو سه‌فاز"..... ۱۵۷

فصل ۱۰ " آشنایی با بارها و سنسورهای مکانیکی"..... ۱۷۳

فصل ۱۱ " شبیه‌سازی 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 السّلام):

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 مقرّب خداست...

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

سلام بر تو وقتی در «لیلۀ 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 نرم‌افزار PSIM را نشان می‌دهد که شامل بخش‌های زیر می باشد.

۱- منوی اصلی

۲- نوار ابزار

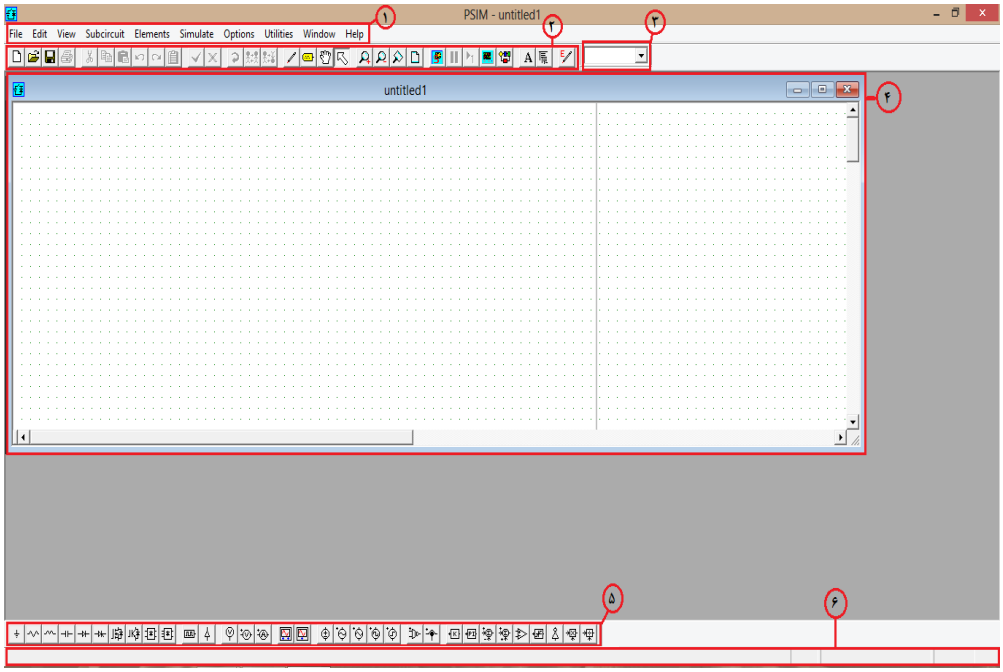
۳- لیست المان‌هایی که اخیرا استفاده شده‌اند (با استفاده از این لیست کشویی می‌توانید لیست المان‌هایی که اخیرا استفاده کرده‌اید را مشاهده کنید)

۴- پنجره‌ی ترسیم مدارات الکتریکی

www.powerplantac.com

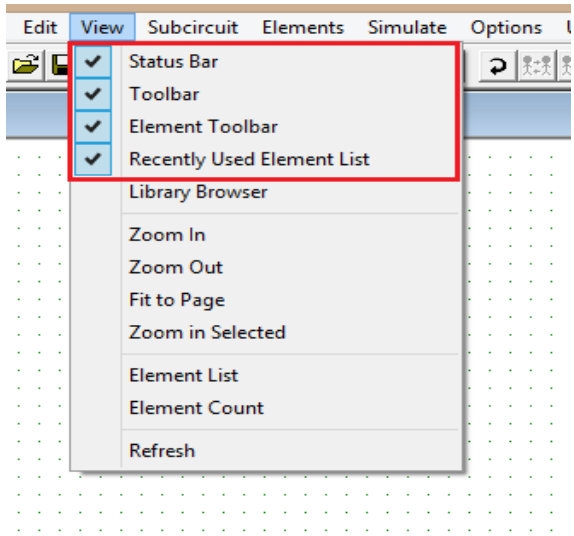
۵- نوار ابزار المان‌های پرکاربرد

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 ابراز، لیست المان‌های اخیرا 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

تو ضیحات مربوط به عملکرد هر یک از المان های نوار ابزار در ق سمت 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 به خط افقی
اتصال سیم	ایجاد برچسب روی مدار رسم‌شده
جابجایی صفحه	انتخاب المان
ابزار بزگنمایی 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

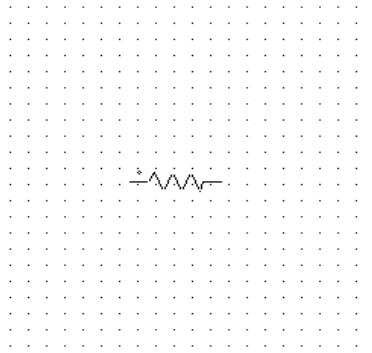
۱–۳– نوار ابزار المان‌های پرکاربرد

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

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

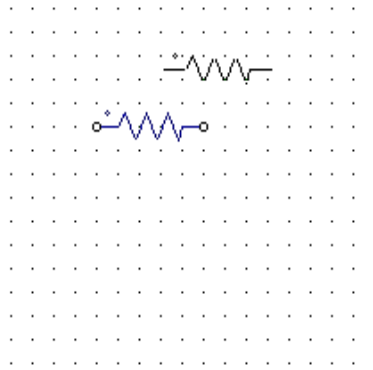
المان‌های خازن، سلف و مقاومت می باشد.

برای انتخاب المان‌های فوق روی آن‌ها کلیک می‌کنیم، با این کار نشـــانگر ماوس به شـــکل آن المان تبدیل می‌شـــود. برای مثال با انتخاب مقاومت از نوار ابزار المان‌ها شـــکل ماوس به‌صورت زیر خواهد شد.



(شکل ۳.۱): انتخاب مقاومت

با کلیک چپ ماوس المان در محل مورد نظر قرار می‌گیرد، شـــکل زیر این حالت را نشان می‌دهد.

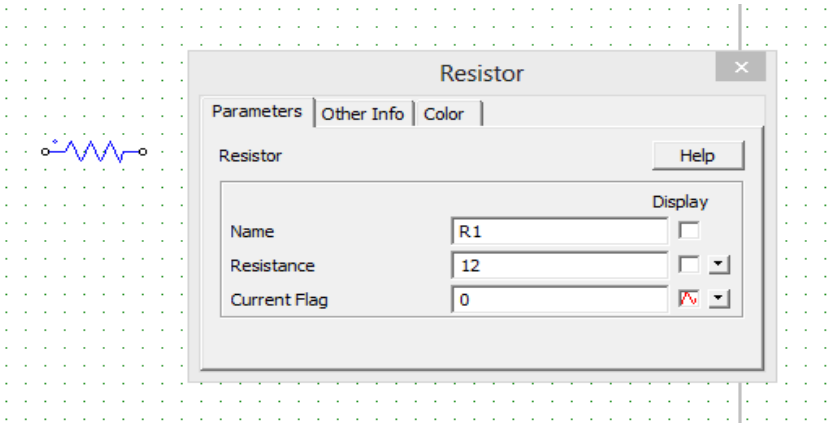


(شکل ۴.۱): پیاده سازی مقاومت

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که سر نقطه‌دار مقاومت، جهت مثبت آن را نشـــان می‌دهد، به این‌صـــورت که اگر جریان از این نقطه وارد شـــود 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 شـــکل 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.

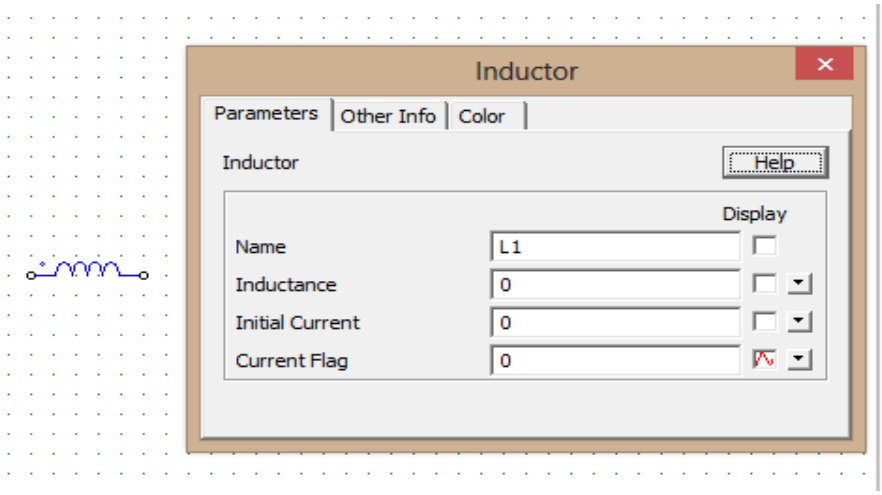


(شکل ۵.۱): تنظیمات مقاومت

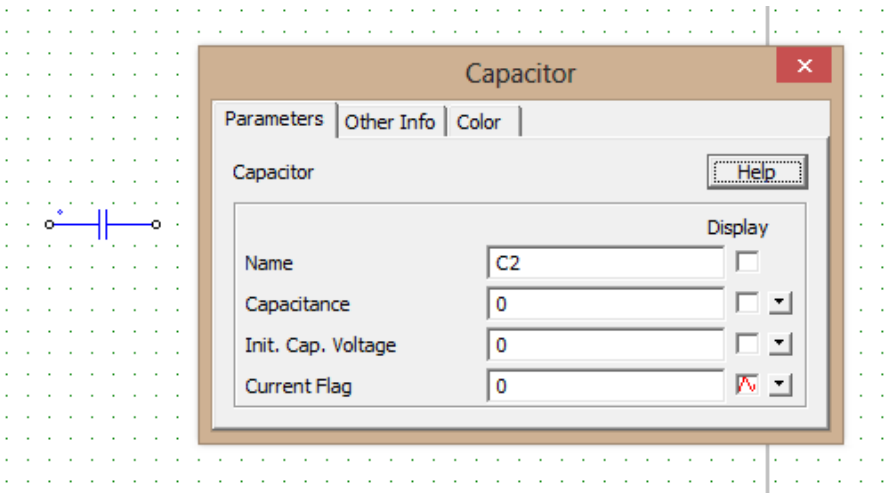
در این پنجره می‌توان نام مقاومت و اندازه‌ی مقامت را (بر حســب اهم) تعیین کرد. اگر در قســمت Display تیک مربوطه زده شــود، نام مقاومت و یا اندازه‌ی آن روی مقاومت نمایش داده می‌شود. گزینه‌ی دیگری که در پنجره دیده می‌شود Current Flag است که در کادر مقابل مقادیر صــفر یا یک را می‌توان قرار داد. اگر در این کادر عدد یک را قرار دهیم، جریان عبوری از مقاومت نســبت به زمان، در خروجی شــبیه‌ســازی نمایش داده خواهد شد.

www.powerplantac.com

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

www.powerplantac.com

با اســتفاده از این پنجره‌ها می‌توان نام، اندازه (بر حســب فاراد برای خازن و بر حســب 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 می‌شـــود و می‌توان تنظیمات مربوط به آن المان را انجام داد. با اســـتفاده از گزینه‌ی Help موجود در این پنجره می‌توان اطلاعات مفیدی در خصـــوص المان مربوطه و تنظیمات آن به‌دست آورد.

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

دیود

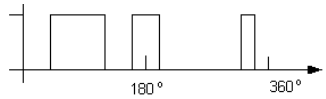
تریستور

سوئیچ نوع MOSFET

سوئیچ نوع IGBT

پل دیودی تک‌فاز

پل دیودی سه‌فاز

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)

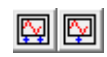
www.powerplantac.com

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)

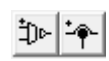
پروب ولتاژ (که ولتاژ بین گرهی که به آن متصل است را نسبت به زمین اندازه‌گیری می‌کند)

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

پروب جریان

 به ترتیب از راست به چپ اسکوپ‌های یک‌کاناله 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 را ست 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: تقسیم کننده، ضرب‌کننده، گیت NOT، محدود کننده، مقایسه‌گر، جمع‌کننده، تفریق‌کننده، کنترل‌کننده‌ی PI و کنترل‌کننده‌ی تناسبی

www.powerplantac.com

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

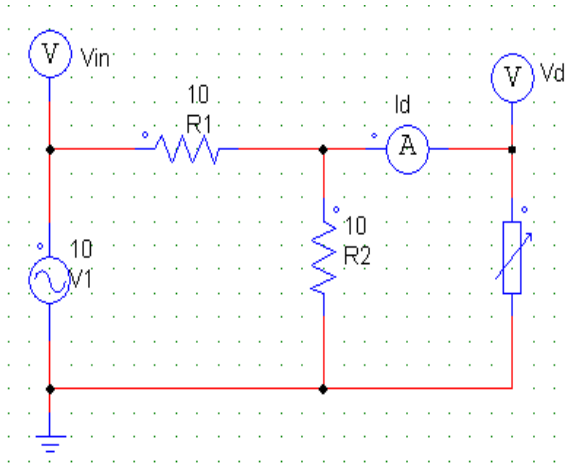
فصل دوم

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.

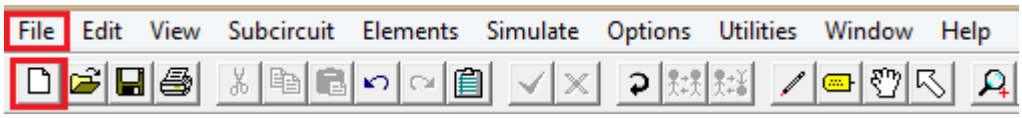
۲–۱– طرح مدار



(شکل ۱.۲): مدار دیود غیرخطی

۲–۲– اجرای شبیه‌سازی

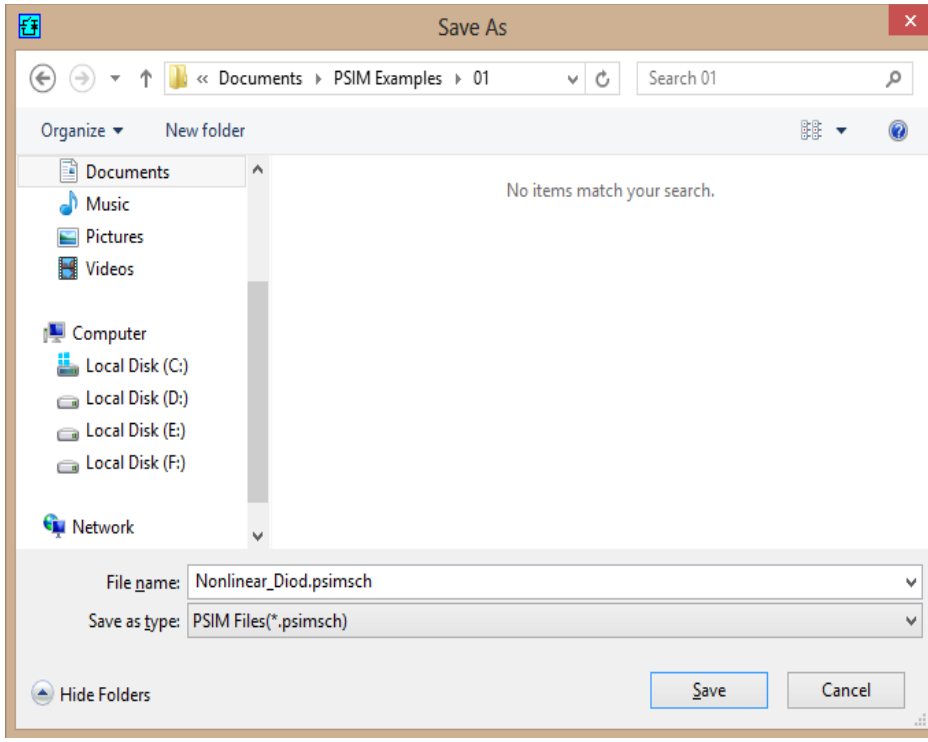
پس از باز کردن نرم‌افزار PSIM، با استفاده از ابزار 🗋 از نوار اصلی یا بوسیله‌ی مسیر File→ New یا با فشردن کلیدهای Ctrl+N یک پروژه‌ی جدید ایجاد می‌کنیم.



(شکل ۲.۲): مسیر ایجاد پروژه جدید

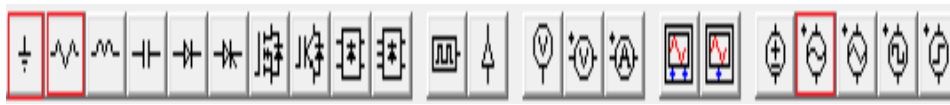
www.powerplantac.com

سـپس از مسـیر File → Save As شـبیه‌سـازی را در دایرکتوری مورد نظر ذخیره می‌کنیم. در این‌جا شبیه‌سازی با نام Nonlinear_Diod ذخیره شده است.



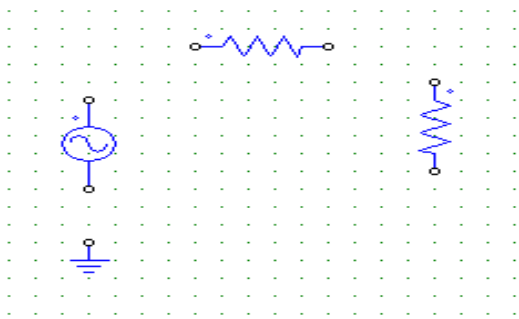
(شکل ۳.۲): مسیر ذخیره‌سازی و نام‌گذاری

المان‌های مورد نیاز برای این شـبیه‌سـازی را می‌توان از نوار ابزار المان‌ها طبق شـکل زیر انتخاب کرد.



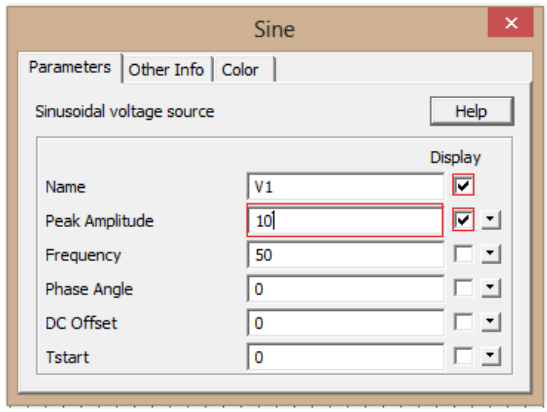
(شکل ۴.۲): نوار ابزار انتخاب المان

وقتی که یک المان را انتخاب کردیم و شکل ماوس به صورت آن المان درآمد، می‌توان با کلیک راست ماوس آن را چرخاند. اگر المان روی صفحه‌ی ترسیم مدار قرار داشته باشد، آن را انتخاب کرده و با استفاده از ابزار از نوار ابزار اصلی آن را می‌چرخانیم. با توجه به نکات فوق، شکل اولیه‌ی مدار را به‌صورت زیر ترسیم می‌شود.



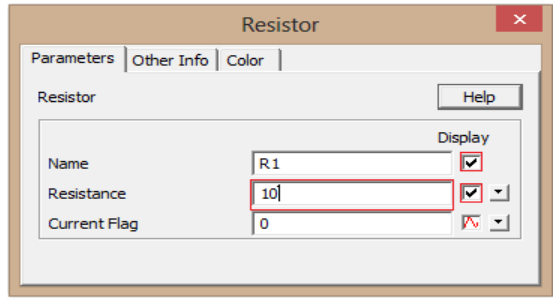
(شکل ۵.۲): المان‌های انتخاب شده

با دوبار کلیک کردن روی المان‌های فوق، پارامترهای آن‌ها را به‌صـــورت زیر تنظیم می‌کنیم.

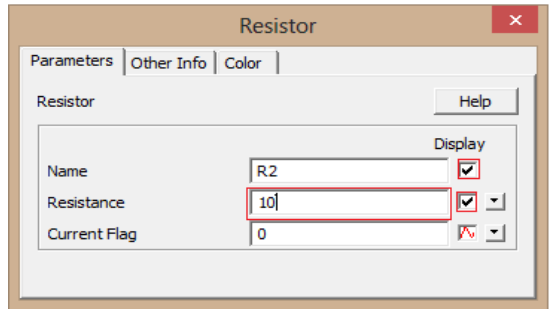


(شکل ۶.۲): تنظیم منبع ولتاژ

www.powerplantac.com



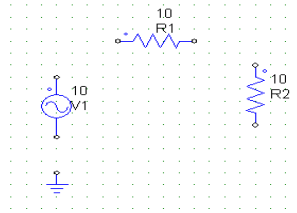
(شکل ۷.۲): تنظیم مقاومت سری



(شکل ۸.۲): تنظیم مقاومت موازی

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

پس از تنظیمات فوق مدار به شکل زیر در می‌آید:

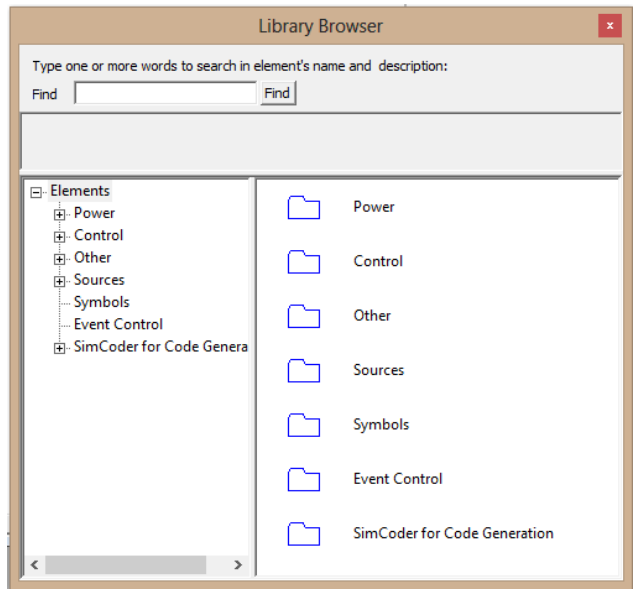


(شکل ۹.۲): اعمال مقدار المان ها

حال باید دیود را به مدار اضـــافه 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 ا ضافه کردن این المان، ابزار را از نـوار ابـزار اصلی انتخاب می‌کنیم. با این کار پنجره‌ای به شکل (۱۱.۲) باز می‌شود.

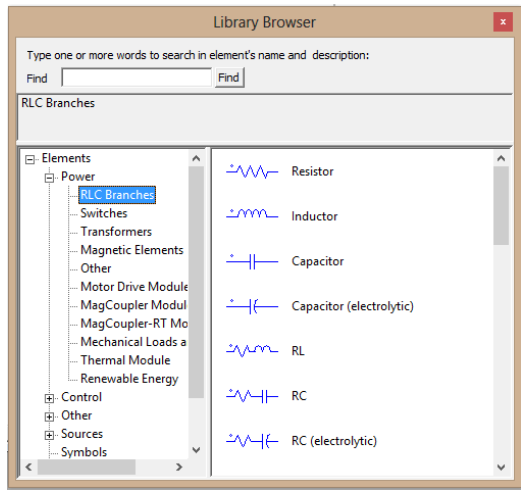
(شکل ۱۰.۲): مسیر انتخاب ابزار Library Browser

البته به این پنجره می‌توان بوسیله‌ی منوی View→Library Browser نیز دسترسی پیدا کرد.



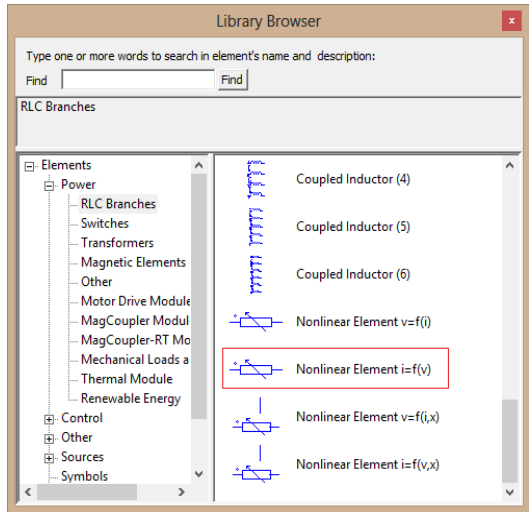
(شکل ۱۱.۲): منوی Library Browser

در سربرگ Power → Elements قسمت RLC Branches را انتخاب می‌کنیم.



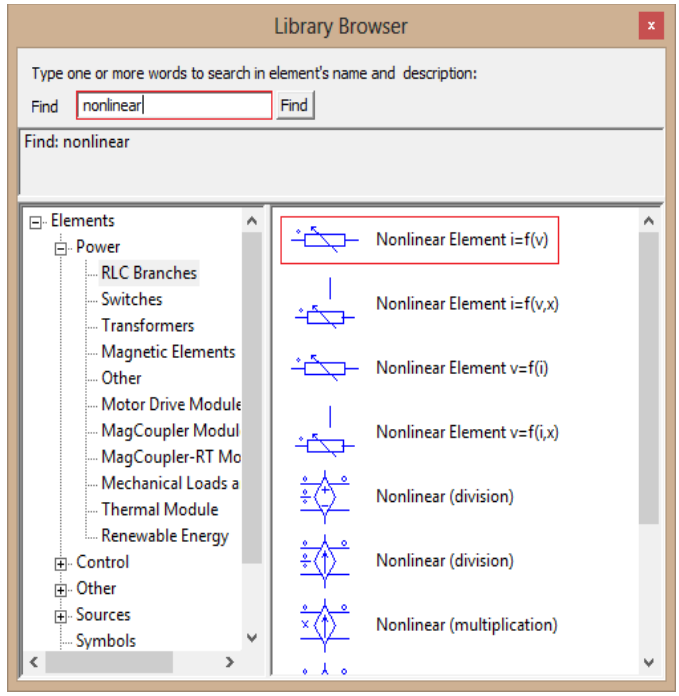
(شکل ۱۲.۲): Library Browser

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



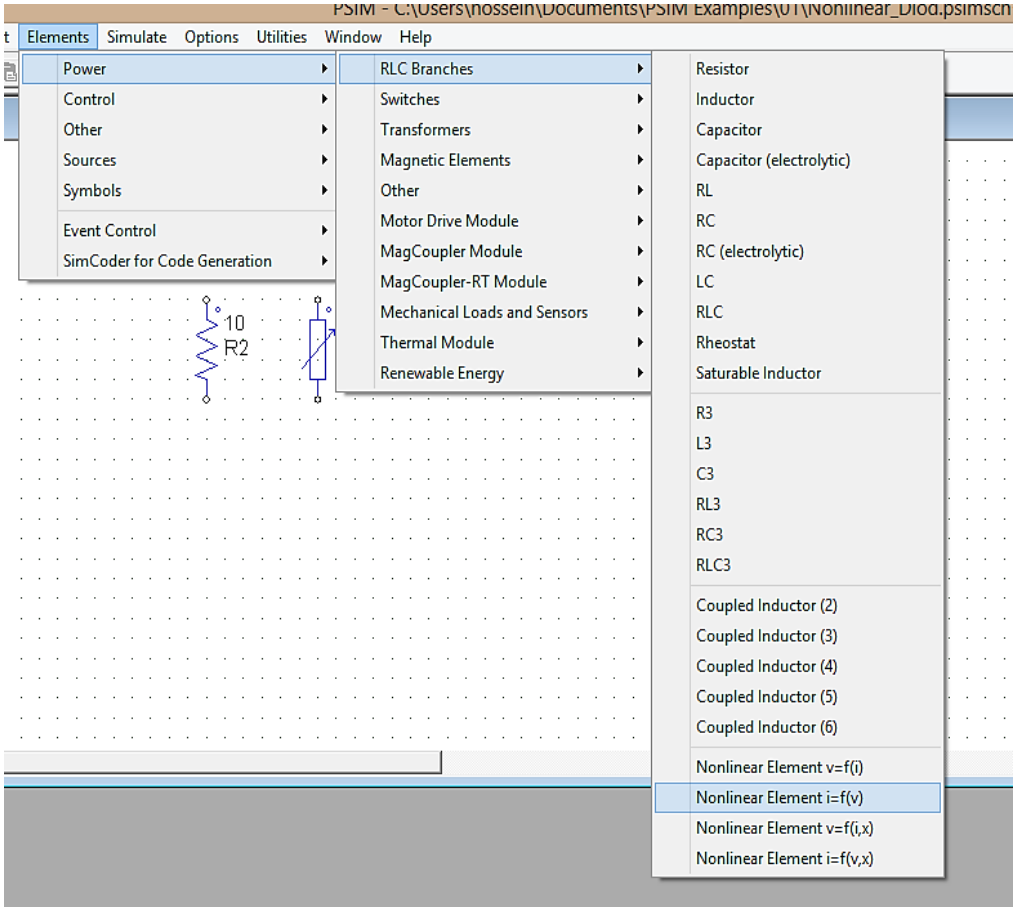
(شکل ۱۳.۲): Library Browser

باید در نظر داشــت که می‌توان نام المان‌ها را در قســمت Find پنجره‌ی کتابخانه نیز جستجو کرد.



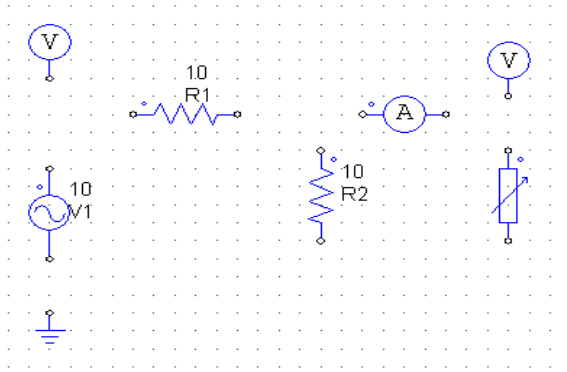
(شکل ۱۴.۲): Library Browser

روش سومی که می‌توان بوسیله‌ی آن به المان‌ها دسترسی پیدا کرد، منوی Elements است.



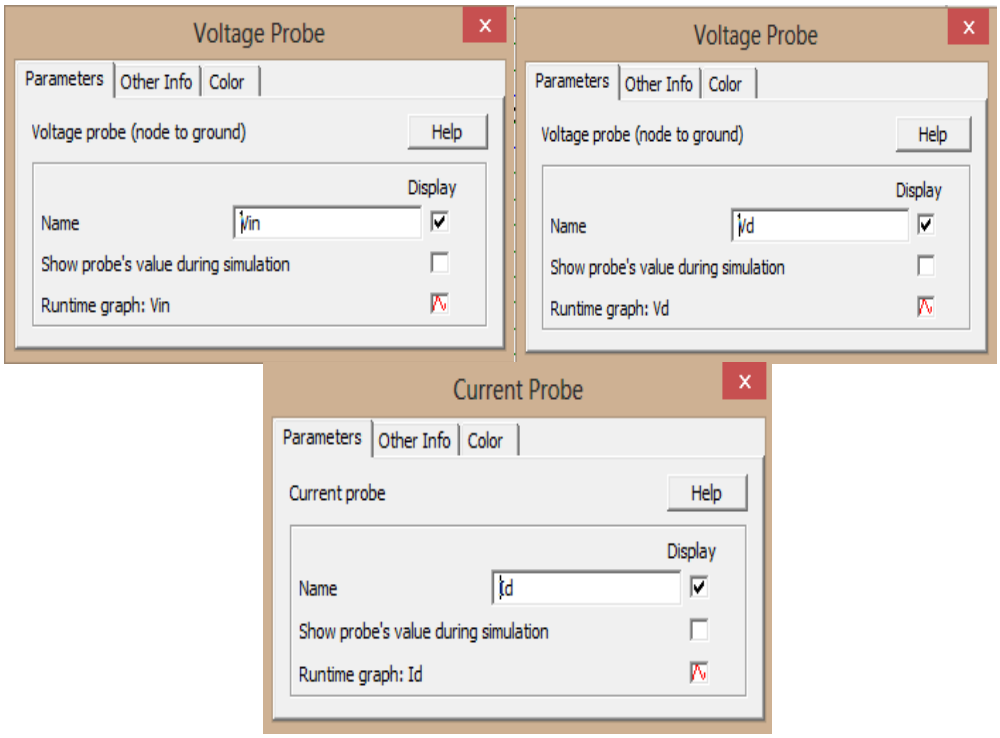
(شکل ۱۵.۲): نوار ابزار Elements

با اضافه کردن پروب‌های ولتاژ و جریان از نوار ابزار المان‌ها مدار به شکل زیر در می‌آید.



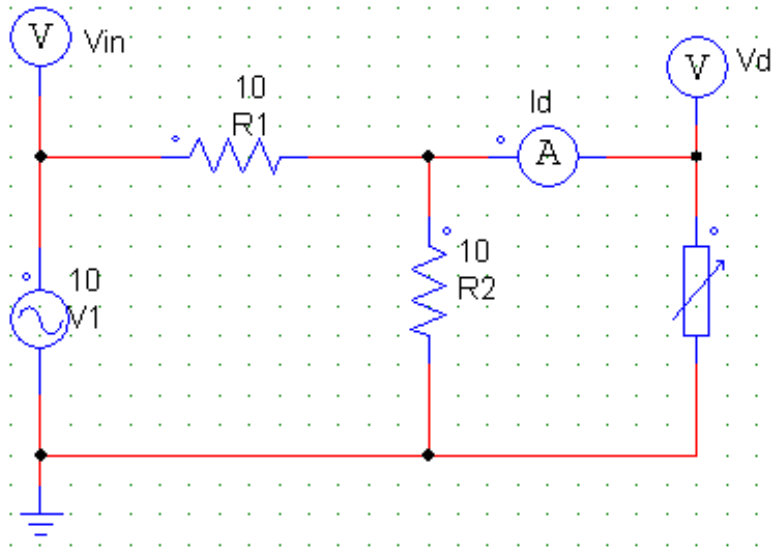
(شکل ۱۶.۲): اضافه کردن پروب‌های ولتاژ و جریان

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



(شکل ۱۷.۲): تنظیمات پروب‌های ولتاژ و جریان

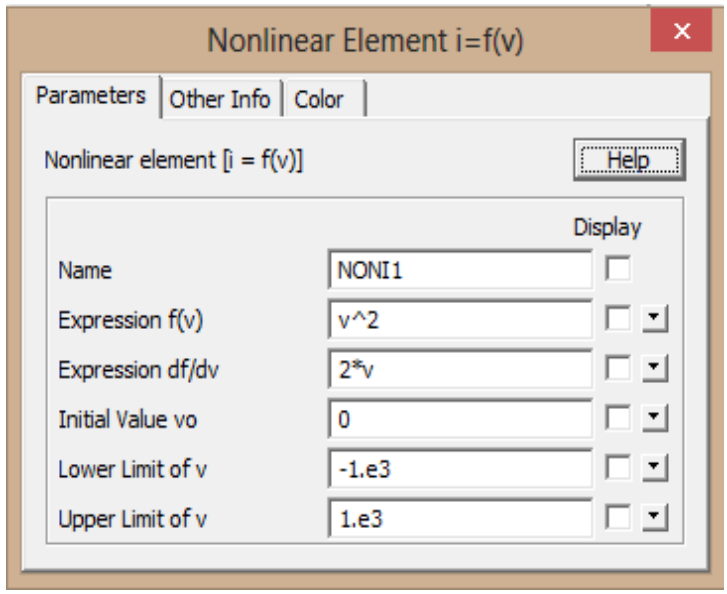
حال برای کشیدن سیم بین المان‌ها ابزار را از نوار ابزار اصلی انتخاب می‌کنیم. برای کشیدن سیم بین دو نقطه کافی است که نشانگر را در نقطه‌ی اول قرار داده و سپس کلیک چپ ماوس را فشار می‌هیم، هم‌چنان که کلیک چپ ماوس را نگه داشته‌ایم، نشانگر را به نقطه‌ی دوم می‌بریم. شکل زیر مدار کامل شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۸.۲): مدار تکمیل شده

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

www.powerplantac.com

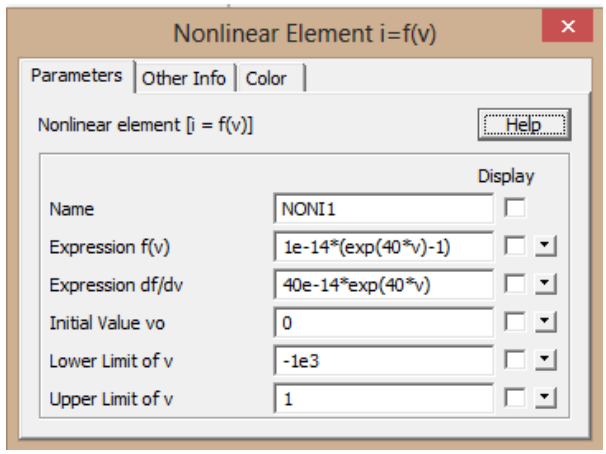


(شکل ۱۹.۲): معادله‌ی المان غیر خطی

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 vo: 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

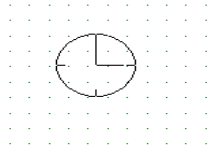
پس از اعمال تنظیمات، نتیجه به‌صورت زیر خواهد بود:



(شکل ۲۰.۲): تنظیمات المان غیرخطی

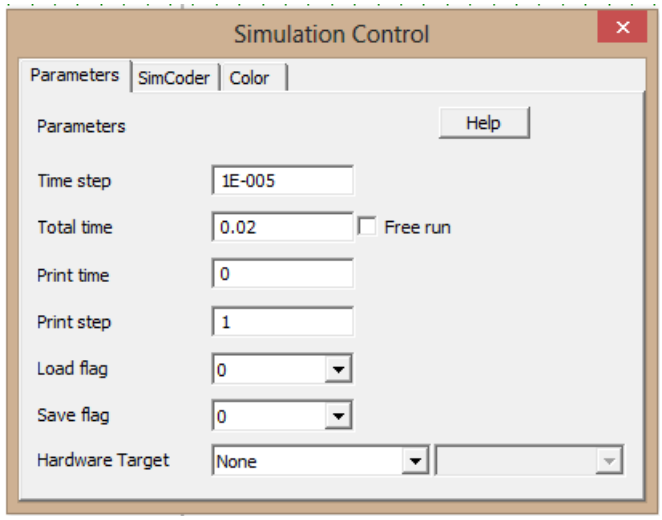
همانطور که می‌دانید e-۱٤ همان $۱۰^{-۱۴}$ و exp(٤٠*v) همان $e^{٤٠*v}$ می‌باشد.

حال مدار آماده‌ی اجرا (Run) است. برای این کار کافی است روی ابزار از نوار ابزار اصـــلی کلیک کنیم یا اینکه Run Simulation را از منوی Simulate انتخاب کنیم. پیش از اجرای شبیه‌سازی از منوی Simulate گزینه‌ی Simulation Control را انتخاب می‌کنیم، با این کار نشانگر ماوس به شکل ساعت در می‌آید، 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:

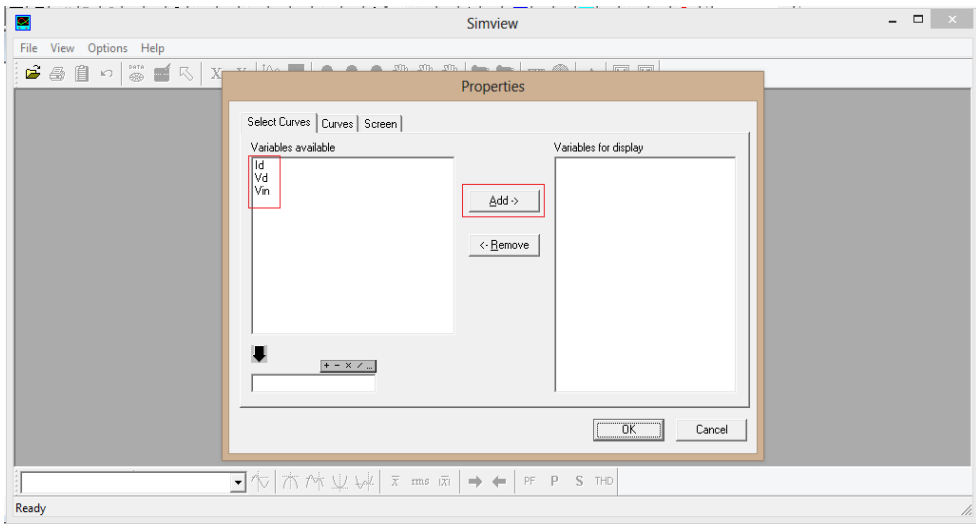
Time step: این گزینه فوا صل بین زمان را م شخص می‌کند. در اینجا شبیه سازی با دقت $۱۰^{-۵}$ ثانیه اجرا می‌شود.

Total time: کل زمان شبیه سازی در اینجا وارد می شود. برای شبیه سازی این مثال زمان ۰,۰۲ ثانیه در نظر گرفته شـــده اســـت. اگر تیک گزینه‌ی Free run زده شـــود، شـــبیه‌ســـازی تا بی‌نهایت ادامه پیدا می‌کند. در این حالت ابزار به شکل در می‌آید و با کلیک کردن روی آن می‌توان شبیه‌سازی را متوقف کرد.

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

اطلاعات مربوط به سایر گزینه‌ها را می‌توان بوسیله‌ی Help موجود در این پنجره به‌دست آورد.

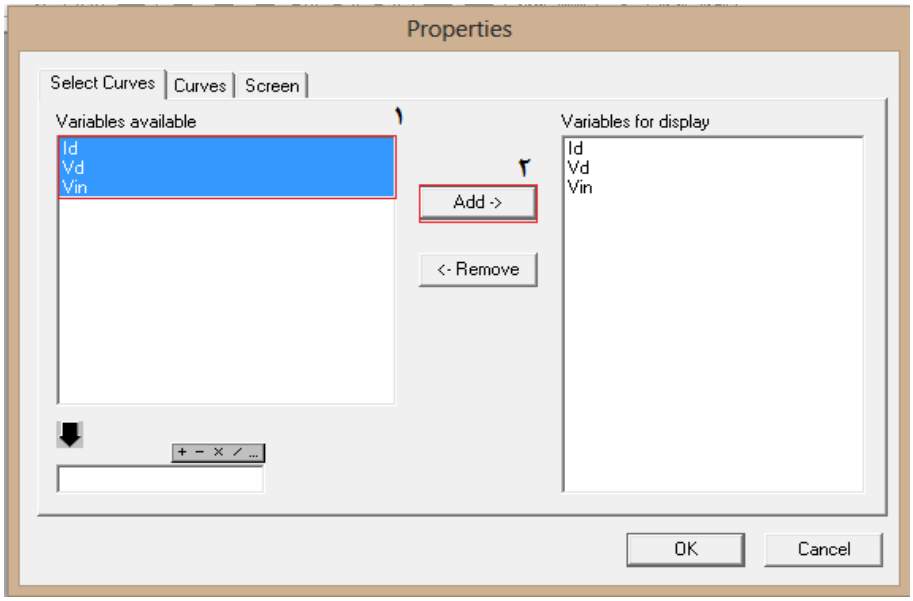
حال پنجره‌ی فوق را بسته و با انتخاب ابزار شبیه‌سازی را اجرا می‌کنیم. پس از اتمام شبیه‌سازی اگر تیک Auto-run SIMVIEW در منوی Option زده شده باشد، پنجره‌ای به شکل (۲۳.۲) نمایش داده می‌شود.



(شکل ۲۳.۲): پنجره تنظیمات المان های قابل نمایش

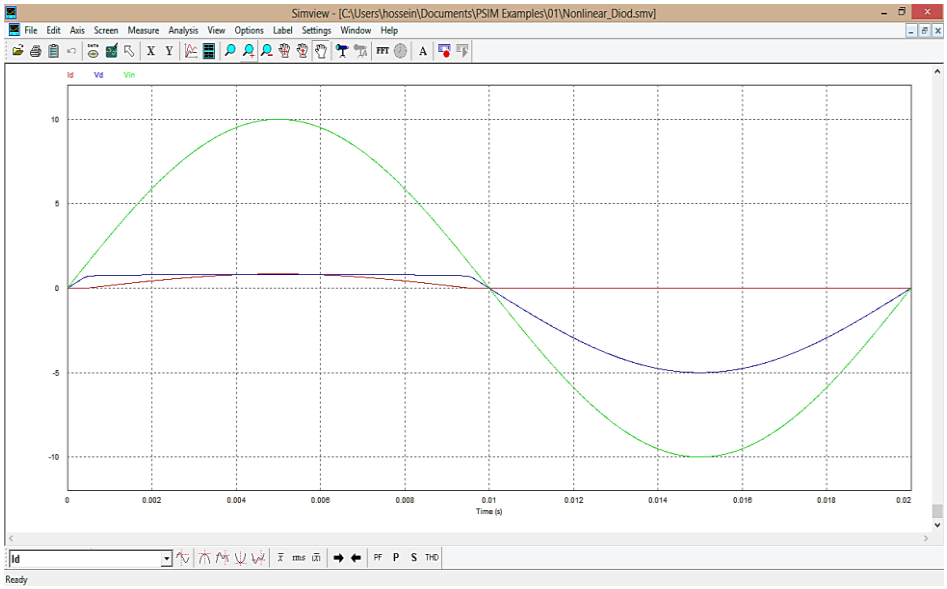
www.powerplantac.com

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.



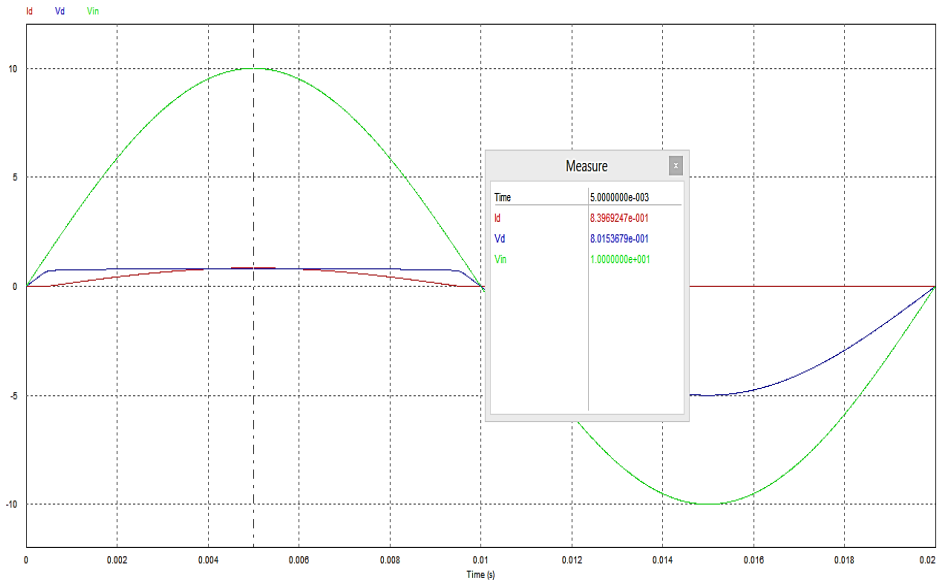
(شکل ۲۴.۲): Variables available

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.

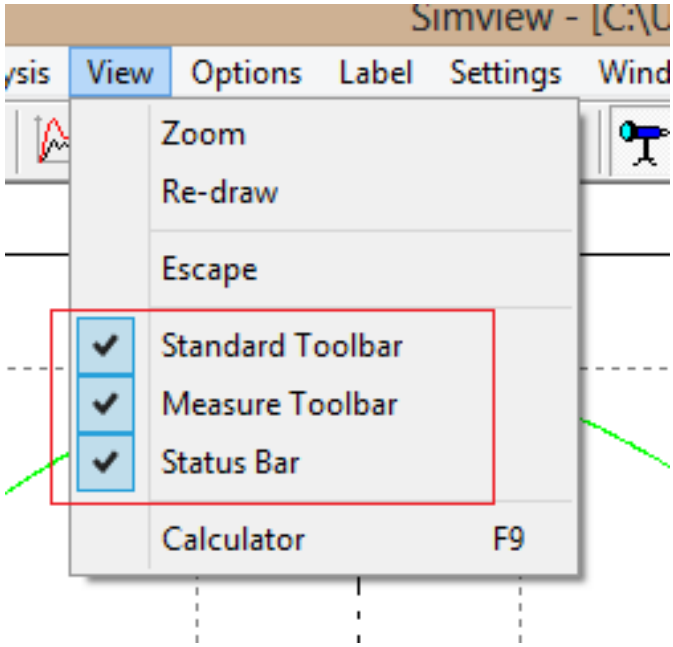


(شکل ۲۶.۲): ابزار نمایش دقیق منحنی ها

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

(شکل ۲۷.۲): ابزار جابجایی دقیق‌تر خط اندازه‌گیری

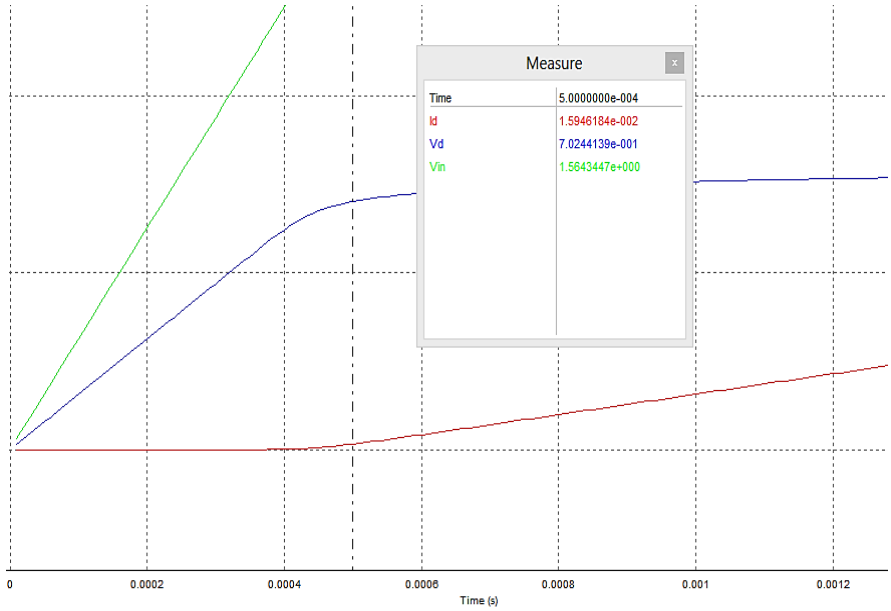
باید در نظر داشت که این ابزارها را می‌توان از منوی View فعال یا غیرفعال کرد.



(شکل ۲۸.۲): منوی View

حال به منحنی‌های به‌دســـت 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 ۰/۸ ولت و جریان عبوری از آن ۰/۸۴ آمپر است. برای بزرگنمایی روی منحنی‌ها می‌توان از ابزارهای استفاده کرد.

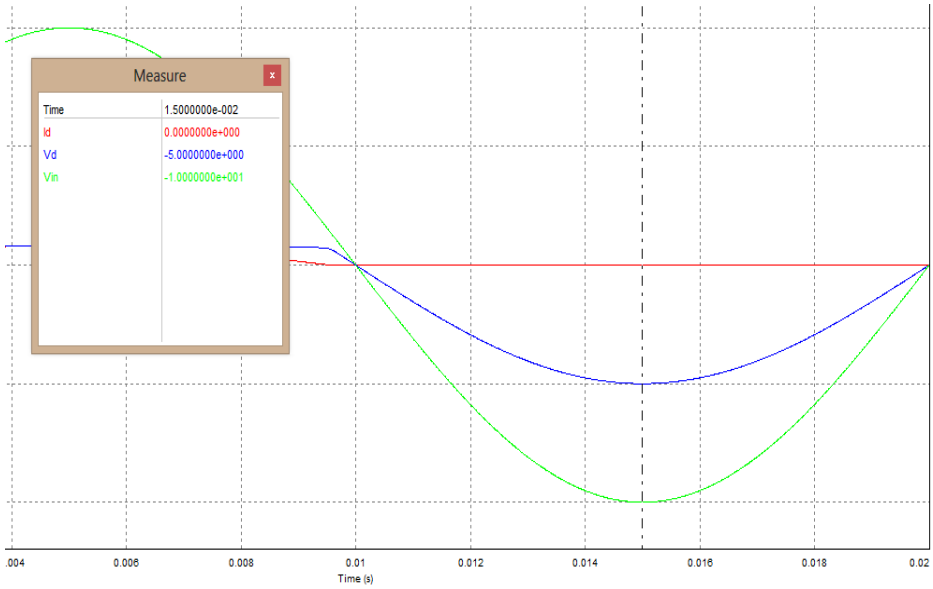
با بزرگنمایی در زمان‌های اولیه‌ی شبیه‌سازی، شکل زیر به‌دست می‌آید.



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

همانطور که مشخص است تا زمانی که ولتاژ دیود به ۰/۷ ولت نرسیده است، جریان آن هم‌چنان صفر است. به محض اینکه ولتاژ به ۰/۷ 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 شـــده و در نتیجه جریان آن برابر صـــفر و ولتاژ آن برابر ولتاژ دو سر مقاومت R_2 است.

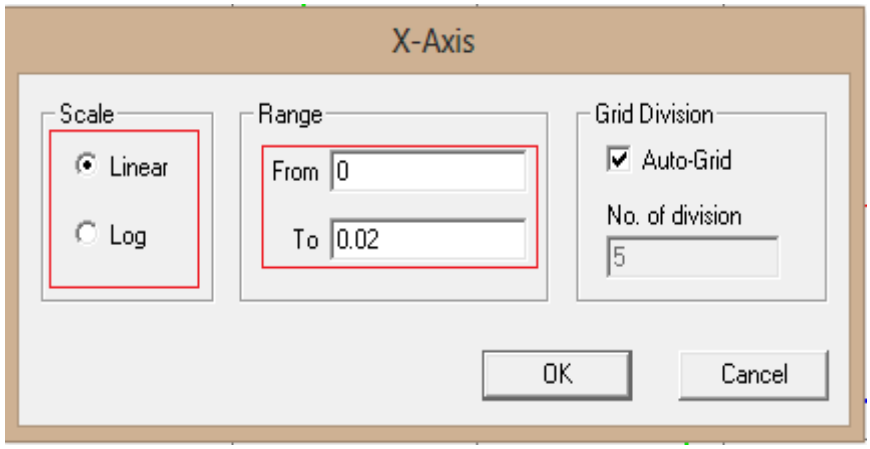
www.powerplantac.com



(شکل ۳۰.۲): نیم سیکل دوم شکل خروجی

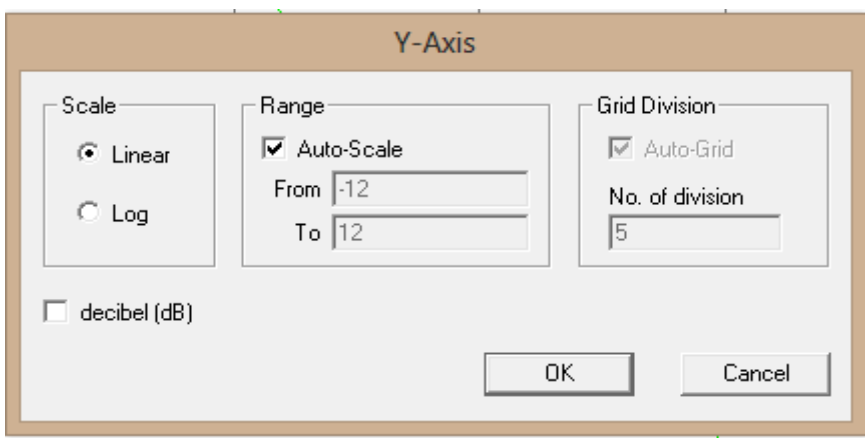
همانطور که ملاحظه می شود نرم‌افزار PSIM می‌تواند تحلیل دقیقی از رفتار مدارهای الکتریکی ارائه دهد. در ادامه توضیحاتی در خصوص سایر ابزارهای موجود در پنجره‌ی Simview خواهیم داد.

به منظور تنظیمات مربوط به محورهای X و Y می‌توان از ابزارهای X و Y موجود در نوار ابزار پنجره‌ی Simview استفاده کرد. تنظیمات موجود برای محور X به‌صورت زیر است:



(شکل ۳۱.۲): تنظیمات محور x

در قسمت Range می‌توان محدوده‌ی نمایش داده شده تو سط 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 تر سیم کرد. شکل زیر تنظیمات مربوط به محور Y را نشان می‌دهد:



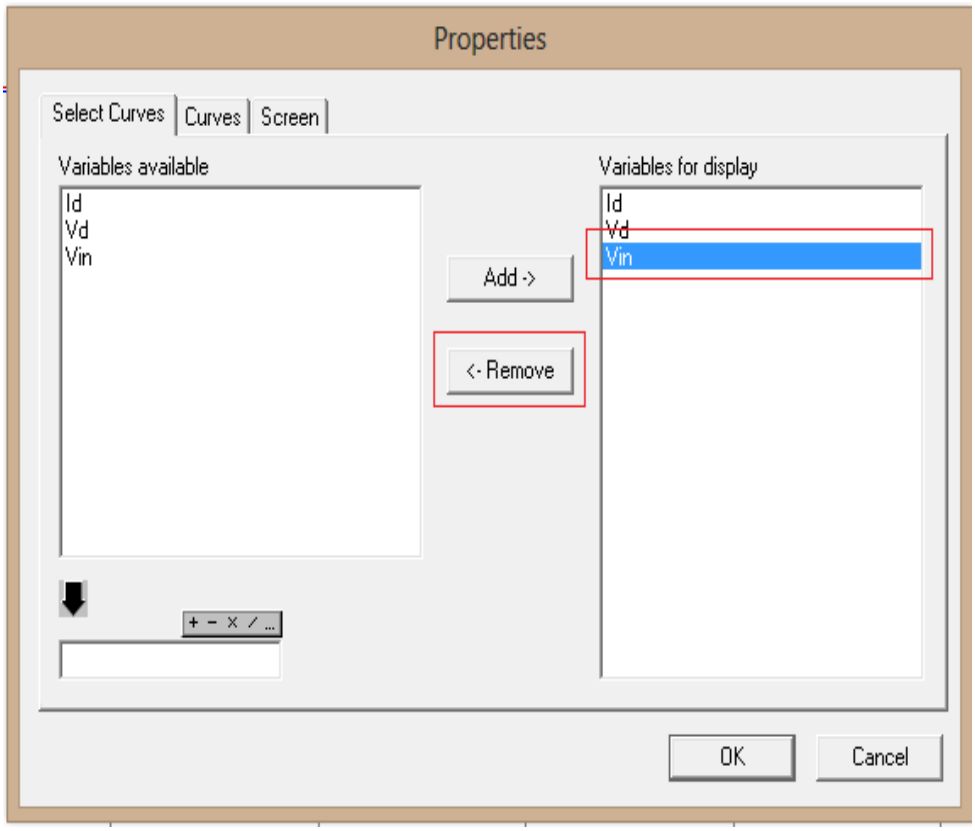
(شکل ۳۲.۲): تنظیمات محور y

www.powerplantac.com

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 اســتفاده از آن محدوده‌ی محور Y به صورت خودکار تنظیم می شود. در ق سمت Scale نیز می‌توان محور Y را به‌صــورت لگاریتمی ترســیم کرد. هم‌چنین اگر تیک مربوط به decibel (dB) زده شود، محور Y برحسب دسیبل رسم می‌شود.

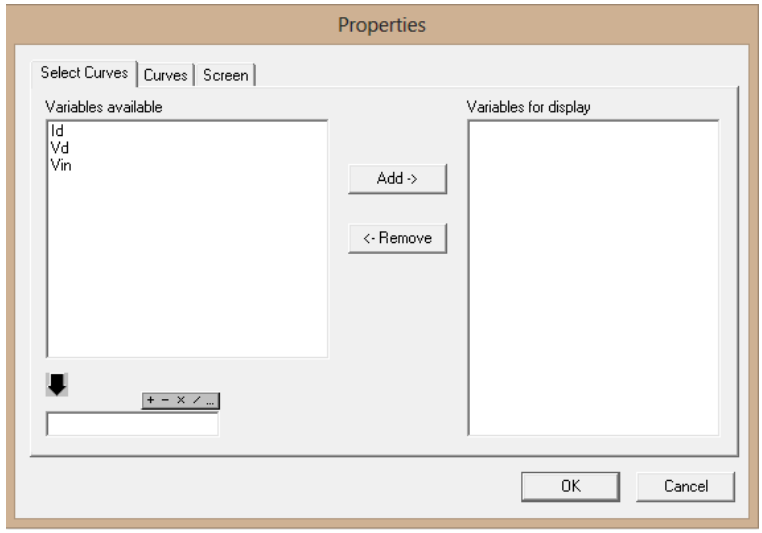
با زدن ابزار پنجره‌ی زیر باز می‌شـــود که همان پنجره‌ی مربوط به رســـم متغیرهاست. اگر متغیر دیگری بود که آن را رسم نکرده بودیم، می‌توانستیم آن را انتخاب کرده و به متغیرهای سمت راست اضافه کنیم. با زدن OK منحنی‌های جدید به منحنی موجود ا ضافه می شود. هم‌چنین می‌توان برای حذف منحنی‌ها، متغیر مربوط به آن را از لیســت ســمت راســت انتخاب کرده و با زدن Remove آن را حذف کرد. برای مثال در این‌جا منحنی مربوط به Vin را حذف می‌کنیم، با زدن OK تغییرات اعمال می‌شود.

www.powerplantac.com



(شکل ۳۳.۲): تنظیمات Properties

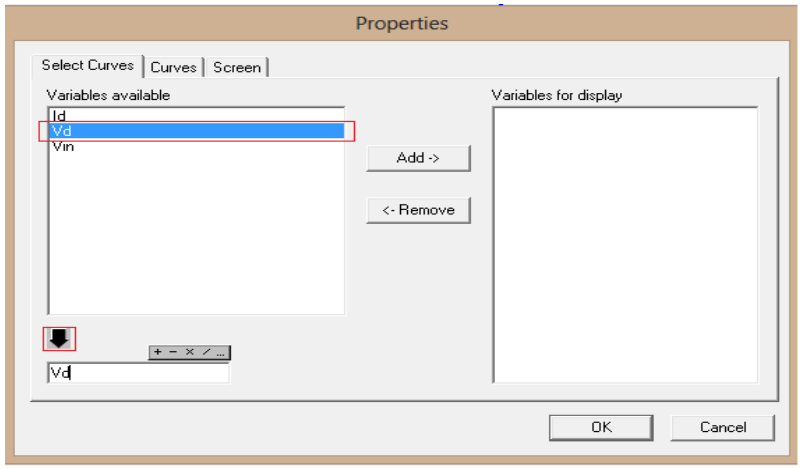
با استفاده از ابزار دوباره پنجره‌ای به شکل زیر نمایش داده می‌شود و با استفاده از آن می‌توان منحنی‌های جدید را رسم کرد با این تفاوت که منحنی‌های جدید در محورهای جداگانه نمایش داده می‌شوند که در شکل (۳۴.۲) نمایش داده شده است.



(شکل ۳۴.۲): تنظیمات Properties

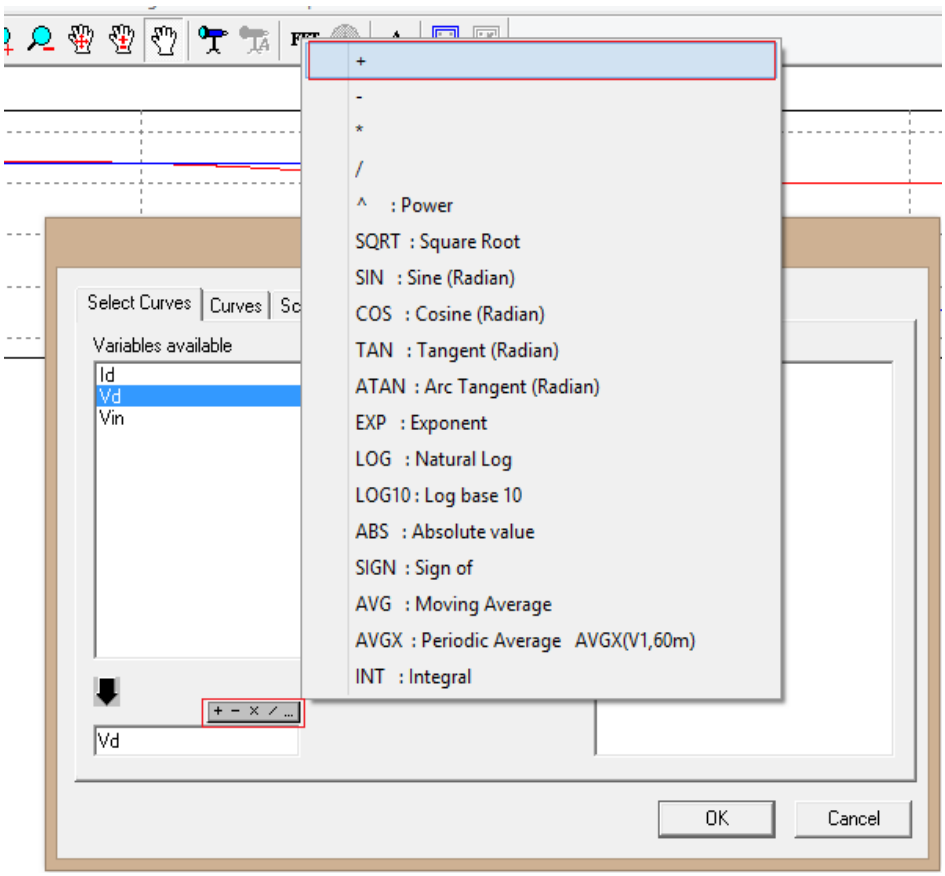
برای مثال در این‌جا می‌خواهیم منحنی‌های Vd+Id و قدر مطلق Vd را رسم کنیم.

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.



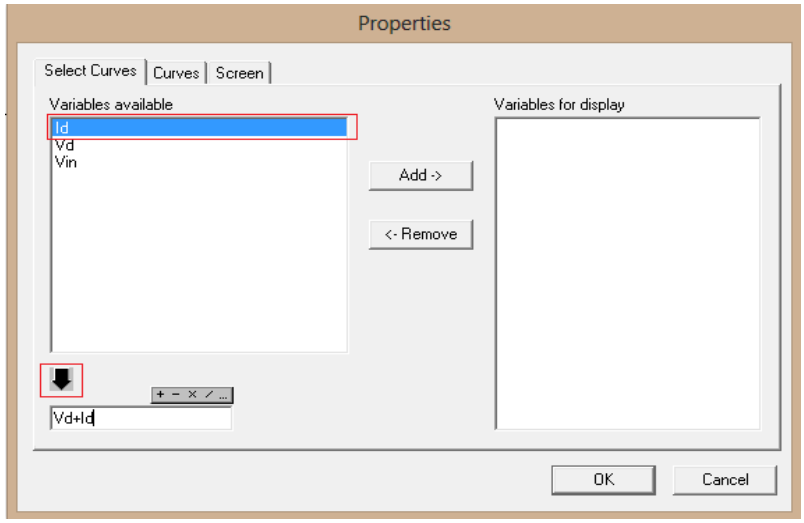
(شکل ۳۵.۲): تنظیمات Properties

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



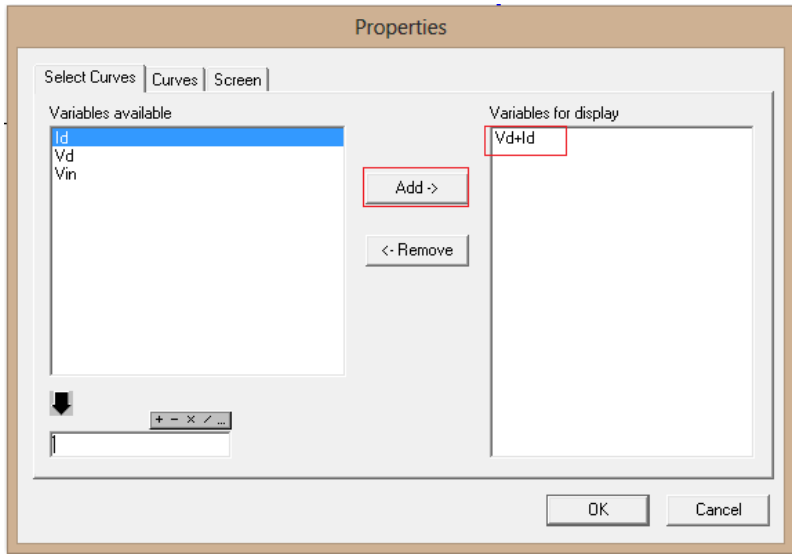
(شکل ۳۶.۲): انتخاب عملگر ریاضی

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



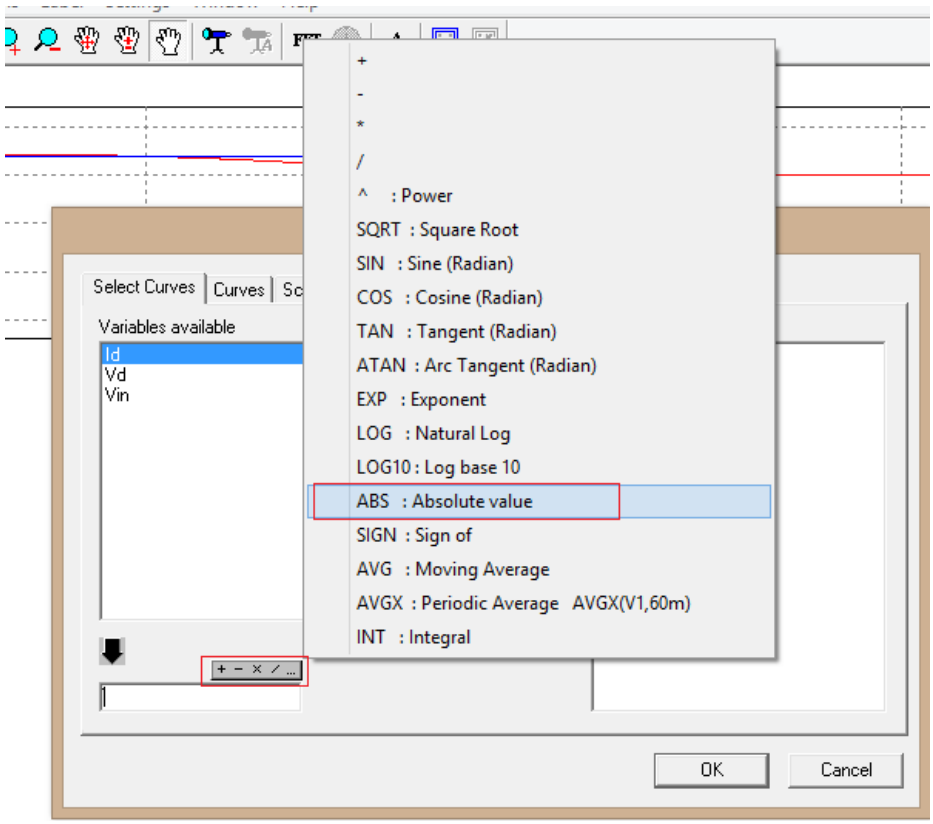
(شکل ۳۷.۲): تنظیمات Properties

با زدن Add معادله‌ی نو شته شده در کادر پایین به قسمت Variables for display منتقل می‌شود.



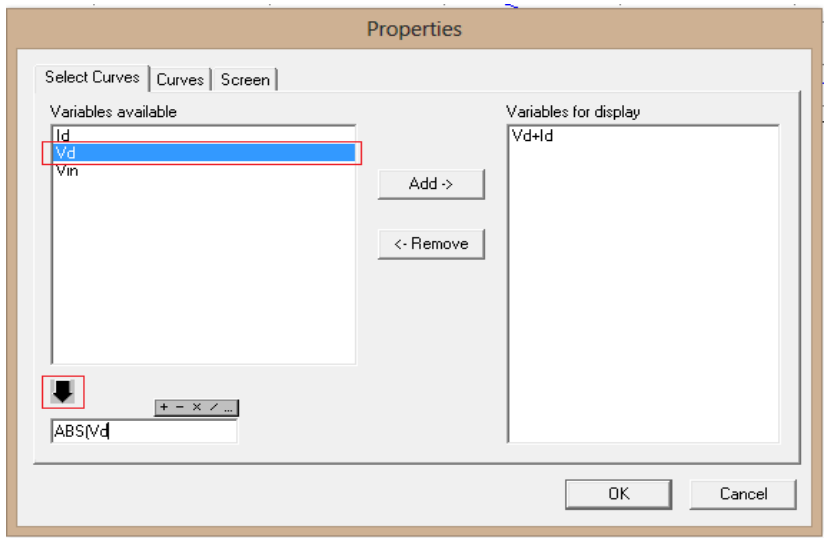
(شکل ۳۸.۲): تنظیمات Properties

برای رسم قدر مطلق Vd ابتدا روی علامت کلیـک کرده و گزینـه‌ی ABS (به معنی قدر مطلق) را انتخاب می‌کنیم.



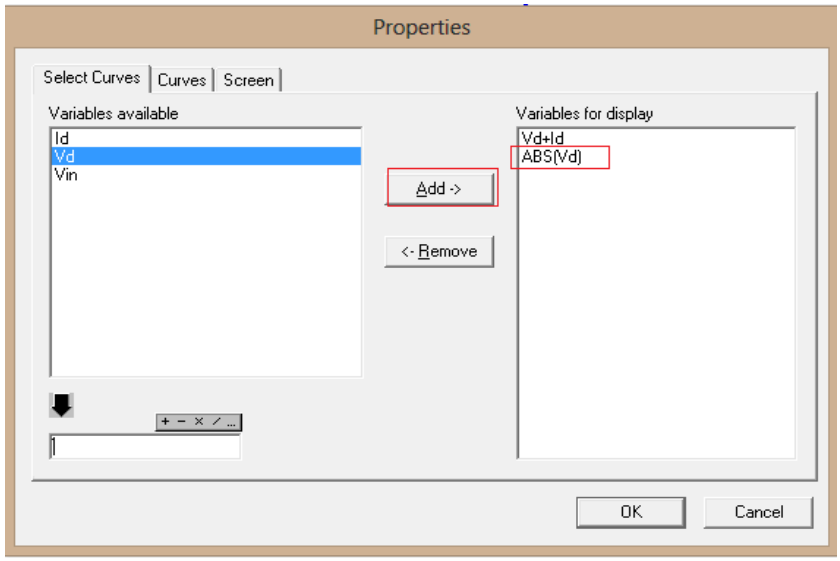
(شکل ۳۹.۲): عملگر ریاضی

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



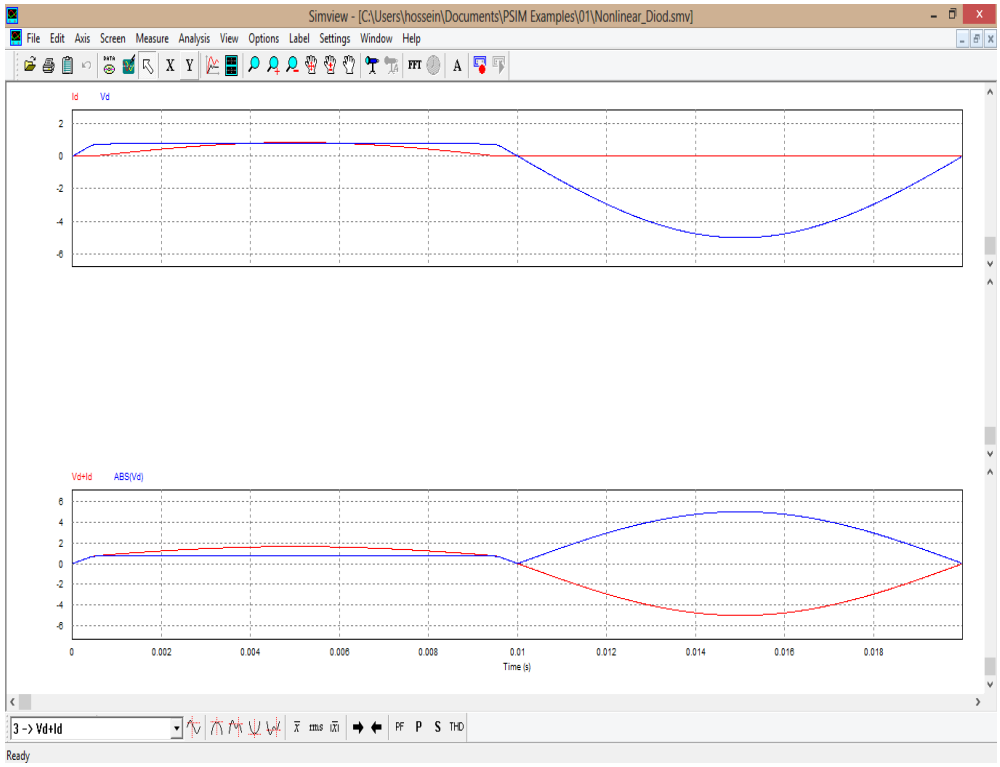
(شکل ۴۰.۲): تنظیمات Properties

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



(شکل ۴۱.۲): تنظیمات Properties

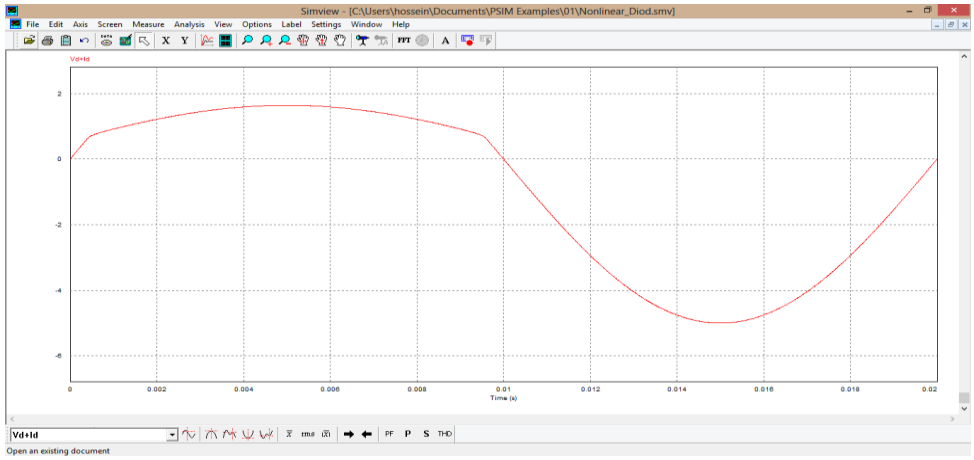
سایر عملیات ریا ضی بر روی نمودارها نیز با این روش انجام می شود. با زدن دکمه‌ی OK منحنی‌ها به‌صورت زیر نمایش داده می‌شوند.



(شکل ۴۲.۲): نمایش منحنی های خروجی

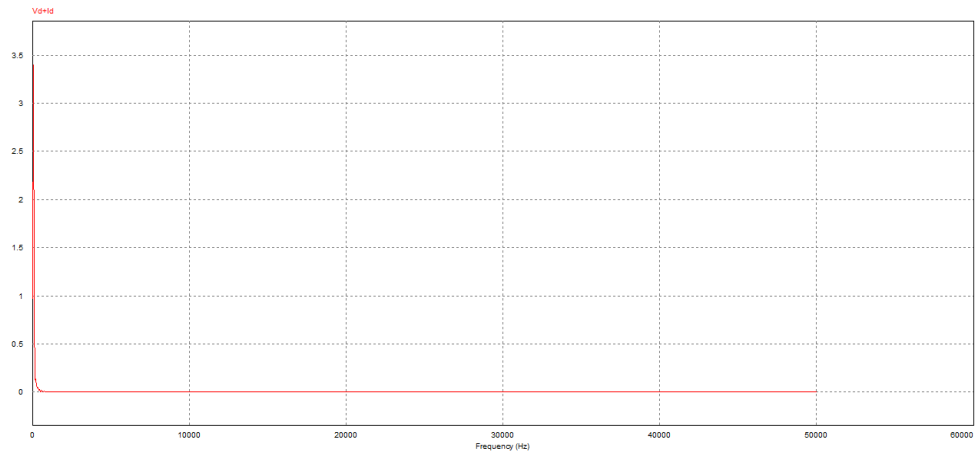
حال همه‌ی منحنی‌ها را حذف کرده و فقط منحنی Vd+Id را نگه می‌داریم.

نکته: به منظور تطبیق منحنی‌ها با صفحه‌ی نمایش می‌توان از استفاده کرد.



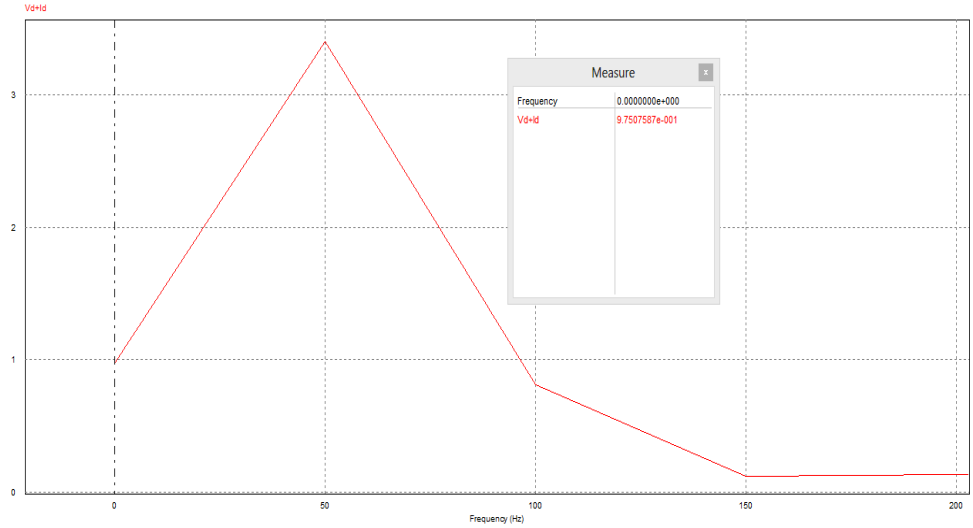
(شکل ۴۳.۲): استفاده از ابزار تطبیق منحنی ها

با اســـتفاده از ابزار FFT می‌توان مولفه‌های فرکانســـی موجود در شـــکل موج را مشاهده کرد. با این کار نمودار زیر نمایش داده می شود که محور افقی، فرکانس و محور عمودی، اندازه‌ی مولفه‌ی مربوط به آن فرکانس را نشان می‌دهد.



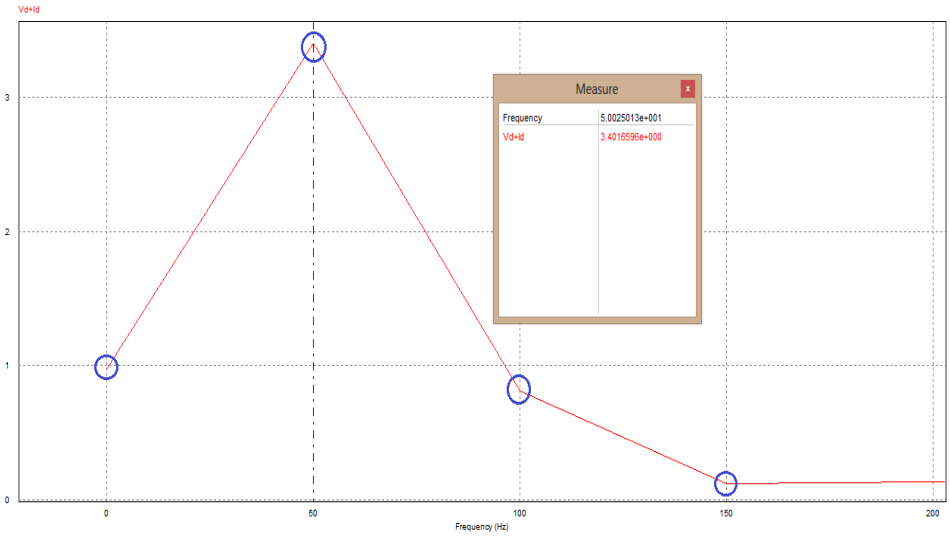
(شکل ۴۴.۲): FFT

برای فهم بهتر نمودار، روی فرکانس‌های پایین بزرگنمایی کرده و از ابزار برای نمایش دقیق‌تر مقادیر استفاده می‌کنیم.



(شکل ۴۵.۲): نمایش دقیق مقادیر

همانطور که ملاحظه می‌شود اندازه‌ی مولفه‌ی DC برابر ۰/۹۷۵ است. برای مشاهده‌ی سایر مولفه ها می‌توان از علامت های استفاده کرد. لازم به ذکر است که فقط نقاطی که در آن‌ها شکستگی وجود دارد جزء مولفه‌های فرکانسی هستند (مولفه‌های فرکانسی مضارب صحیحی از فرکانس شکل موج اصلی هستند که در اینجا این فرکانس ۵۰ هرتز است).



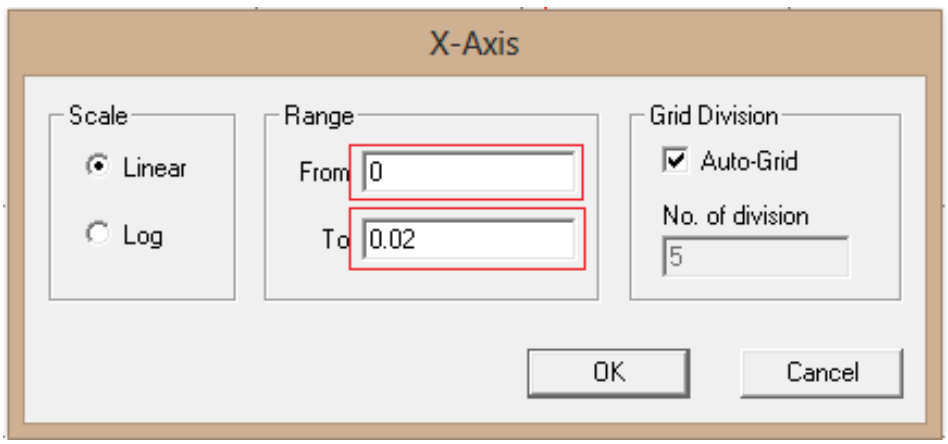
(شکل ۴۶.۲): نمایش نقاط مولفه های فرکانسی

بنابراین مولفه‌های فرکانسی موجود در شکل موج Vd+Id به‌صورت جدول زیر است:

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

برای نمایش منحنی در حوزه‌ی زمان می‌توان از ابزار استفاده کرد. با استفاده از ابزارهای 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.

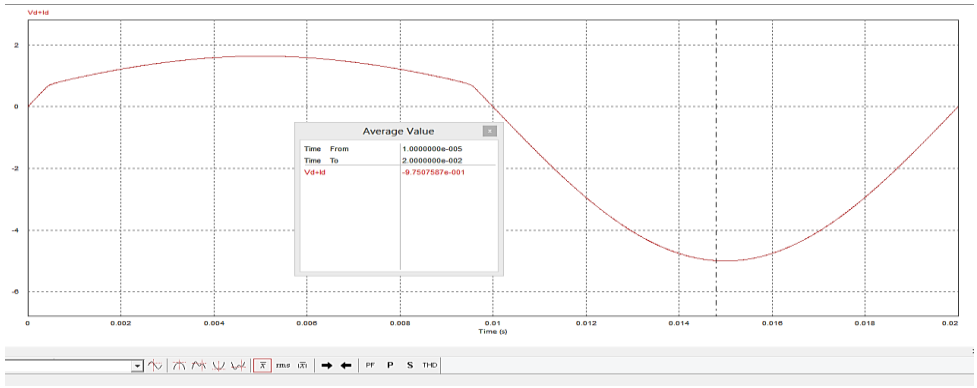
نقطه‌ی شروع و پایان محاسبات بوسیله‌ی تنظیمات محور X مشخص می‌شوند. روی ابـــــزار کلیک کرده و نقاط شروع و پایان را به ترتیب در صفر و ۰/۰۲ تنظیم می‌کنیم. با این کار مقادیر متوســـط و موثر در محدوده‌ی زمانی صـــفر تا ۰/۰۲ ثانیه محاسبه می‌شوند.



(شکل ۴۷.۲): تنظیمات محور X

حال روی ابزار کلیک می‌کنیم تا مقدار متوسط نمودار محاسبه شود.

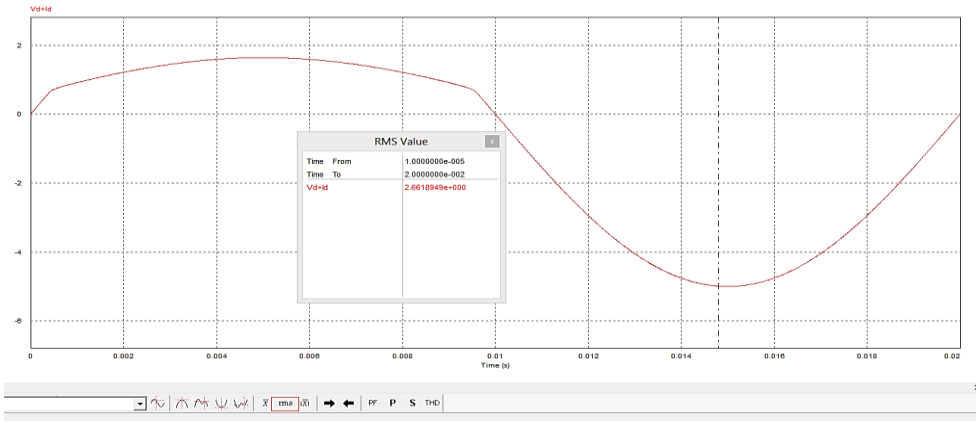
www.powerplantac.com



(شکل ۴۸.۲): نمایش مقدار متوسط نمودار

همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار متوسط بین زمان‌های صفر تا ۰/۰۲ ثانیه برابر ۰/۹۷۵- است.

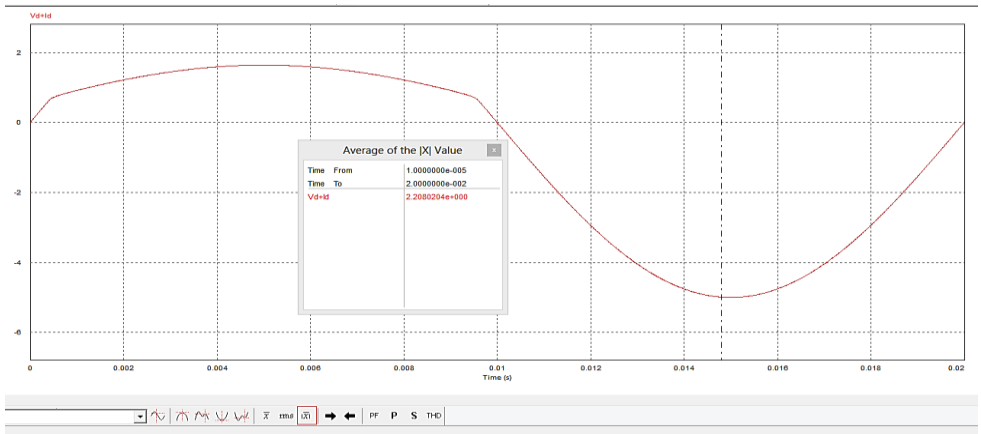
برای محاسبه‌ی مقدار rms روی ابزار rms کلیک می‌کنیم که مقدرا rms شکل موج برابر خواهد بود با ۲/۶۶.



(شکل ۴۹.۲): محاسبه مقدار rms

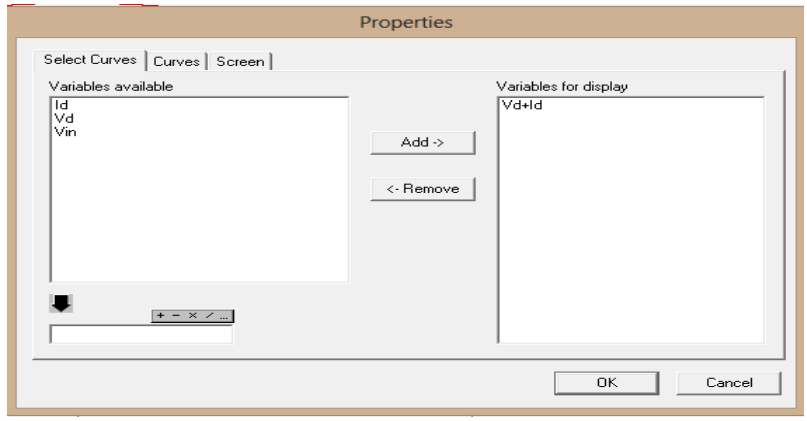
www.powerplantac.com

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



(شکل ۵۰.۲): محاسبه مقدار متوسط قدر مطلق

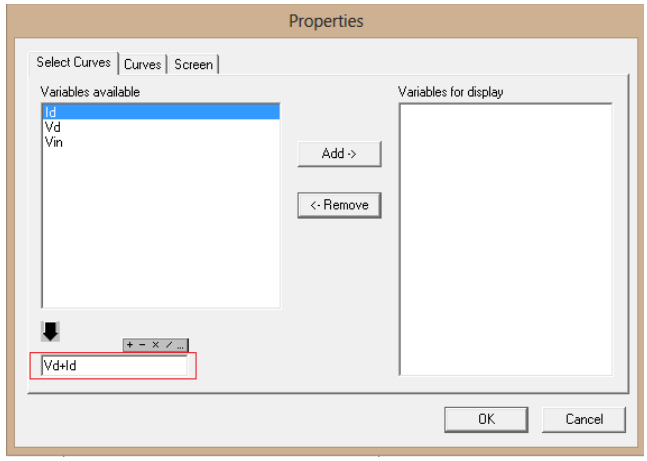
حال در پایان می‌خواهیم منحنی i-v مربوط به دیود را رسم کنیم. برای این کار ابزار را انتخاب کرده یا روی منحنی دوبار کلیک می‌کنیم. با این کار پنجره‌ی آشنای زیر نمایش داده می‌شود.



(شکل ۵۱.۲): تنظیمات Properties

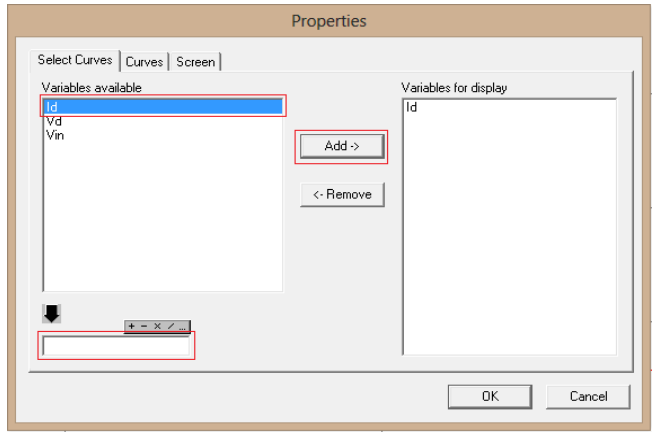
www.powerplantac.com

از لیست سمت را ست 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

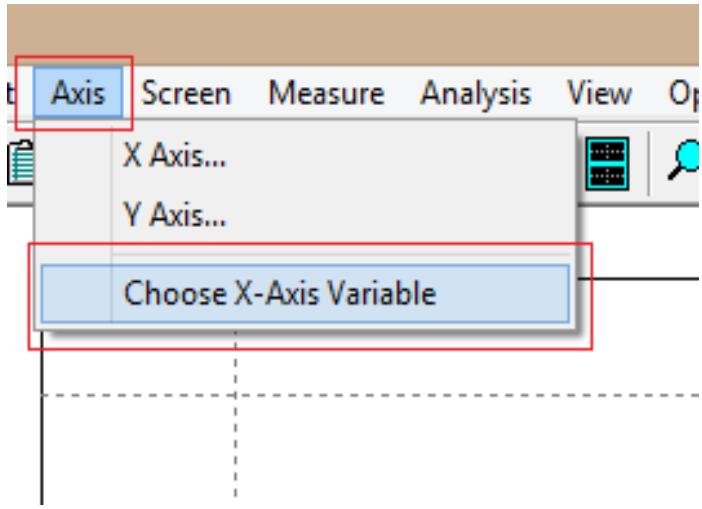
حال عبارت Vd+Id را از این کادر نیز delete می‌کنیم. سپس Id را به لیست سمت راست Add می‌کنیم.



(شکل ۵۳.۲): تنظیمات Properties

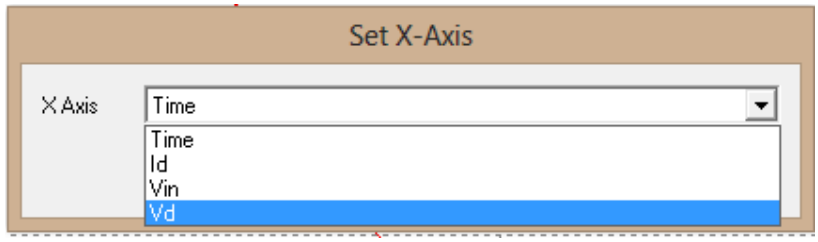
www.powerplantac.com

حال گزینه OK را می‌زنیم. با این کار نمودار Id برحسب زمان رسم می‌شود. برای اینکه منحنی i-v را ر سم کنیم باید محور افقی به جای زمان بر ح سب Vd با شد. برای تغییر محور افقی به منوی Axis رفته و گزینه‌ی Choose X-Axis Variable را انتخاب می‌کنیم.



(شکل ۵۴.۲): منوی Axis

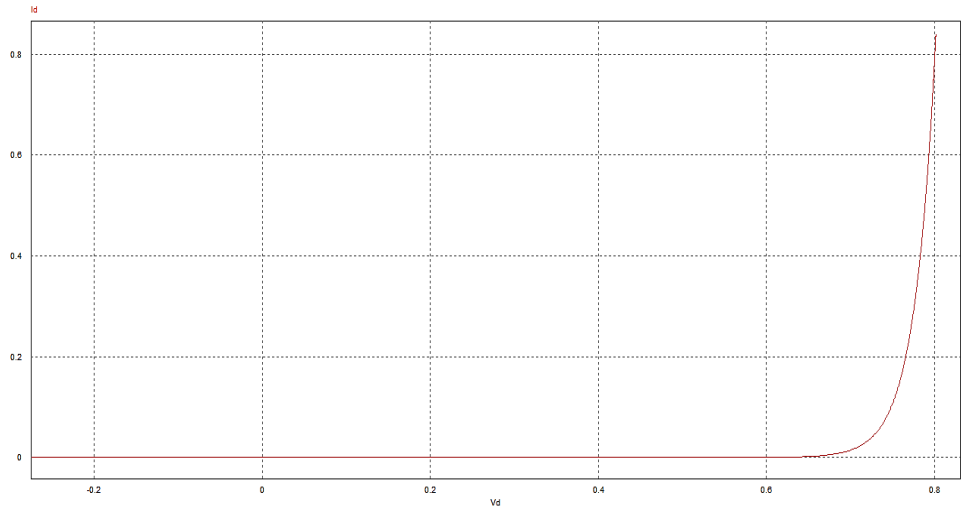
با این کار پنجره‌ی زیر باز می‌شود. از کادر کشویی موجود متغیر Vd را انتخاب می‌کنیم.



(شکل ۵۵.۲): تنظیمات محور x

www.powerplantac.com

با این کار نمودار i-v مربوط به دیود به صورت زیر رسم می‌شود.



(شکل ۵۶.۲): نمودار i-v دیود

در این فصل شبیه‌سازی یک المان غیرخطی (دیود) با معادله‌ی i=f(v) مشخص شبیه‌سازی شده و قابلیت‌های مهم پنجره‌ی Simview که مربوط به نمایش منحنی‌های خروجی است، توضیح داده شد. سعی شد که روند شبیه‌سازی با جزئیات بالا تشریح شود تا کاربران مبتدی نیز بتوانند با روند شبیه سازی آ شنا شوند. بدیهی ا ست که در ف صل های های بعدی فقط نکات جدید توضیح داده خواهد شد.

www.powerplantac.com

www.powerplantac.com

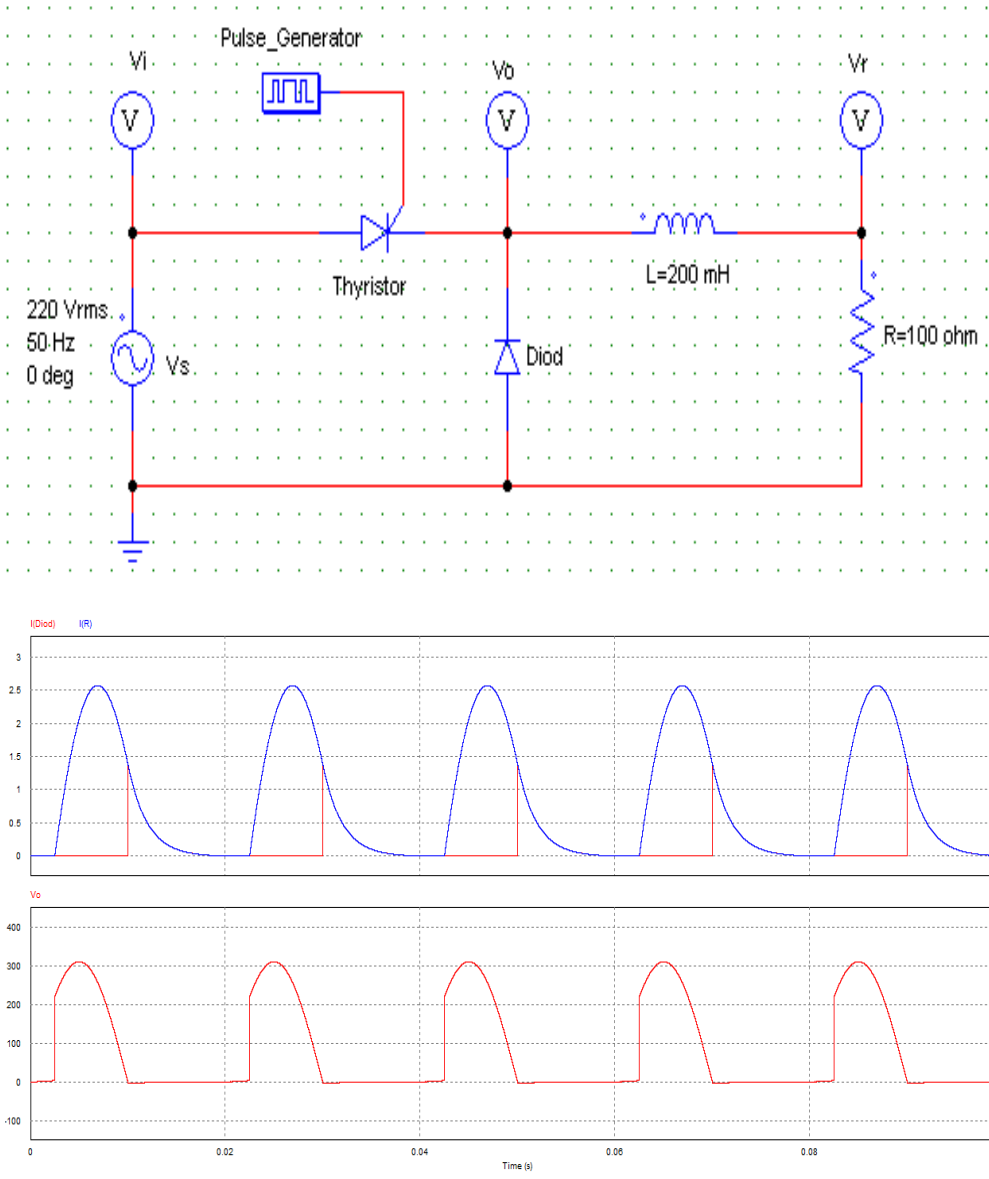
فصل سوم

کنترل یک سوئیچ تریستوری

۳– مقدمه

در این فصل کنترل یک سوییچ 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

www.powerplantac.com

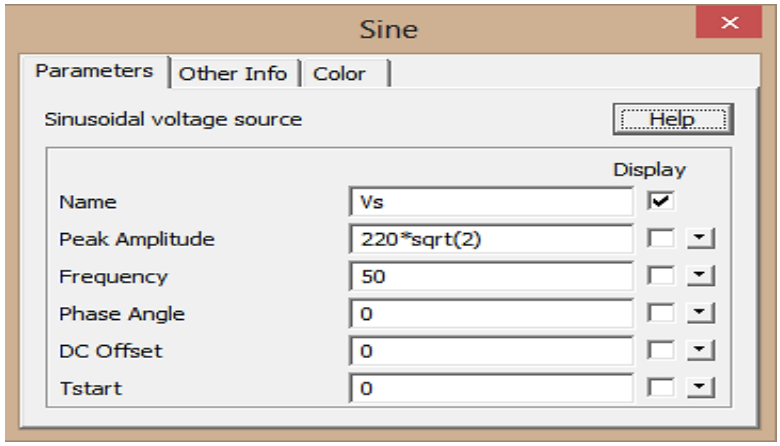
۳-۲-اجرای شبیه‌سازی

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

(شکل ۲.۳): انتخاب المان ها از نوار ابزار

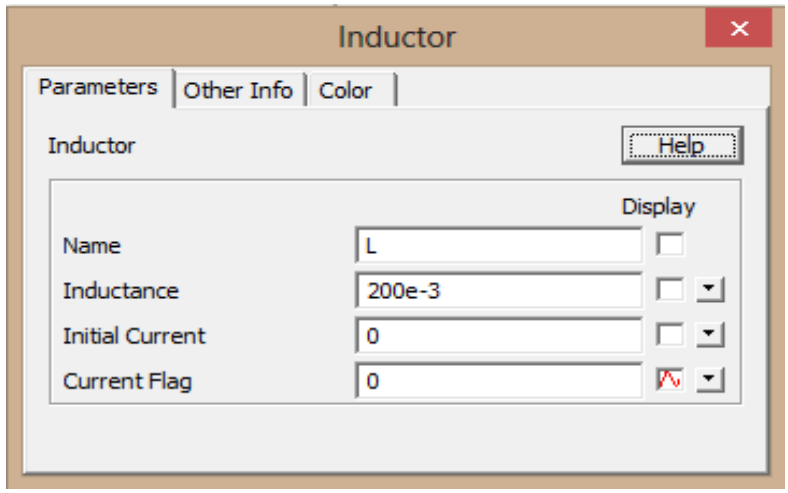
نکته: پس از قرار دادن تریستور در صفحه‌ی ترسیم، شکل آن بصورت می باشد. برای اینکه گیت آن را به سمت بالا بچرخانیم، با استفاده از ابزار آن را انتخاب کرده و با کلیک روی علامت آن را به شکل در می‌آوریم.

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.

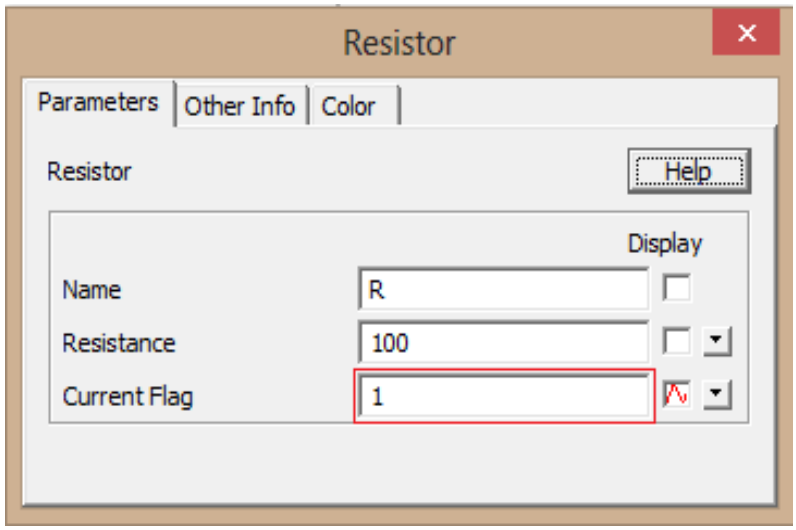


(شکل ۳.۳): ولتاژ منبع سینوسی

تنظیمات سلف و مقامت نیز به صورت زیر انجام می‌شود.



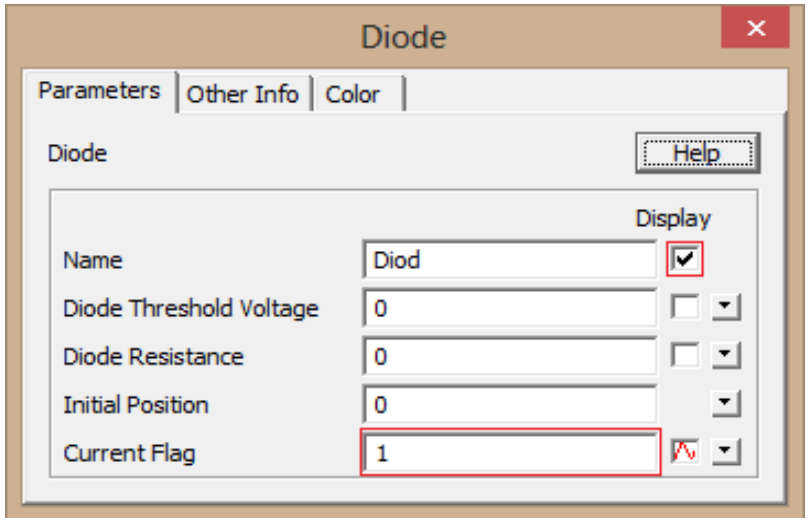
(شکل ۴.۳): تنظیمات سلف



(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 آمپرمتر باشد جریان مقاومت در خروجی قابل نمایش خواهد بود، چنین قابلیتی برای سـایر المان‌ها نیز وجود دارد. برای اندازه‌گیری ولتاژ المان‌ها حتما باید از ولت‌متر استفاده کنیم.

دیود هرزگرد نیز به‌صورت زیر تنظیم می‌شود:

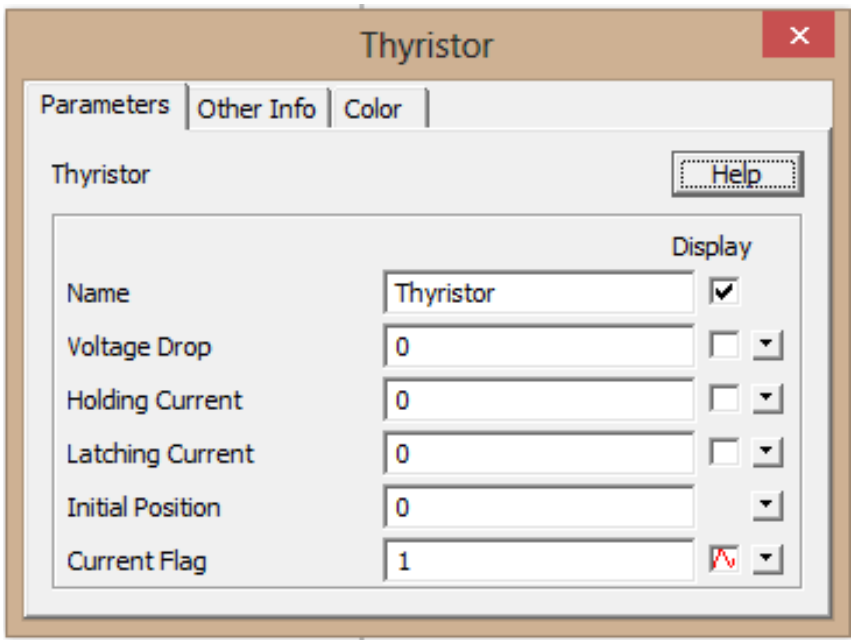


(شکل ۶.۳): تنظیمات دیود

برای نمایش جریان عبوری از دیود هرزگرد نیز Current Flag یک شده ا ست. وقتی تیک مربوط به Display زده شـده باشـد، عبارت موجود در کادر کناری‌اش نمایش داده می شود. سایر پارامترها برابر صفر تنظیم شده‌اند تا یک دیود ایده‌آل دا شته با شیم. در ادامه توضیحاتی در خصوص این پارامترها ارائه می‌شود.

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: وضـــعیت اولیه‌ی دیود را مشـــخص می‌کند، از صـــفر برای حالت اولیه‌ی خاموش و از یک برای حالت اولیه‌ی روشن استفاده می‌شود.

پارامترهای تریستور نیز به‌صورت یک کلید ایده‌آل تنظیم شده است:



(شکل ۷.۳): تنظیمات تریستور

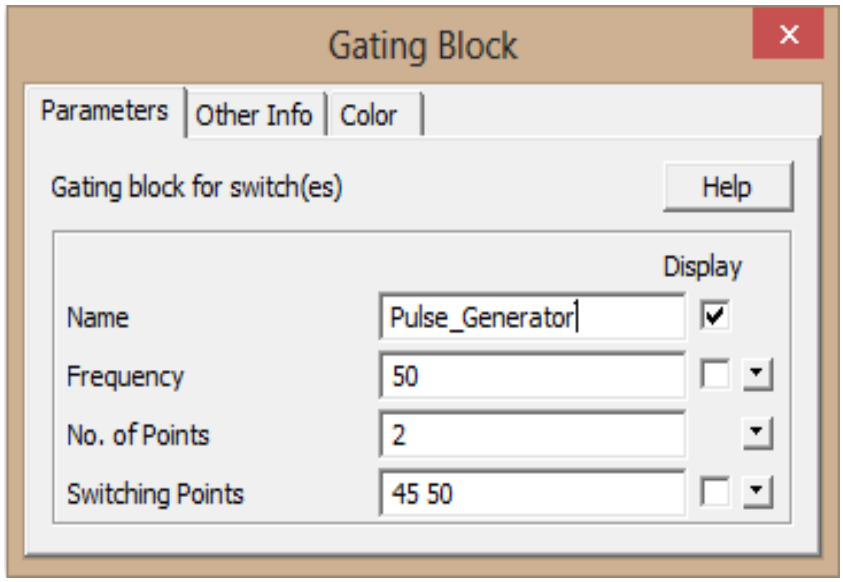
Voltage Drop: افت ولتاژ تریستور در زمان هدایت
Holding Current: حداقل جریان لازم (بر حسب A) برای اینکه تریستور روشن باقی بماند. وقتی جریان عبوری این مقدار کم‌تر شود تریستور خاموش می‌شود.
Latching Current: حداقل جریانی که لازم است تا تریستور پس از اینکه پالس اعمالی به گیت آن برداشته شد هم‌چنان روشن باقی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

۳-۳- نحوه‌ی 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 صرفا 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 می‌کند که گیت آن تحریک شود. به این صورت که در بایاس مستقیم به محض اعمال سیگنال به گیت، تریستور روشن می‌شود و با صفر شدن پالس نیز تا زمانی که جریان عبوری از آن صفر شود هم‌چنان به هدایت خود ادامه می‌دهد (در یک تریستور ایده‌آل). بنابراین فقط روشن

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

المان پالس‌های لازم برای روشن شدن سوئیچ‌ها را تولید می‌کند. تنظیمات این المان در این شبیه‌سازی به صورت زیر انجام می‌شود.

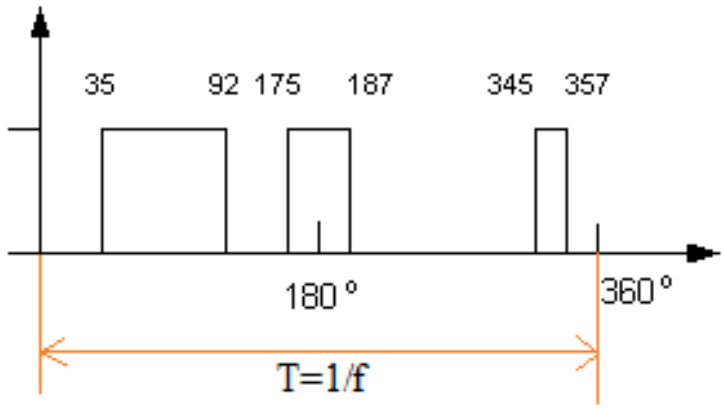


(شکل ۸.۳): تنظیمات پالس گیت

www.powerplantac.com

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.

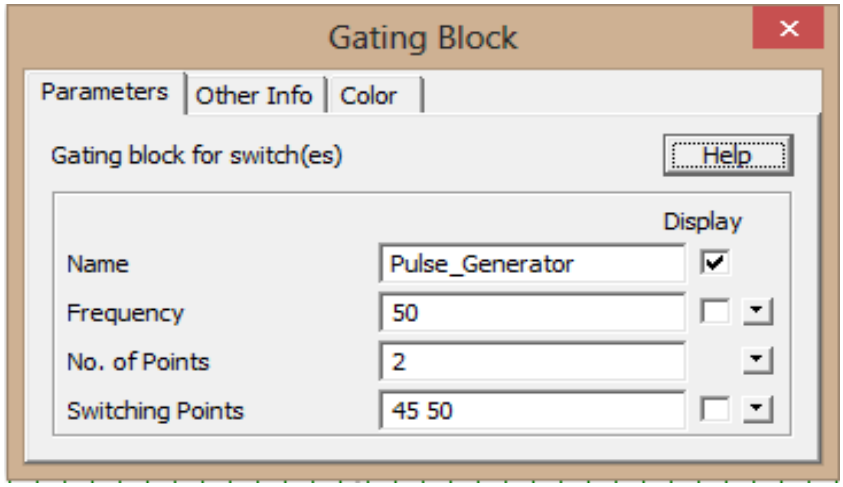
تنظیمات برای ٦= No. Of Points و ۱۸۷ ۱۷۵ ۹۲ ۳۵ = Switching Points ۳۵۷ ۳۴۵ در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۹.۳): تنظیمات کلید زنی در یک دوره زمانی

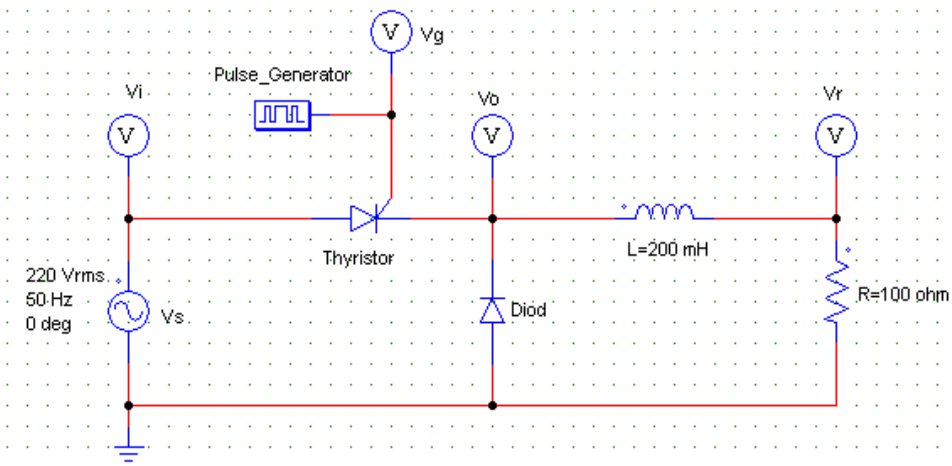
این الگو با فرکانس f تکرار می شود. در این شبیه سازی تولیدکننده‌ی پالس تریستور به‌صورت زیر تنظیم شده است:

www.powerplantac.com



(شکل ۱۰.۳): تنظیمات گیت

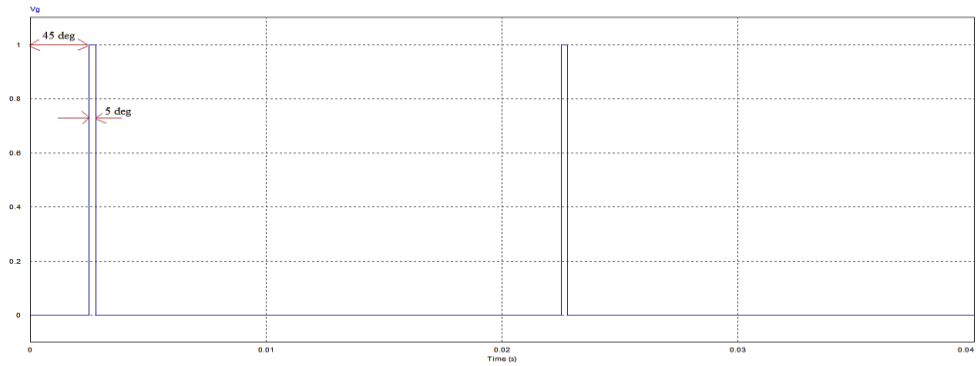
برای مشاهده‌ی خروجی می‌توان مطابق شکل زیر یک پروب ولتاژ به خروجی سیگنال ژنراتور متصل کرد.



(شکل ۱۱.۳): اعمال ابزار کنترل مدار

www.powerplantac.com

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



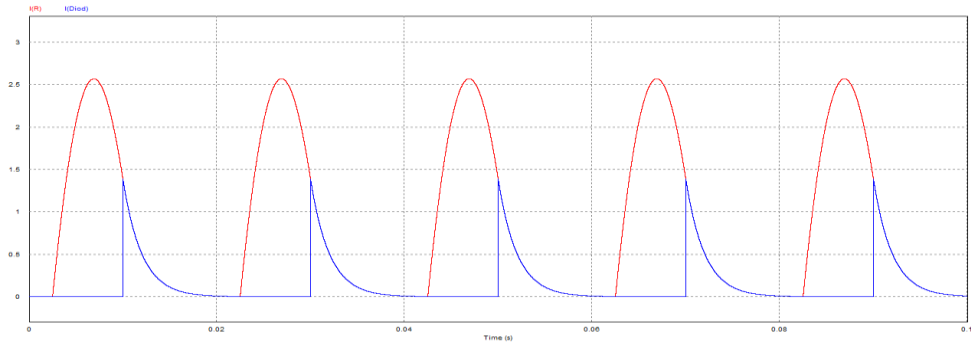
(شکل ۱۲.۳): پالس تولیدی

همانطور که ملاحظه می شود 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:

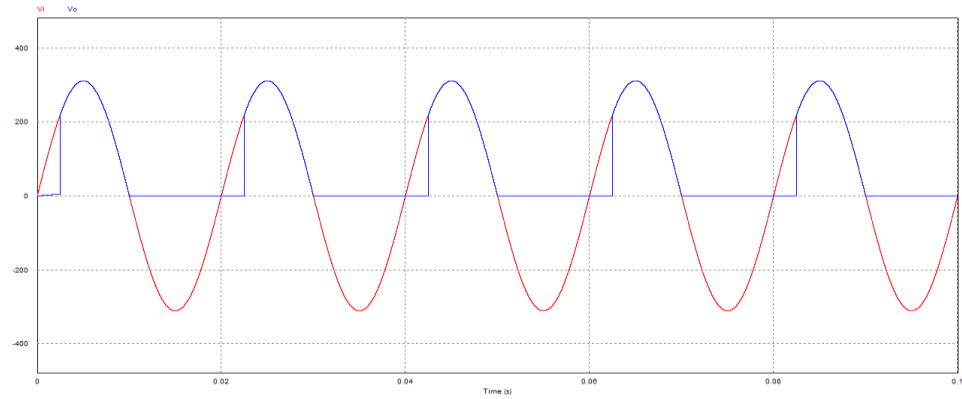
$$t = \frac{\varphi}{360 \times f}$$

t بر حسب ثانیه و φ برحسب درجه است.

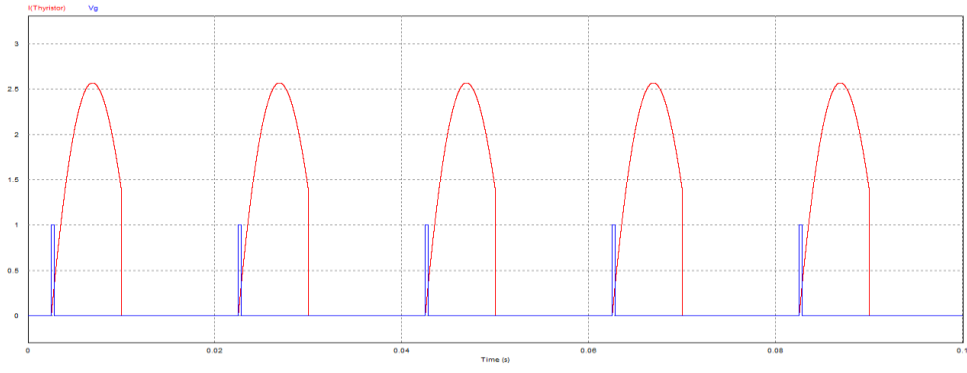
با اعمال این پالس به تریستور، خروجی شبیه‌سازی به‌صورت زیر خواهد بود:



(شکل ۱۳.۳): جریان مقاومت و جریان دیود هرزگرد



(شکل ۱۴.۳): ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور

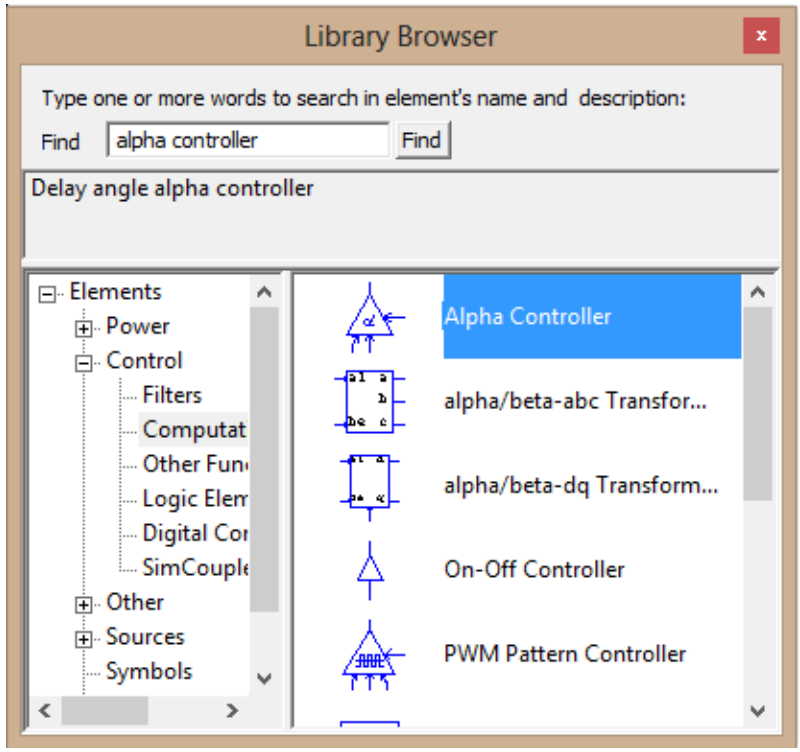


(شکل ۱۵.۳): جریان عبوری از تریستور و پالس اعمالی به آن

در زمان ۲/۵ میلی ثانیه (۴۵ درجه)، پالس به تریستور اعمال می‌شود و چون تریستور به‌صورت 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 به‌صورت 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.

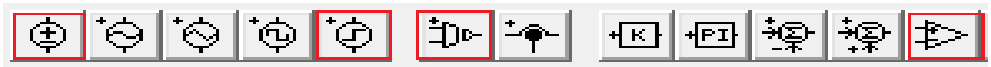
لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به پالس تولیدی با توجه به فاز ولتاژ منبع تنظیم شده‌اند. اگر ولتاژ منبع دارای فاز اولیه باشد تنظیمات مربوط به پالس نیز باید تغییر کنند تا شکل موج خروجی ثابت بماند. برای مثال اگر فاز منبع در ۹۰ درجه تنظیم شود باید پالس‌ها در ۴۵ منهای ۹۰ و ۵۰ منهای ۹۰ تنظیم شوند تا خروجی تغییر نکند. بنابراین در این شرایط باید فاز ولتاژ منبع معلوم با شد که در عمل این‌گونه نیست. برای حل این مشکل می‌توان از کنترل‌کننده‌ی سوئیچ آلفا برای تولید سیگنال گیت تریستور ا ستفاده کرد. برای این منظور alpha controller را در کتابخانه‌ی نرم‌افزار جستجو کرده و آن را به مدار اضافه می‌کنیم.

www.powerplantac.com



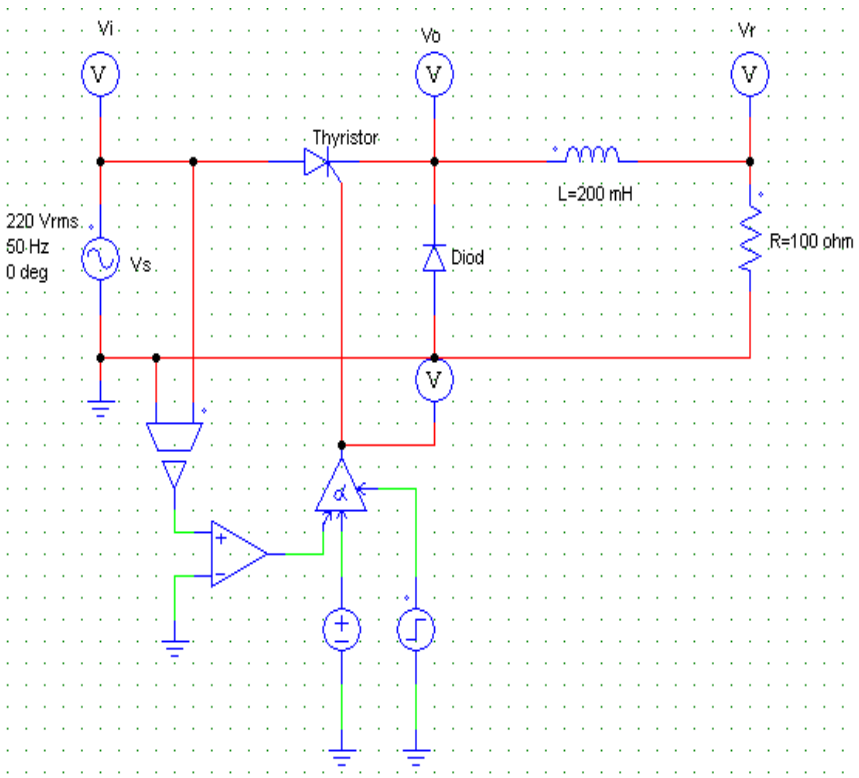
(شکل ۱۶.۳): انتخاب alpha controller

برای تنظیم این کنترل‌کننده به سنسور ولتاژ، منبع ولتاژ DC، منبع ولتاژ پله و یک مقایسه‌گر احتیاج خواهیم داشت. این المان‌ها را هم از نوار ابزار المان‌ها به مدار اضافه می‌کنیم.



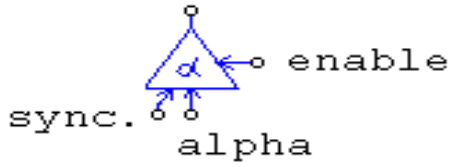
(شکل ۱۷.۳): نوار ابزار المان‌ها

در این حالت مدار به شکل زیر درمی‌آید:



(شکل ۱۸.۳): شمای کلی مدار

ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی آلفا به‌صورت زیر است:



(شکل ۱۹.۳): ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی آلفا

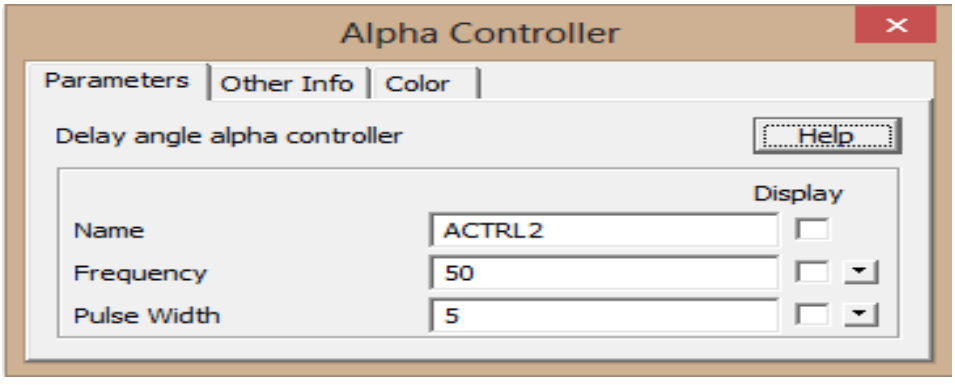
www.powerplantac.com

enable: سیگنال فعال‌کننده به این قسمت اعمال می‌شود. با سیگنال یک بلوک فعال شده و زایه‌ی آتش تریستور را تولید می‌کند و با سیگنال صفر غیر فعال می‌گردد. برای اینکه این بلوک در لحظه‌ی صفر فعال شود به آن خروجی یک منبع ولتاژ پله را متصل می‌کنیم.

alpha: زاویه‌ی آتش تریستور برحسب درجه در این قسمت اعمال می شود که برای تنظیم آن می‌توان از یک منبع ولتاژ DC استفاده کرد. اندازه‌ی ولتاژ منبع زاویه‌ی آتش را مشخص می‌کند.

sync.: سیگنال سنکرون کننده به این قسمت اعمال می شود. کنترل‌کننده‌ی آلفا با لبه‌ی بالا رونده‌ی این سیگنال از نو تنظیم می شود. در ادامه در رابطه با این سیگنال بیشتر توضیح خواهیم داد.

با دوبار کلیک روی کنترل‌کننده‌ی آلفا پنجره‌ی مربوط به تنظیمات آن باز می‌شود.

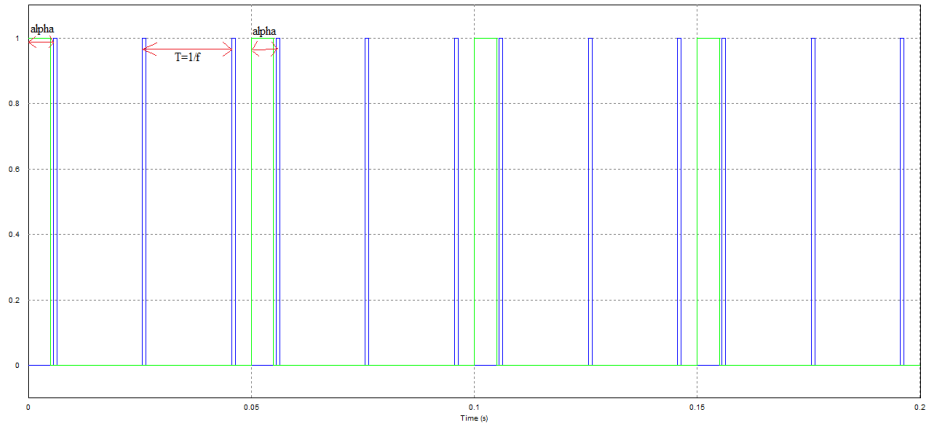


(شکل ۲۰.۳): تنظیمات کنترل‌کننده‌ی آلفا

www.powerplantac.com

Frequency: فرکانس پالس تولید شده
Pulse Width: پهنای پالس تولید شده بر حسب درجه

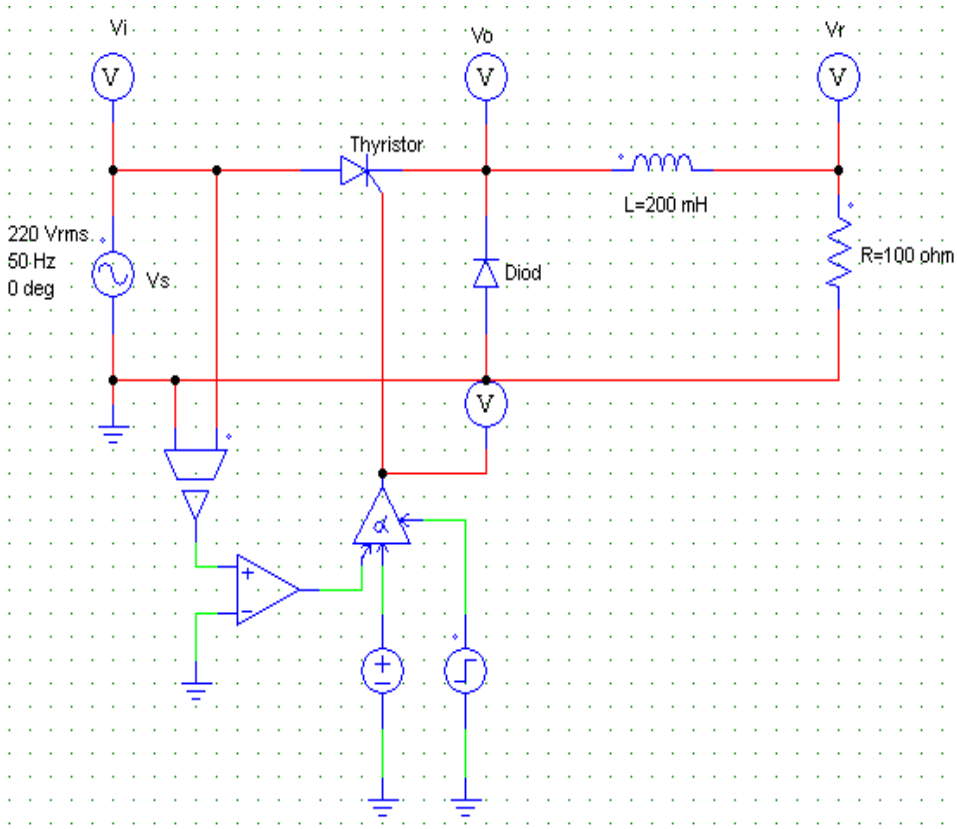
با لبه‌ی بالارونده‌ی سیگنال سنکرون کننده، کنترل‌کننده‌ی آلفا شروع به تولید پالسی با فرکانس ۵۰ هرتز می‌کند که پهنای آن ۵ درجه است. اولین پالس تولیدی به اندازه‌ی alpha درجه (که توسط منبع DC تنظیم می‌شود) از لبه‌ی بالارونده‌ی سیگنال سنکرون‌کننده فاصله دارد و فاصله‌ی دومین پالس از اولین پالس به اندازه‌ی $\frac{1}{f}$ ثانیه است و پالس‌های بعدی نیز به همین ترتیب تولید می‌شوند تا اینکه یک لبه‌ی بالا رونده به گیت سنکرون‌کننده 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 سنکرون‌کننده و نمودار آبی خروجی کنترل‌کننده‌ی آلفا است.



(شکل ۲۱.۳): شکل موج سیگنال سنکرون‌کننده و سیگنال آلفا

www.powerplantac.com

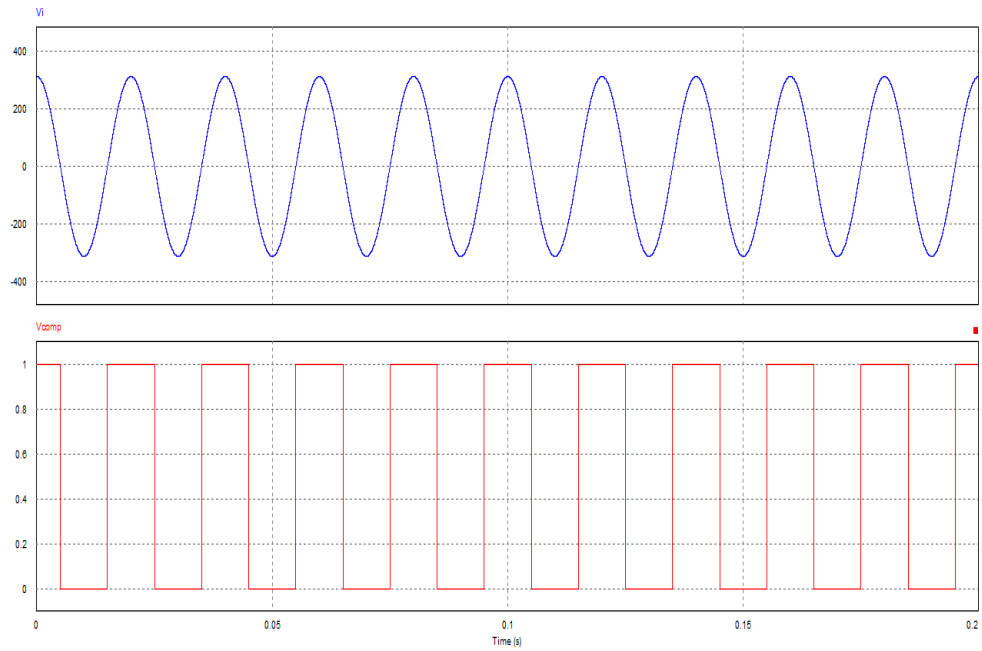
در شکل زیر ولتاژ دوسر منبع توسط سنسور ولتاژ اندازه‌گیری شده و در خروجی آن را به سیگنال کنترلی تبدیل می‌کند (همانطور که مشخص است در نرم‌افزار PSIM سیگنال‌های قدرت به رنگ قرمز و سیگنال‌های کنترلی به رنگ سبز در می‌آیند). این سیگنال در یک مقایسه‌کننده با مقدار صفر مقایسه می‌شود. خروجی مقایسه‌گر زمانی که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



(شکل ۲۲.۳): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

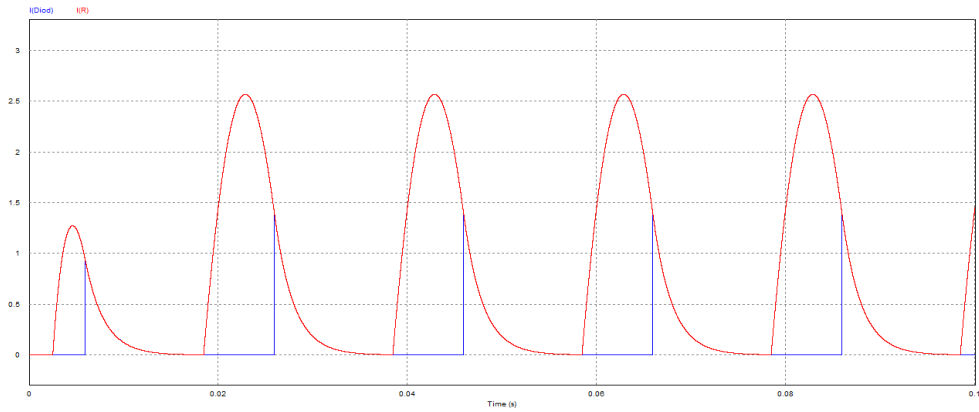
شکل زیر ولتاژ منبع و خروجی مقایسه‌گر را نشان می‌دهد که لبه‌ی بالارونده در عبور از صفر ولتاژ (از منفی به مثبت) اتفاق می‌افتد.



(شکل ۲۳.۳): ولتاژ منبع و خروجی مقایسه‌گر

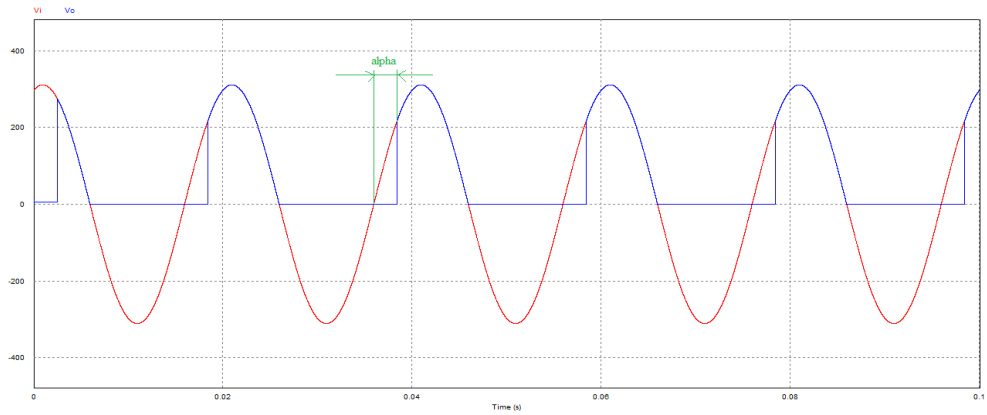
حال اگر فرکانس کنترل‌کننده‌ی آلفا را در ۵۰ هرتز تنظیم کنیم به محض تغییر علامت ولتاژ از منفی به مثبت، کنترل‌کننده‌ی آلفا پالسی تولید می‌کند که به اندازه‌ی alpha درجه از صفر ولتاژ فاصله دارد. برای بررسی صحت مدل فاز منبع ولتاژ را در ۷۳ درجه و ولتاژ منبع DC را در ۴۵ ولت تنظیم می‌کنیم که همان زاویه‌ی آتش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

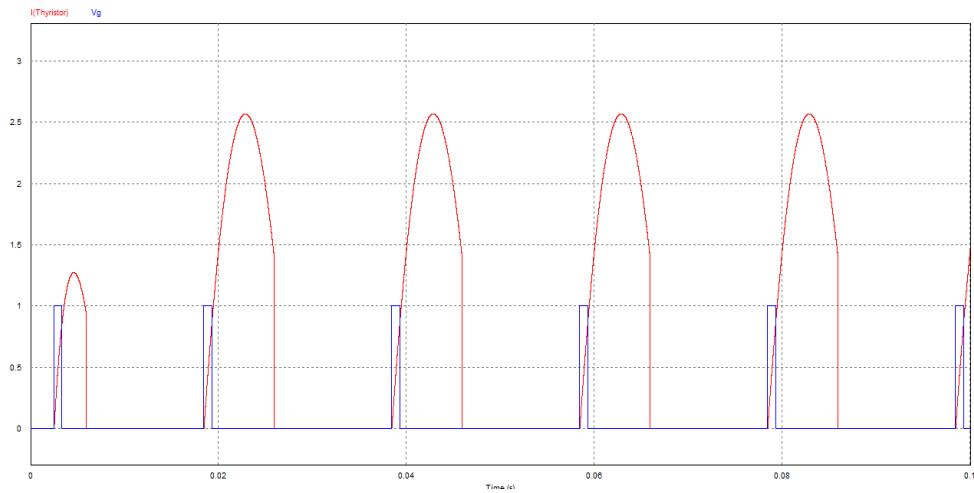
شکل زیر ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور را نشان می‌دهد.



(شکل ۲۵.۳): ولتاژ منبع و ولتاژ خروجی تریستور

www.powerplantac.com

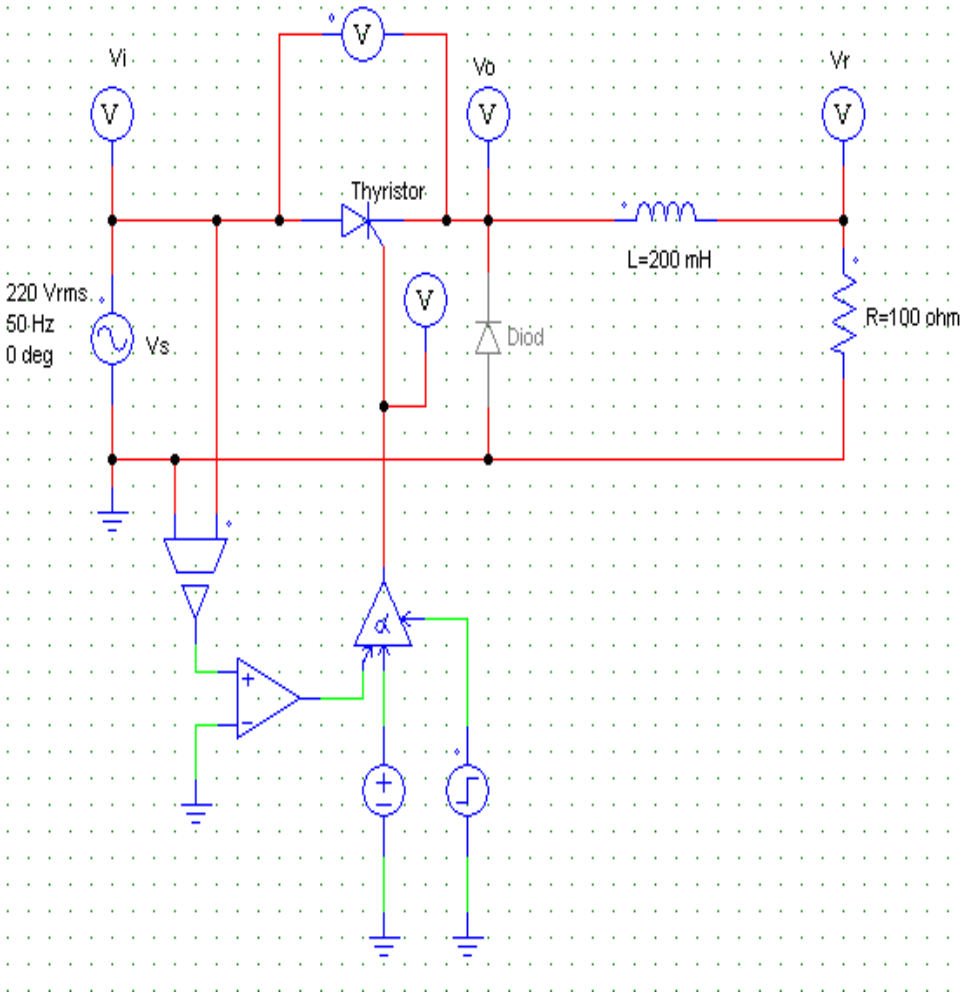
شکل زیر نیز سیگنال خروجی کنترل‌کننده‌ی آلفا و جریان تریستور را نشان می‌دهد.



(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 زوایه‌ی 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 ۰/۰۰۵ ثانیه است و همین زمان در فرکانس ۱۰۰ هرتز معادل ۱۸۰ درجه خواهد بود.

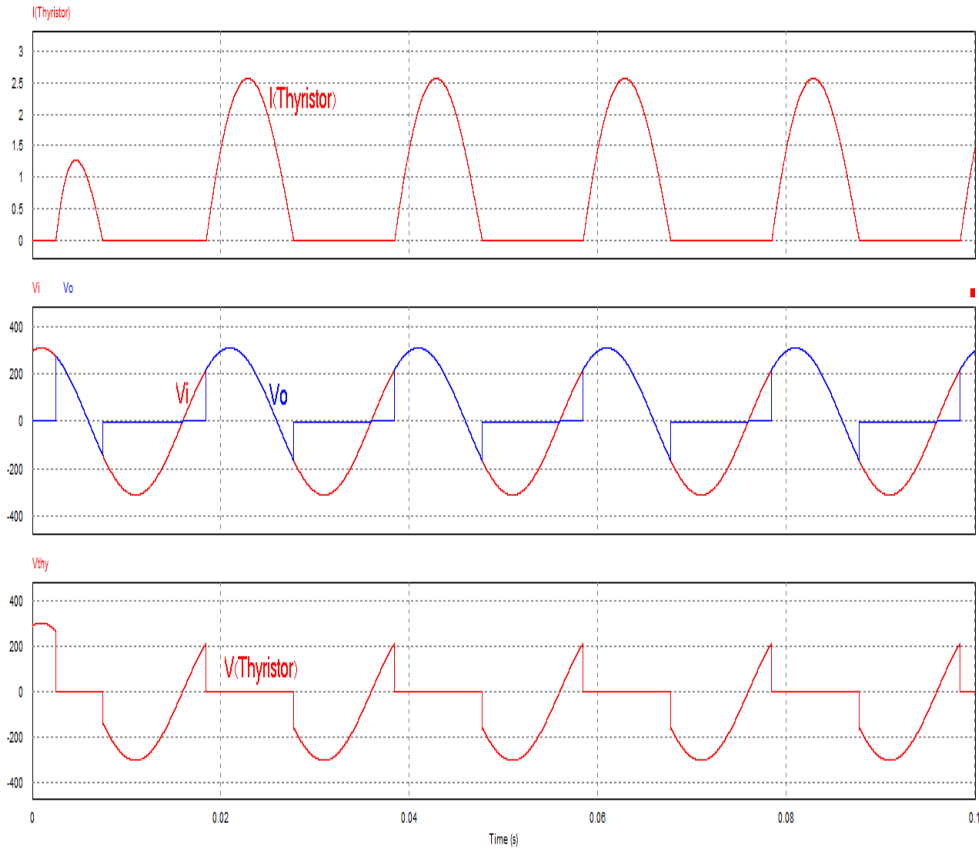
در این قسمت می‌خواهیم با عملکرد دیود هرزگرد بیشتر آشنا شویم. برای این منظور دیود هرزگرد را انتخاب کرده و با ا ستفاده از ابزار آن را غیر فعال می‌کنیم. مدار به‌صورت شکل زیر خواهد بود:



(شکل ۲۷.۳): شمای مدار بعد از غیر فعال کردن دیود هرزگرد

www.powerplantac.com

در این‌جا 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

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

در این فصــل نحوه‌ی کنترل یک تریســتور با اســتفاده از ســیگنال‌ژنراتور آموزش داده شــد. آموختید که در این حالت برای تنظیم زاویه‌ی آتش تریســتور حتما باید فاز اولیه‌ی ولتاژ معلوم باشــد، از این رو برای اســتخراج فاز ولتاژ، کنترل‌کننده‌ی ســوئیچ آلفا معرفی شد که بو سیله‌ی آن ابتدا فاز ولتاژ ا ستخراج شده و سپس زاویه‌ی آتش تریستور تولید می‌شود. هم‌چنین با عملکرد دیود هرزگرد نیز آشنا شدید.

www.powerplantac.com

www.powerplantac.com

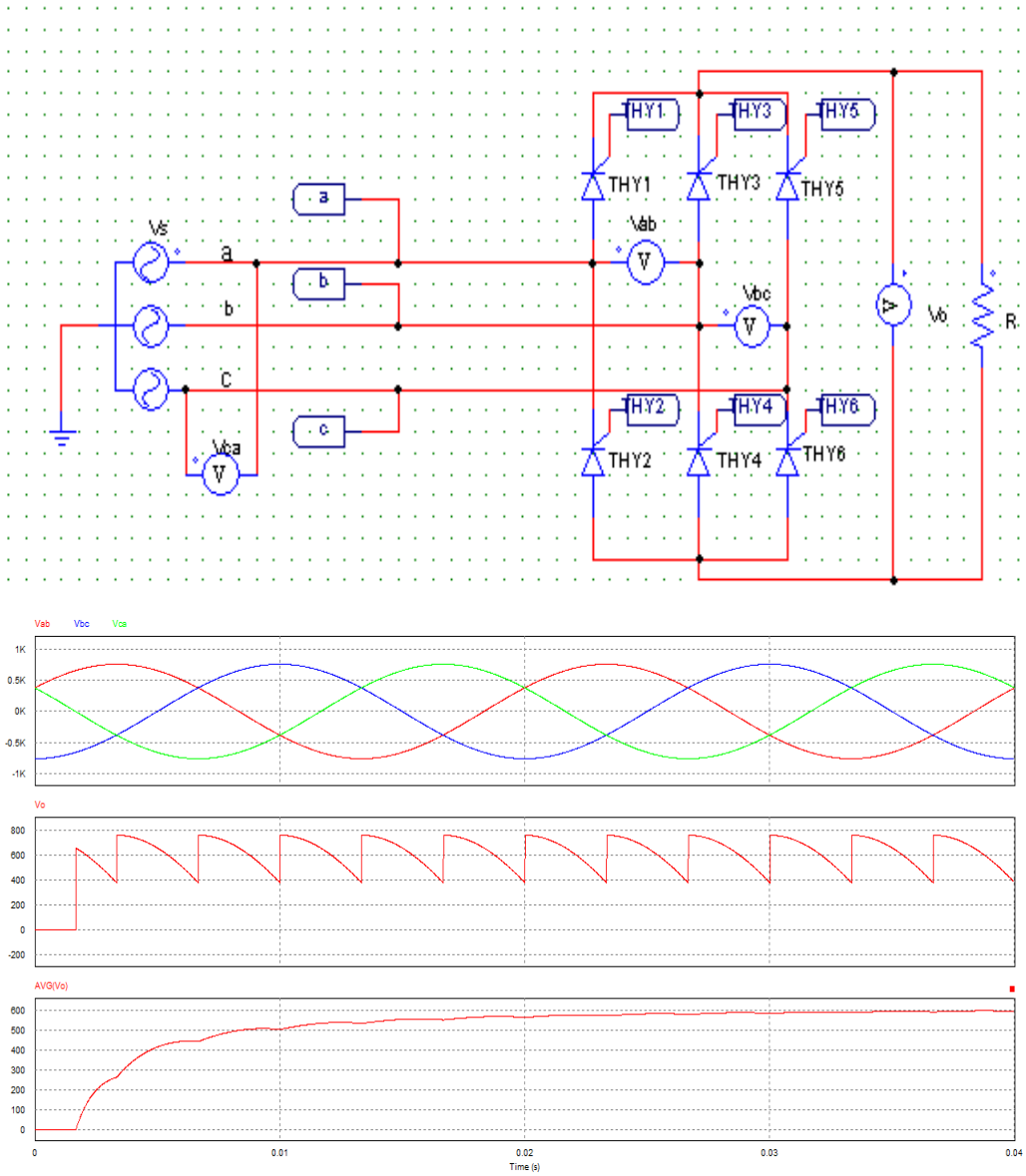
فصل چهارم

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

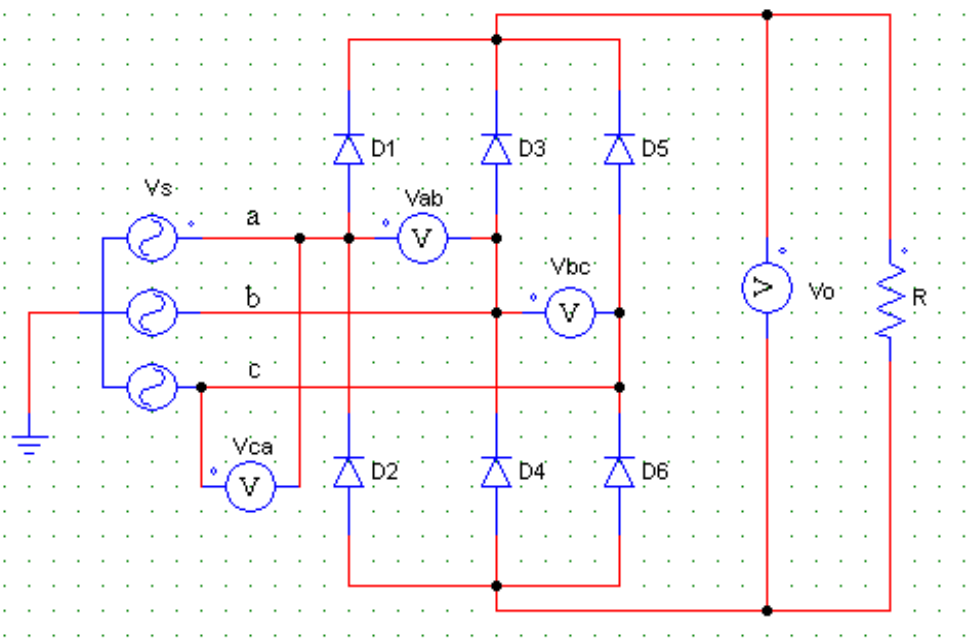


(شکل ۱.۴): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

۴-۲- اجرای شبیه‌سازی

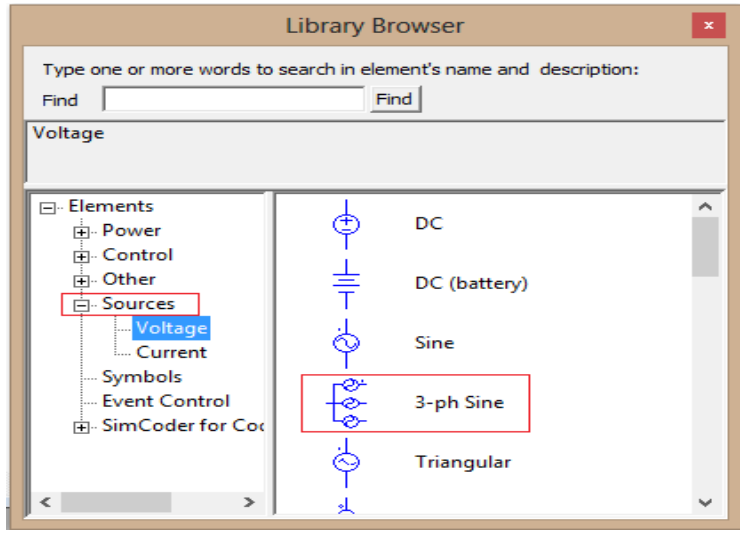
پیش از شبیه سازی مدار برای آشنایی بیشتر با ترتیب روشن شدن سوئیچ‌ها در یک یکسوساز سه‌فاز، ابتدا یکسوساز دیودی سه‌فاز شبیه سازی می شود. برای این منظور در محیط نرم‌افزار PSIM یک پروژه‌ی جدید ایجاد کرده و آن را با نام Diod_rectifier ذخیره کنید. با اســـتفاده از المان‌های موجود در نوار ابزار المان‌ها یا کتابخانه‌ی نرم‌افزار، مدار شکل زیر را رسم نمایید.



(شکل ۲.۴): یکسوسازی دیودی سه‌فاز

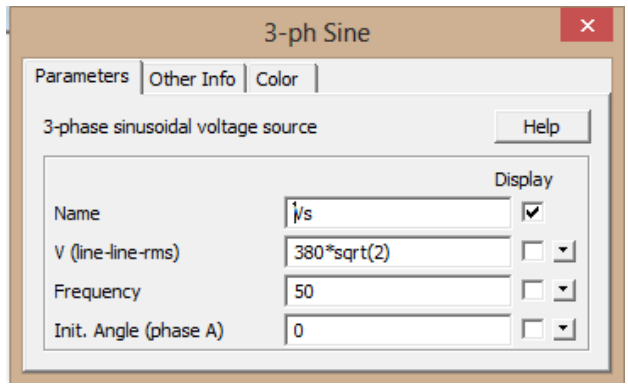
www.powerplantac.com

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.

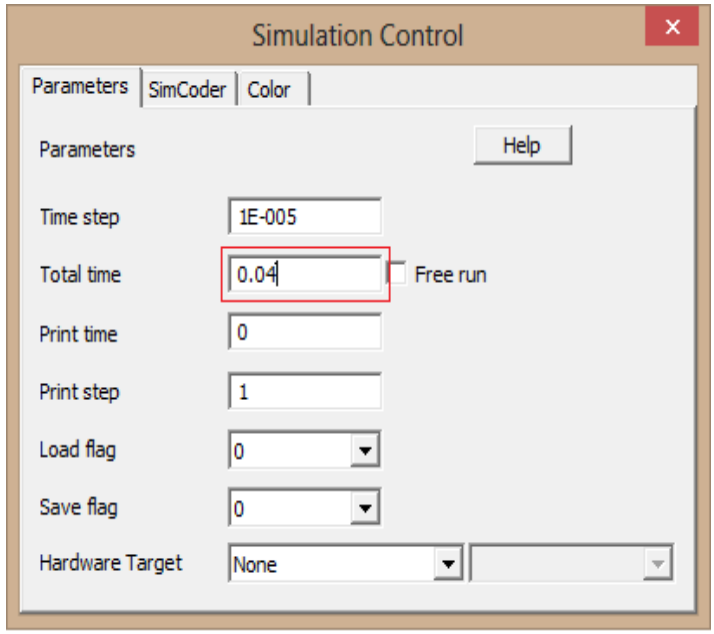


(شکل ۴.۴): منبع ولتاژ سه‌فاز

www.powerplantac.com

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.

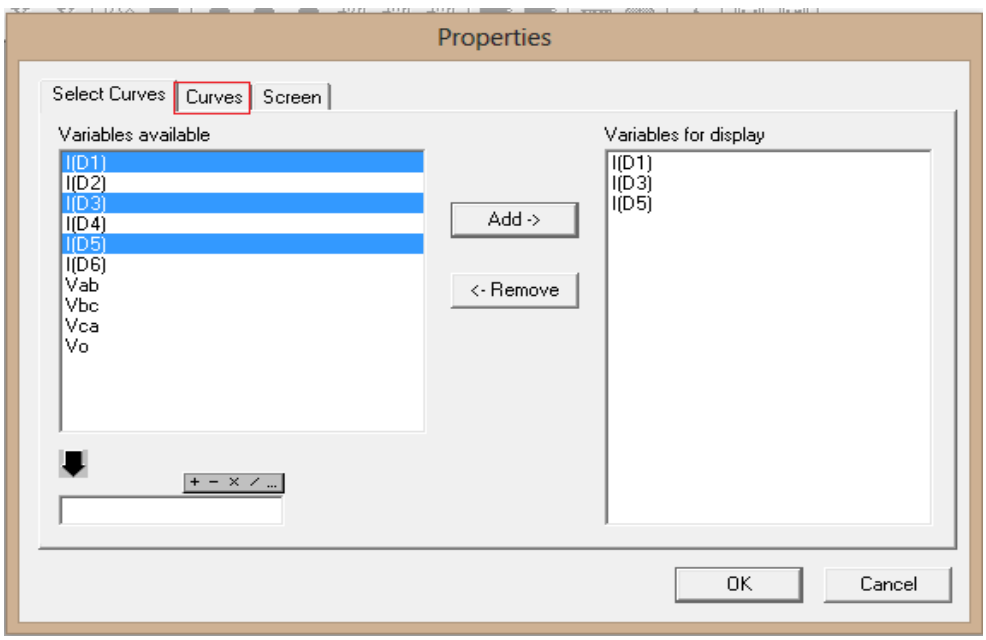
پیش از اجرای شبیه‌سازی از منوی Simulate گزینه‌ی Simulation Control را انتخاب می‌کنیم. همانطور که قبلا نیز گفته شد، نشان‌گر ماوس به شکل ساعت در می‌آید، با کلیک کردن در نقطه‌ی دلخواهی از صفحه، پنجره‌ی زیر باز می شود که در آن زمان شبیه‌سازی را در ۰,۰۴ ثانیه تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۵.۴): Simulation Control

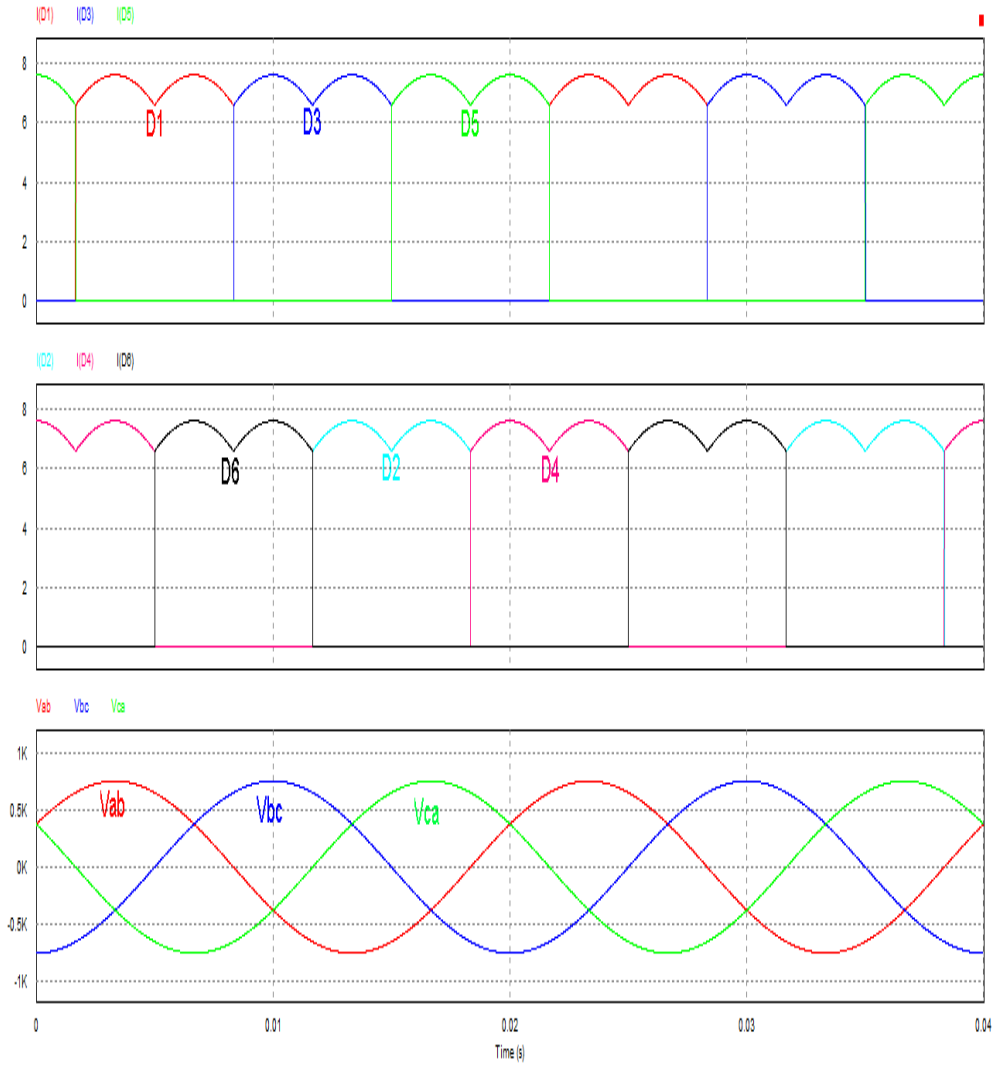
www.powerplantac.com

حال شـــبیه‌ســـازی را اجرا می‌کنیم و در پنجره‌ی بازشـــده، جریان دیودهای D_1، D_3و D_5 را انتخاب می‌کنیم. توجه داشـــته باشـــید 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 این‌بار جریان دیودهای دو، چهار و شش را در یک نمودار جدید زیر نمودار قبلی رسم می‌کنیم، همین‌کار را برای ولتاژهای Vab، Vbc و Vca انجام می‌دهیم. شکل زیر خروجی را نمایش می‌دهد.



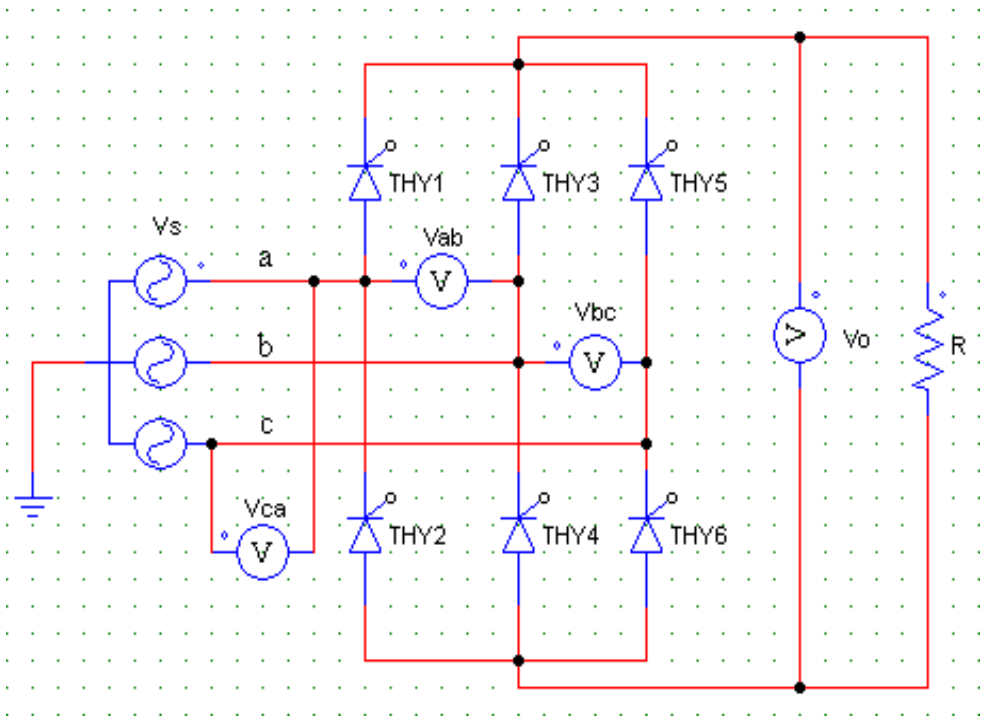
(شکل ۷.۴): جریان‌های دیود و ولتاژهای خط

همانطور که مشخص است دیود شماره یک، زمانی روشن می‌شود که $Vca < 0$ باشد. دیود شماره سه نیز وقتی که Vab منفی گردد، رو شن می شود. جدول زیر زمان رو شن

شـــدن ســـایر دیودها را نشـــان می‌دهد. با اســـتفاده از این اطلاعات، می‌توان ســـیگنال ســـنکرون‌کننده را برای کنترل‌کننده‌های آلفا تولید کرد. بنابراین برای هر تریســـتور، یک کنترل‌کننده‌ی آلفا در نظر می‌گیریم.

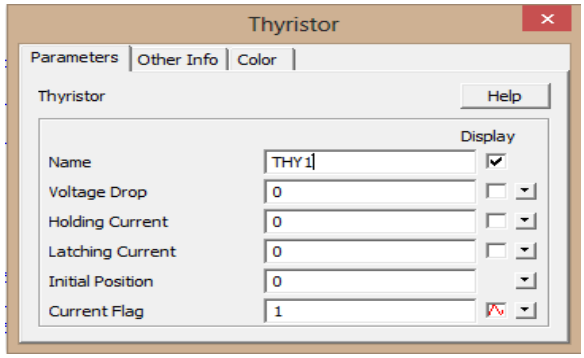
شماره‌ی تریستور	شرط روشن شدن
۱	Vca<0
۲	Vca>0
۳	Vab<0
۴	Vab>0
۵	Vbc<0
۶	Vbc>0

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



(شکل ۸.۴): مدار یکسوساز سه‌فاز تریستوری

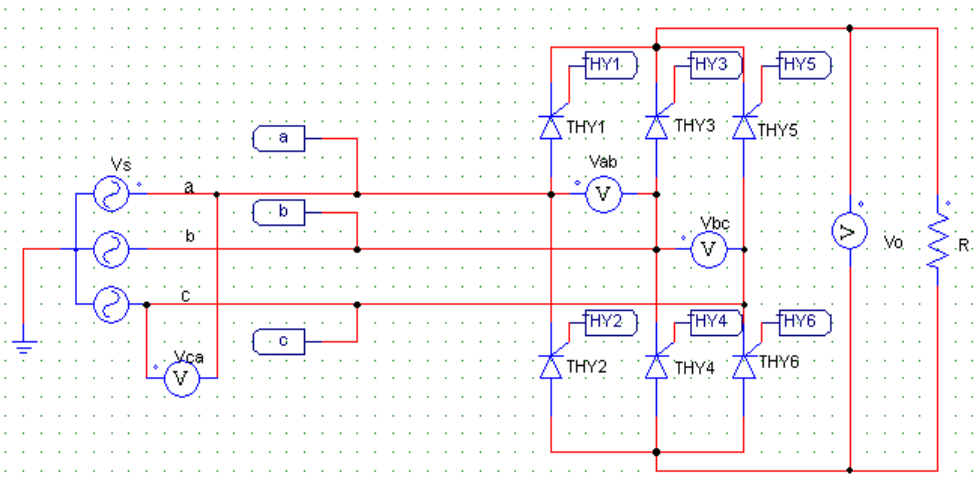
تمامی تریستورها به صورت زیر تنظیم شده‌اند:



(شکل ۹.۴): تنظیمات تریستور

www.powerplantac.com

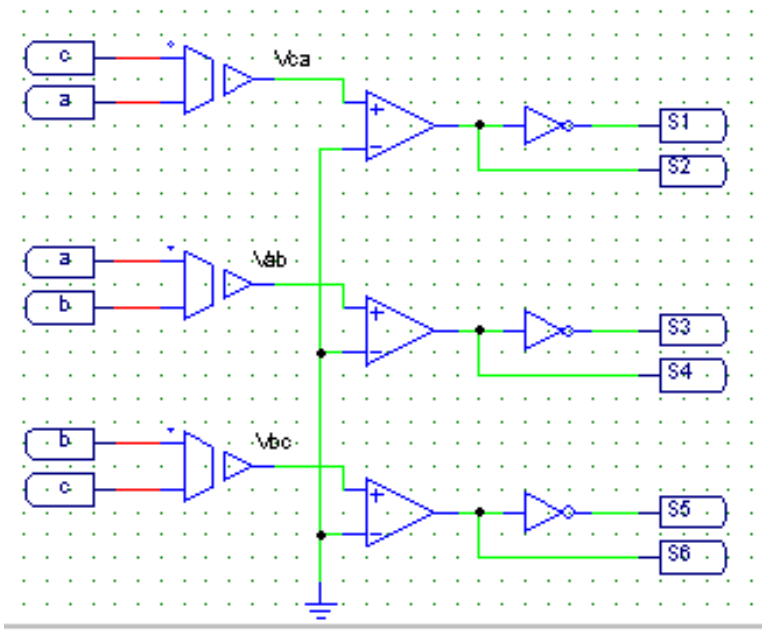
برای تولید سیگنال‌های مربوط به گیت تریستورها، به شش کنترل‌کننده‌ی آلفا نیاز داریم. سیگنال سنکرون‌کننده‌ی مربوط به این کنترل‌کننده‌ها نیز مطابق جدول فوق، بوسیله‌ی مقایسه‌ی ولتاژ خطوط با صفر به‌دست می‌آید. بنابراین مدار کنترلی به سیم‌کشی‌های زیادی احتیاج خواهد داشت. به‌منظور جلوگیری از پیچیده شدن مدار، 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 تریستورها استفاده می‌کنیم.



(شکل ۴.۱۰): استفاده از برچسب برای انشعاب گرفتن و گیت تریستور

www.powerplantac.com

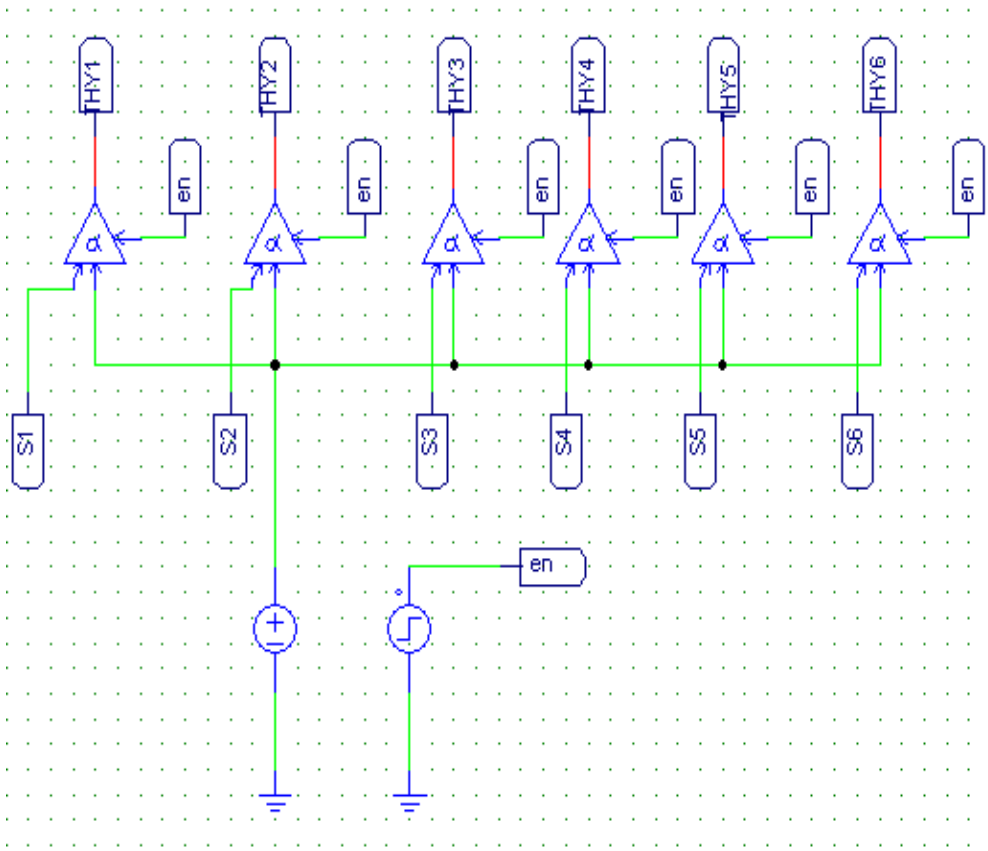
پس از انتخاب برچسب پنجره‌ای به‌شکل زیر باز می‌شود که در کادر مربوطه نامی را برای گره مورد نظر در نظر می‌گیریم. اگر دو برچسب نام یکسانی داشته باشند، دو نقطه‌ای که برچسب‌ها به آن متصل هستند به یکدیگر متصل می شوند. برای اندازه‌گیری ولتاژ خطوط باید از سنسور ولتاژ ( ) استفاده کنیم. برای مثال برای اندازه‌گیری ولتاژ Vab 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

www.powerplantac.com

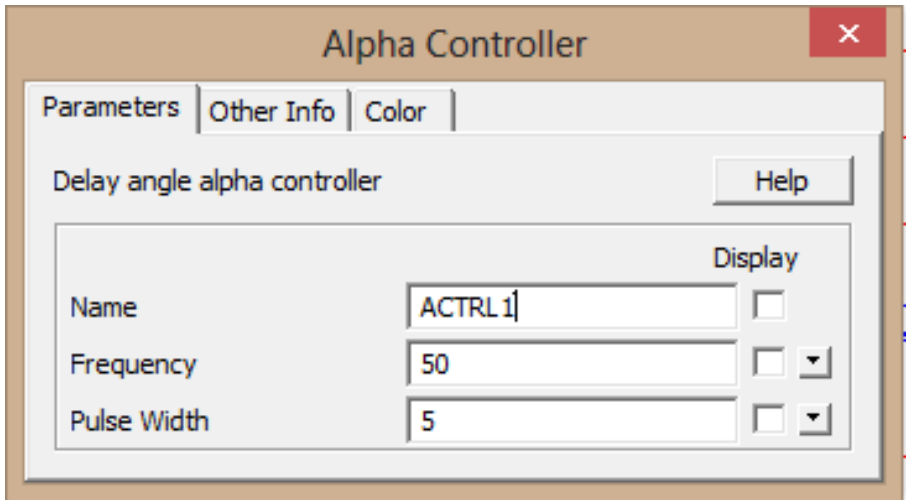
حال شـــش کنترل‌کننده‌ی آلفا به مدار اضـــافه می‌کنیم. شـــکل زیر مدار مربوط به این کنترل‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۲.۴): مدار کنترل‌کننده‌ها

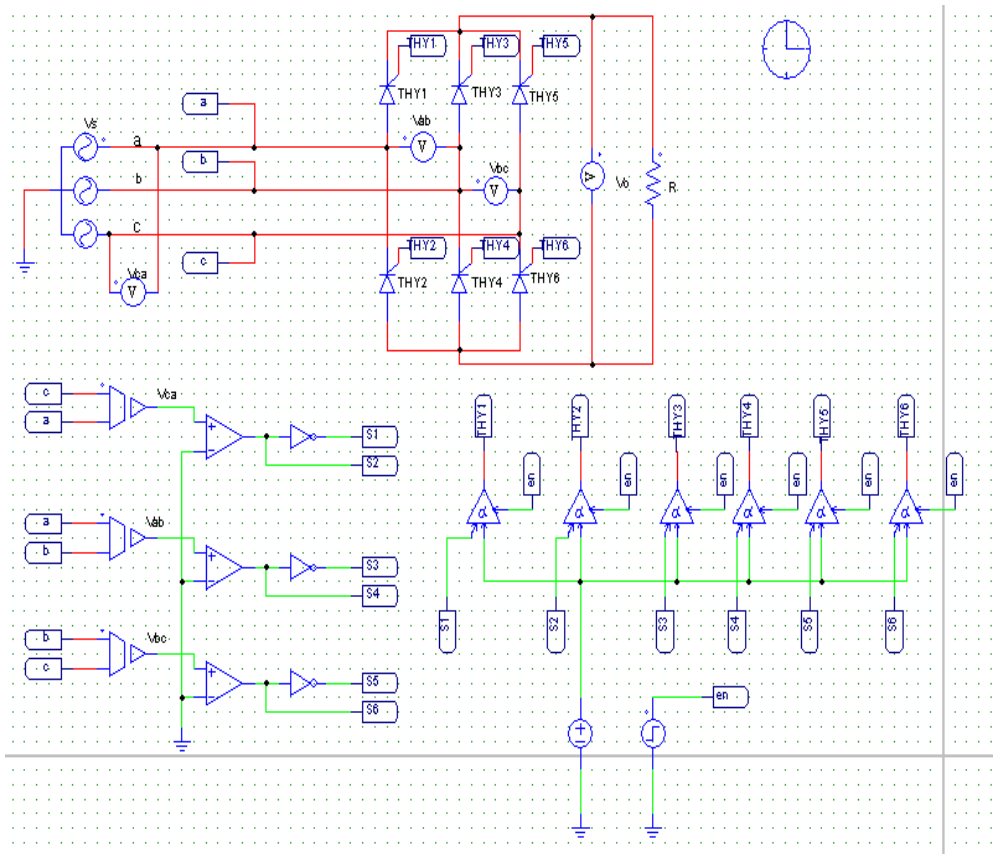
تمام کنترل‌کننده‌های آلفا را به صورت زیر تنظیم می‌کنیم.

www.powerplantac.com



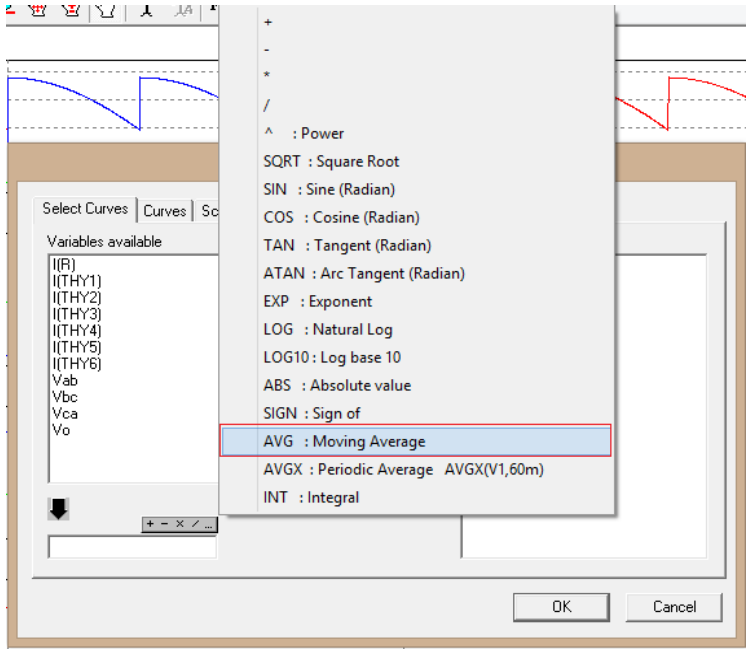
(شکل ۱۳.۴): تنظیم کنترل‌کننده‌های آلفا

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، Vstep در یک و Tstep 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 سنکرون کننده 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.

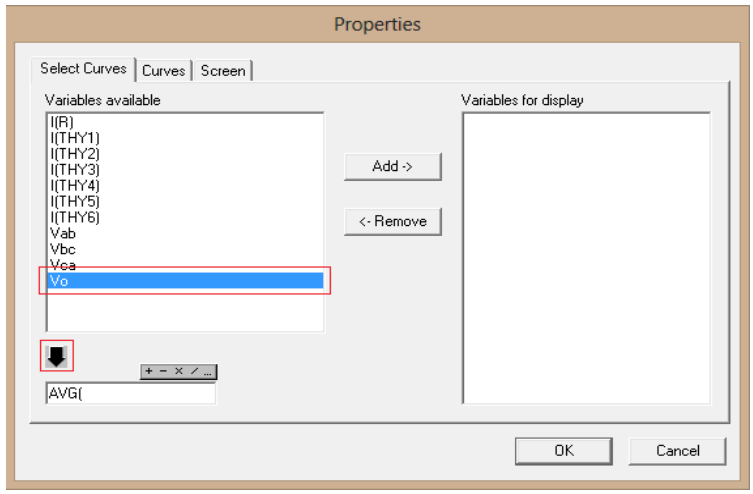


(شکل ۱۴.۴): نمای کامل مدار

زمان شبیه‌سازی را در ۰/۰۴ ثانیه تنظیم کرده وشبیه‌سازی 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 متو سط ولتاژ خروجی را در نمودار چهارم رسم کنید. برای این کار طبق شکل زیر گزینه‌ی AVG را انتخاب کرده و سپس Vo را به کادر پایین انتقال می‌دهیم.

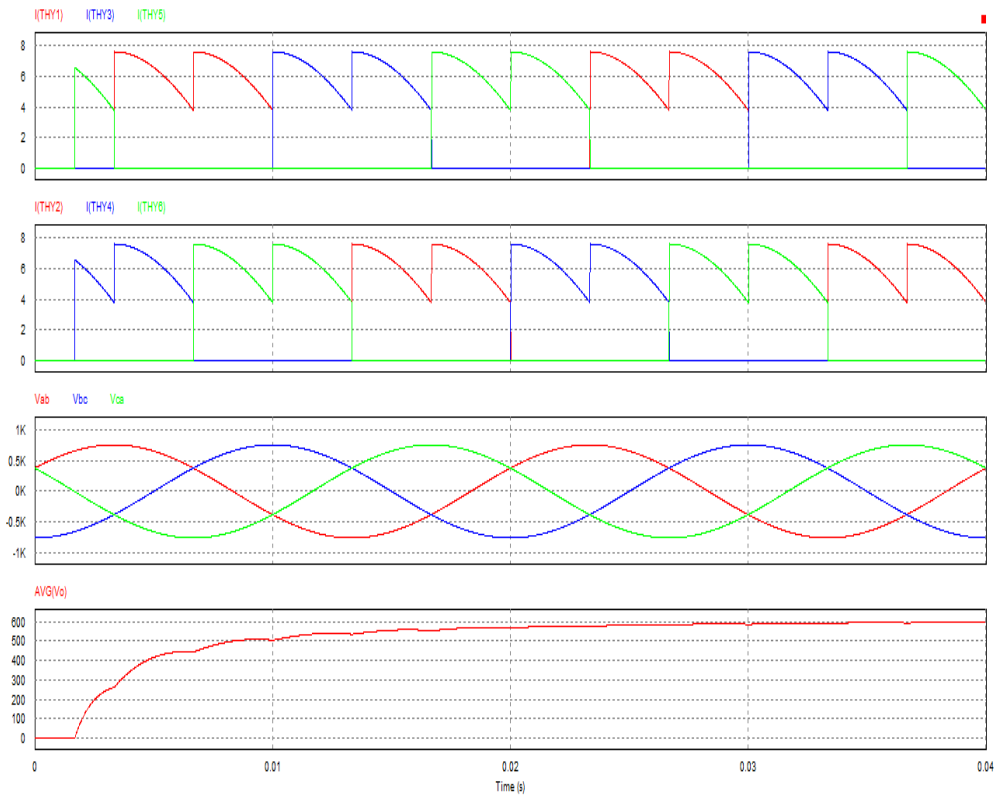


(شکل ۱۵.۴): ابزار عملگرها



(شکل ۱۶.۴): تنظیمات Properties

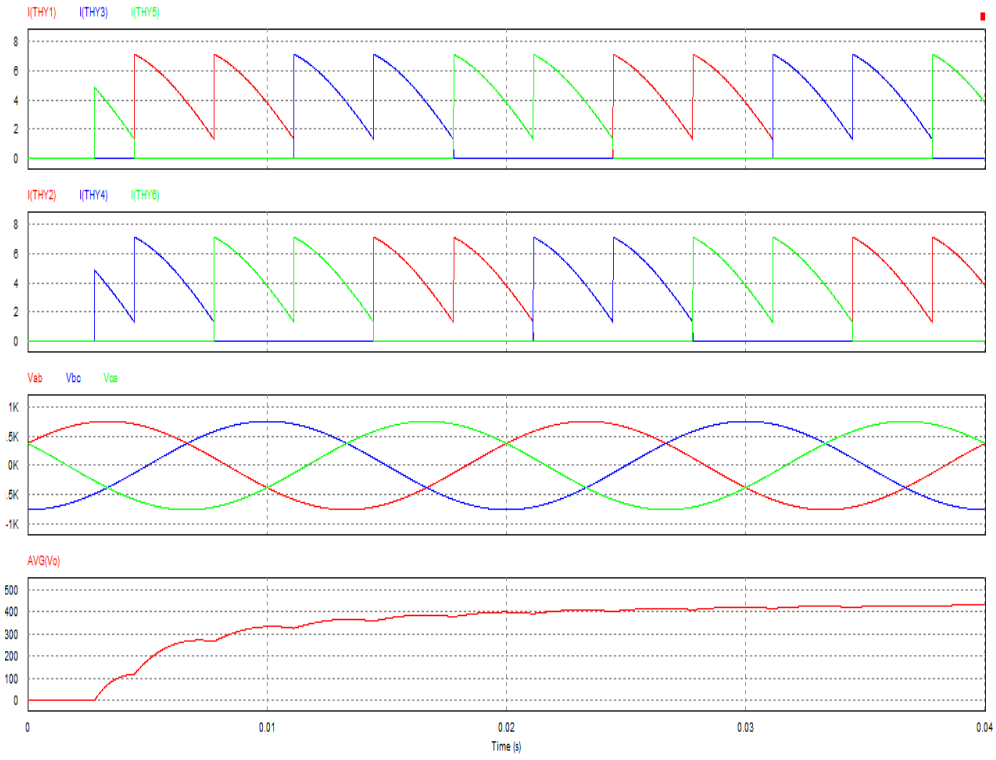
با زدن Add عبارت AVG (Vo) به کادر سمت راست منتقل می‌شود. حال اگر دکمه‌ی OK را بزنیم متوسط ولتاژ خروجی رسم می‌شود، شکل زیر خروجی مدار را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۷.۴): شکل موج‌های خروجی

حال زاویه‌ی آتش تریستورها را در ۵۰ درجه تنظیم می‌کنیم. برای این کار کافی است که ولتاژ منبع DC را در ۵۰ تنظیم کنیم. شـــکل نمودارهای فوق را با زاویه‌ی آتش ۵۰ درجه نشان می‌دهد.

www.powerplantac.com

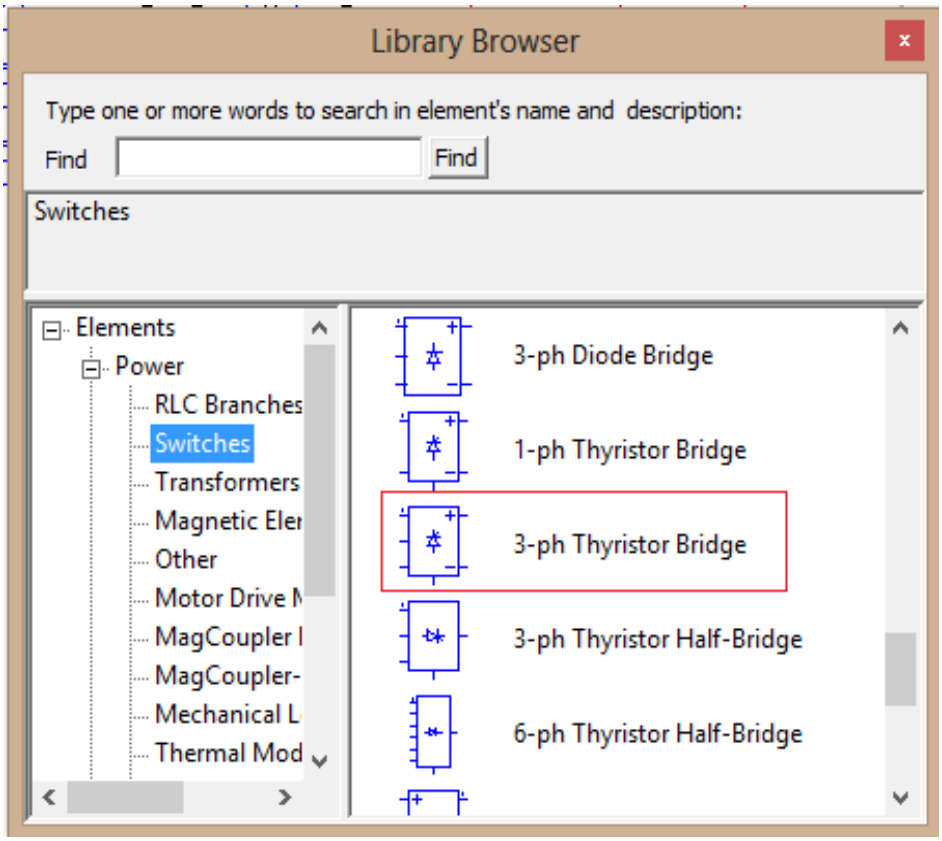


(شکل ۱۸.۴): شکل موج خروجی با زاویه آتش ۵۰ درجه

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه‌ی آتش تریستورها متوسط ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. از آنجایی که طراحی مدار یکسوساز 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 پرکابرد به‌صورت 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 یکسوساز تریستوری طبق شکل زیر در کتابخانه‌ی نرم‌افزار ۳-ph

www.powerplantac.com

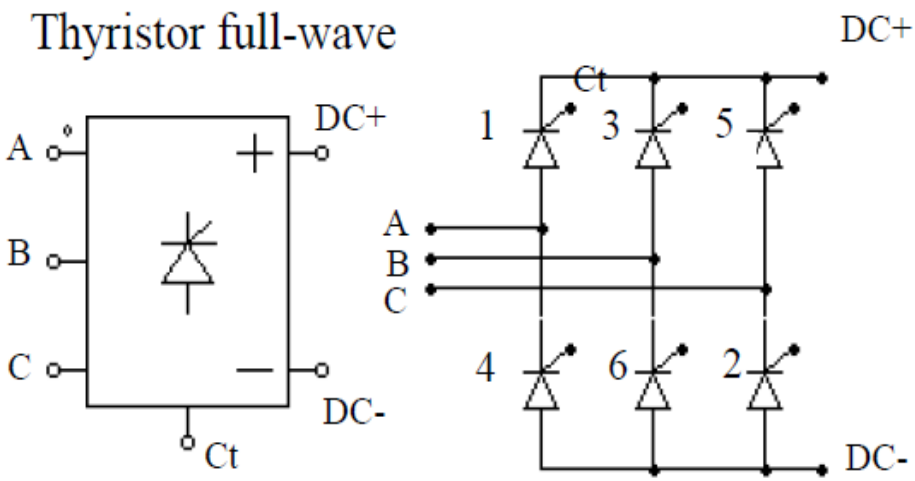
Thyristor Bridge را انتخاب کنید. همانطور که ملاحظه می‌کنید در این قسمت بلوک‌های آماده‌ی مربوط به سایر مدارهای پرکابرد نیز وجود دارند.



(شکل ۱۹.۴): کتابخانه ابزار

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

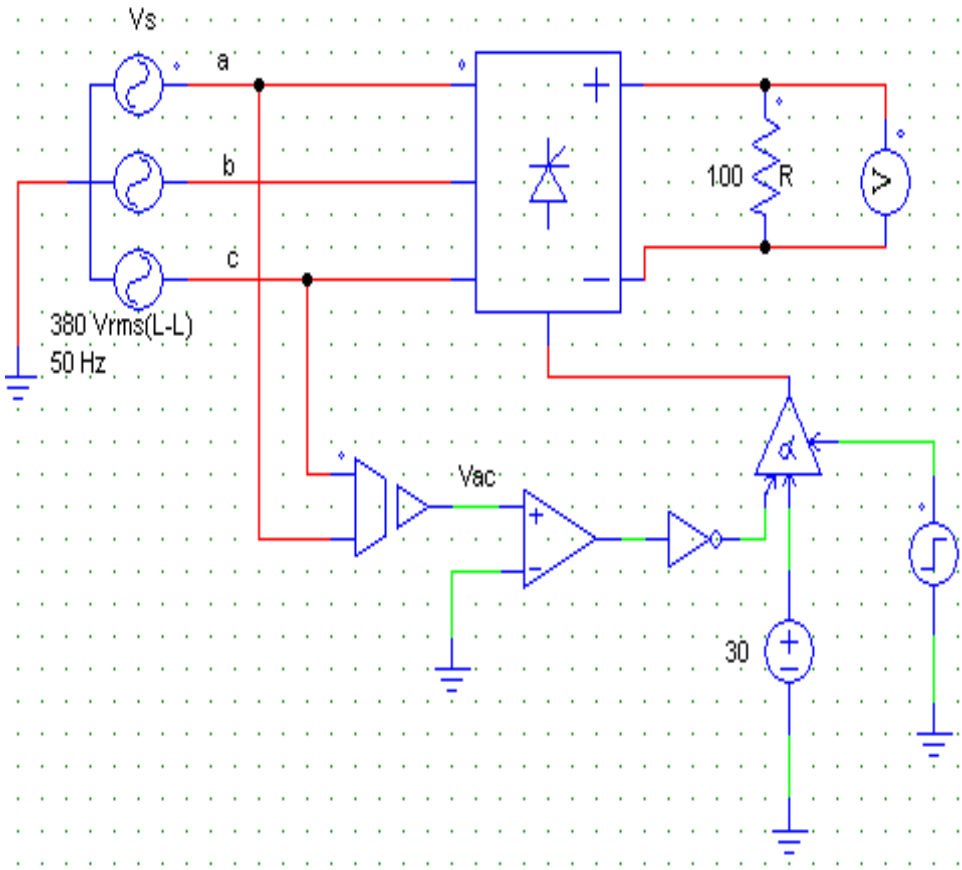
توســـط کنترل‌کننده‌ی آلفا یا تولیدکننده‌ی پالس تنظیم می‌شـــوند. به این ورودی فقط زاویه‌ی آتش تریســتور یک اعمال می‌شـود و زاویه‌ی آتش مربوط به ســایر تریســتورها به صـورت داخلی توسـط خود بلوک تولید می‌گردد. شـکل زیر، داخل این بلوک را به همراه نحوه‌ی شماره‌گذاری تریستورها نشان می‌دهد.



(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.

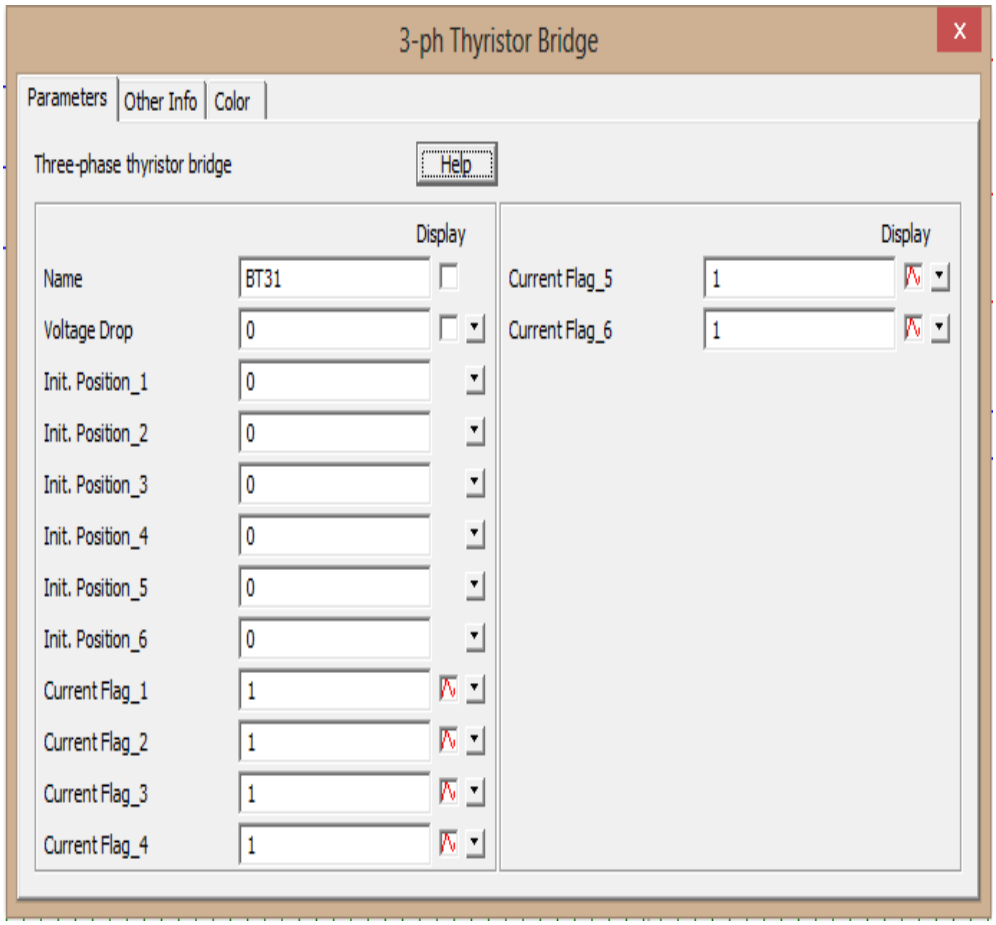
www.powerplantac.com



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

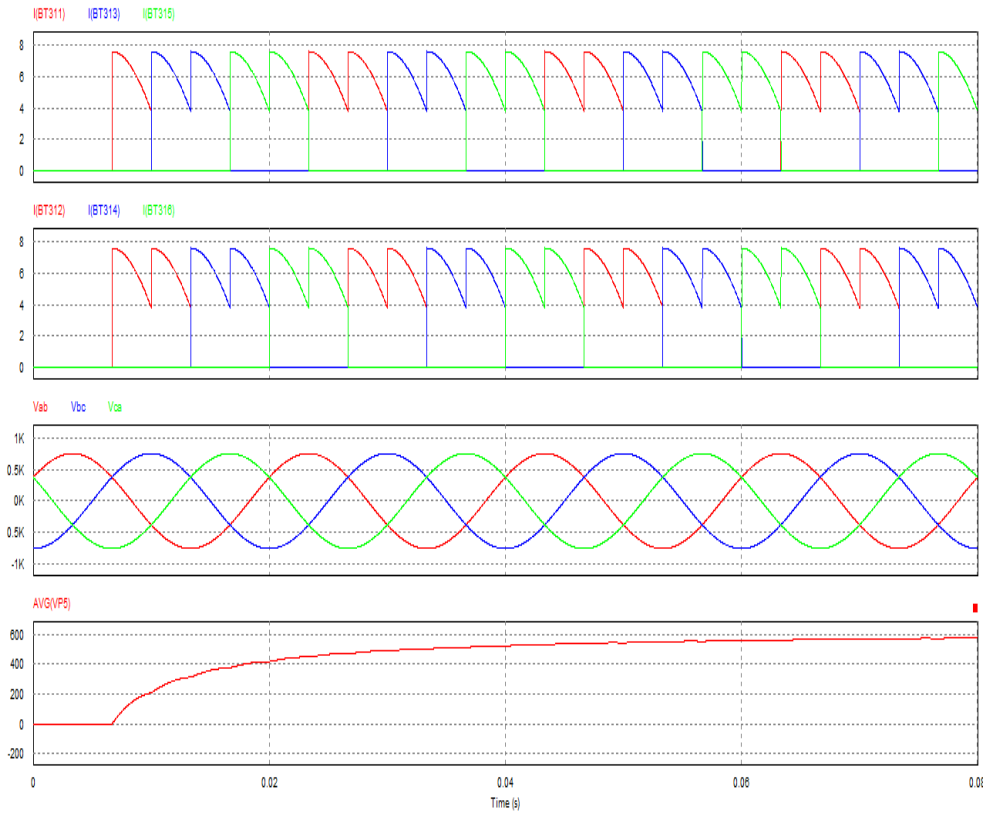
با دوبار کلیک روی بلوک یکسو ساز، پنجره‌ای باز می شود که در آن می‌توان تنظیمات مربوط به شش دیود را اعمال کرد. در نظر دا شته با شید که شماره‌گذاری‌ها، طبق شکل صفحه‌ی قبل انجام شده ا ست. در این‌جا برای نمایش جریان تری ستورها در کادر مقابل Current Flag ها عدد یک درج شده است.

www.powerplantac.com



(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 شبیه سازی 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 صرفا آشنایی با نحوه‌ی کنترل و هماهنگی تریستورها در یک مدار بود و برای شبیه‌سازی انواع مختلف یکسوسازها می‌توان از بلوک‌های آماده‌ی موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار استفاده کرد.

www.powerplantac.com

فصل پنجم

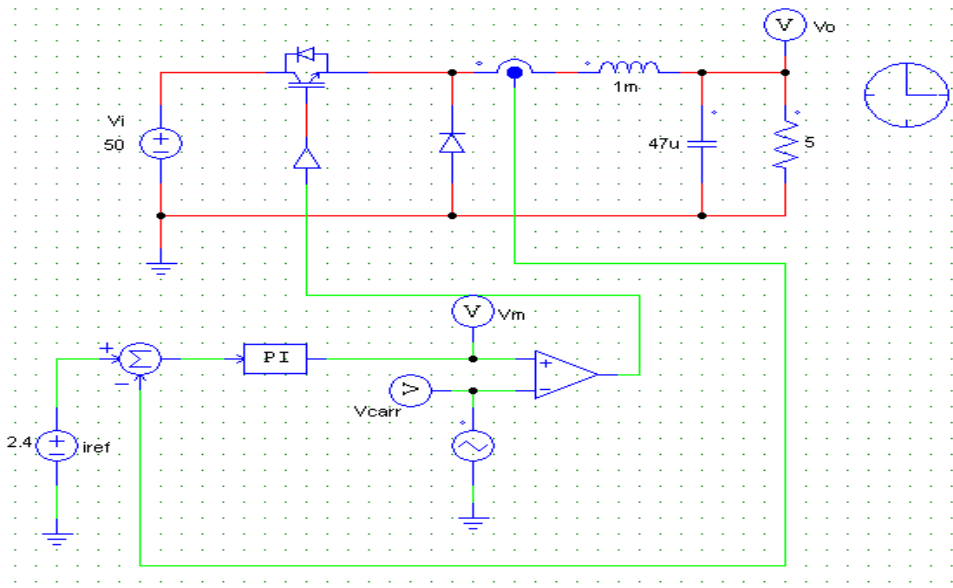
شبیه‌سازی مبدل DC به DC با کنترل جریان متوسط

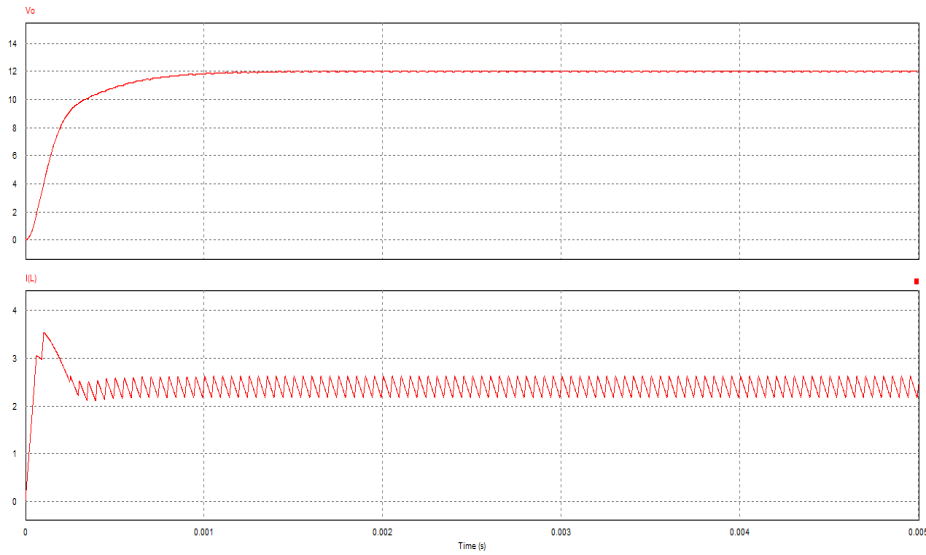
۵– مقدمه

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.

www.powerplantac.com

۵-۱- طرح مدار



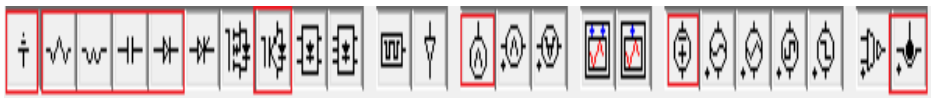


(شکل ۱.۵): شمای کلی مدار

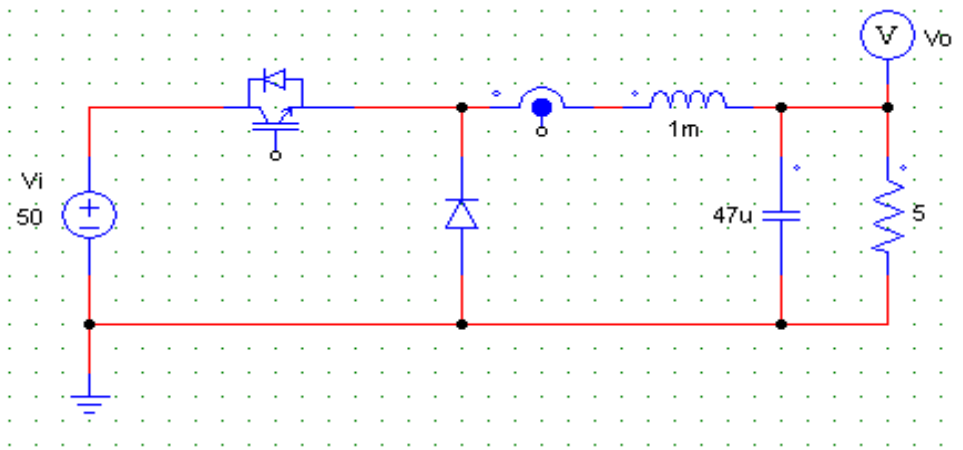
www.powerplantac.com

۵-۲-اجرای شبیه‌سازی

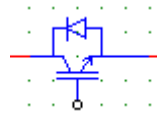
ابتدا مدار شکل زیر را با استفاده از المان‌های موجود در نوار ابزار المان رسم کرده و آن را با نام Average_Current_Mode_Ctrl ذخیره می‌کنیم.



(شکل ۲.۵): انتخاب‌های المان‌ها از نوار ابزار

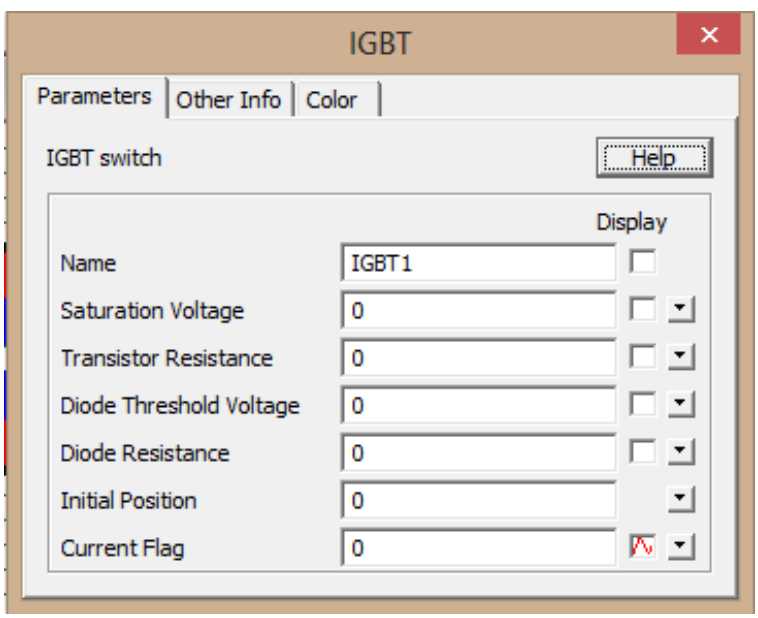


(شکل ۳.۵): پیاده سازی اولیه مدار

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

www.powerplantac.com

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



(شکل ۴.۵): تنظیمات IGBT

www.powerplantac.com

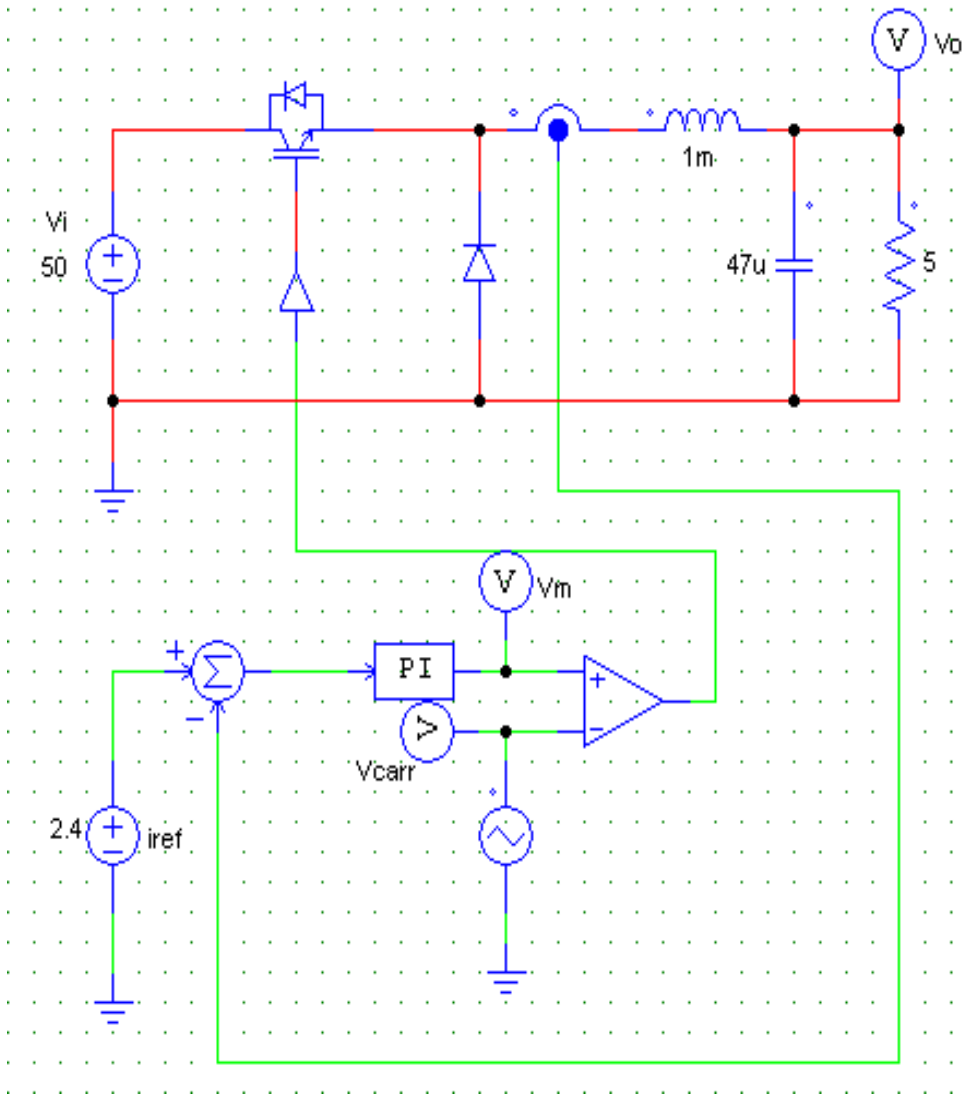
Saturation Voltage: افت ولتاژ روی ترانزیستور زمانی که روشن است
Transistor Resistance: مقاومت ترانزیستور در زمان روشن بودن
Diode Threshold Voltage: ولتاژ آستانه‌ی هدایت دیود معکوس و موازی
Diod Resistance: مقاومت دیود در زمان هدایت
Initial Position: موقعیت اولیه‌ی ترانزیستور (صفر برای خاموش و یک برای روشن)

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 دا شته با شید با نو شتن 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 ا ست 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

www.powerplantac.com



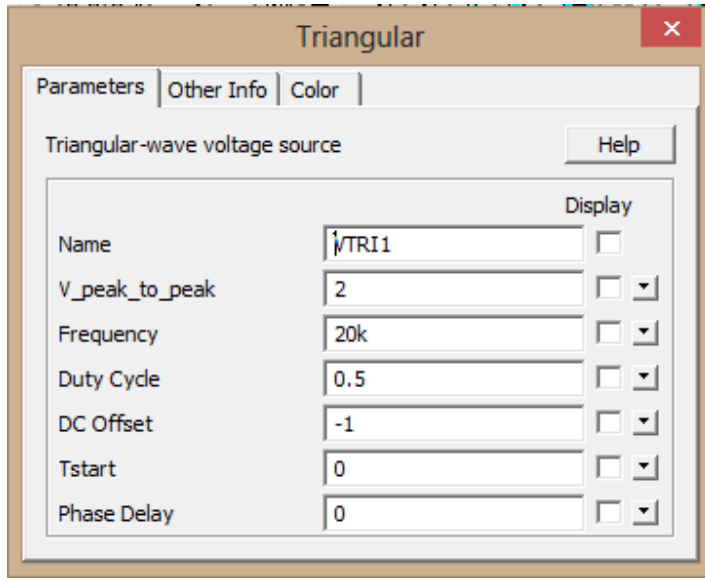
(شکل ۶.۵): اعمال قسمت کنترلی به مدار

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

www.powerplantac.com

مناسب جهت مقایسه با سیگنال حامل (سیگنال مثلثی) تولید شود. در خروجی مقایسه‌گر، پالس‌های مناسب جهت روشن و خاموش شدن کلید به‌گونه‌ای تولید می شود که جریان سلف در مقدار مرجع تنظیم شود. باید توجه کرد از آنجایی که سیگنال خروجی مقایسه‌گر یک سیگنال کنترلی است، نمی‌توان آن را مستقیما 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.

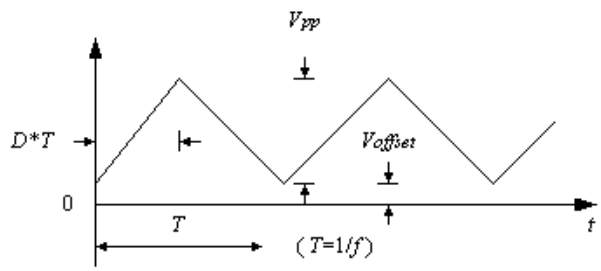
تنظیمات مربوط به منبع مثلثی به‌صورت زیر انجام شده است:



(شکل ۷.۵): تنظیمات منبع مثلثی

www.powerplantac.com

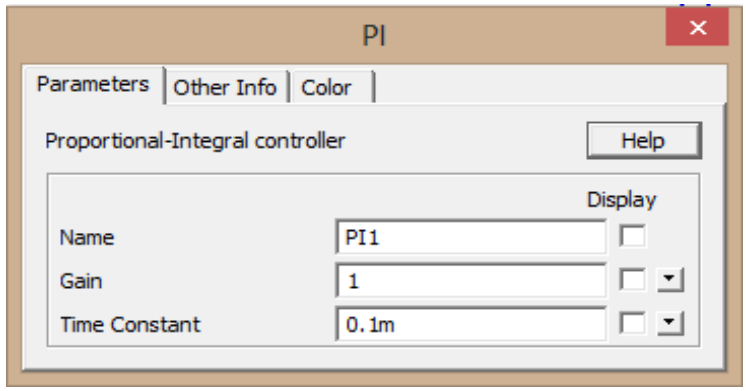
با این تنظیمات یک سیگنال مثلثی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌شود که در آن ولتاژ پیک تا پیک ۲V است. DC Offset و Duty Cycle در شکل زیر نشان داده شده است.



(شکل ۸.۵): سیگنال مثلثی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز

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

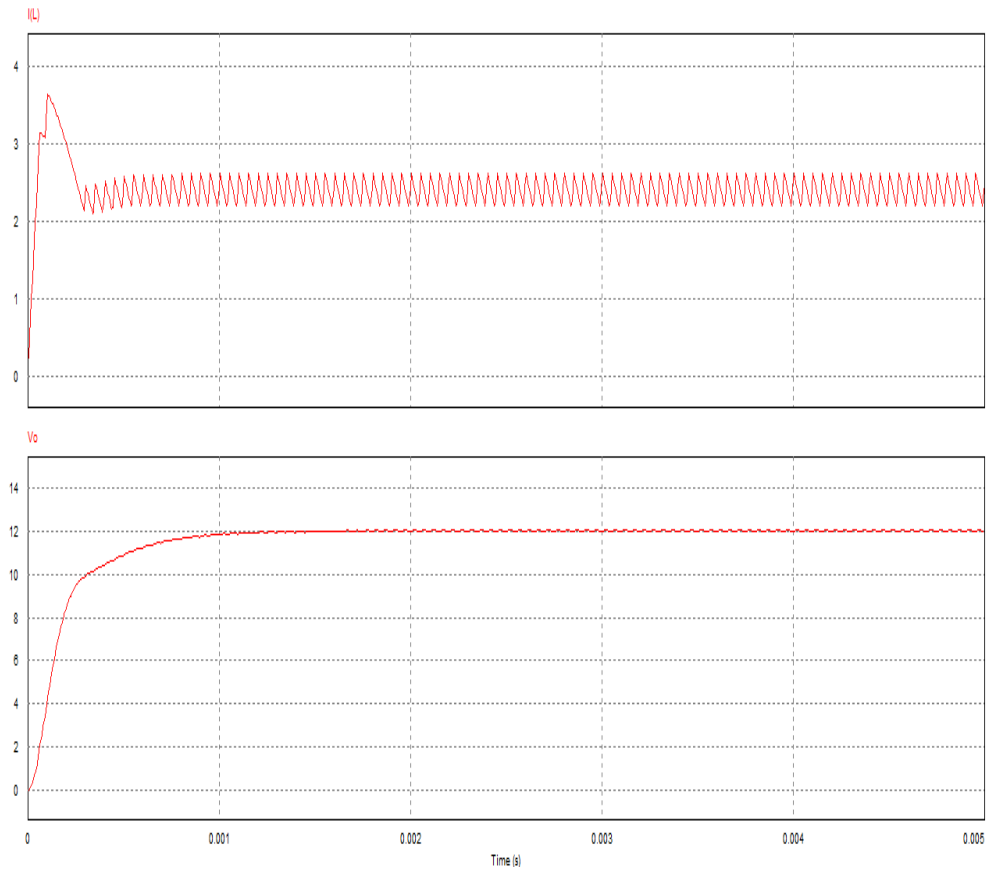
$$G(s) = K * (1 + sT)/(sT)$$



(شکل ۹.۵): تنظیمات کنترل‌کننده‌ی PI

www.powerplantac.com

پیش از شـــبیه‌ســـازی، Current Flag مربوط به ســـلف را یک می‌کنیم تا در خروجی جریان سلف نیز نمایش داده شود. زمان شبیه سازی را ۵ میلی‌ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی نمودار های Vo و I(L) را رســـم می‌کنیم، شـــکل زیر این خروجی‌ها را نشان می‌دهد.



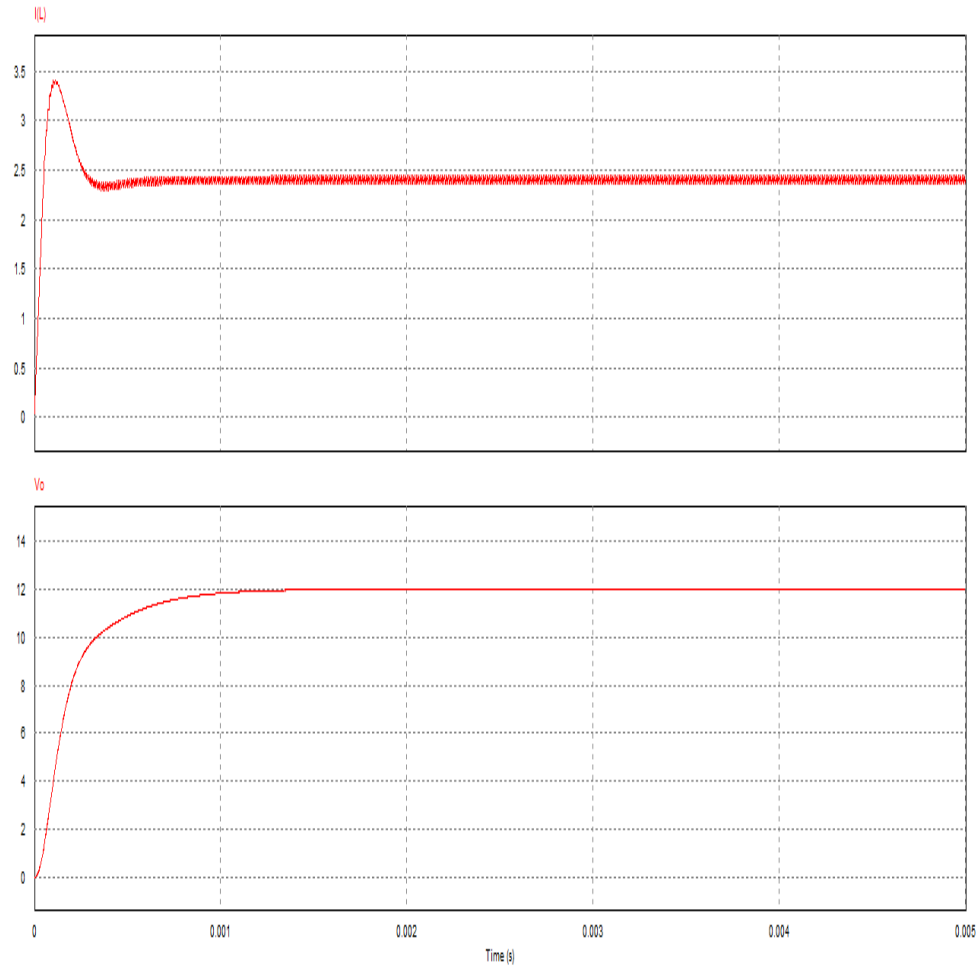
(شکل ۱۰.۵): خروجی نمودارهای Vo و I(L)

www.powerplantac.com

همانطور که مشاهده می‌شود جریان سلف در ۲/۴ آمپر تثبیت شده است (چراکه جریان مرجع در ۲/۴ 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 ۲/۴ آمپر خواهد بود.

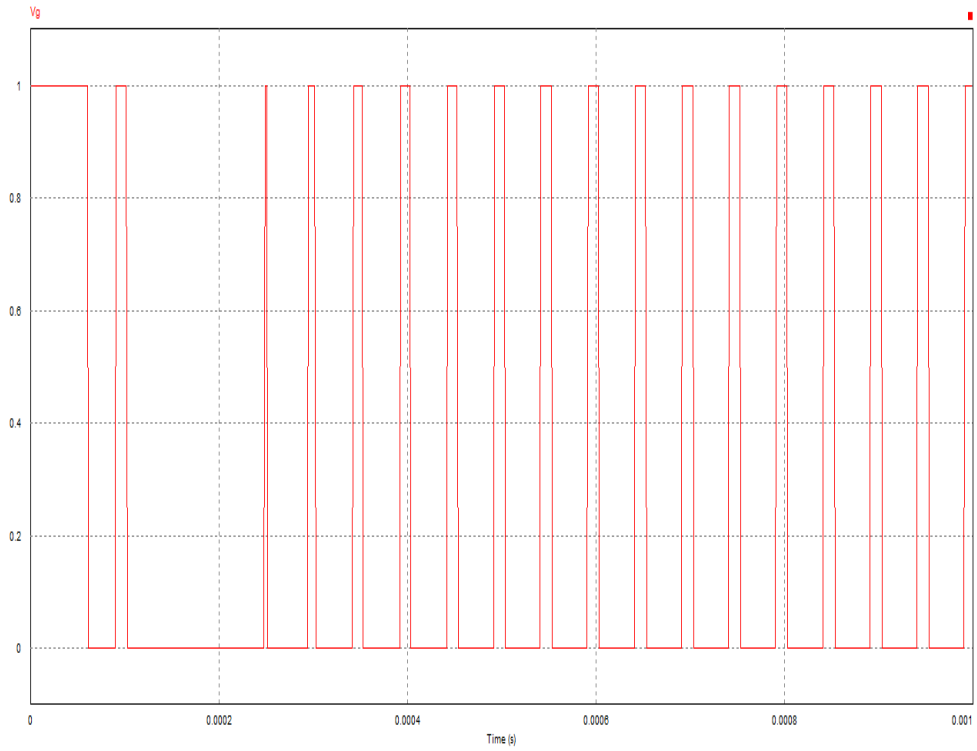
نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که هرچه فرکانس کلید زنی بیشتر باشد ریپل‌های موجود در نمودارهای خروجی کمتر می‌شود. فرکانس کلید زنی با فرکانس موج حامل برابر است. برای مثال فرکانس سیگنال مثلثی را در ۱۰۰ کیلوهرتز تنظیم کرده و شبیه‌سازی را دوباره اجرا نمایید، شکل زیر خروجی‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که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

www.powerplantac.com



(شکل ۱۱.۵): شکل موج‌های جریان و ولتا خروجی

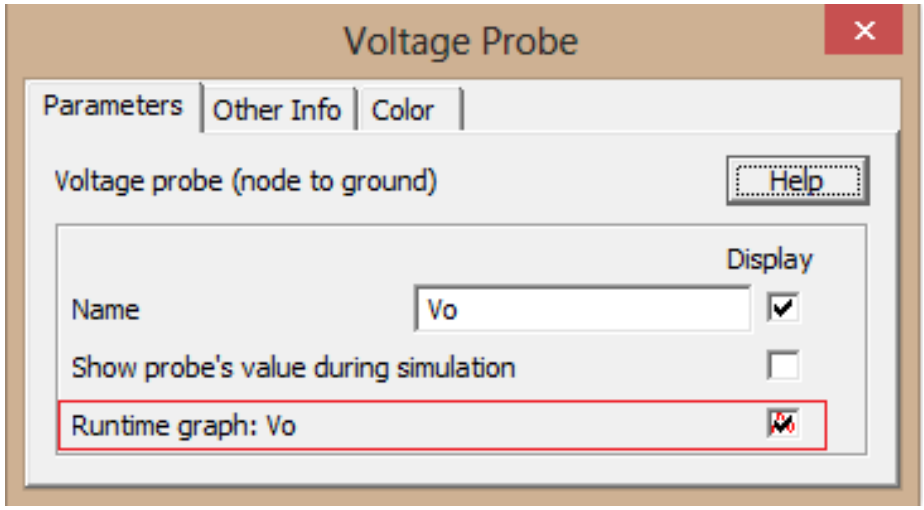
با قرار دادن یک پروب ولتاژ در خروجی مقایســـه‌گر می‌توان پالس‌های اعمالی به گیت ترانزیستور را مشاهده کرد. شکل زیر پالس‌های اعمال‌شده به ترانزیستور را نشان می‌دهد.



(شکل ۱۲.۵): پالس‌های اعمال‌شده به ترانزیستور

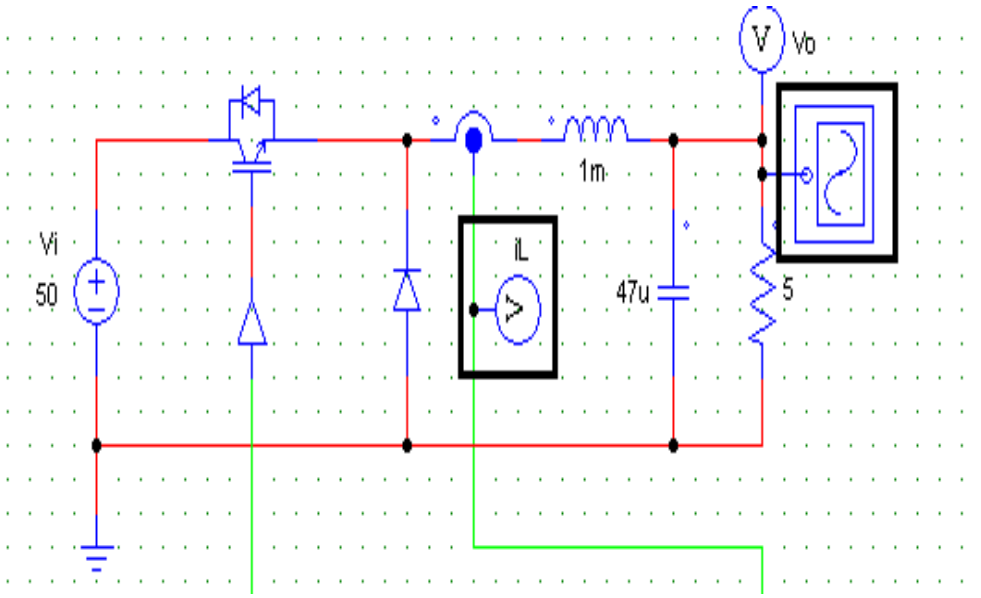
برای م شاهده‌ی اثر تغییر مقاومت روی شکل موج خروجی در حین شبیه سازی ابتدا زمان شبیه‌سازی را در یک ثانیه تنظیم کنید. برای مشاهده‌ی شکل موج ولتاژ خروجی در حین شبیه‌سازی دو روش وجود دارد. در روش اول روی پروب ولتاژ (Vo) دو بار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی مربوط به تنظیمات آن باز شود. با زدن تیک مربوط به گزینه‌ی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

www.powerplantac.com



(شکل ۱۳.۵): پروب ولتاژ

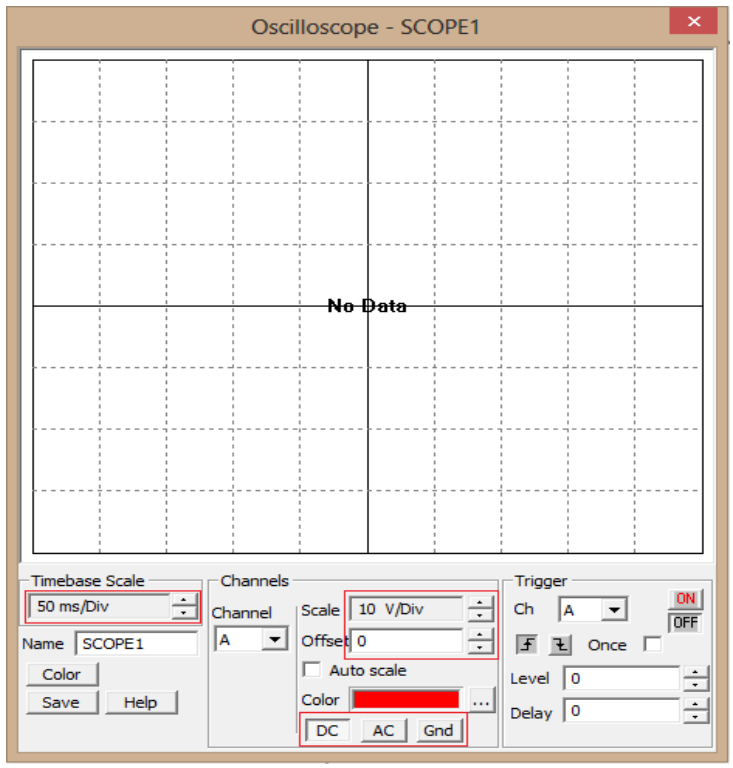
در روش دوم می‌توان یک اسیلوسکوپ یک‌کاناله ( ) به نقطه‌ی مورد نظر متصل کرد. در این حالت اسیلوسکوپ، ولتاژ آن نقطه را نسبت به زمین نمایش خواهد داد. برای نمایش جریان سلف در حین شبیه‌سازی نیز می‌توان یک پروب ولتاژ به خروجی سنسور جریان متصل نمود و تیک مربوط به graph Runtime را زد یا از یک اسیلوسکوپ استفاده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



(شکل ۱۴.۵): استفاده از اسیلوسکوب 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 می شود. 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 با شد، 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 تغییرات AC شـــکل موج و در حالت Gnd زمین مرجع نمایش داده می‌شود. اگر Trigger خامـــــوش روشن باشد، شکل موج زمانی نمایش داده می‌شود که شرایط Trigger ارضا شود.



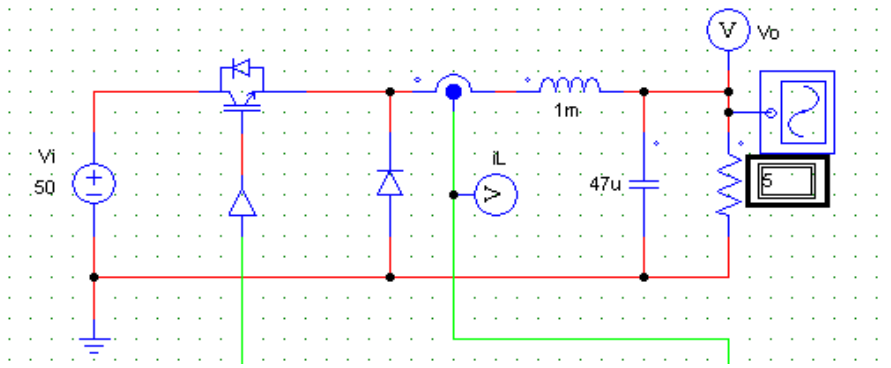
(شکل ۱۵.۵): اسیلوسکوپ

برای مثال اگر در اینجا تریگر رو شن شود، نمایش شکل موج از زمانی شروع می شود 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 می‌شـــود). با این کار می‌توان حالت‌های گذرای شـــکل موج را اســـتخراج کرد. برای تغییر مقدار مقاومت در حین شبیه‌سازی باید تیک مربوط به نمایش مقدار آن زده شده باشد.

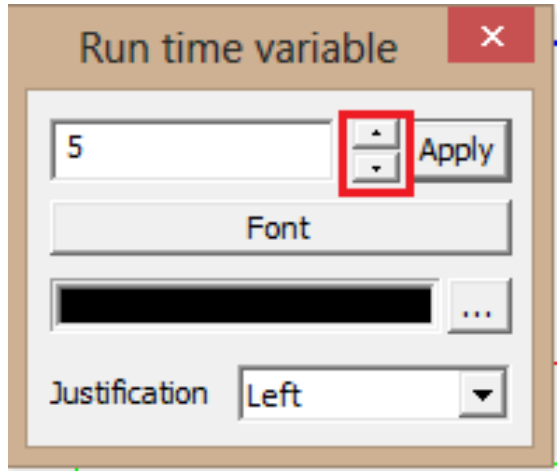
(شکل ۱۶.۵): مقاومت

حال روی مقدار نمایش‌داده‌شده برای مقاومت دو بار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی زیر باز شود.



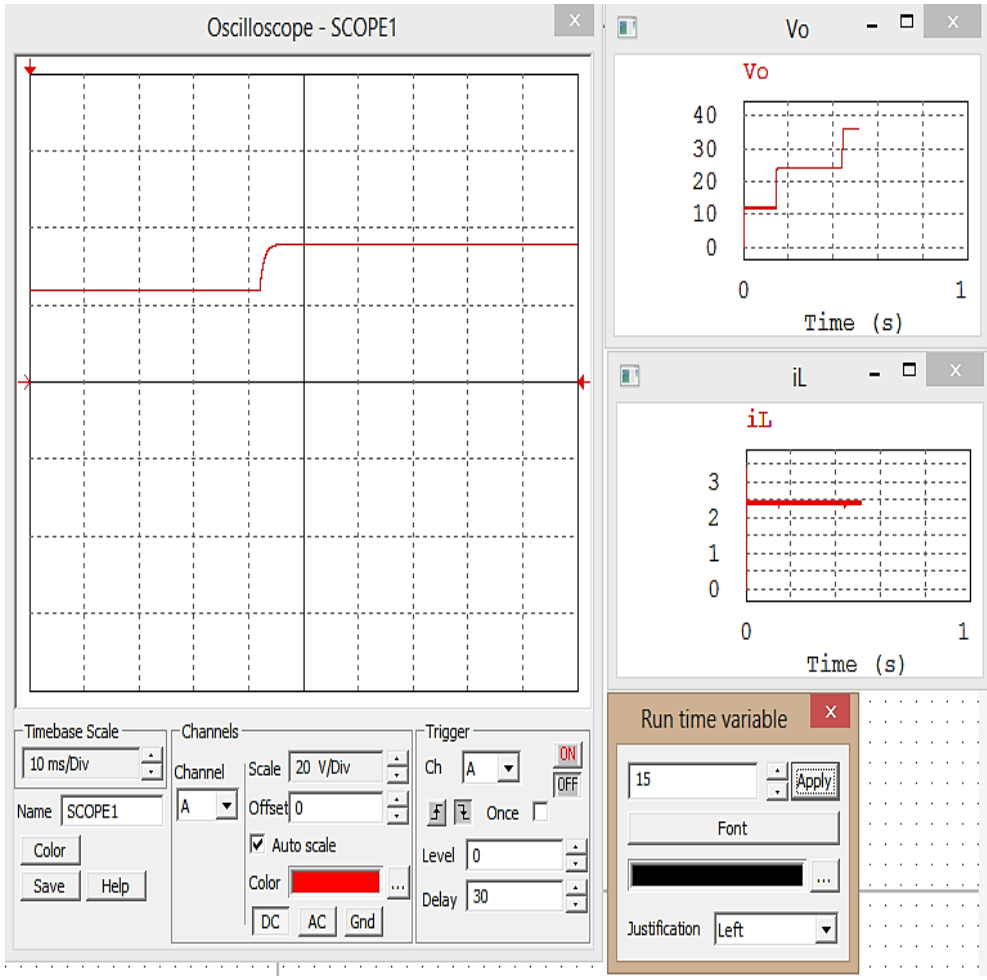
(شکل ۱۷.۵): مدار تکمیل شده

www.powerplantac.com



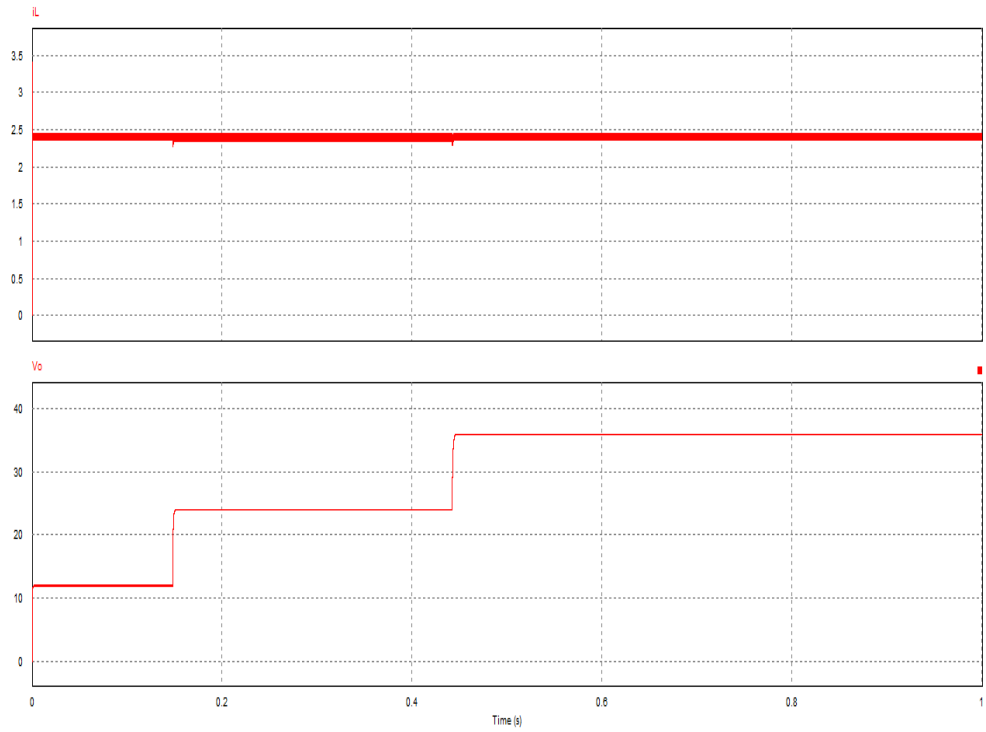
(شکل ۱۸.۵): بلوک تنظیم زمان اجرا

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 با شد و ا سیلو سکوپ نیز باز با شد 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 ۲/۴ آمپر ثابت باقی می‌ماند.

در این فصل یک مبدل DC به DC کاهنده با استفاده از کنترل‌کننده‌ی جریان شبیه‌سازی شد. برای چنین مبدل‌هایی عمدتا از ترانزیستور IGBT یا MOSFET استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که عملکرد ترانزیستور MOSFET نیز مشابه IGBT است. عموما برای کنترل چنین کلیدهایی، یک سیگنال مناسب (سینوسی، DC و ...) با سیگنال مثلثی

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

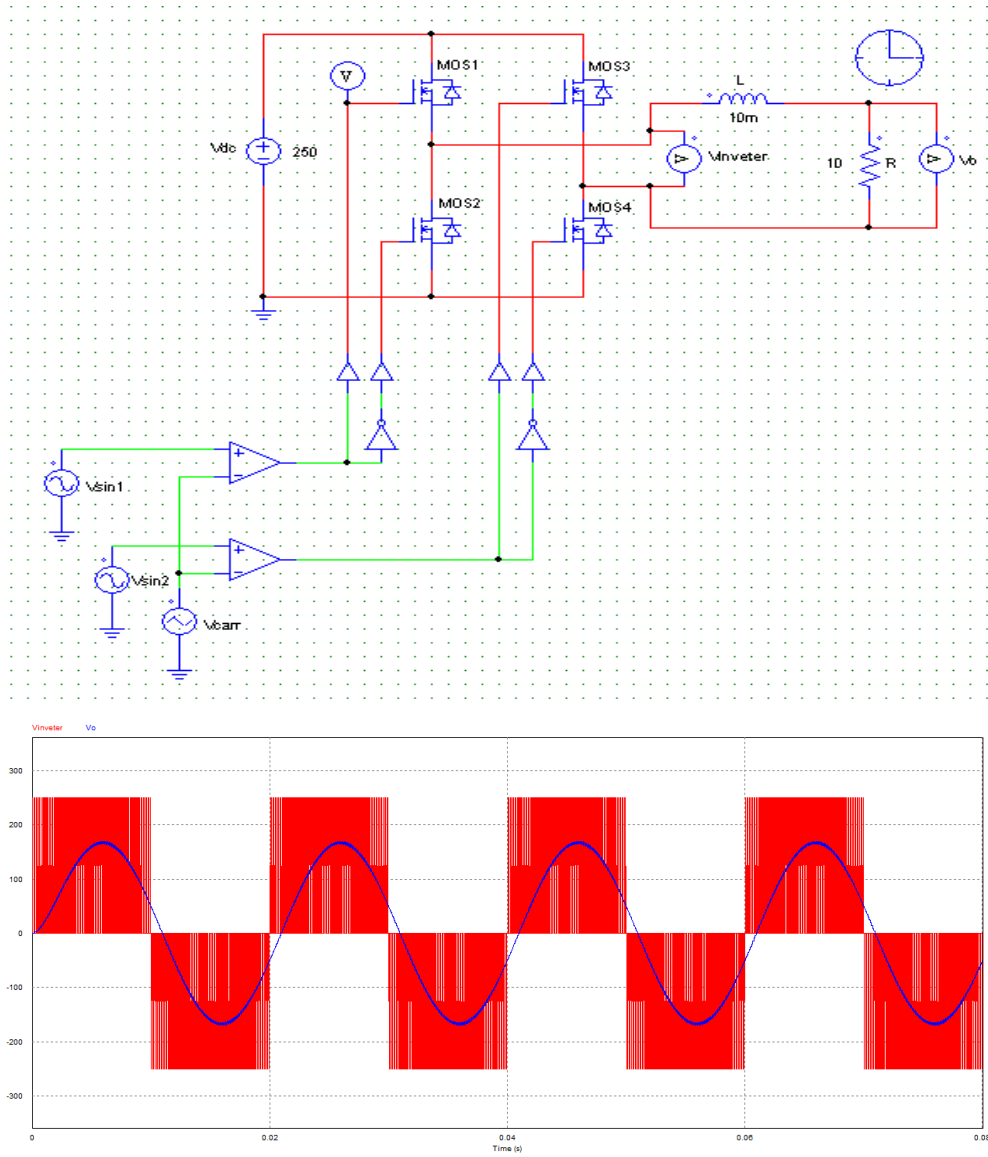
شبیه‌سازی اینورتر منبع ولتاژ تک‌فاز

۶– مقدمه

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

www.powerplantac.com

۶–۱– طرح مدار

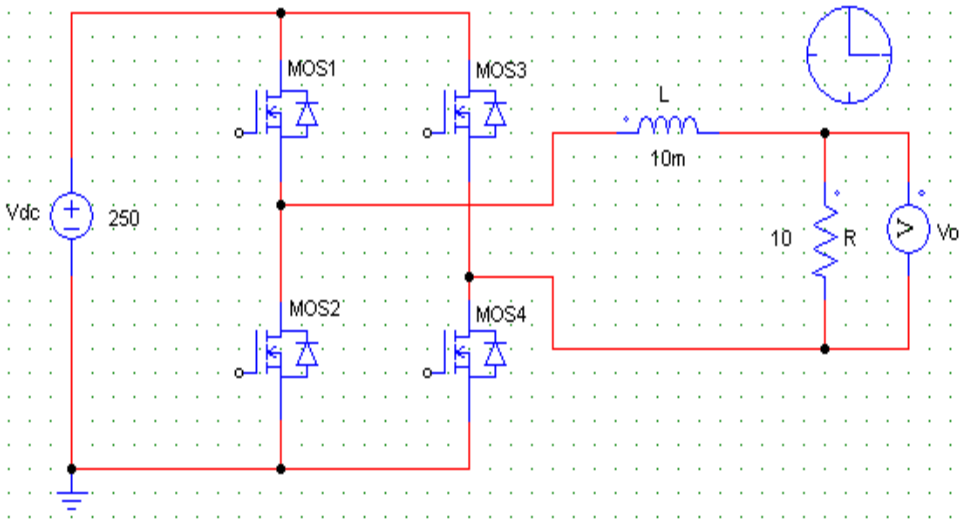


(شکل ۱.۶): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

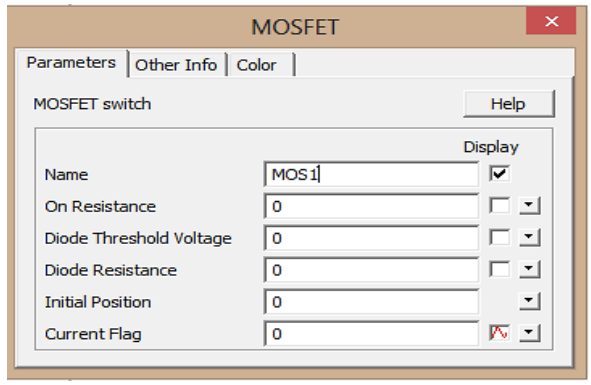
۶-۲-اجرای شبیه‌سازی

برای شبیه سازی یک اینورتر تک‌فاز به یک منبع DC و چهار سوئیچ احتیاج داریم. در این‌جا از ترانزیستور MOSFET به عنوان سوئیچ استفاده خواهیم کرد. بنابراین مدار شکل زیر را در نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۶): اینورتر تکفاز

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



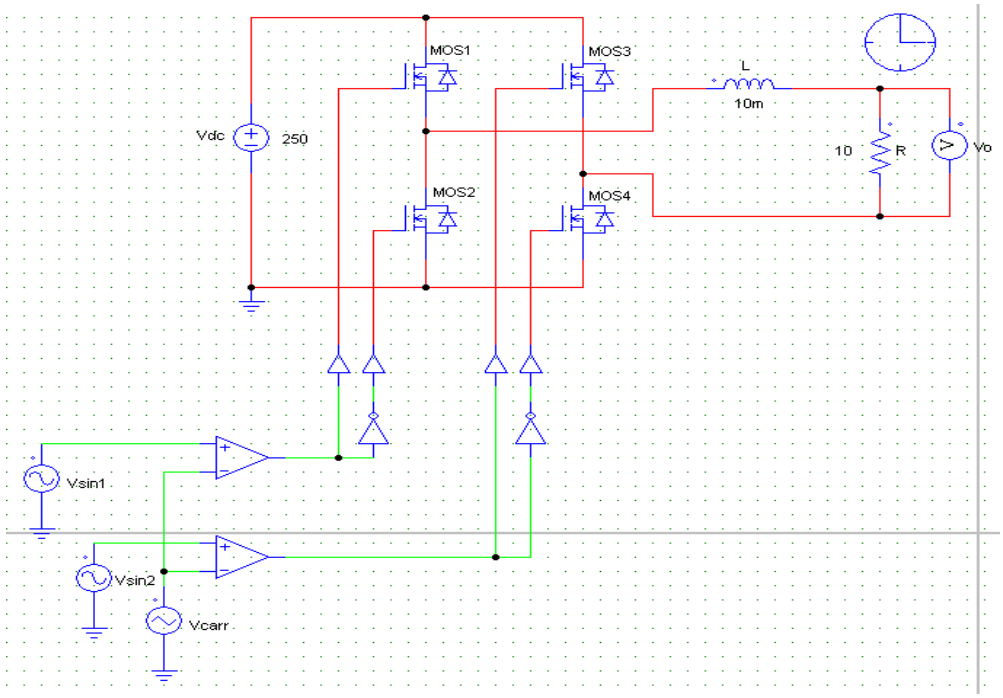
(شکل ۳.۶): تنظیمات MOSFET

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
Diod Resistance: مقاومت دیود در زمان هدایت
Initial Position: موقعیت اولیه‌ی ترانزیستور (صفر برای خاموش و یک برای روشن)

نحوه‌ی عملکرد ترانزیستور MOSFET نیز دقیقا 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 مثلثی مقایسه شده و پالس‌های مناسب برای سوئیچ‌ها تولید می‌شود.

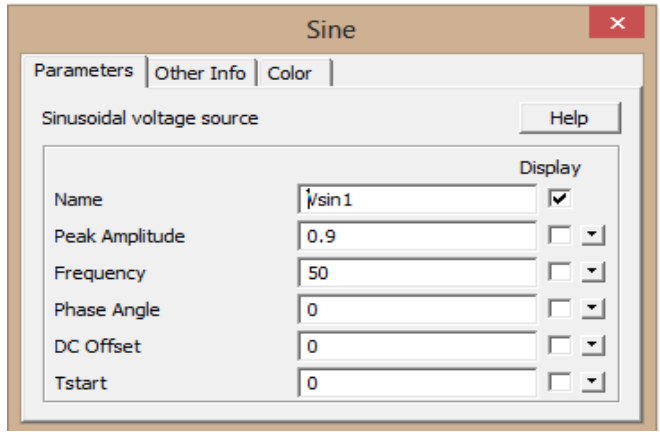
نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که ترانزیستور موجود در یک ستون، نباید هم‌زمان با هم روشن شوند. برای این منظور پالس‌های اعمالی به ترانزیستورهای پایینی باید NOT ترانزیستور بالایی در همان ستون باشد. پالس‌های مربوط به ترانزیستور شماره‌ی یک از مقایسه‌ی سینوسی با یک موج مثلثی حاصل می‌شود. برای تولید پالس‌های 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 به‌صورت زیر تکمیل می‌کنیم.



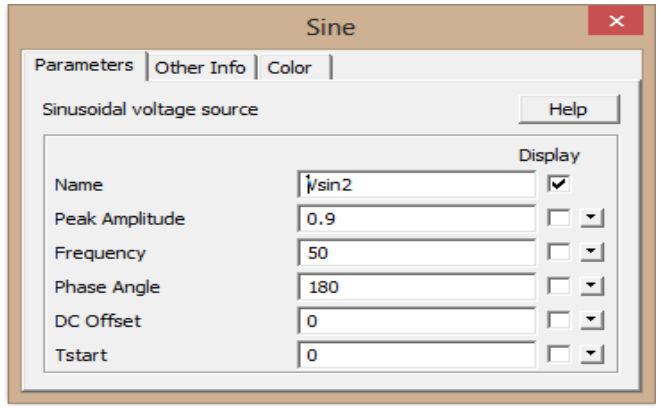
(شکل ۴.۶): اضافه کردن قسمت کنترل آتش به مدار

www.powerplantac.com

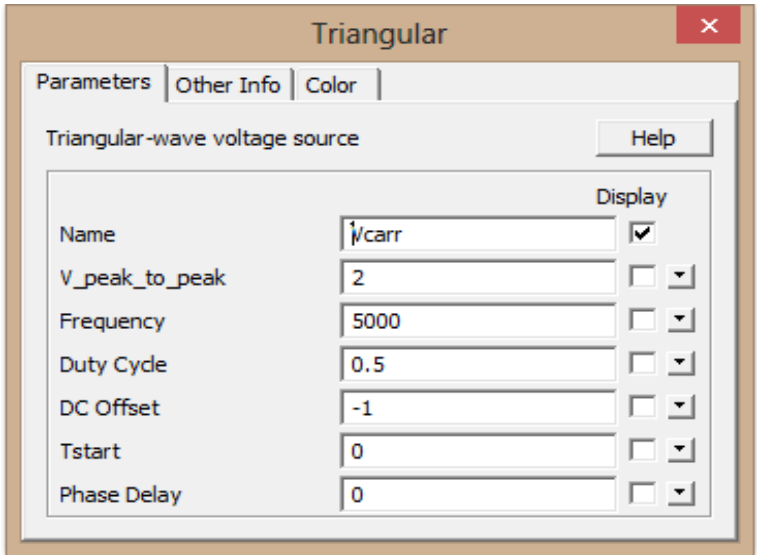
همانطور که مشاهده می شود از خروجی هر مقایسه‌گر به همراه NOT آن برای تولید پالس‌های مناسب برای ترانزیستورهای موجود در یک بازو استفاده شده است. تنظیمات مربوط به منابع سینوسی و منبع مثلثی به صورت زیر هستند.



(شکل ۵.۶): تنظیمات منبع سینوسی

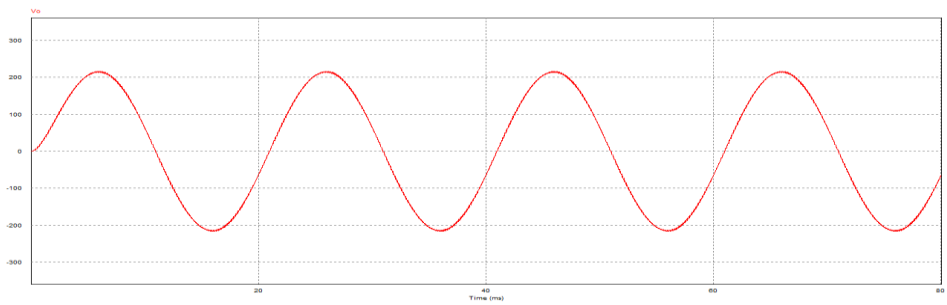


(شکل ۶.۶): تنظیمات منبع سینوسی



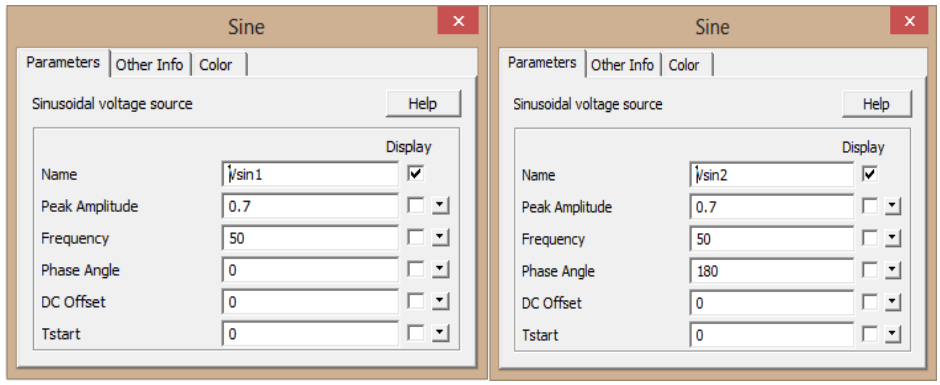
(شکل ۷.۶): تنظیمات منبع مثلثی

لازم به ذکر ا ست که فرکانس سیگنال مثلثی همان فرکانس کلید زنی ا ست و هرچه این فرکانس بالاتر با شد خروجی سینو سی‌تر خواهد بود. زمان شبیه سازی را ۰/۰۸ ثانیه در نظر گرفته و آن را اجرا می‌کنیم، شکل زیر ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد.



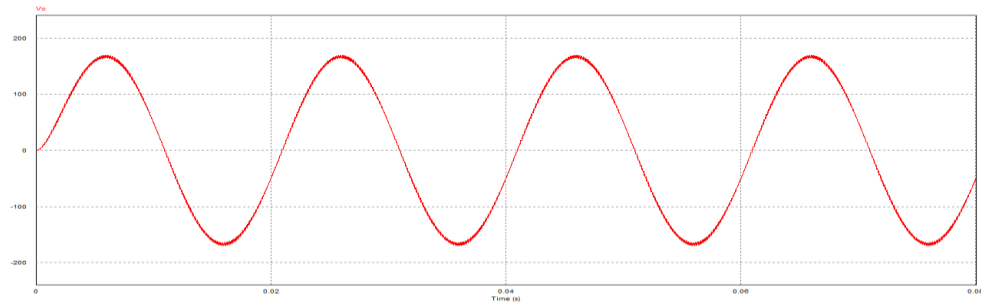
(شکل ۸.۶): ولتاژ خروجی

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 ۰/۷ ولت تغییر داده و شبیه‌سازی را دوباره اجرا می‌کنیم.



(شکل ۱۰.۶): تنظیمات منبع سینوسی

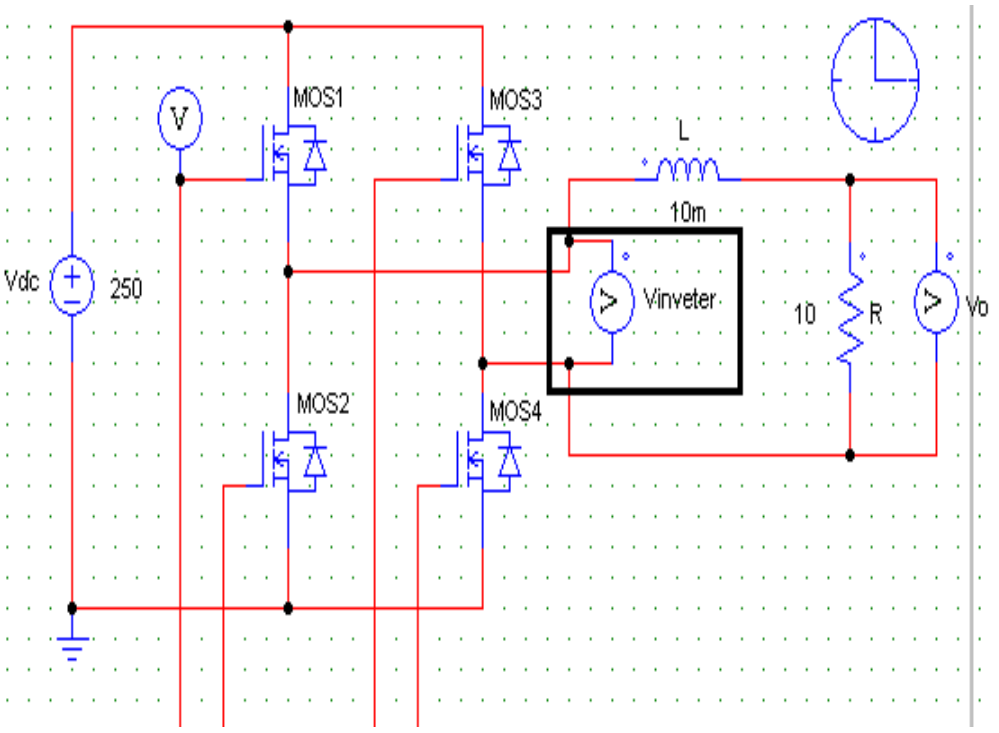
ولتاژ خروجی به‌صورت زیر خواهد بود.



www.powerplantac.com

(شکل ۱۱.۶): ولتاژ خروجی

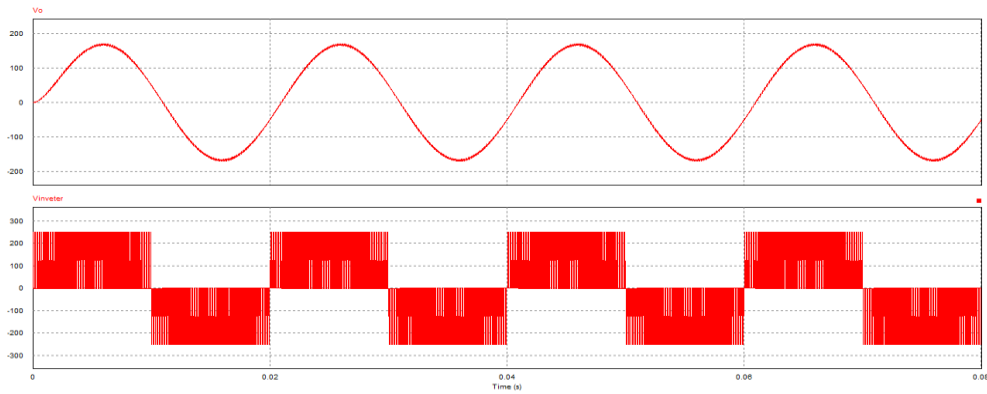
در این حالت دامنه‌ی ولتاژ خروجی نسبت به حالت قبل کاهش داشته است. نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره کرد در خصوص نقش سلف در این مدار است. در اینجا سلف همانند یک فیلتر عمل کرده و ریپل های موجود در ولتاژ را کاهش می‌دهد. برای مشاهده‌ی تاثیر سلف طبق شکل زیر یک ولت‌متر در خروجی اینورتر قرار داده و شبیه‌سازی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



(شکل ۱۲.۶): اعمال ولت‌متر در خروجی اینورتر

www.powerplantac.com

در خروجی ولتاژهای Vo و Vinveter را ر سم می‌کنیم. همانطور که م شاهده می شود 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 Vo - Vinveter

در این شبیه سازی با ترانزیستور IGBT آ شنا شدید و نحوه‌ی تولید پالس PWM و هماهنگی ترانزیستورها را در یک اینورتر تک‌فاز فرا گرفتید.

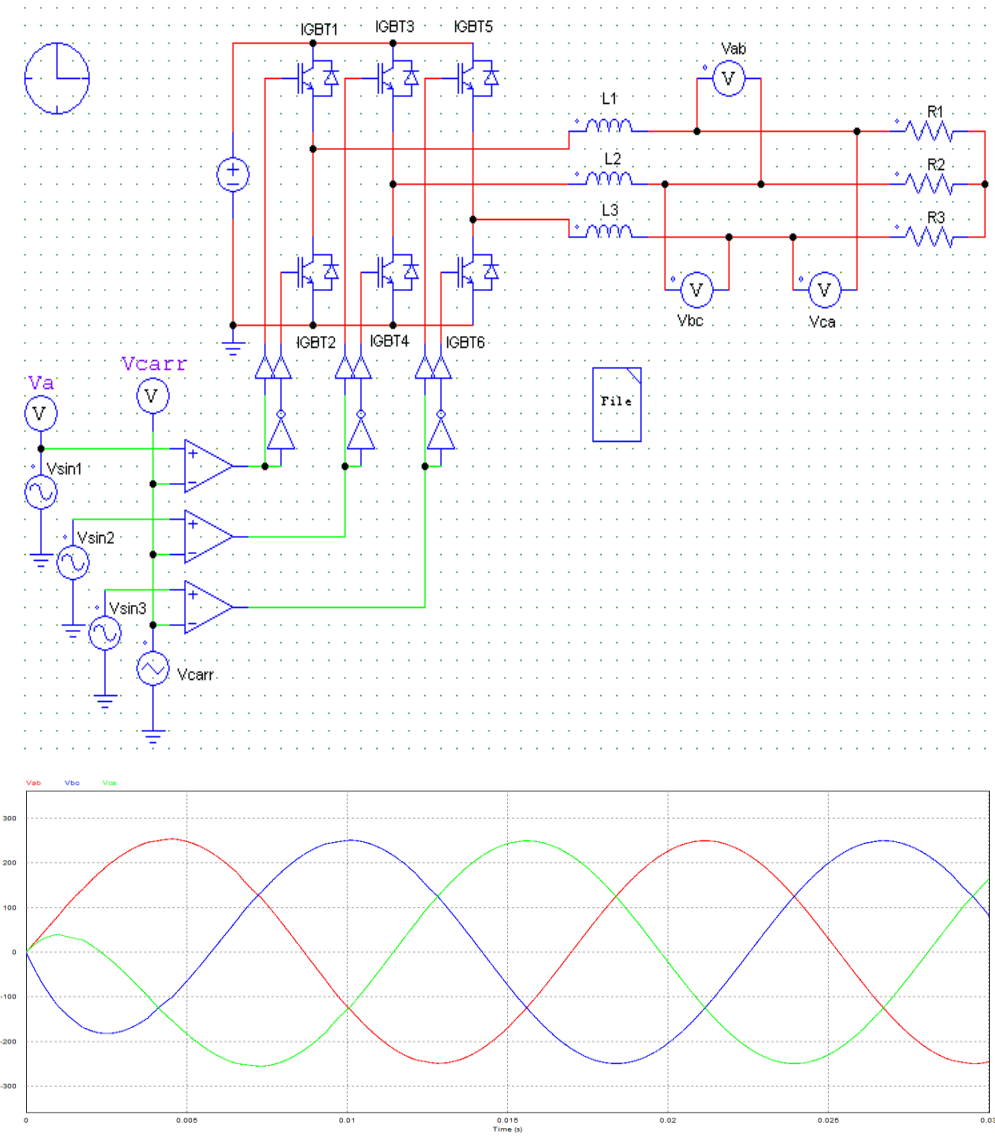
فصل هفتم

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

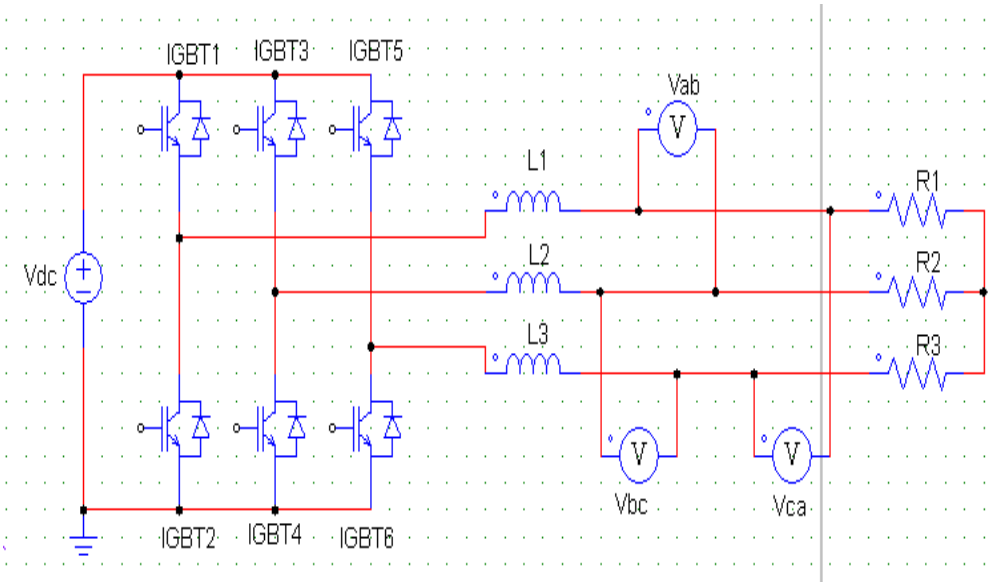


(شکل ۱.۷): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

۷-۲-اجرای شبیه‌سازی

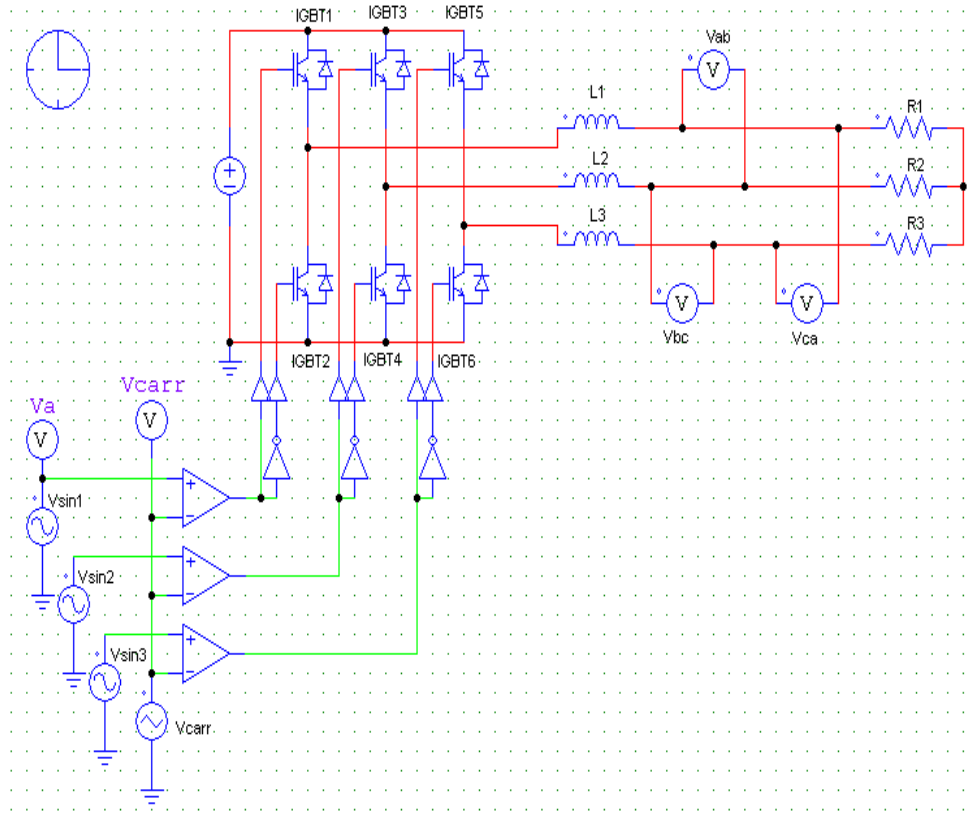
برای شبیه‌سازی یک اینورتر سه‌فاز به یک منبع DC و شش سوئیچ احتیاج داریم. در این‌جا از ترانزیستور IGBT به عنوان سوئیچ استفاده خواهیم کرد. بنابراین مدار شکل زیر را در نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۷): پیاده سازی 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 ۱۲۰ 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.

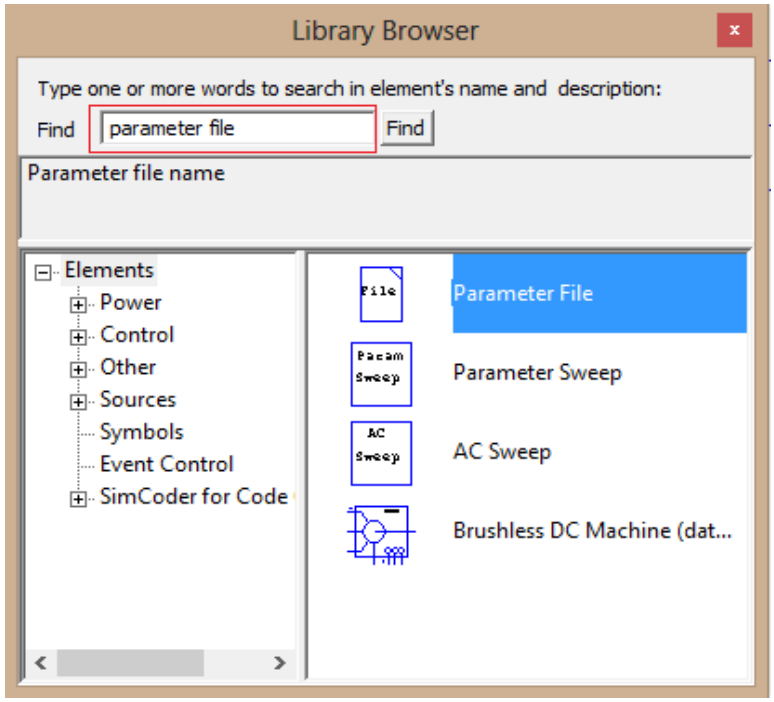


(شکل ۳.۷): مدار کامل به همراه پالس های آتش

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

www.powerplantac.com

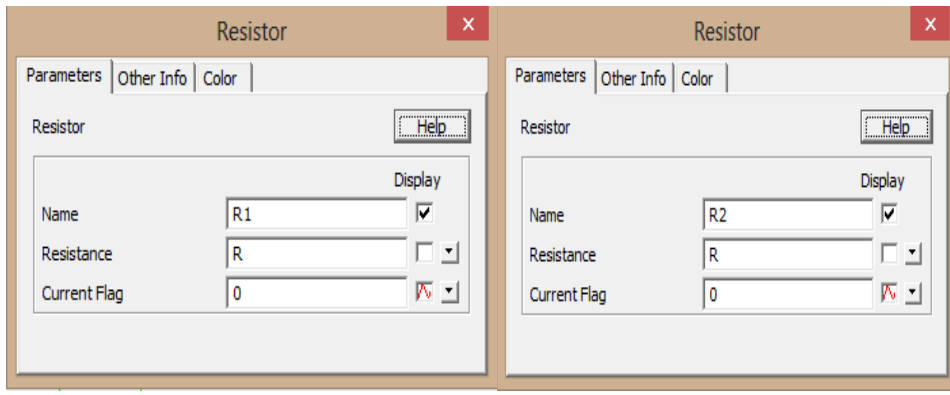
می‌خواهیم از بلوک Parameter File اســتفاده کنیم. این بلوک را می‌توان با جســتجوی عبارت parameter file در کتابخانه‌ی نرم‌افزار پیدا کرد.



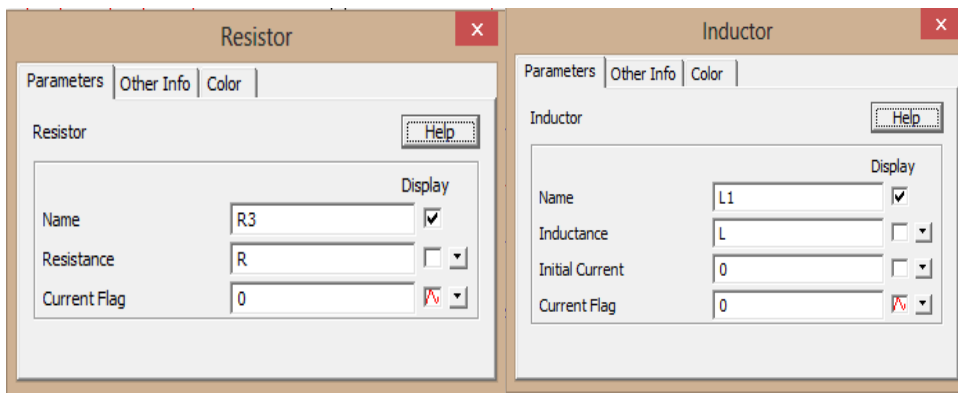
(شکل ۴.۷): کتابخانه

این بلوک را به مدار اضــافه 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 مشــخص کرد. در این شــبیه‌ســازی مقادیر المان‌های مختلف به‌صــورت زیر تعریف شده است.

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

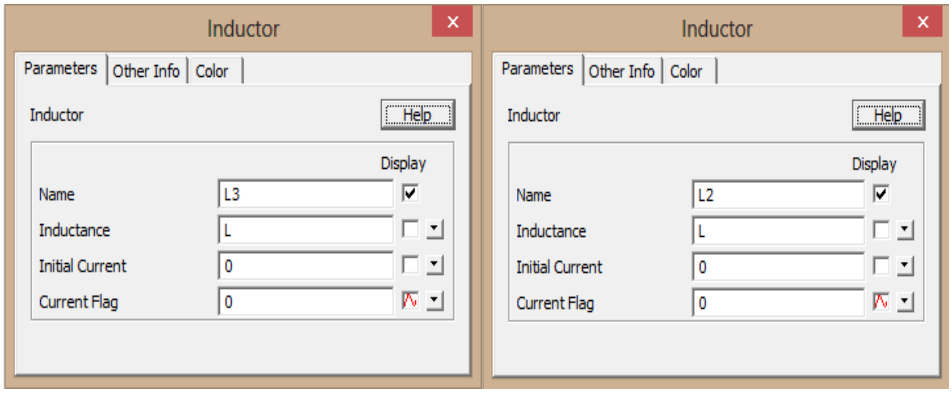


(شکل ۵.۷): تنظیم مقاومت‌ها



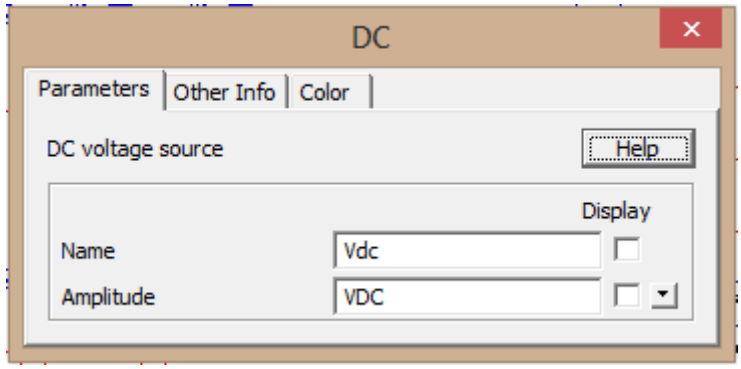
(شکل ۶.۷): تنظیم مقاومت و سلف

www.powerplantac.com



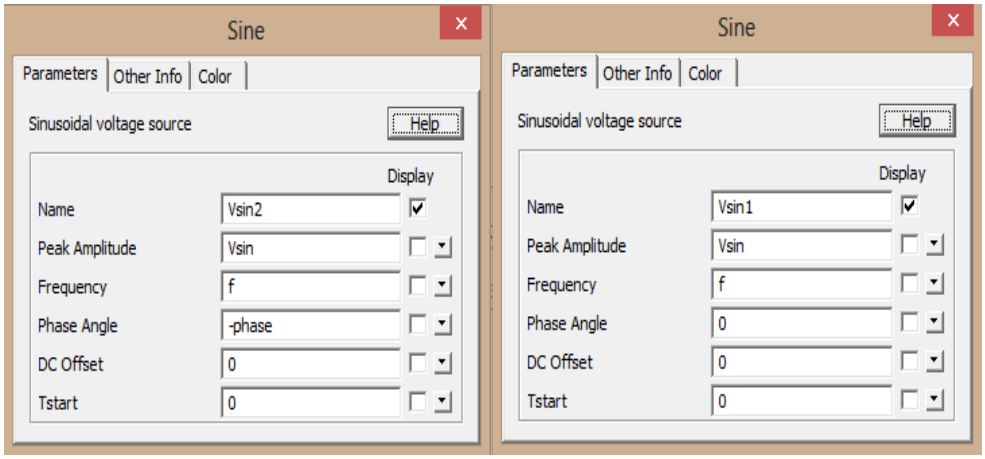
(شکل ۷.۷): تنظیم سلف‌ها

مقدار منبع DC نیز به‌صورت VDC تعریف شده است.

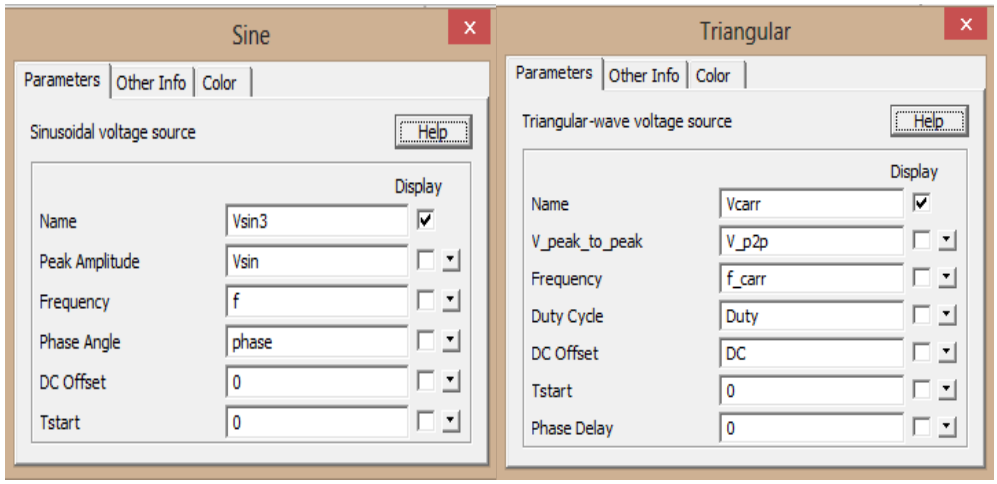


(شکل ۸.۷): منبع ولتاژ ثابت

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

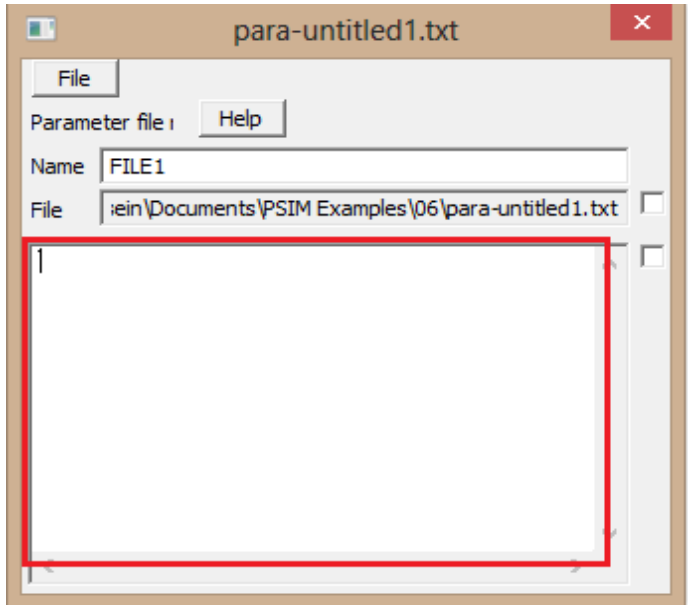


(شکل ۹.۷): تنظیم منبع سینوسی



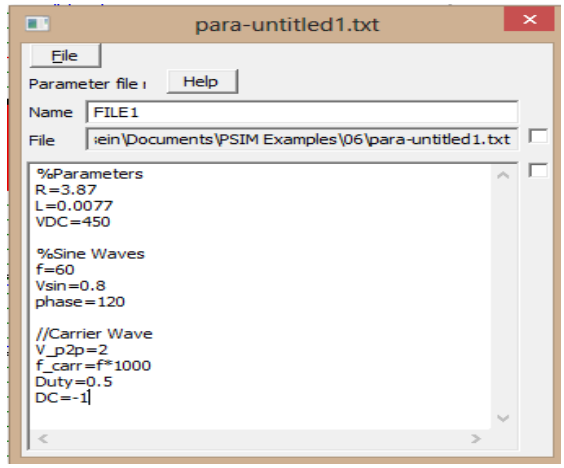
(شکل ۱۰.۷): تنظیم منبع مثلثی

حال باید این پارامترها در بلوک Parameter File تعریف کنیم. برای این کار روی این بلوک دوبار کلیک می‌کنیم تا پنجره‌ی زیر باز شود.



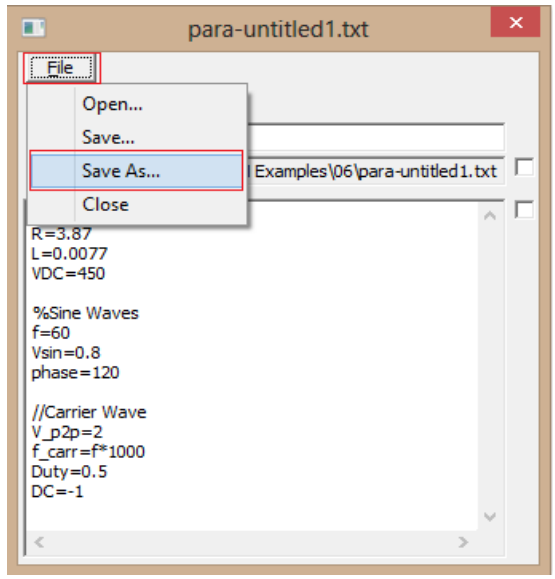
(شکل ۱۱.۷): بلوک تعریف پارامترهای المان‌ها

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 معمولا مضرب صحیحی از فرکانس سیگنال سینوسی تعریف می‌شود.



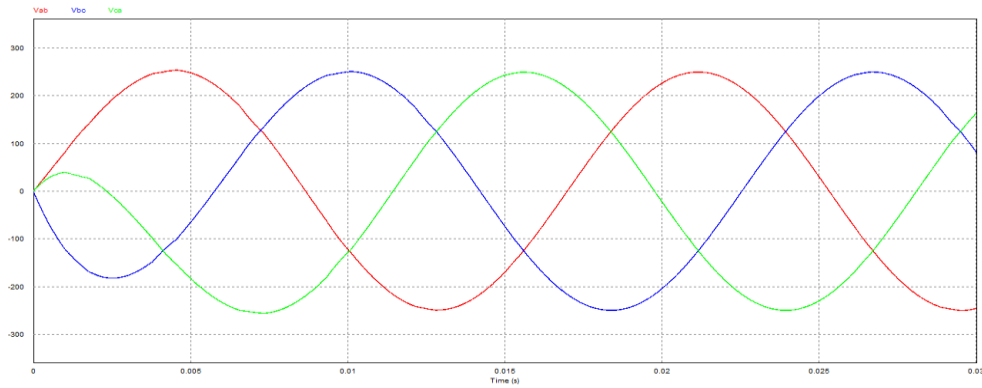
(شکل ۱۲.۷): نحوه تعریف پارامترها

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 شبیه سازی را در ۰/۰۳ ثانیه تنظیم کرده و شبیه سازی 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 شبیه سازی‌های پیچیده ا ستفاده از فایل پارامتر، کمک شایانی به نظم شبیه‌سازی خواهد کرد.

www.powerplantac.com

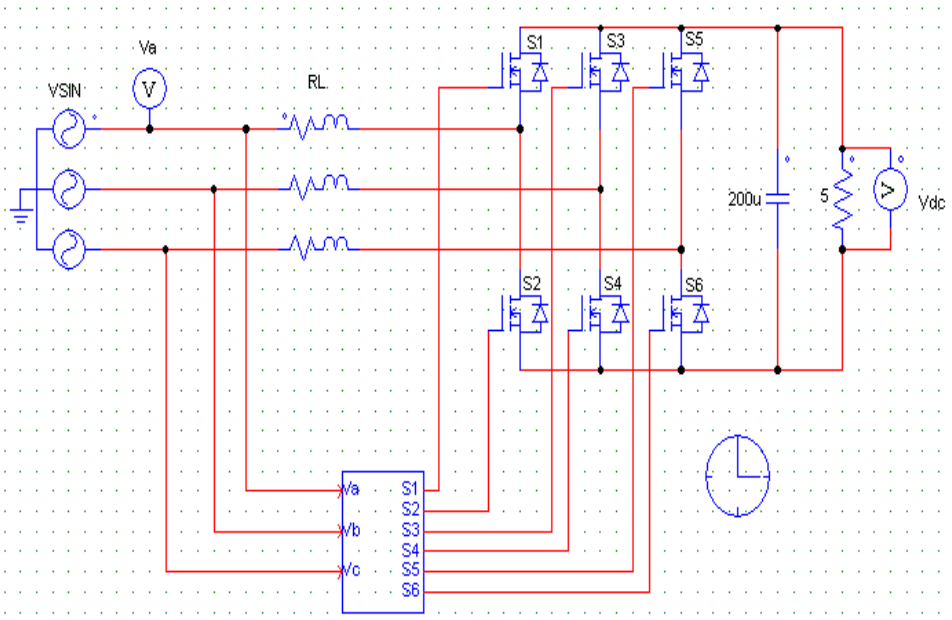
فصل هشتم

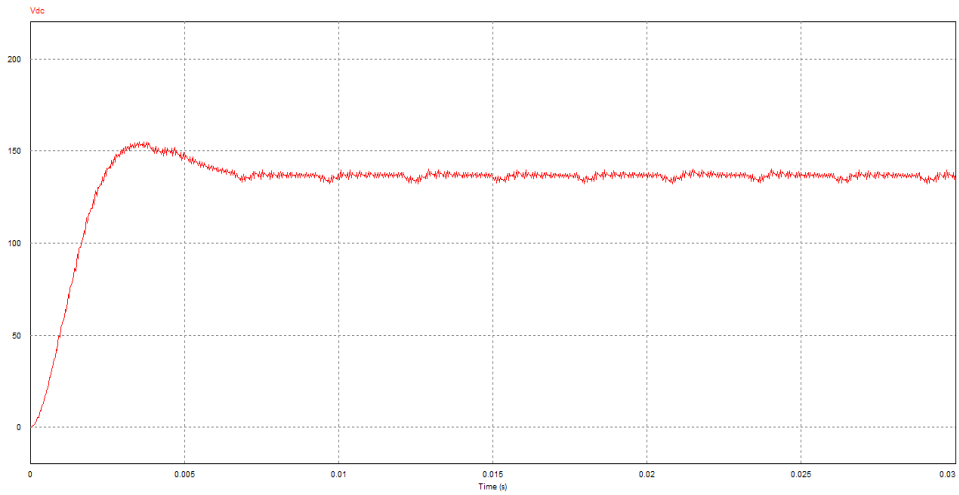
شبیه‌سازی یکسوساز PWM سه فاز

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



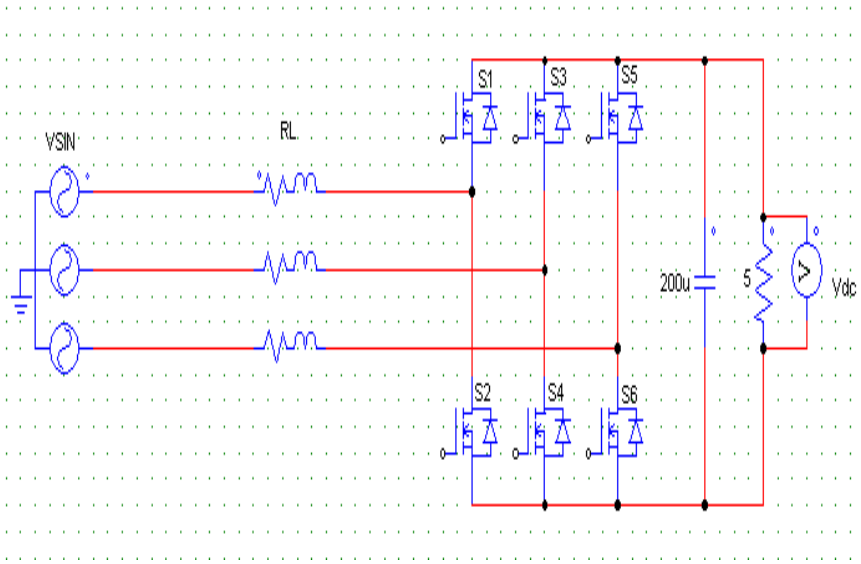


(شکل ۱.۸): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

۸-۲-اجرای شبیه‌سازی

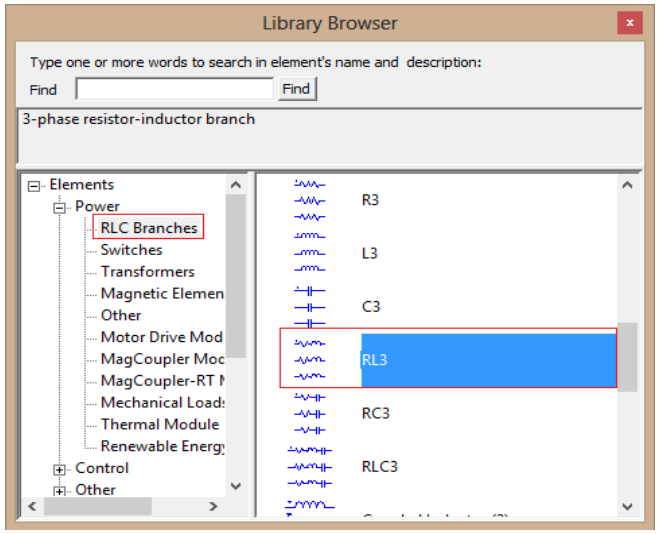
مدار شکل زیر را با استفاده منبع سینوسی سه‌فاز، مقاومت، خازن، کلیدهای MOSFET و یک RL سه‌فاز طراحی می‌کنیم.



(شکل ۲.۸): پیاده‌سازی مدار

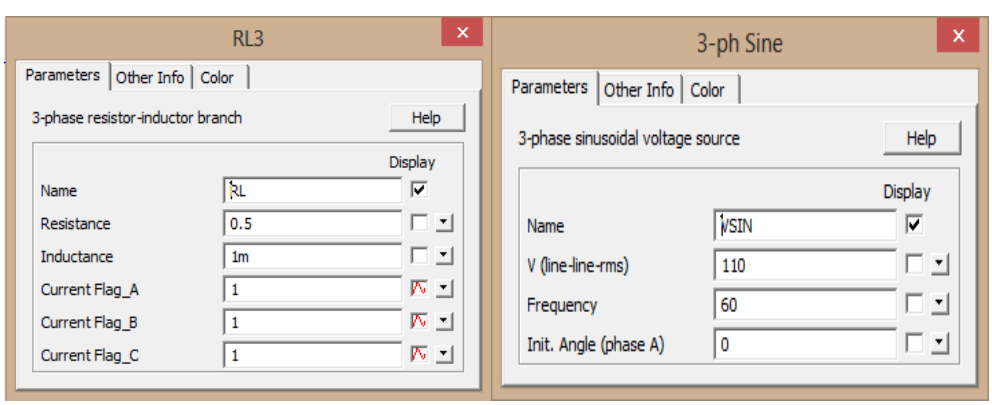
RL سه‌فاز را می‌توان از مسیر شکل (۳.۸) در کتابخانه‌ی نرم‌افزار به مدار اضافه کرد.

www.powerplantac.com



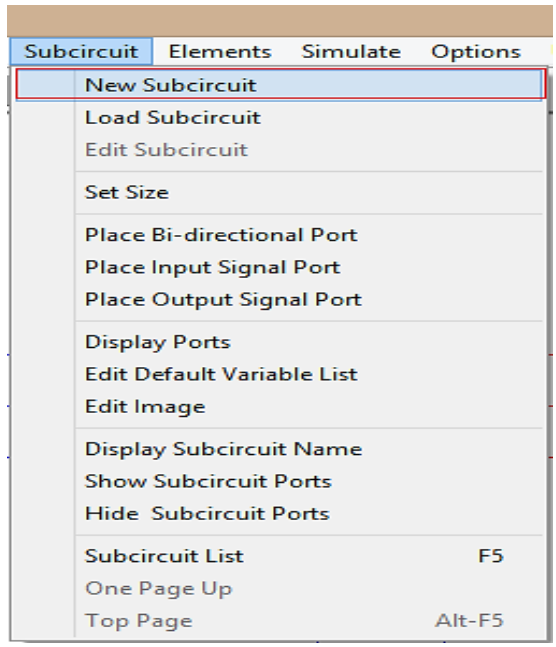
(شکل ۳.۸): کتابخانه نرم‌افزار

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

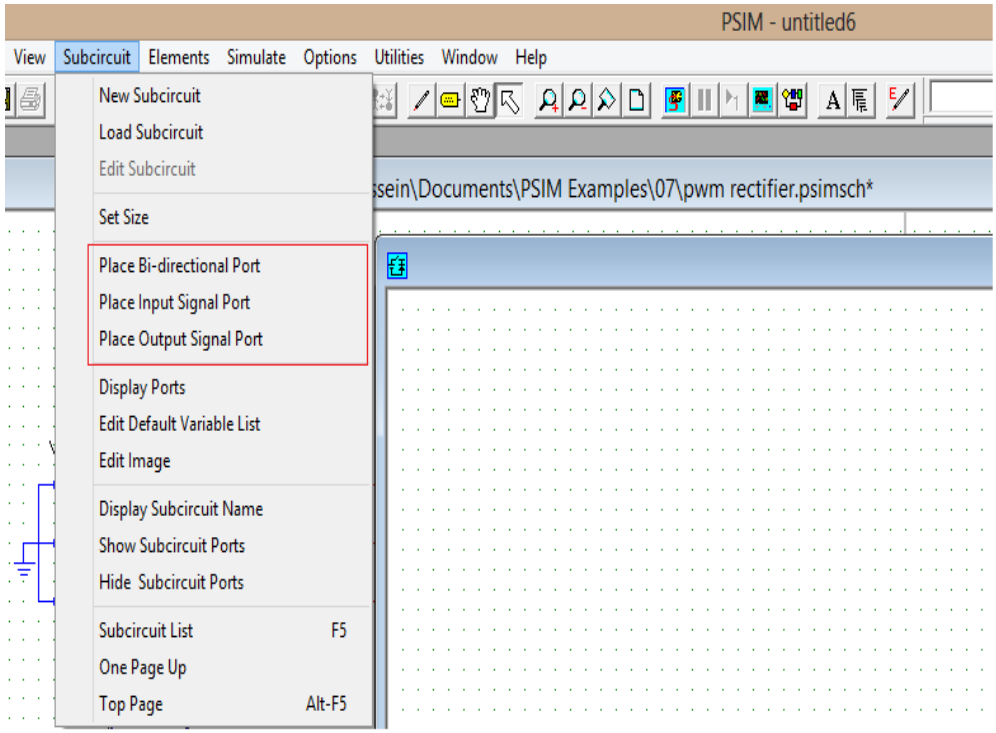
حال یک زیرسیستم ایجاد می‌کنیم تا مدار مربوط به پالس‌های PWM را در داخل آن رسم کنیم. برای این کار از منوی Subcircuit گزینه‌ی New Subcircuit را انتخاب می‌کنیم. با این کار شکل ماوس به یک مستطیل تبدیل می‌شود. با کلیک کردن در نقطه‌ی مورد نظر یک زیرسیستم در مدار اصلی ایجاد می‌شود.



(شکل ۵.۸): ایجاد زیرسیستم

با استفاده از گزینه‌ی Load Subcircuit می‌توان مدارهای دیگر را به‌صورت زیرسیستم وارد این شبیه‌سازی کرد. حال روی زیرسیستم دوبار کلیک می‌کنیم، با این کار یک صفحه‌ی جدید باز می شود. هر مداری که در این‌جا ر سم شود در داخل زیر سیستم در

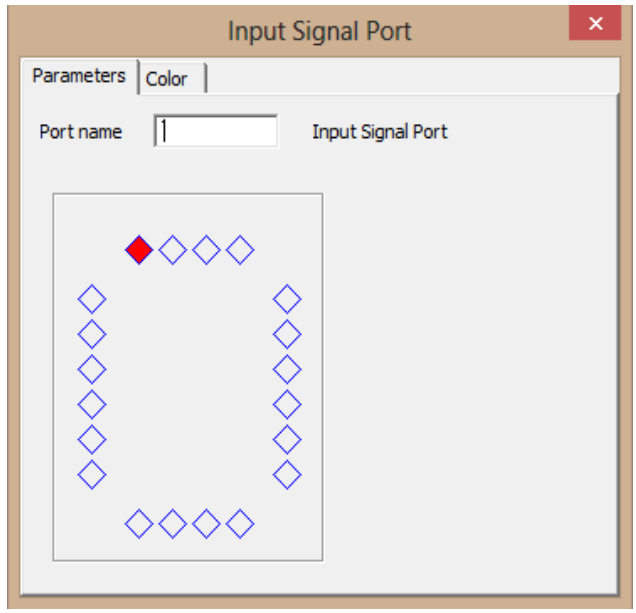
نظر گرفته خواهد شد. حال باید پورت‌های ورودی و خروجی را برای زیر سیستم تعریف کنیم، برای این کار منوی Subcircuit را باز می‌کنیم. دقت کنید که در این حالت حتما باید صفحه‌ی مربوط به زیرسیستم انتخاب شده باشد.



(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

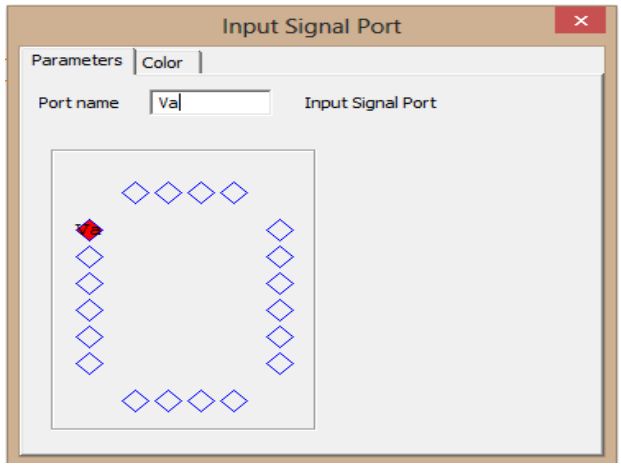
برای انتقال سیگنال‌های PWM به کلیدها احتیاج داریم. از این منو گزینه‌ی Place Input Signal Port را انتخاب می‌کنیم. با قرار دادن این پورت روی صفحه، پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۷.۸): پورت سیگنال ورودی

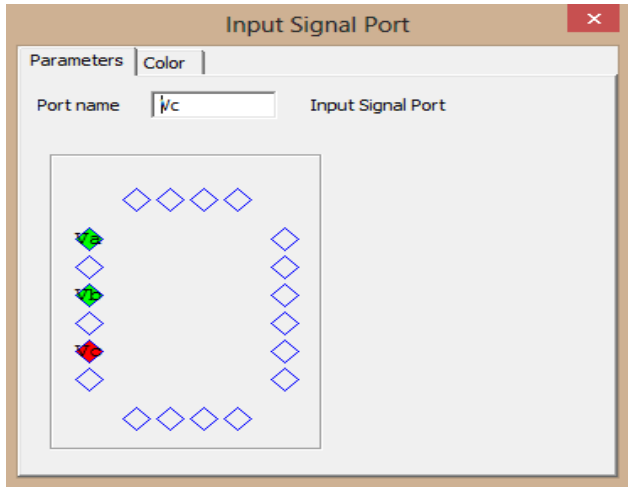
در این پنجره نام پورت و محل نمایش آن در بلوک زیر سیستم که در مدار اصلی قرار گرفته است، وارد می‌شود. محل پورت با کلیک ماوس روی اشکال لوزی تعیین می‌شود و پس از انتخاب به رنگ قرمز در می‌آید. این پورت را با نام Va در محلی که در شکل زیر نشان داده شده است ذخیره می‌کنیم.

www.powerplantac.com



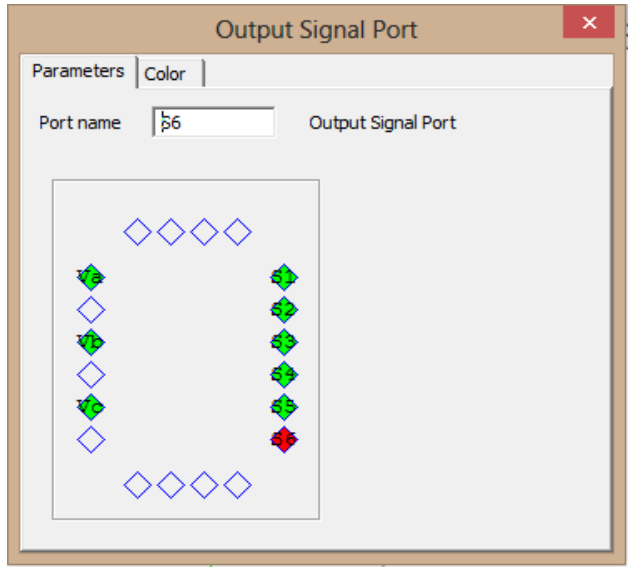
(شکل ۸.۸): پورت سیگنال ورودی

دو پورت ورودی دیگر نیز از منوی Subcircuit به صفحه‌ی زیرسیستم با نام‌های Vb و Vc اضافه می‌کنیم.



(شکل ۹.۸): پورت سیگنال ورودی

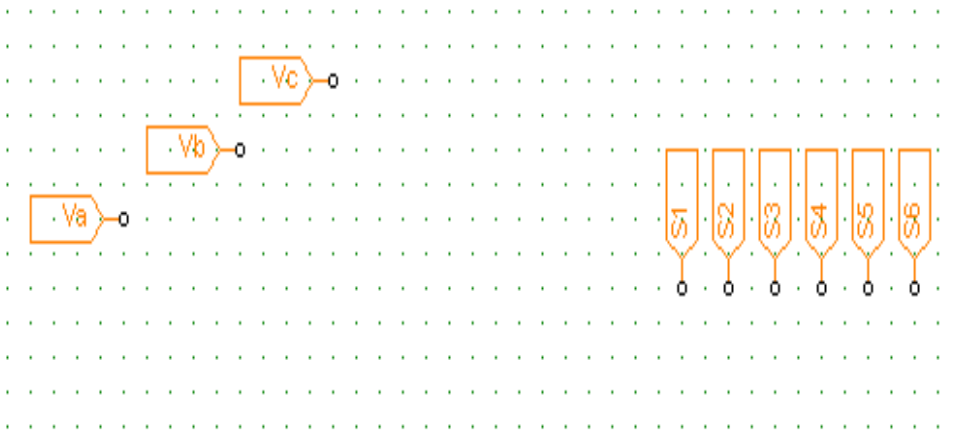
حال از منوی Subcircuit گزینه‌ی Place Output Signal Port را انتخاب می‌کنیم تا پورت‌های خروجی را نیز وارد مدار کنیم. در اینجا شش پورت خروجی به مدار اضافه شده است.



(شکل ۱۰.۸): پورت سیگنال خروجی

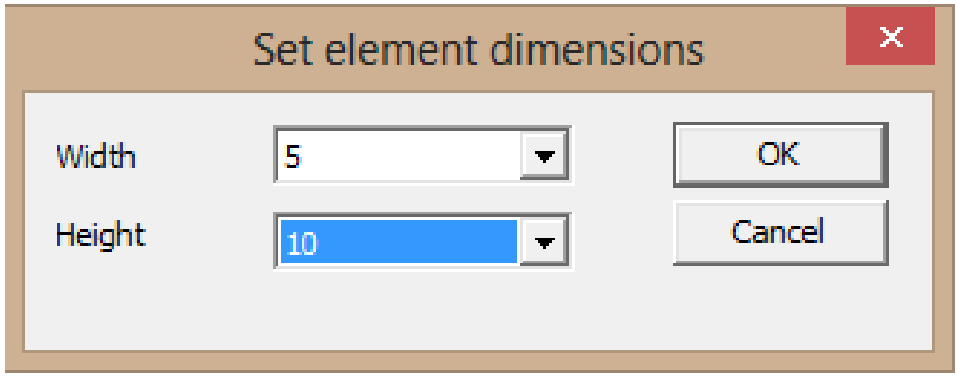
شکل (۱۱.۸) این پورت‌ها را در صفحه‌ی زیرسیستم نشان می‌دهد.

www.powerplantac.com



(شکل ۱۱.۸): پورت‌های سیگنال‌های ورودی و خروجی

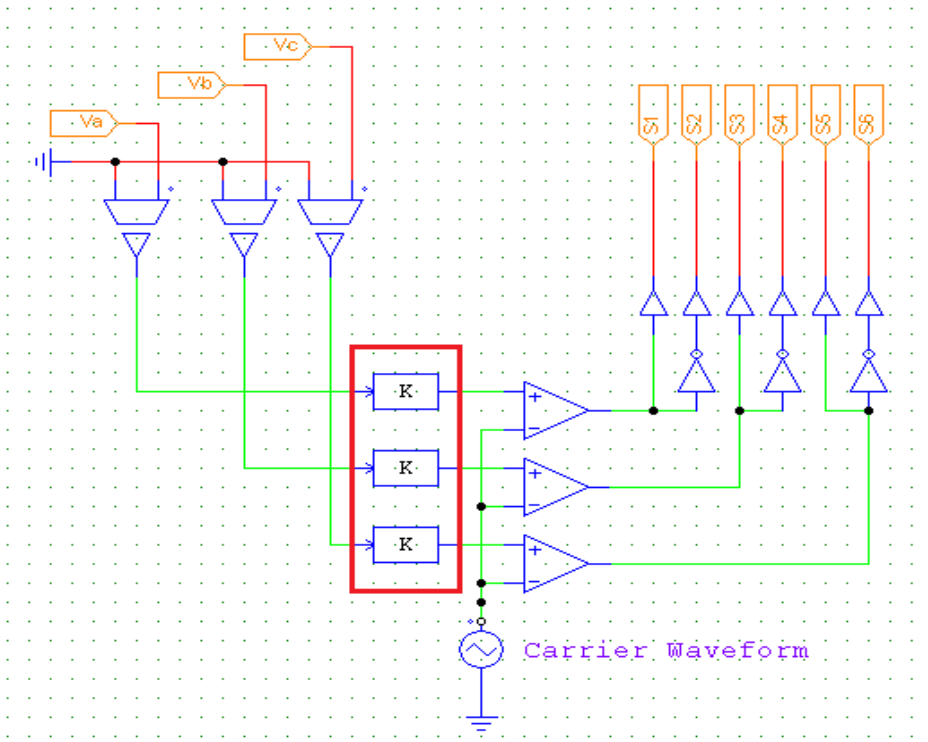
برای وارد کردن تعداد بیشتری پورت می‌توان از منوی Subcircuit گزینه‌ی Set Size را انتخاب کرده و اندازه‌ی زیرسیستم را تعیین کرد. لازم به ذکر است که برای این کار حتما باید در صفحه‌ی زیرسیستم باشیم نه صفحه‌ی مدار اصلی.



(شکل ۱۲.۸): تعیین اندازه زیرسیستم

www.powerplantac.com

حال مدار کنترلی را به‌صورت شکل زیر در زیرسیستم رسم می‌کنیم.



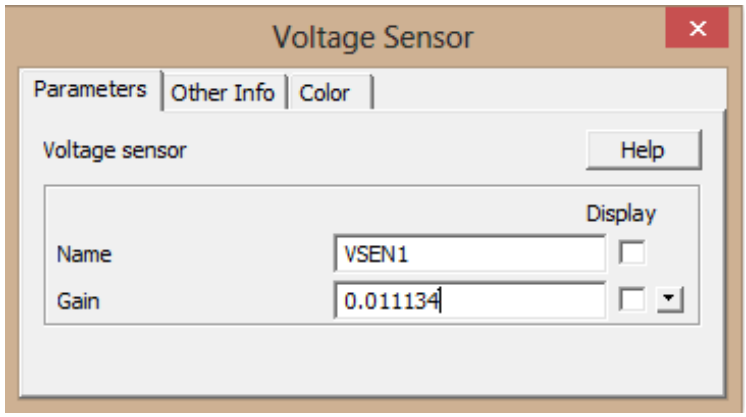
(شکل ۱۳.۸): مدار کنترلی

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

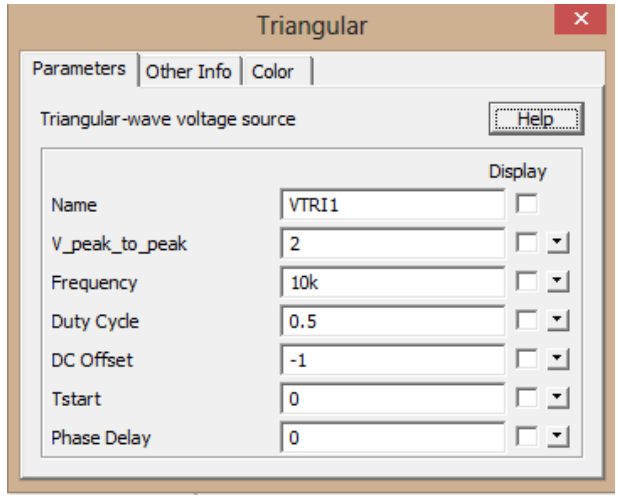
www.powerplantac.com

با دوبار کلیک روی سنسور ولتاژ پنجره‌ی زیر باز می‌شود که می‌توان در آن بهره‌ی سنسور را تعیین کرد. در این‌صورت 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.



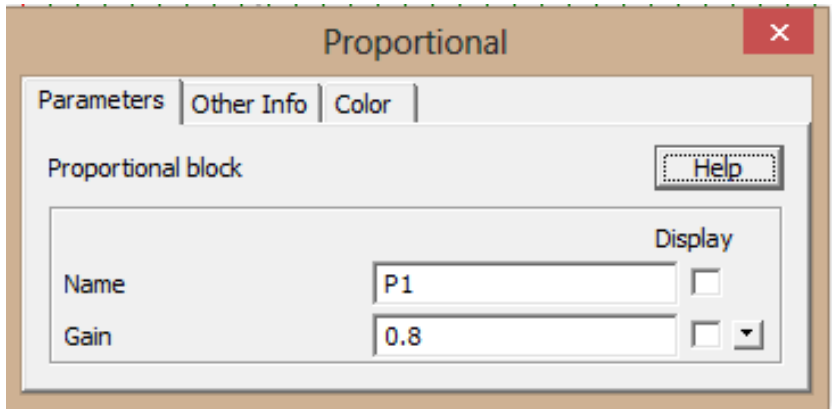
(شکل ۱۵.۸): سنسور ولتاژ

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 به‌صورت زیر تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۱۶.۸): منبع مثلثی

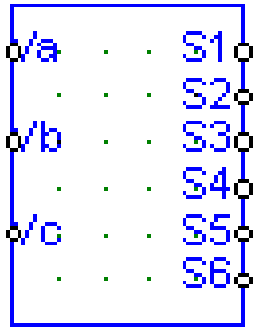
حال با اســتفاده از بهره‌ی بلوک‌های تناســبی می‌توان دامنه‌ی ولتاژ خروجی را تنظیم کرد. در این‌جا بهره‌ی همه‌ی بلوک‌های تناسبی در ۰/۸ تنظیم شده‌اند.



(شکل ۱۷.۸): تنظیم بهره بلوک‌های تناسبی

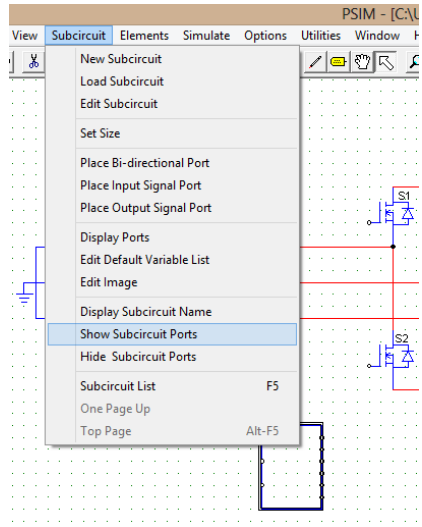
www.powerplantac.com

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



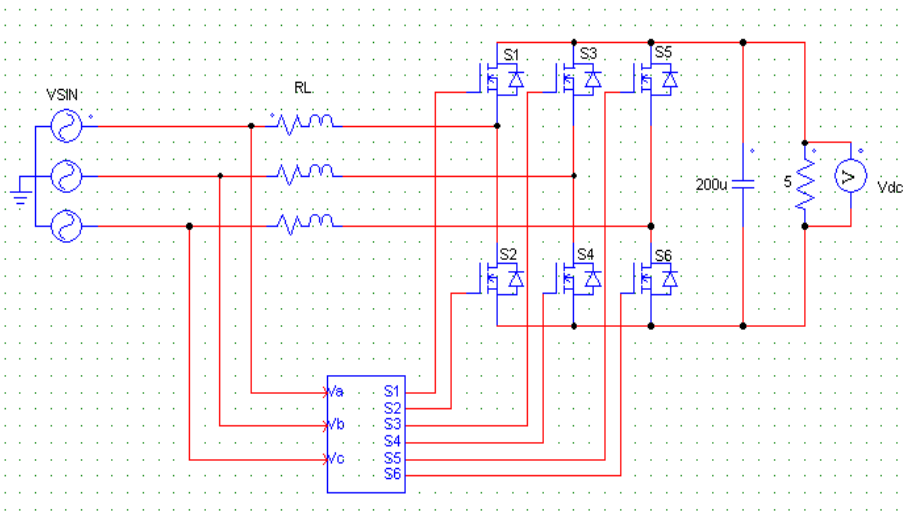
(شکل ۱۸.۸): زیرسیستم

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



(شکل ۱۹.۸): تنظیمات زیرسیستم

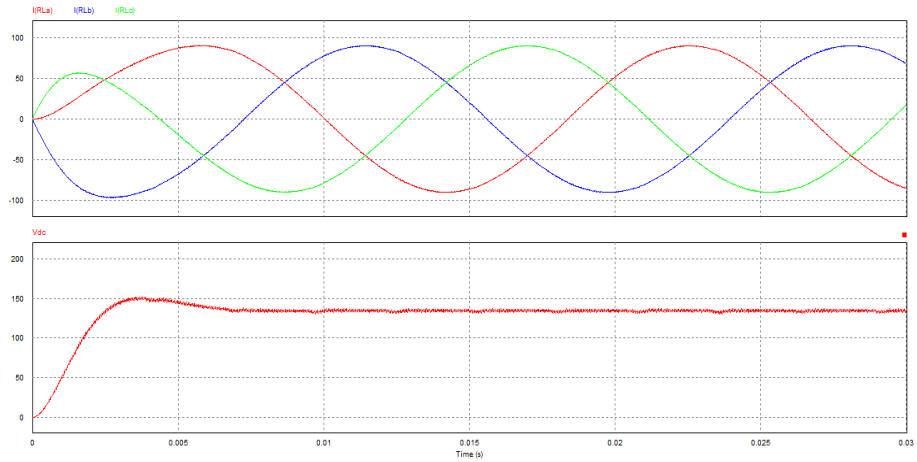
حال ورودی‌ها و خروجی‌های بلوک زیر سیستم را به صورت زیر به مدار اصلی متصل می‌کنیم.



(شکل ۲۰.۸): اضافه کردن زیرسیستم به مدار

www.powerplantac.com

حال شبیه سازی را اجرا می‌کنیم. در خروجی ولتاژ Vdc و جریان عبوری از سلف‌ها را رسم می‌کنیم.



(شکل ۲۱.۸): ولتاژ Vdc و جریان عبوری از سلف‌ها

همانطور که ملاحظه می‌کنید در خروجی ولتاژ DC داریم.

در این فصل یک یکسو ساز سه‌فاز با استفاده از پالس‌های PWM شبیه سازی شد. نحوه‌ی تولید پالس‌های PWM را فراگرفتید، هم‌چنین در این فصـــل نحوه‌ی ایجاد یک زیرسیستم آموزش داده شد.

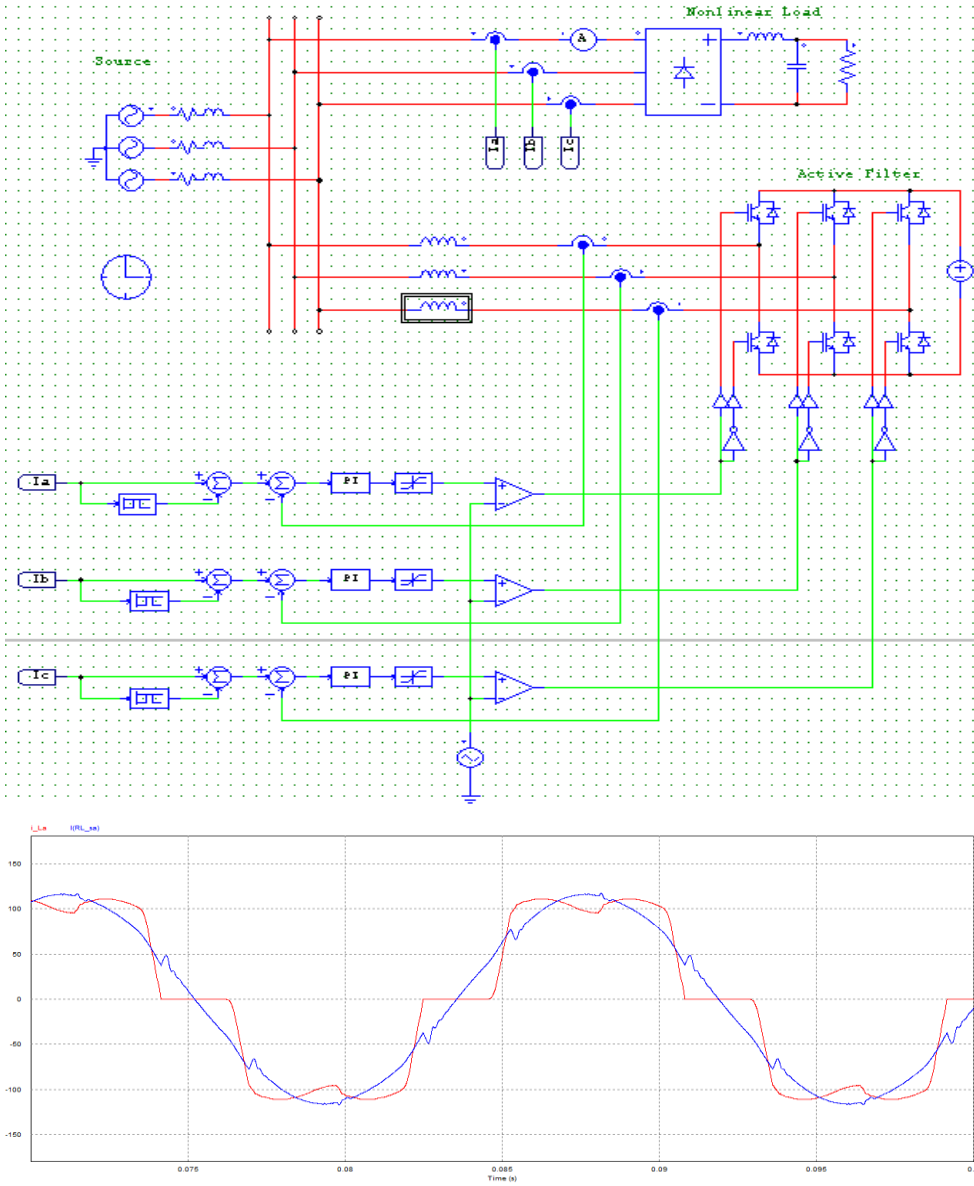
فصل نهم

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

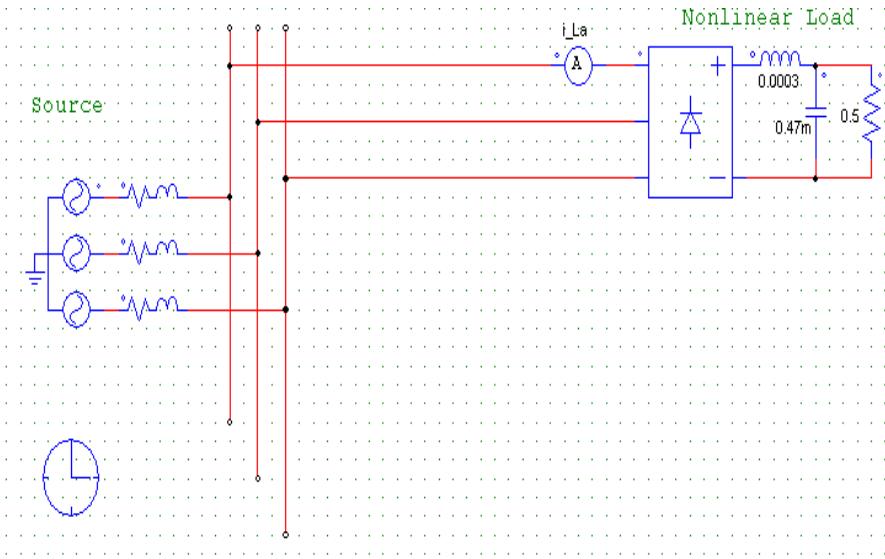


(شکل ۱.۹): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

۹-۲-اجرای شبیه‌سازی

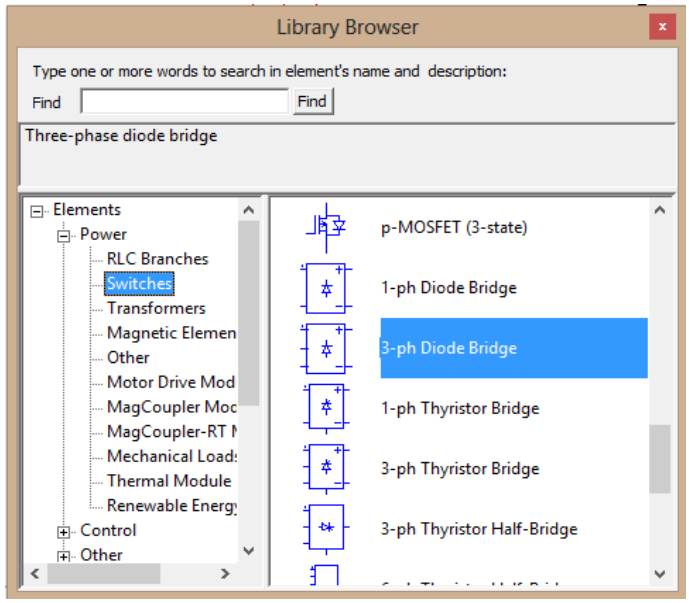
ابتدا مدار شکل زیر را در محیط نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۹): پیاده‌سازی مدار

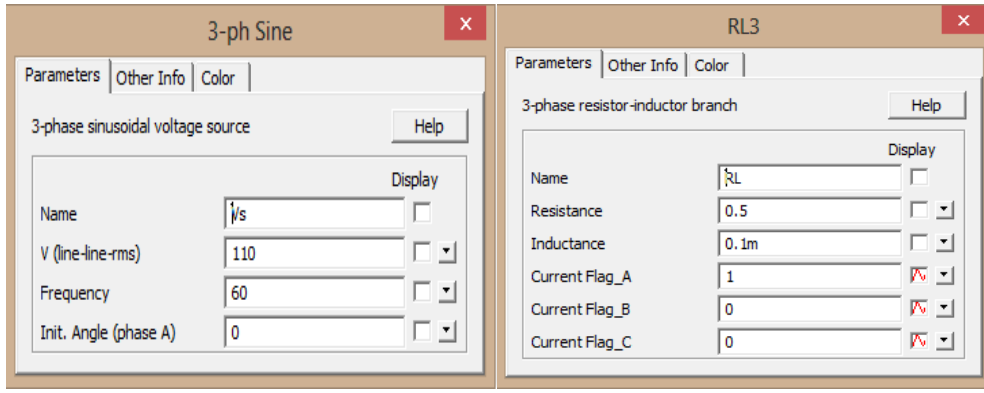
در این شبیه سازی از یک یکسو ساز سه‌فاز تمام پل به عنوان بار غیر خطی ا ستفاده شده است. بلوک یکسوساز دیودی را می‌توان از مسیر زیر به مدار اضافه کرد.

www.powerplantac.com



(شکل ۳.۹): کتابخانه نرم‌افزار

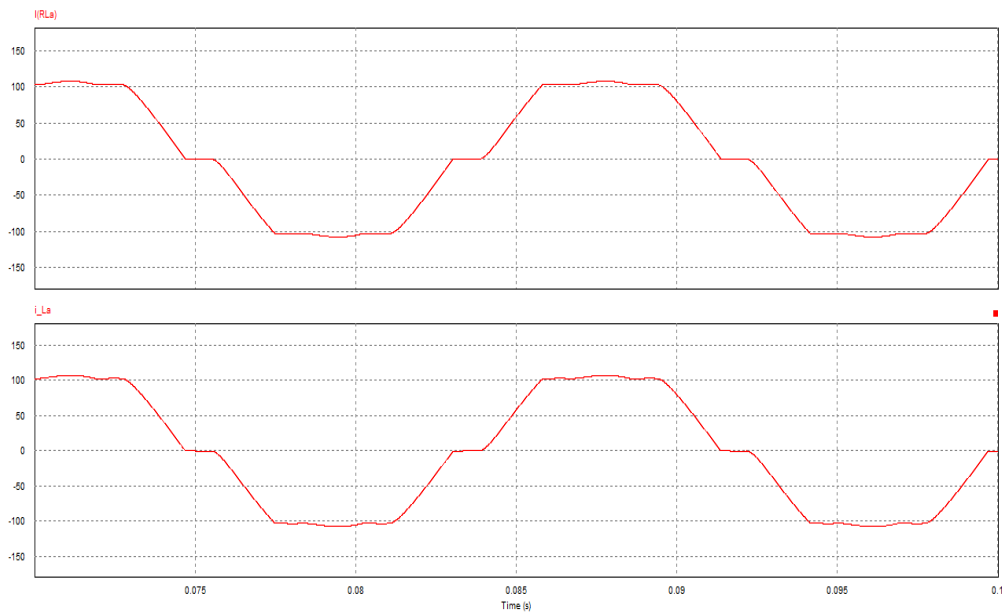
تنظیمات منبع ولتاژ و RL سه‌فاز به‌صورت زیر انجام شده‌اند.



(شکل ۴.۹): تنظیمات المان‌ها

www.powerplantac.com

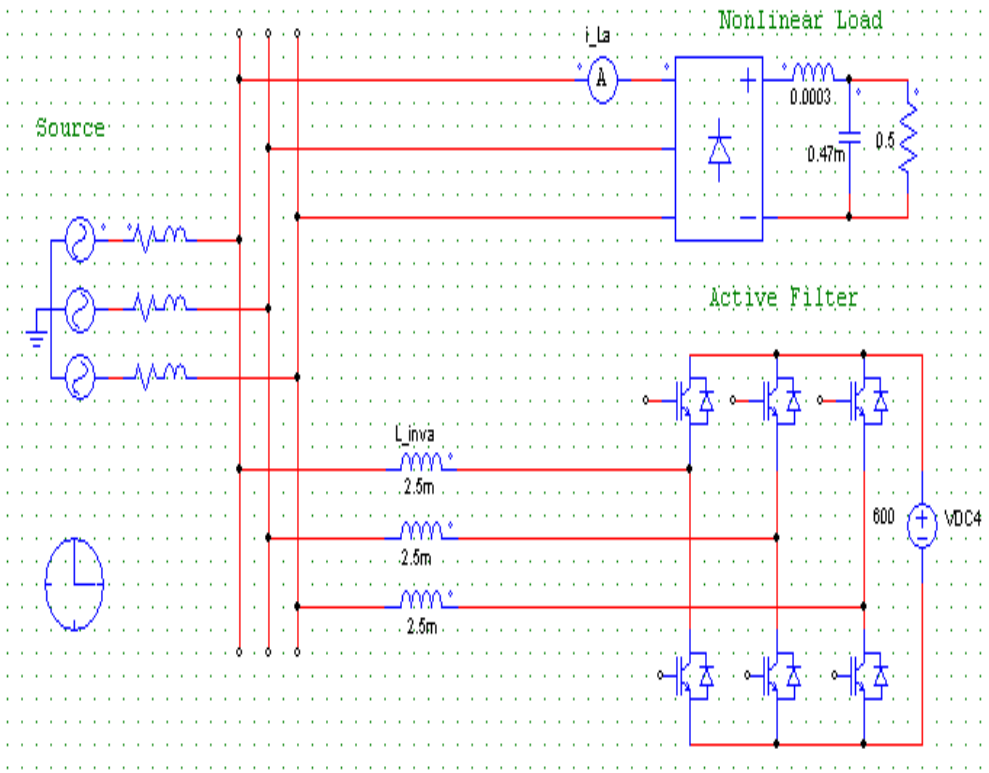
در تنظیمات RL سه‌فاز Current Flag مربوط به فاز a را نیز یک کرده‌ایم تا در خروجی جریان فاز a منبع نیز نمایش داده شود. سایر تنظیمات روی شکل مدار درج شده است. زمان شبیه‌سازی را در ۰/۱ ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی جریان‌های عبوری از منبع و بار غیرخطی را رسم می‌کنیم.



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

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

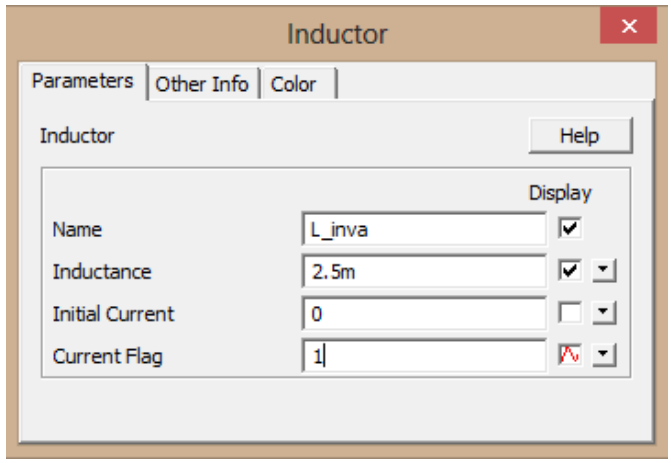
شـــده اســـت که در آن اینورتر به‌گونه‌ای کنترل می‌شـــود که در خروجی، معکوس جریان هارمونیکی بار غیرخطی را تولید کند. در این‌صـــورت مولفه‌های هارمونیکی بار غیرخطی، فیلتر شده و جریان شبکه سینو سی باقی می‌ماند. بنابراین طبق شکل زیر یک اینورتر موازی با بار خطی به مدار اضافه می‌کنیم.



(شکل ۶.۹): اضافه کردن اینورتر به مدار

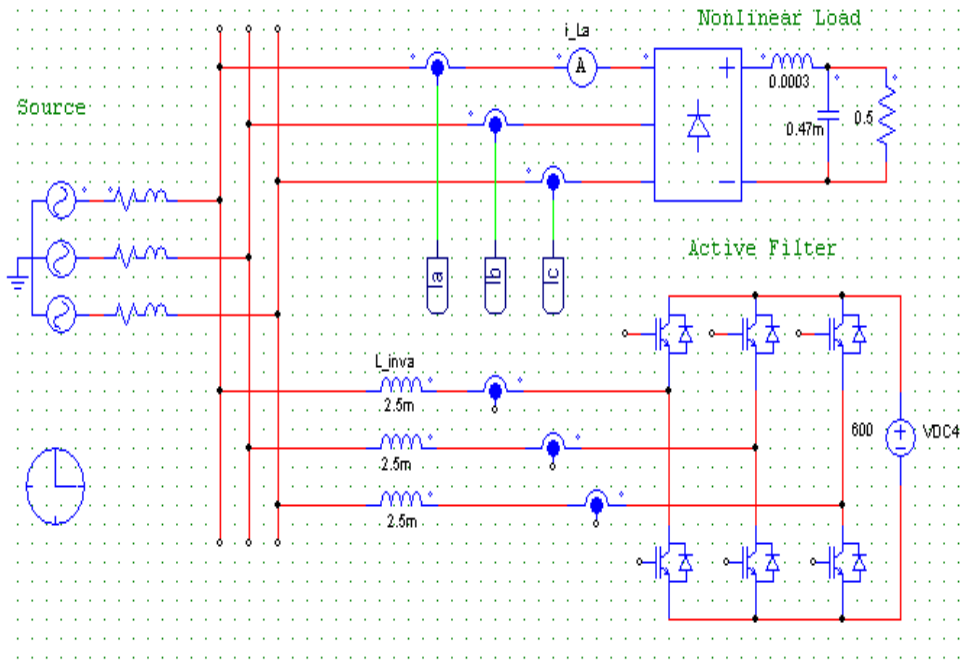
www.powerplantac.com

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 میلی‌هانری 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 هارمونیکی بار غیرخطی را توسط اینورتر تولید کرد باید جریان هارمونیکی بار غیرخطی با جریان خروجی اینورتر مقایسه شود تا پالس PWM منا سب 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.

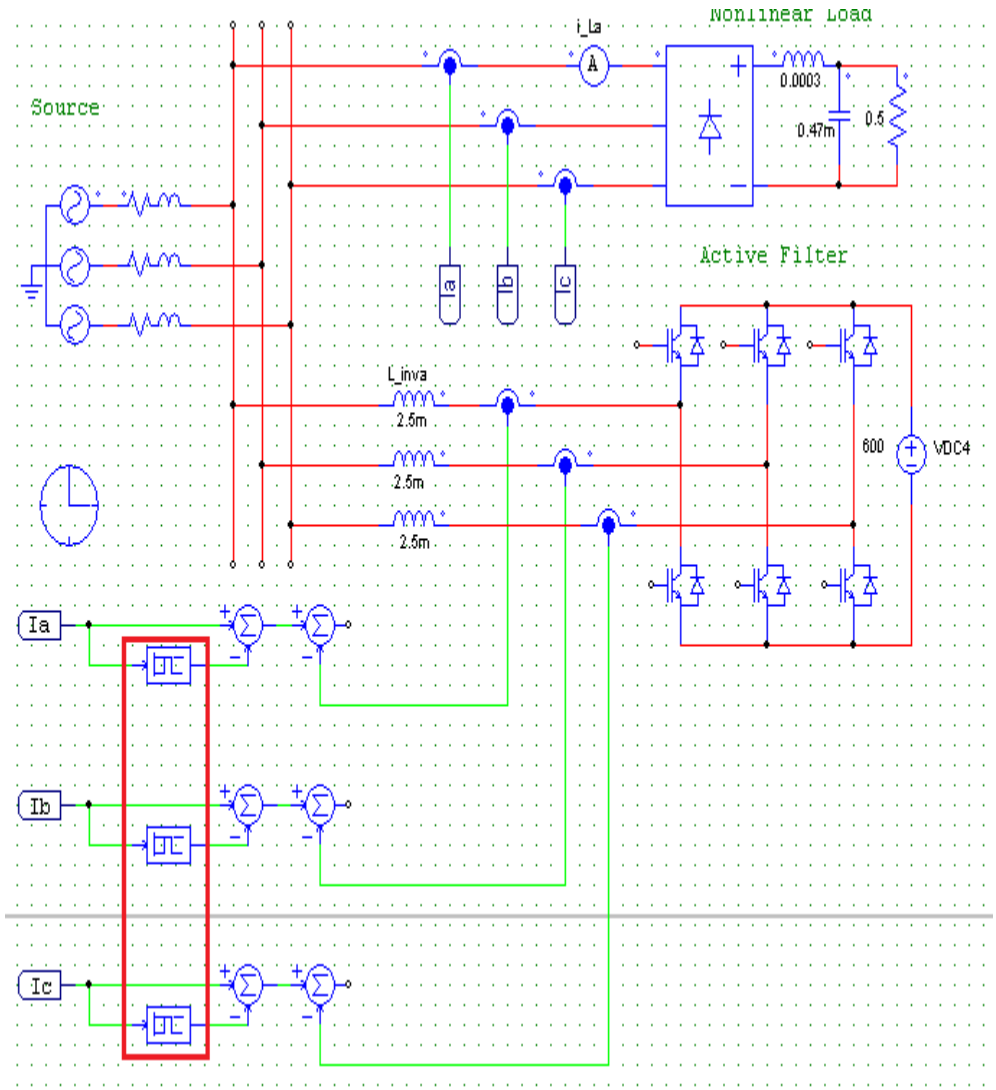


(شکل ۸.۹): اعمال سنسورهای جریان به مدار

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.

www.powerplantac.com

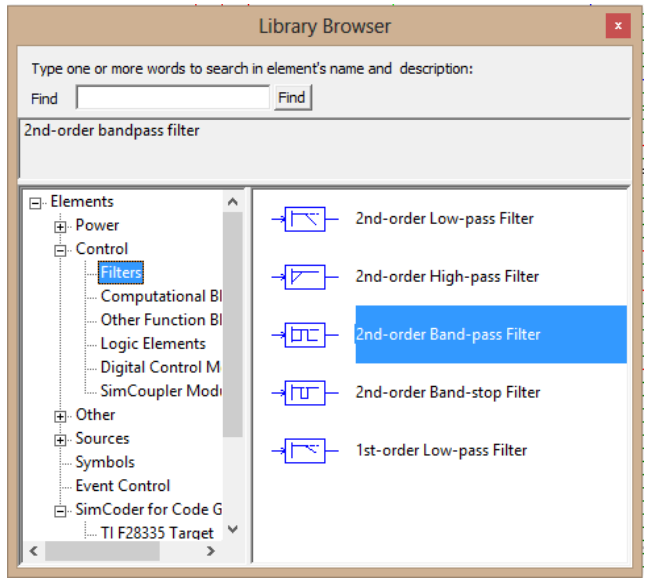
بنابراین از مولفه‌های هارمونیکی جریان یکسوساز به عنوان سیگنال مرجع استفاده می‌شود تا جریان‌های خروجی اینورتر با آن‌ها مقایسه شود.



(شکل ۹.۹): روند تکمیل مدار

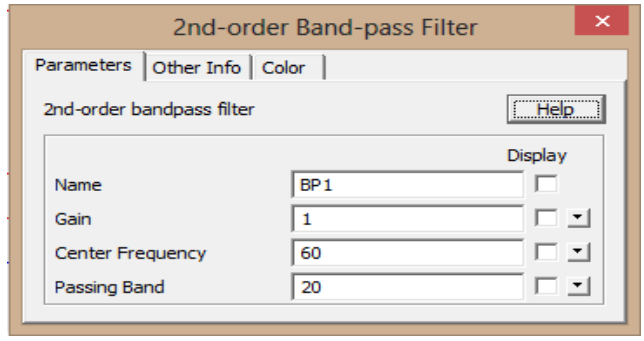
www.powerplantac.com

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

www.powerplantac.com

پارامترهای موجود در این فیلتر به شرح زیر هستند:

Gain: بهره‌ی فیلتر
Center Frequency: فرکانس مرکزی f۰ ($f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$)
Passing Band: پهنای باند عبور فیلتر ($f_b = \frac{B}{2\pi}$)

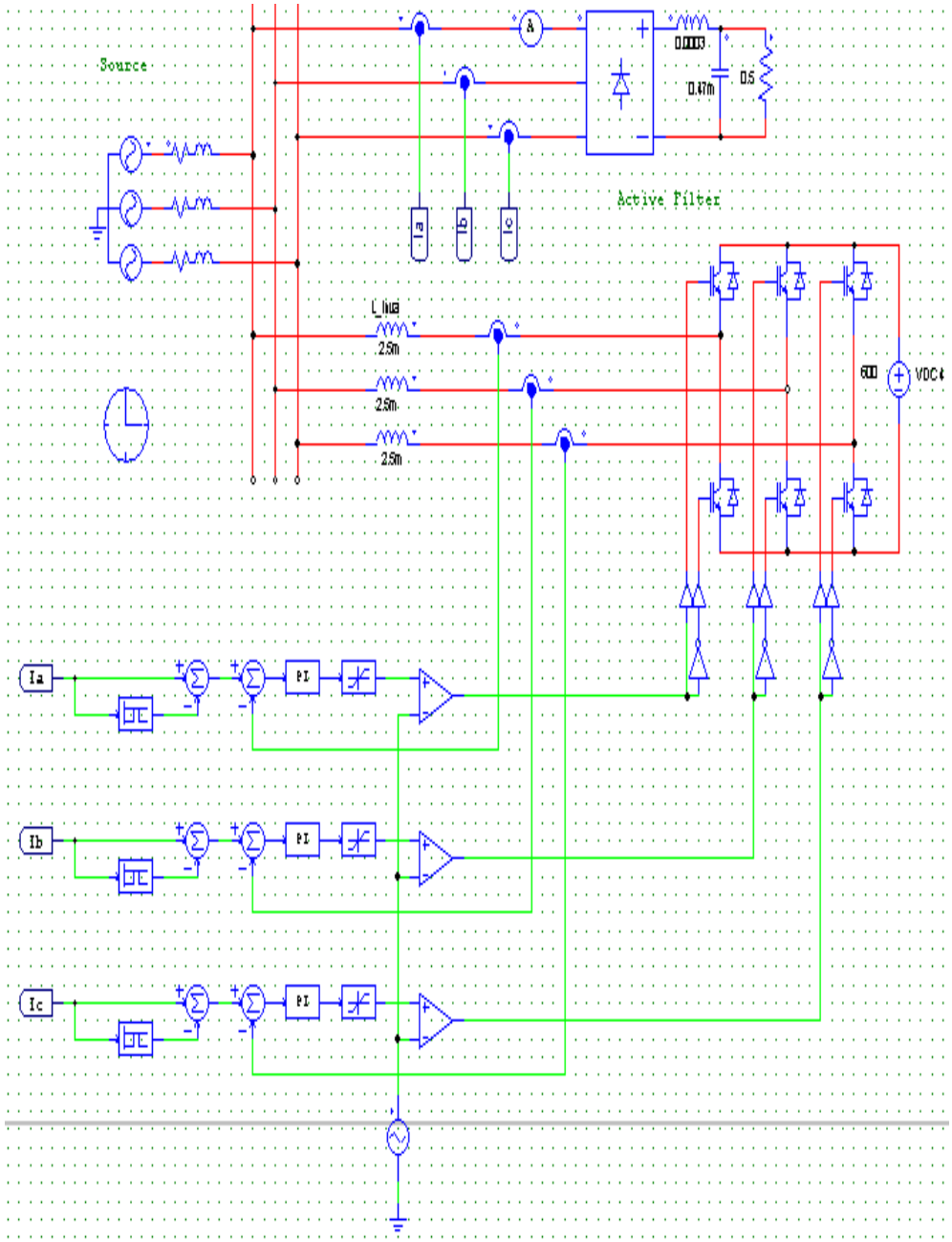
تابع تبدیل این فیلتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در اینجا فرکانس مرکزی روی ۶۰ هرتز و پهنای باند عبور روی ۲۰ هرتز تنظیم شده‌اند تا فقط مولفه‌ی مربوط به فرکانس ا صلی از فیلتر عبور کند. با کم کردن مولفه‌ی ا صلی از کل جریان، فقط مولفه‌های هارمونیکی 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 مثلثی تولید می‌شود، مدار را به‌صورت شکل زیر کامل می‌کنیم.

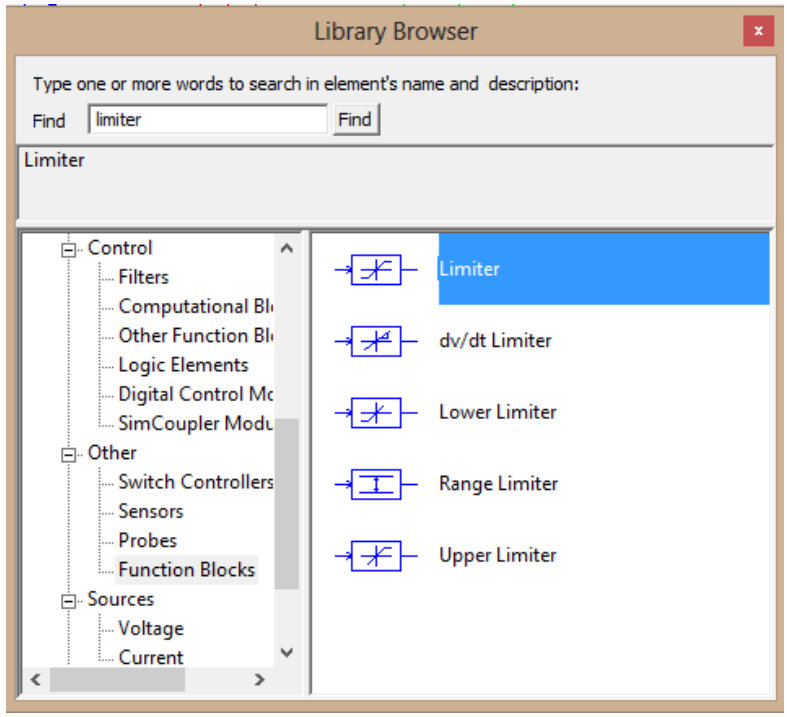
www.powerplantac.com



(شکل ۱۲.۹): اضافه نمودن قسمت کنترلی به مدار

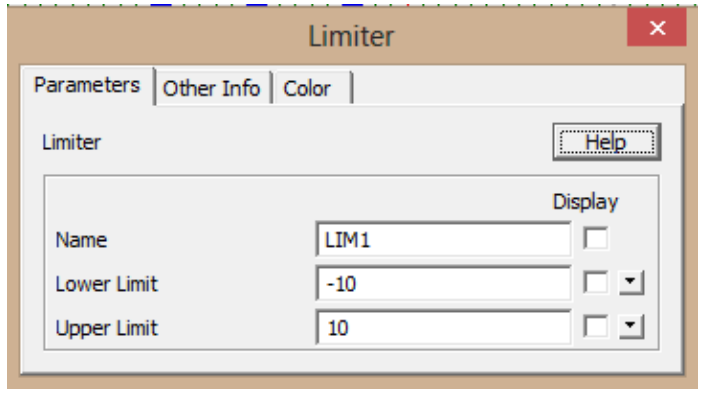
www.powerplantac.com

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



(شکل ۱۳.۹): کتابخانه نرم‌افزار

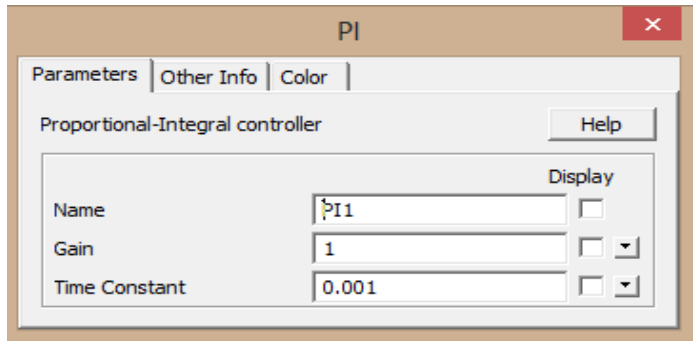
با دوبار کلیک روی محدودکننده، پنجره‌ی زیر باز می‌شود.



(شکل ۱۴.۹): تنظیم محدودکننده

حد پایین و بالا را در هر سه محدودکننده به ترتیب ۱۰- و ۱۰ در نظر می‌گیریم. در این‌صورت اگر ورودی محدودکننده از حد پایین (یا بالا) تجاوز کند در خروجی کران پایین (یا بالا) ظاهر می‌شود؛ در غیر این‌صورت ورودی عینا به خروجی محدودکننده منتقل می‌شود.

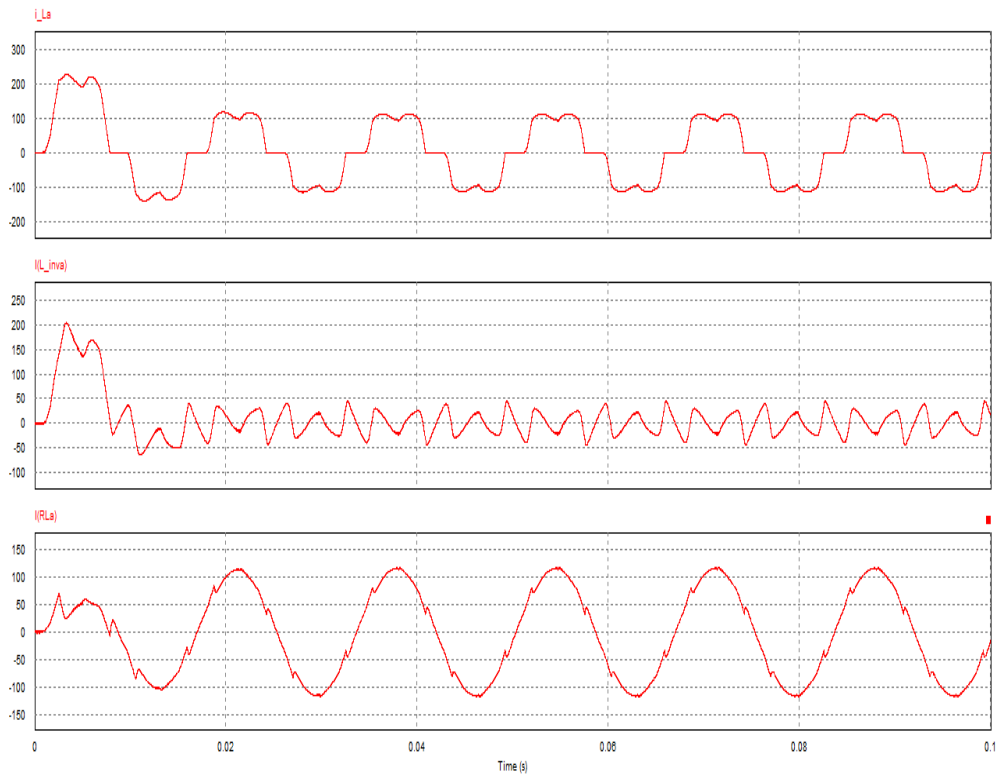
هر سه کنترل‌کننده‌ی PI به صورت زیر تنظیم شده‌اند:



(شکل ۱۵.۹): تنظیم کنترل کننده‌ی PI

www.powerplantac.com

حال مدار آماده‌ی شبیه‌سازی است، زمان شبیه‌سازی را در ۰/۱ ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. نمودار های مربوط به جر یان بار غیرخطی، جر یان 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 اســت که یکســوســاز می‌کشــد. نمودار وســط جریان تولیدی تو سط اینورتر ا ست که در آن هارمونیک‌های بار غیرخطی تولید می شود. نمودار

www.powerplantac.com

پایینی نیز جریان کشیده‌شده از منبع می باشد. 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.

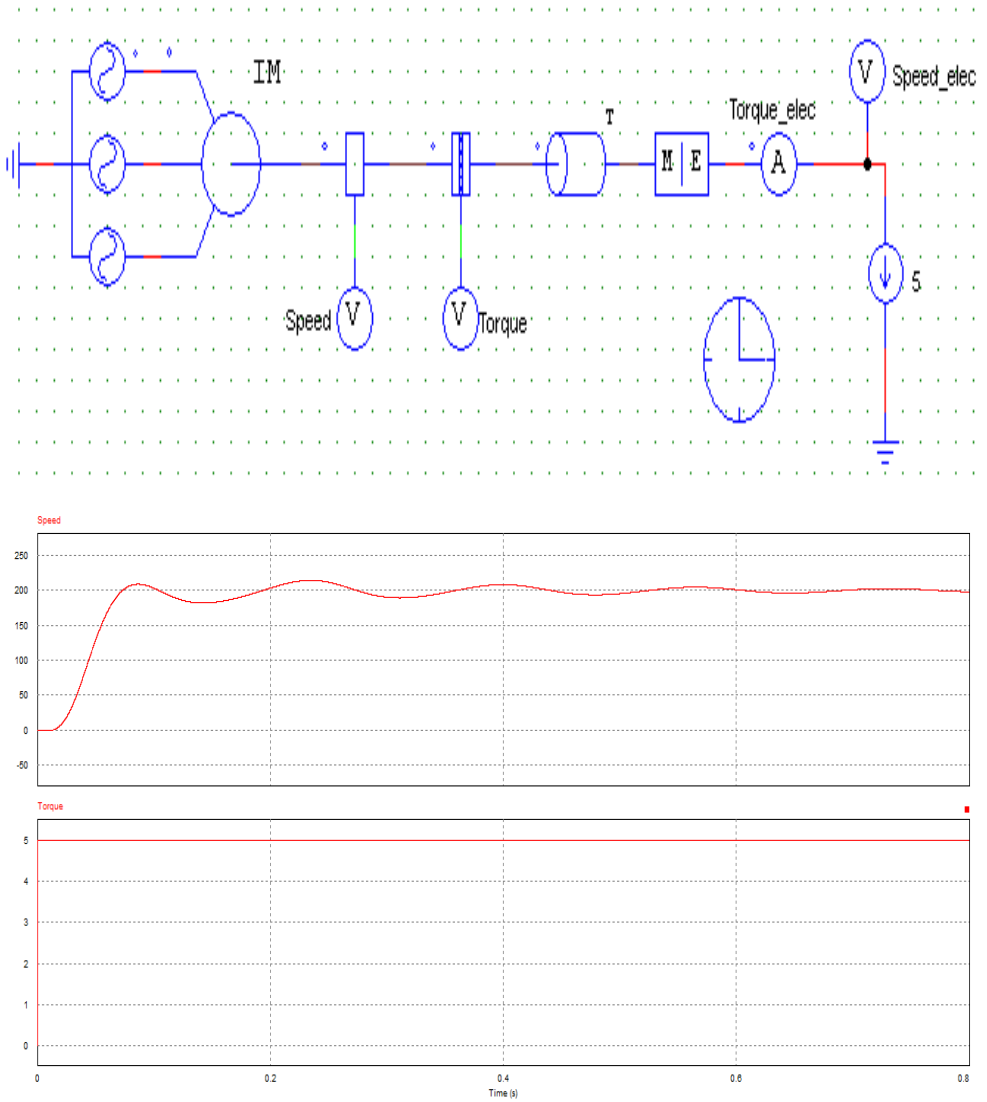
فصل دهم

آشنایی با بارها و سنسورهای مکانیکی

۱۰– مقدمه

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

۱۰–۱– طرح مدار

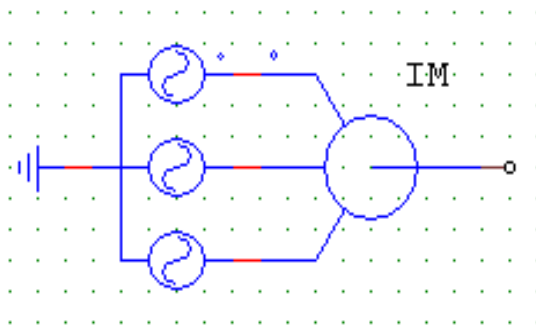


(شکل ۱.۱۰): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

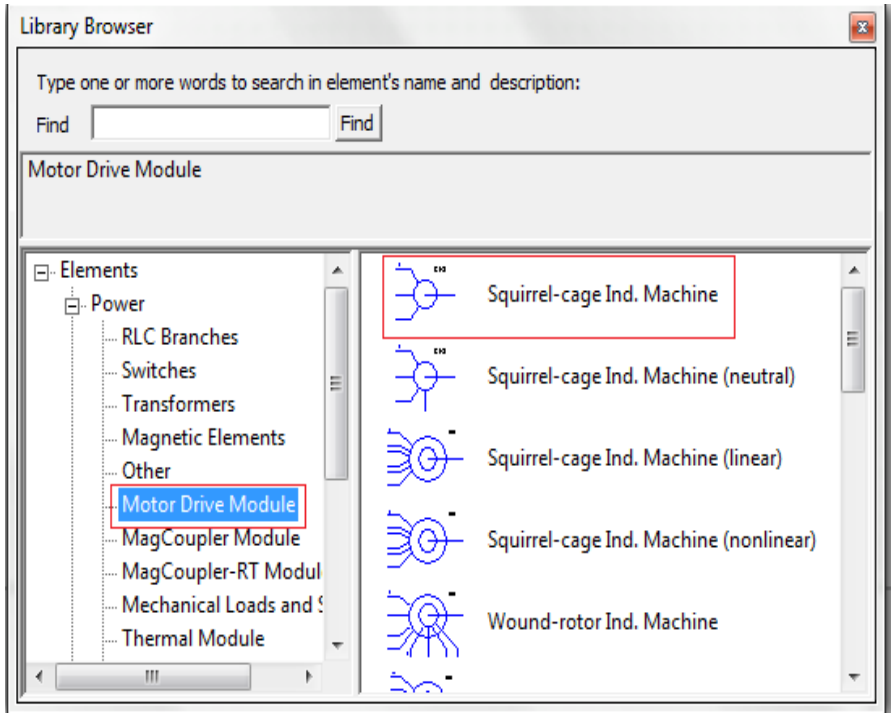
۱۰–۲– اجرای شبیه‌سازی

مدار شکل زیر را با ا ستفاده از یک منبع سه‌فاز سینو سی و یک موتور القایی قف سه سنجابی در محیط نرم‌افزار PSIM رسم می‌کنیم.



(شکل ۲.۱۰): پیاده‌سازی مدار

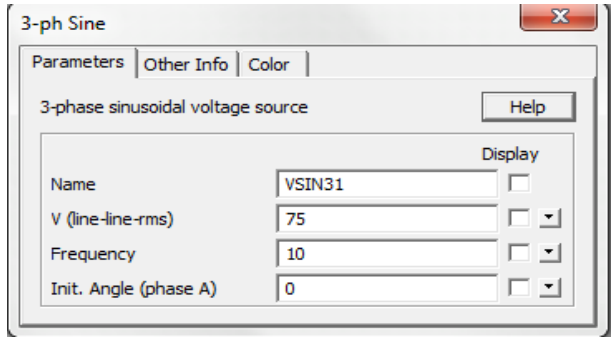
موتور القایی را می‌توان با توجه به شـــکل زیر از قســـمت Motor Drive Module از کتابخانه‌ی نرم‌افزار به شبیه‌سازی اضافه کرد.



(شکل ۳.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

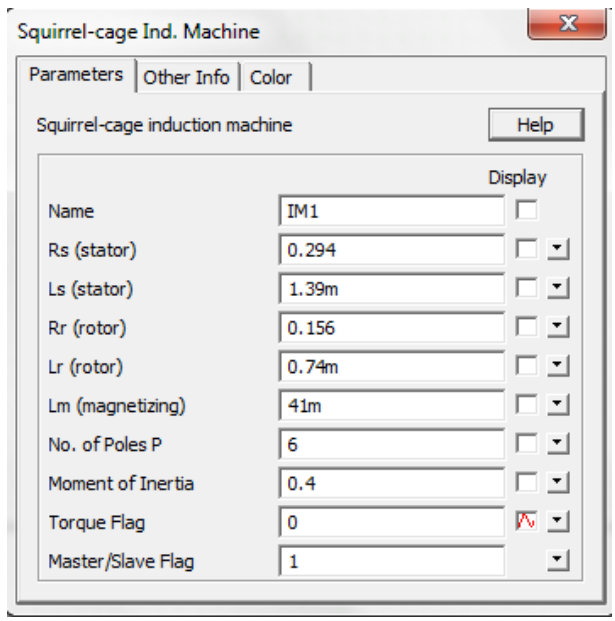
در قسمت Motor Drive Module مدل‌های مربوط به ماشین‌های الکتریکی مختلف از قبیل انواع ماشین‌های القفسه سنجابی، روتور سیم‌پیچی‌شده، ماشین‌های DC و ماشین‌های سنکرون تعبیه شده است که از آن‌ها می‌توان در شبیه سازی‌های مختلف استفاده نمود.

منبع ولتاژ سینوسی را به‌صورت شکل (۴.۱۰) تنظیم می‌کنیم.



(شکل ۴.۱۰): منبع ولتاژ سینوسی

با دوبار کلیک روی موتور القایی پنجره‌ی مربوط به تنظیمات آن به‌صـــورت زیر باز می‌شود.



(شکل ۵.۱۰): تنظیمات موتور القایی

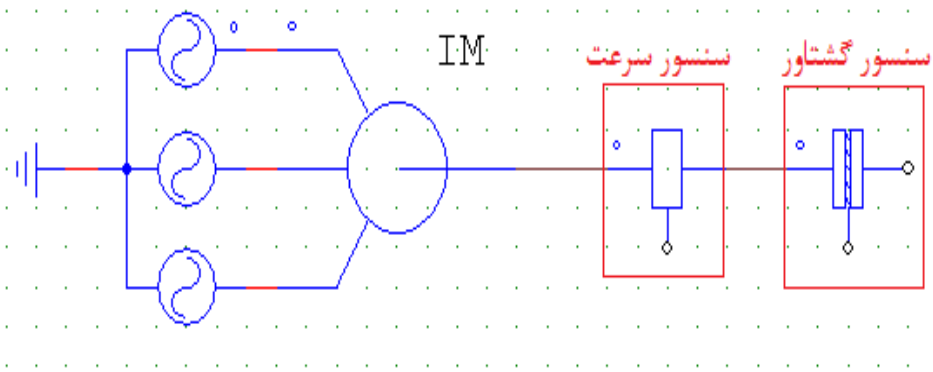
www.powerplantac.com

پارامترهای موجود در این پنجره به‌صورت زیر هستند:

Rs (stator): مقاومت سیم‌پیچی استاتور (اهم)
Ls (stator): اندوکتانس نشتی سیم‌پیچی استاتور (هانری)
Rr (rotor): مقاومت سیم‌پیچی روتور (اهم)
Lr (rotor): اندوکتانس نشتی سیم‌پیچی روتور (هانری)
Lm (magnetizing): اندوکتانس مغناطیس‌کننده (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 kg×m×m
Torque Flag: پرچم خروجی برای نمایش گشتاور الکترومکانیکی داخلی (در صورتی که این پرچم برابر یک باشد، گشتاور داخلی موتور را می‌توان در خروجی رسم کرد)

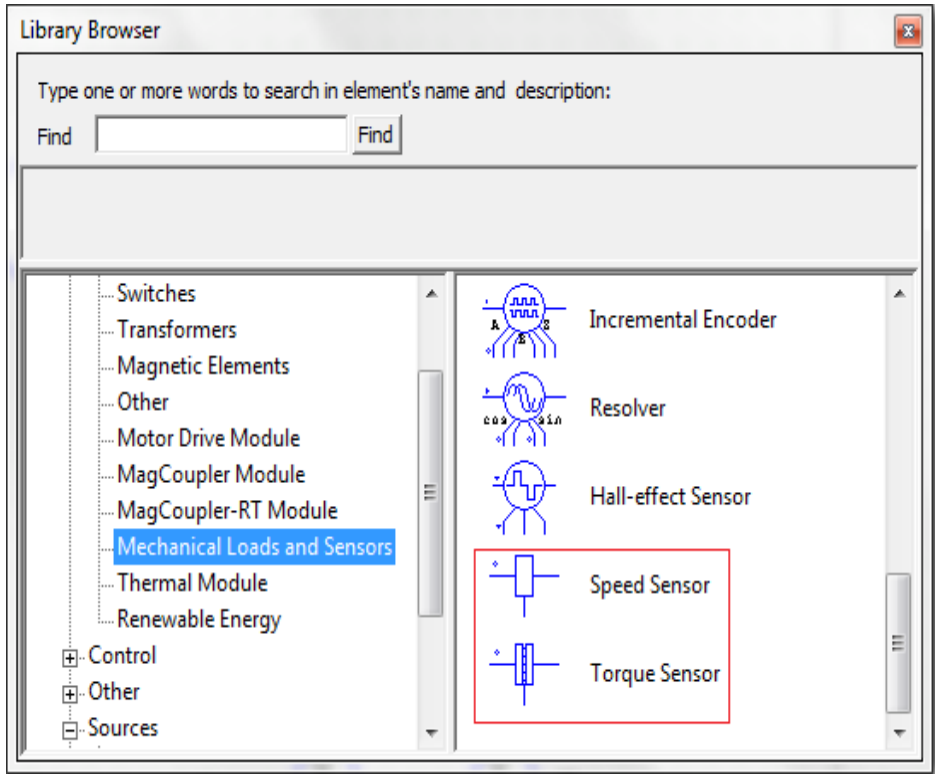
لازم به ذکر است که نرم‌افزار، تمامی پارامترهای فوق را از دید استاتور در نظر می‌گیرد و سیم‌پیچی استاتور نیز دارای اتصال ستاره است. برای سایر ماشین‌ها نیز تنظیمات مربوطه به همین صورت وجود دارد و با استفاده از گزینه‌ی Help موجود در پنجره‌ی تنظیمات می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد آن‌ها به‌دست آورد.

تنظیمات مربوط به موتور القایی را به همان صـــورت پیش‌فرض 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.



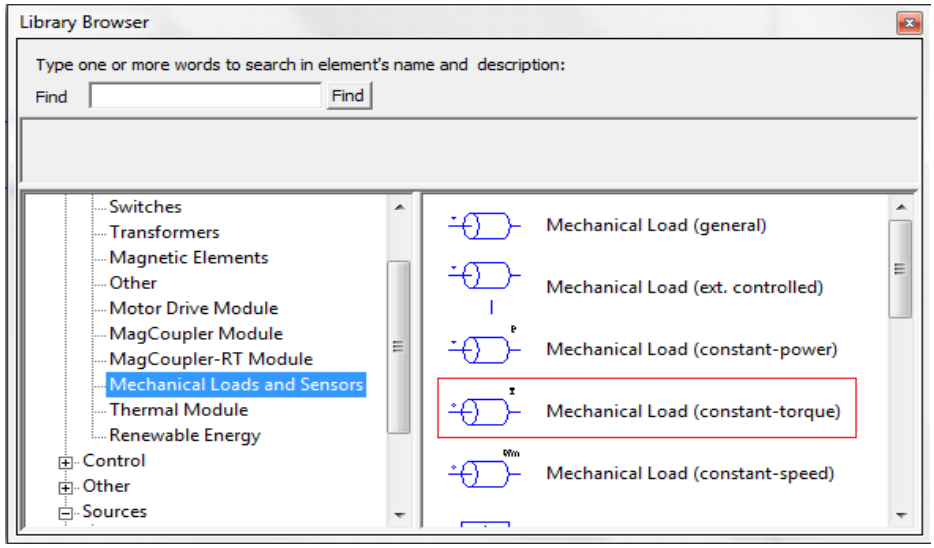
(شکل ۶.۱۰): اعمال سنسورهای مکانیکی به مدار

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



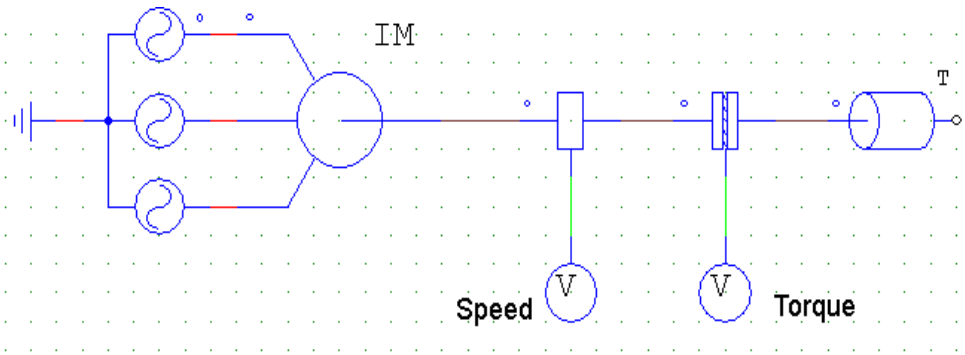
(شکل ۷.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

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 هریک از این بارها می‌توان به Help مربوط به تنظیمات آن‌ها مراجعه نمود.



(شکل ۸.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

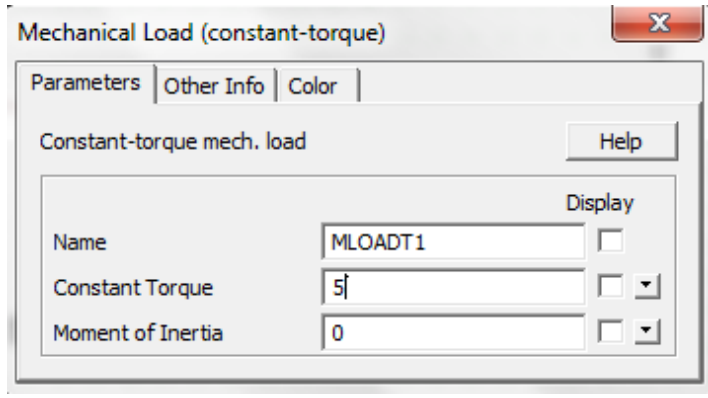
در این شـــبیه‌ســـازی از یک بار با گشـــتاور ثابت اســـتفاده خواهیم کرد. از این رو بار Mechanical Load (constant-torque) را انتخاب کرده و طبق شکل زیر به مدار ا ضافه می‌کنیم.



www.powerplantac.com

(شکل ۹.۱۰): اعمال بار مکانیکی به مدار

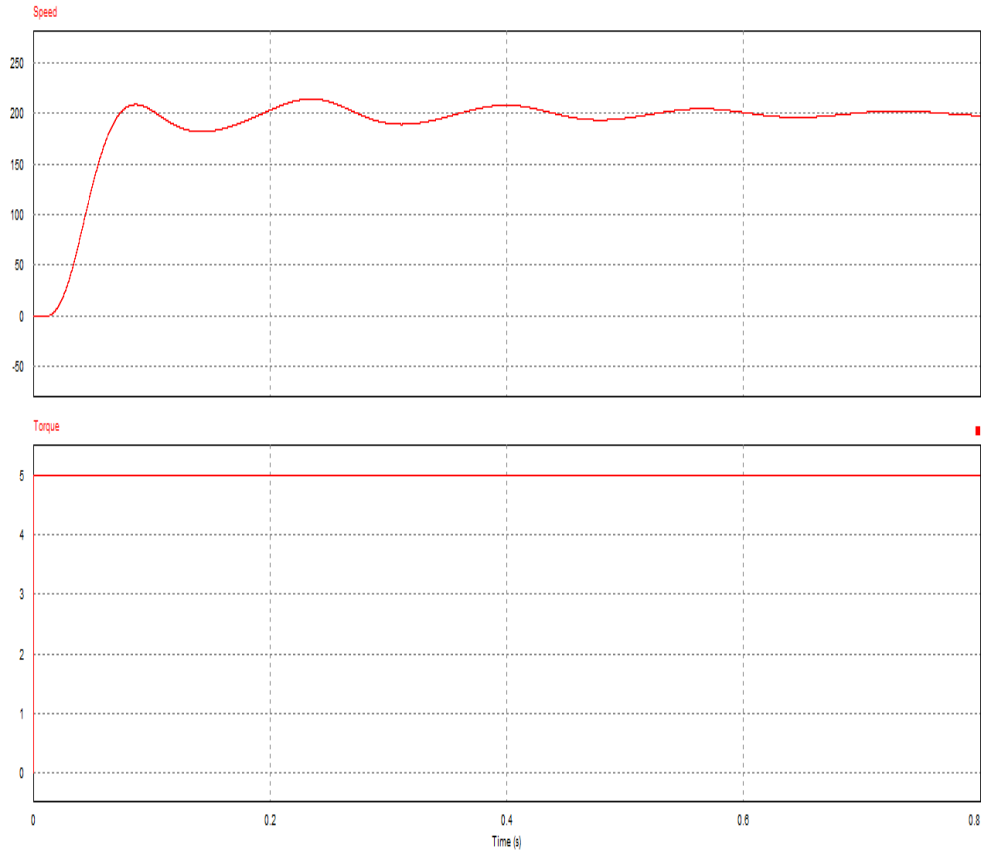
لازم به ذکر ا ست که برای نمایش خروجی سنسورها باید از پروب‌های ولتاژ ا ستفاده کرد. با دوبار کلیک روی بار با گشـــتاور ثابت، پنجره‌ی تنظیمات آن به صـــورت زیر باز می‌شود که در آن می‌توان گشتاور و ممان اینرسی بار را تعریف نمود. در اینجا گشتاور بار را ۵ N.m و ممان اینرسی را صفر در نظر می‌گیریم.



(شکل ۱۰.۱۰): تنظیم بار مکانیکی

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

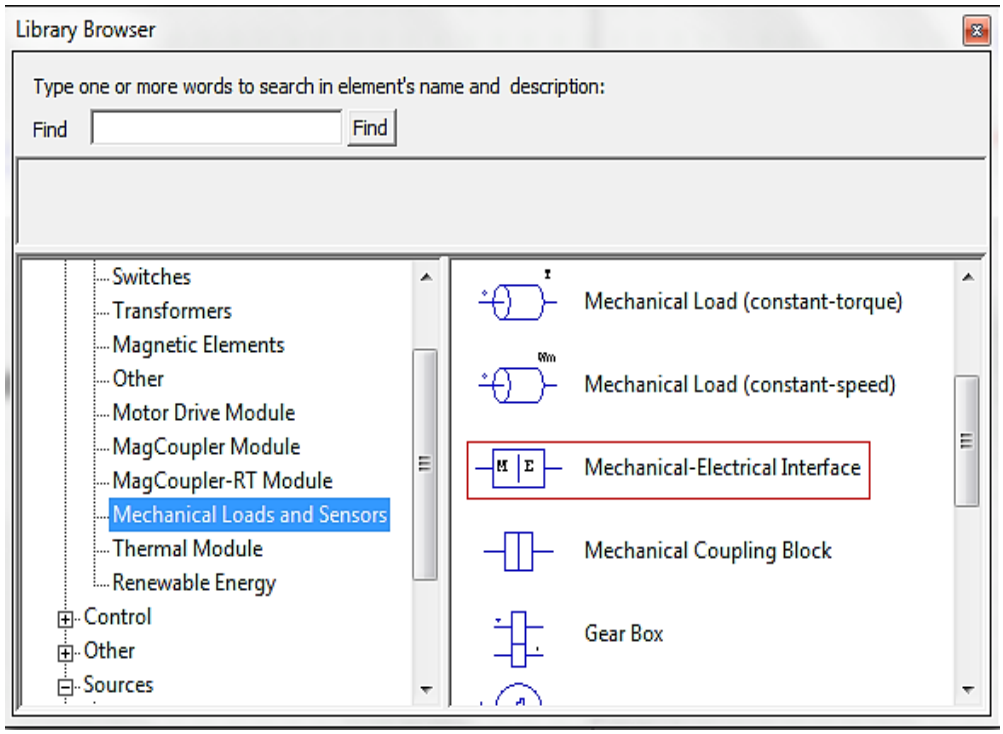
www.powerplantac.com



(شکل ۱۱.۱۰): سرعت و گشتاور موتور

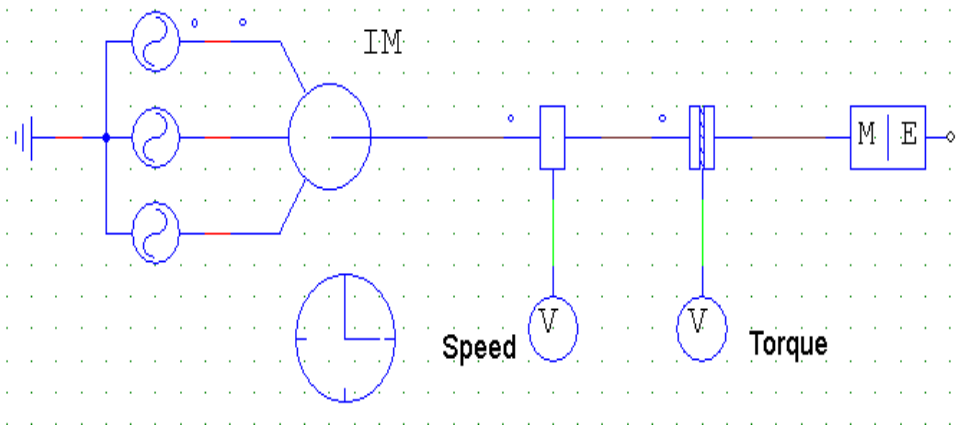
همان‌طور که انتظار می‌رفت گشتاور اندازه‌گیری‌شده برابر است با ۵ N.m و سرعت شفت در ۲۰۰ تثبیت می شود. باید در نظر داشت که خروجی سنسور سرعت بر حسب rpm می‌باشد، بنابراین واحد سرعت نمایش داده شده در اینجا دور در دقیقه خواهد بود.

در این قسمت می‌خواهیم به‌جای 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 می شود. این بلوک در قسمت بارها و سنسورهای مکانیکی کتابخانه‌ی نرم‌افزار وجود دارد.



(شکل ۱۲.۱۰): کتابخانه نرم‌افزار

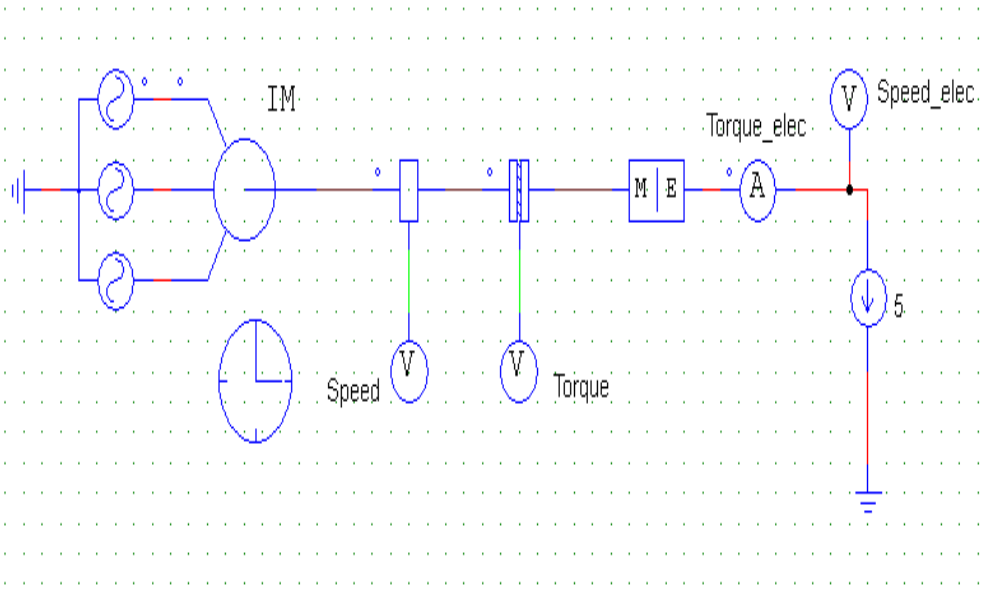
حال بار مکانیکی را حذف کرده و این بلوک را به‌جای آن اضافه می‌کنیم.



(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 می شود. 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 آمپرمتر معادل گشتاور مکانیکی و مقدار اندازه‌گیری شده توسط پروب ولتاژ، برابر سرعت مکانیکی بر حسب رادیان بر ثانیه است.

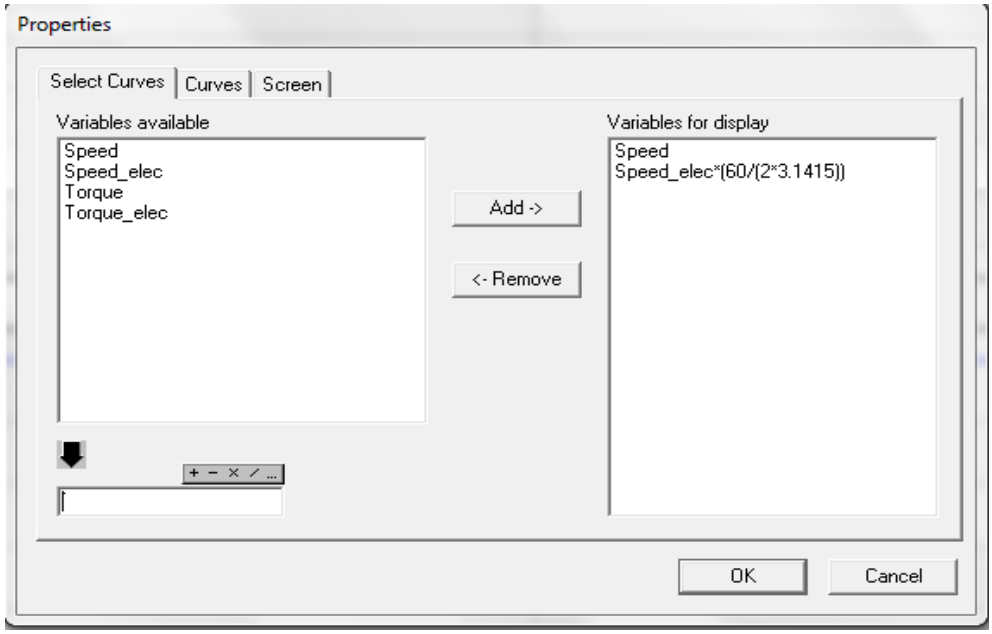
www.powerplantac.com



(شکل ۱۴.۱۰): روند تکمیل مدار

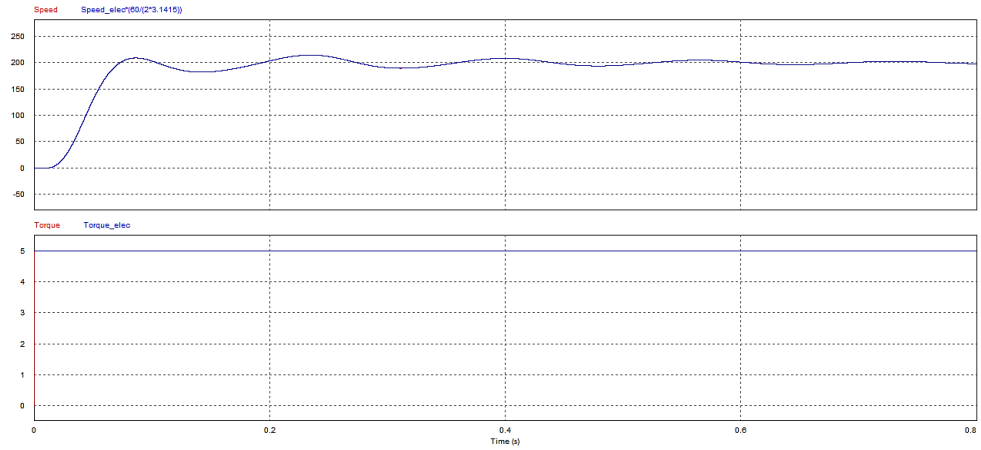
حال شـــبیه‌ســـازی را اجرا کرده و نمودارهای Speed و Speed_elec را باهم در یک نمودار و Torque و Torque_elec را باهم در یک نمودار دیگر رســـم می‌کنیم. از آنجایی که خروجی سنسور سرعت بر حسب rpm است و خروجی پروب ولتاژ، معادل سرعت بر مکانیکی بر حســـب رادیان بر ثانیه می‌باشـــد، نمودار Speed_elec را ابتدا در عدد $\frac{60}{2\pi}$ ضـرب کرده و سـپس به همراه نمودار Speed رسـم می‌کنیم تا واحد هر دو یکسـان (بر حسب rpm) شود. شکل (۱۵.۱۰) این حالت را نشان می‌دهد.

www.powerplantac.com



(شکل ۱۵.۱۰): تنظیمات Properties

در شکل‌های زیر سرعت و گشتاور نشان داده شده است.



(شکل ۱۶.۱۰): شکل موج سرعت و گشتاور

www.powerplantac.com

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 نحوه‌ی اتصالات بخش مکانیکی آشنا شدید و هم‌چنین فراگرفتید که چگونه می‌توان 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

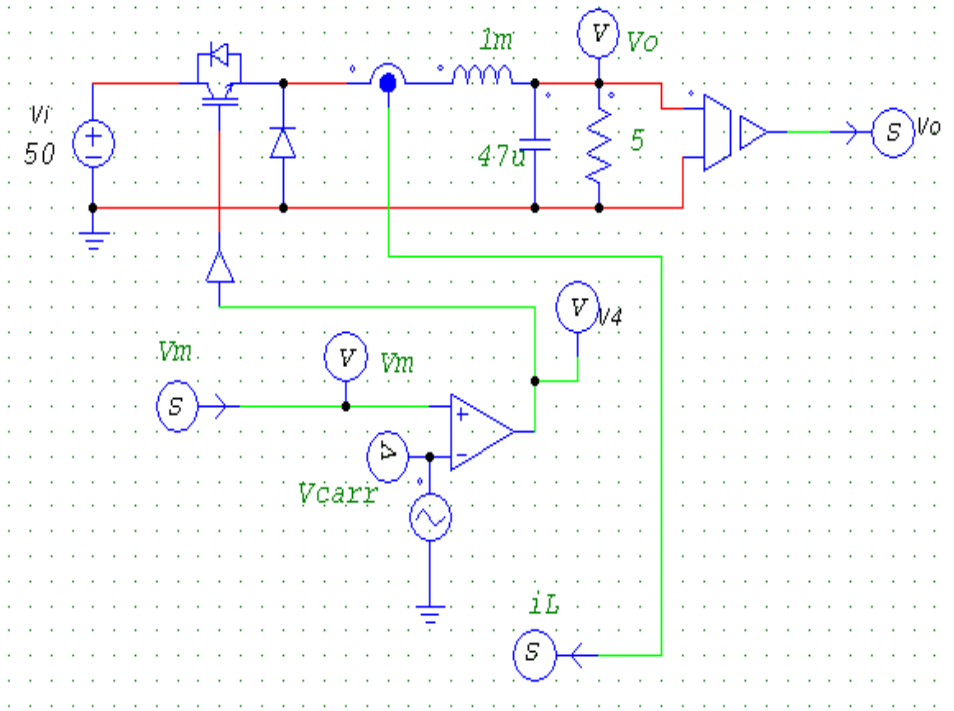
شبیه‌سازی همزمان کنترل جریان

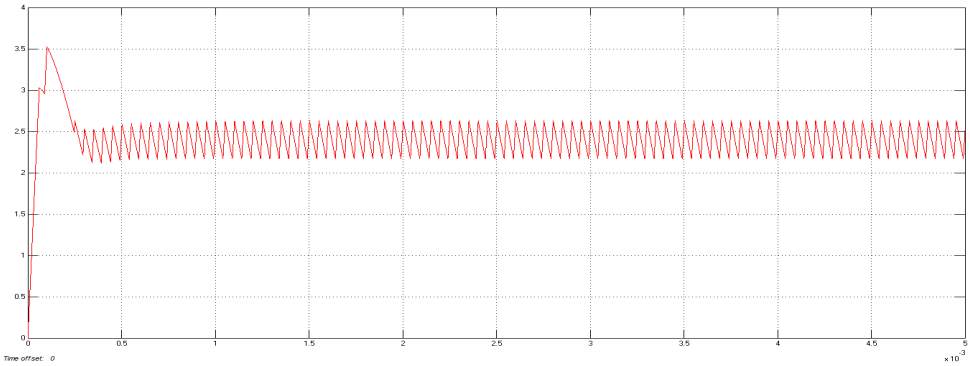
متوسط در PSIM و MATLAB

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





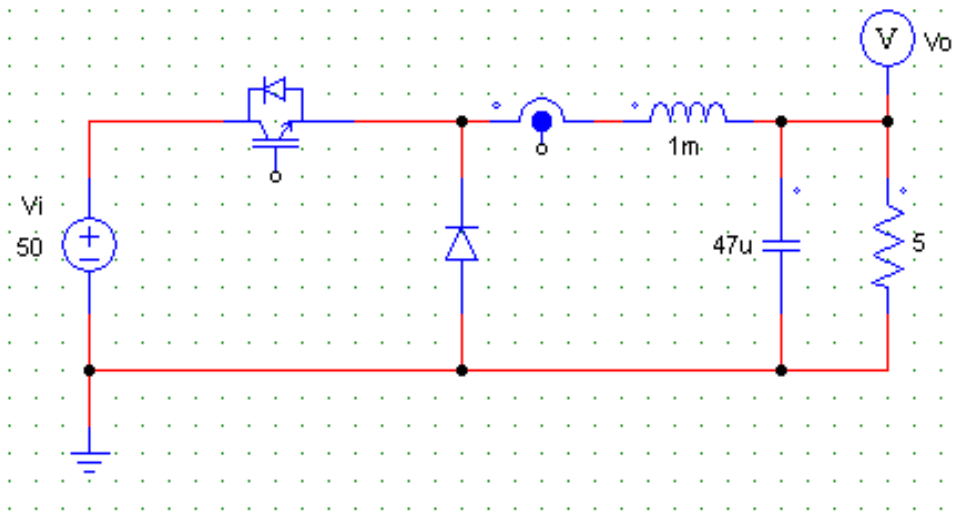
(شکل ۱.۱۱): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

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 مدار همان مثال با تنظیمات مشابه استفاده خواهد شد.

(شکل ۲.۱۱): نوار ابزار

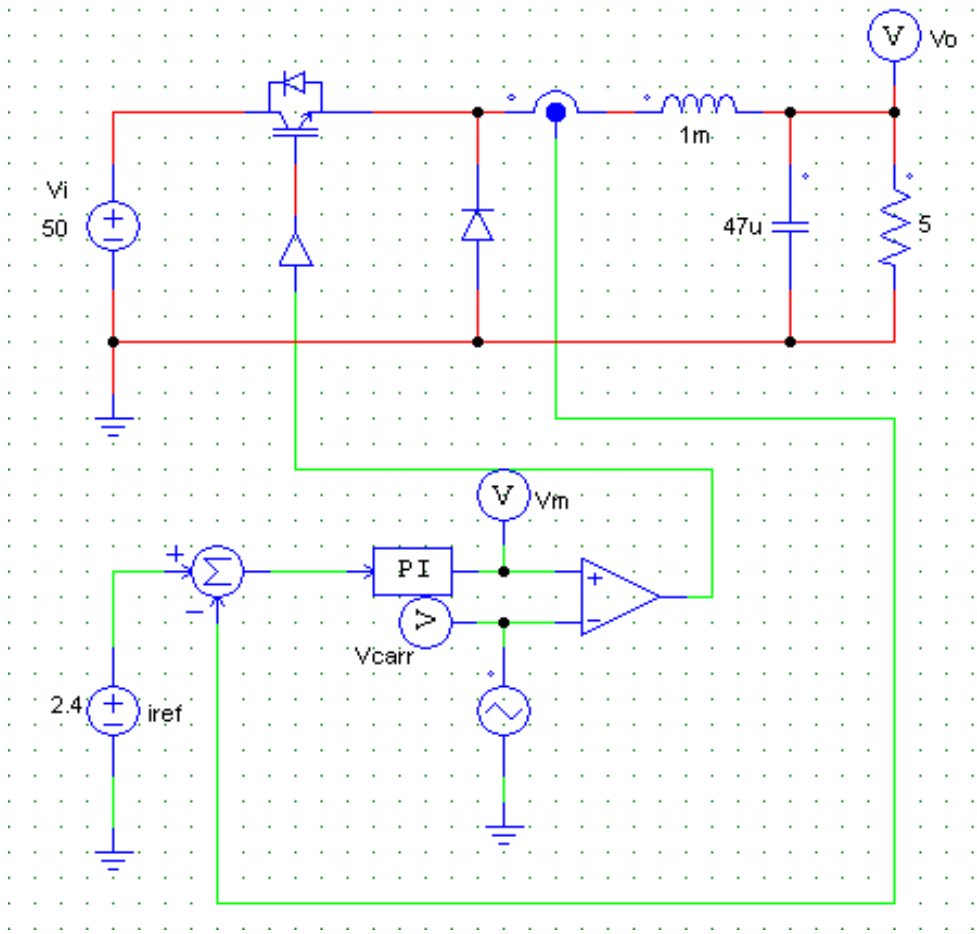


(شکل ۳.۱۱): پیاده‌سازی مدار

www.powerplantac.com

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

(شکل ۴.۱۱): نوار ابزار

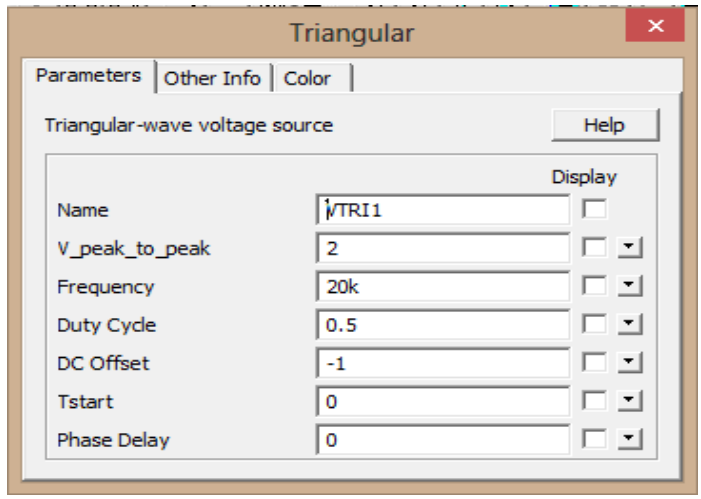


(شکل ۵.۱۱): اضافه کردن قسمت کنترلی مدار

www.powerplantac.com

در مدار کنترلی فوق، جریان عبوری از سلف با مقدار مرجع مقایسه شده و سیگنال خطا تولید می شود. 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 می شود که جریان سلف در مقدار مرجع تنظیم شود. باید توجه کرد از آنجایی که سیگنال خروجی مقایسه‌گر یک سیگنال کنترلی است، نمی‌توان آن را مستقیما 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:

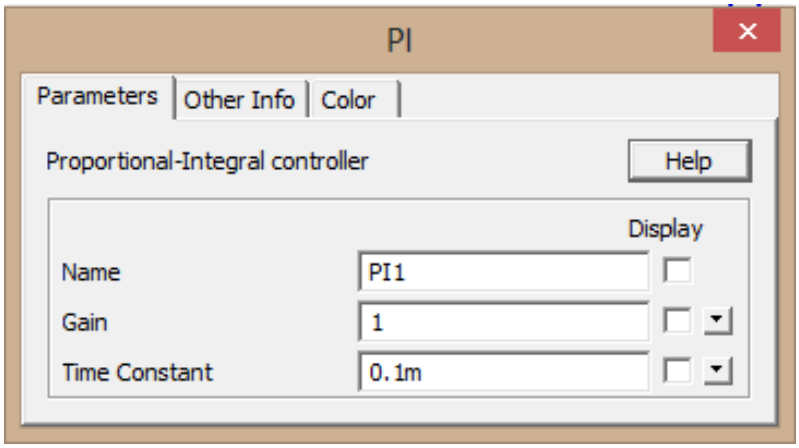


(شکل ۶.۱۱): تنظیم منبع مثلثی

www.powerplantac.com

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

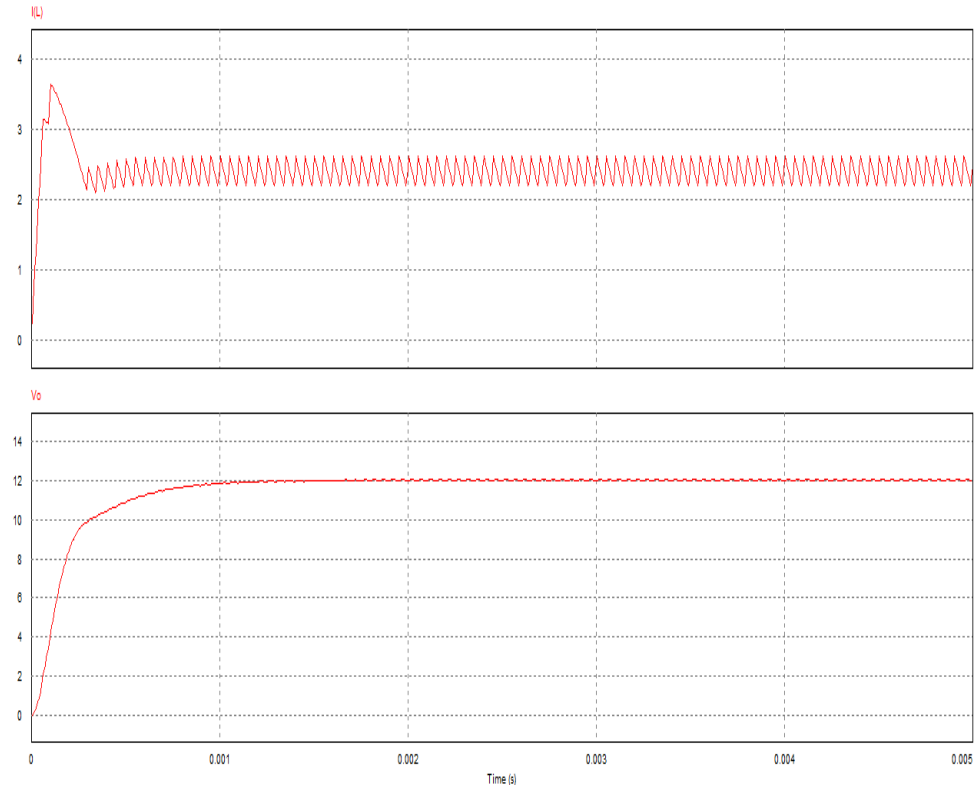
$$G(s) = K * (۱ + sT)/(sT)$$



(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 شبیه سازی را ۵ میلی‌ثانیه تنظیم کرده و آن را اجرا می‌کنیم. در خروجی نمودار های Vo و I(L) را رسم می‌کنیم. شکل زیر این خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

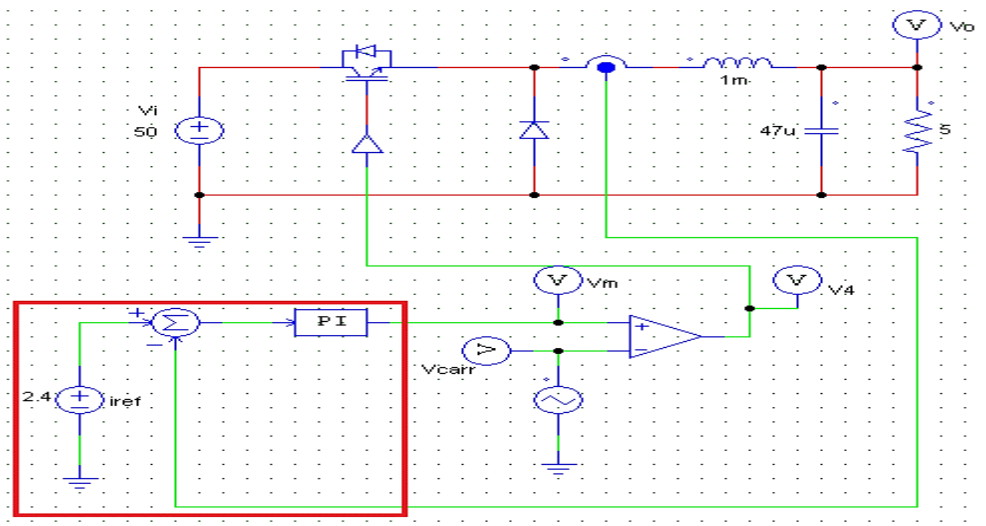
www.powerplantac.com



(شکل ۸.۱۱): نمودارهای Vo و I(L)

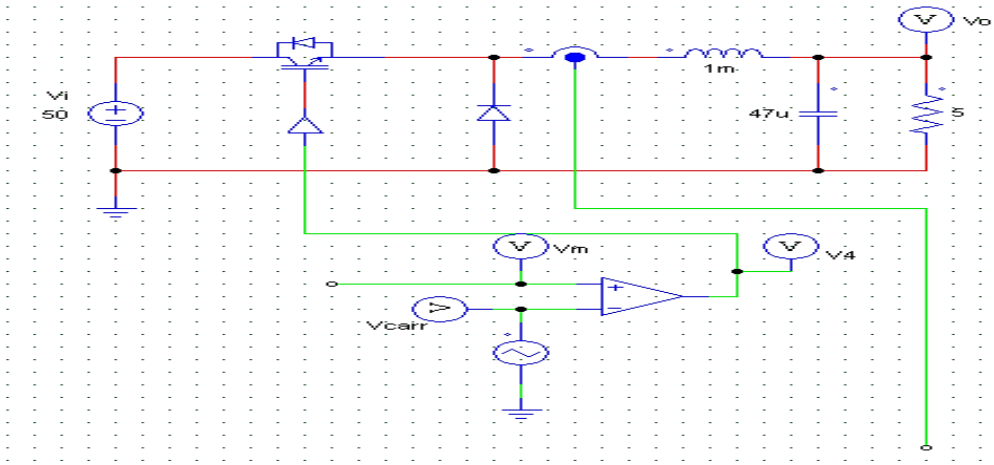
حال می‌خواهیم با استفاده از بلوک SimCoupler بین نرم‌افزارهای PSIM و سیمولینک MATLAB ارتباط برقرار کنیم تا بتوانیم شبیه‌سازی هم‌زمان انجام دهیم، به این‌صورت که بخشی از مدار در PSIM شبیه‌سازی شده و بخش دیگر در سیمولینک اجرا می‌شود. در شکل زیر این دو بخش مشخص شده است. قسمت داخل مستطیل قرمز در سیمولینک MATLAB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

www.powerplantac.com



(شکل ۹.۱۱): روند تکمیل مدار

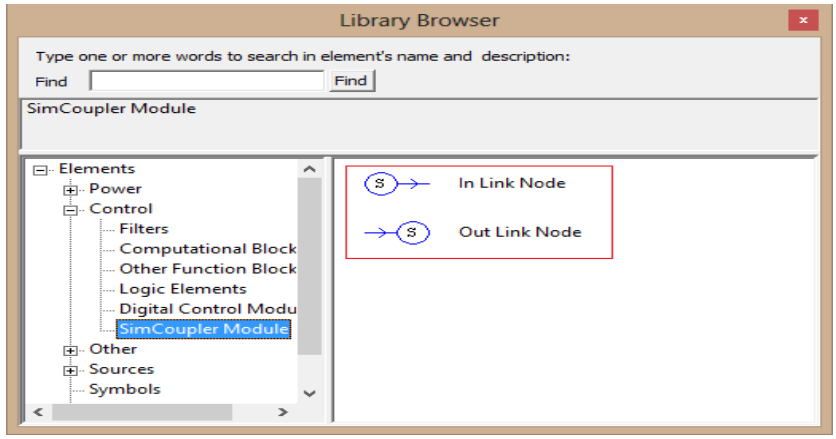
برای این منظور مدار را به شکل زیر اصلاح می‌کنیم.



(شکل ۱۰.۱۱): روند تکمیل مدار

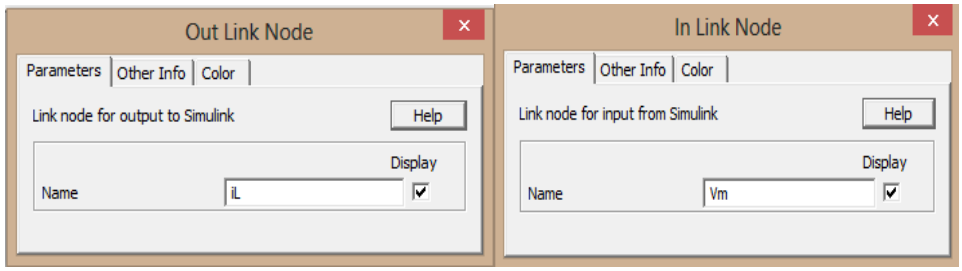
www.powerplantac.com

برای ایجاد ارتباط بین نرم‌افزار PSIM و ســـیمولینک MATLAB باید از بلوک‌های SimCoupler که در کتابخانه‌ی نرم‌افزار PSIM موجود هستند، استفاده کرد.

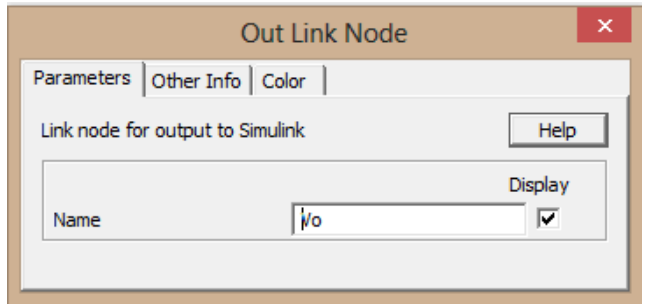


(شکل ۱۱.۱۱): کتابخانه نرم‌افزار

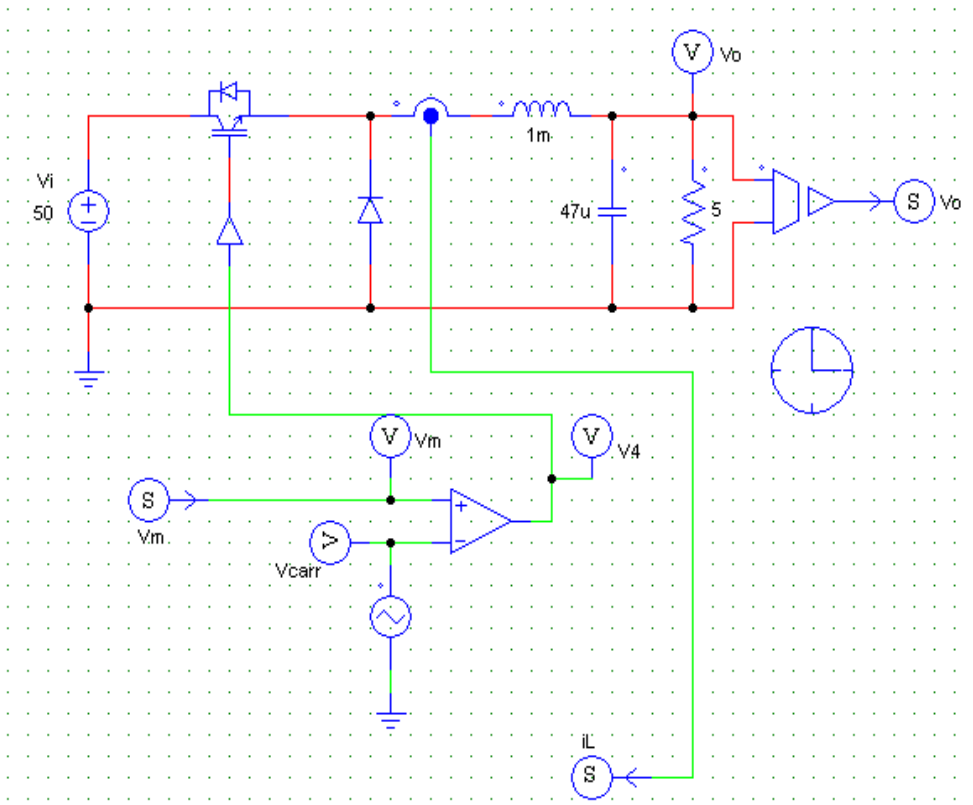
بلوک Out Link Node را به خروجی ســـنســـور جریان و بلوک In Link Node را به ورودی مقایســـه‌گر متصـــل می‌کنیم. با دوبار کلیک کردن روی بلوک‌ها نام آن‌ها را مطابق شکل زیر تغییر می‌دهیم.



www.powerplantac.com



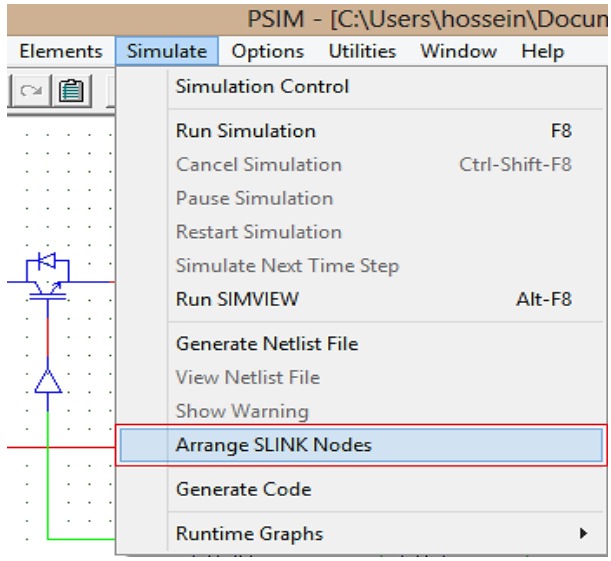
(شکل ۱۲.۱۱): تنظیم بلوک‌های SimCoupler



(شکل ۱۳.۱۱): روند تکمیل مدار

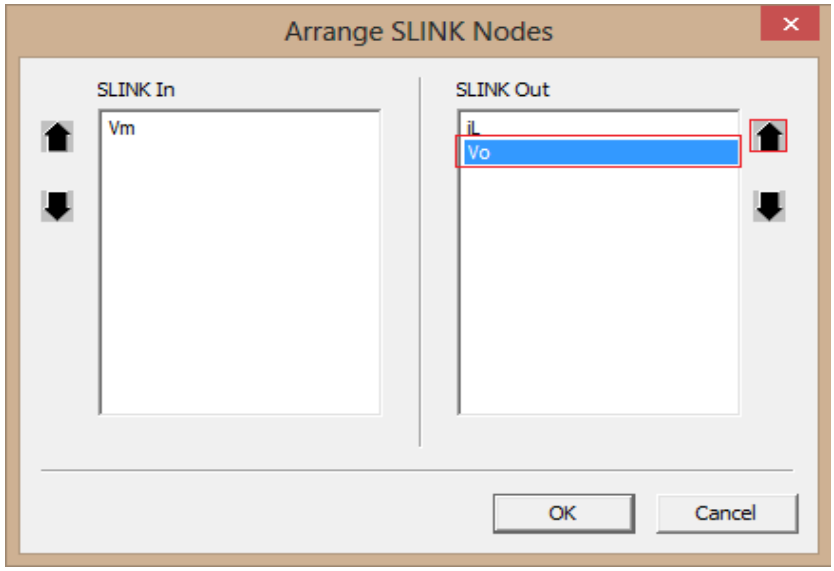
www.powerplantac.com

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 می شود. 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

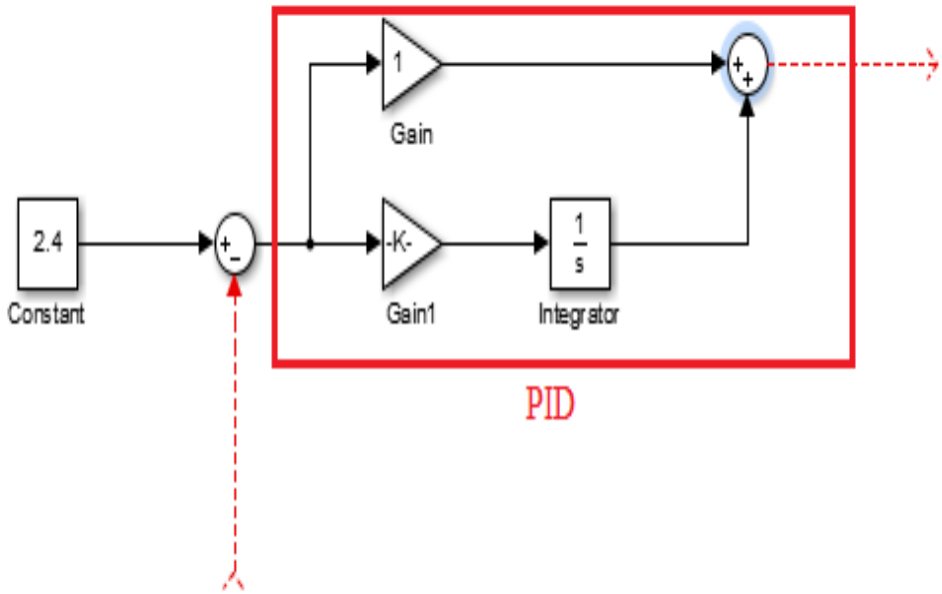
www.powerplantac.com



(شکل ۱۵.۱۱): تنظیمات Arrange SLINK Nodes

برای جابجایی ترتیب گره‌ها، آن‌ها را انتخاب کرده و سپس با ا ستفاده از فلش‌های بالا یا پایین آن‌ها را جابجا می‌کنیم. در این‌جا 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 می شود. یک مدل جدید ایجاد کرده و مدار کنترلی زیر را در آن رسم می‌کنیم.

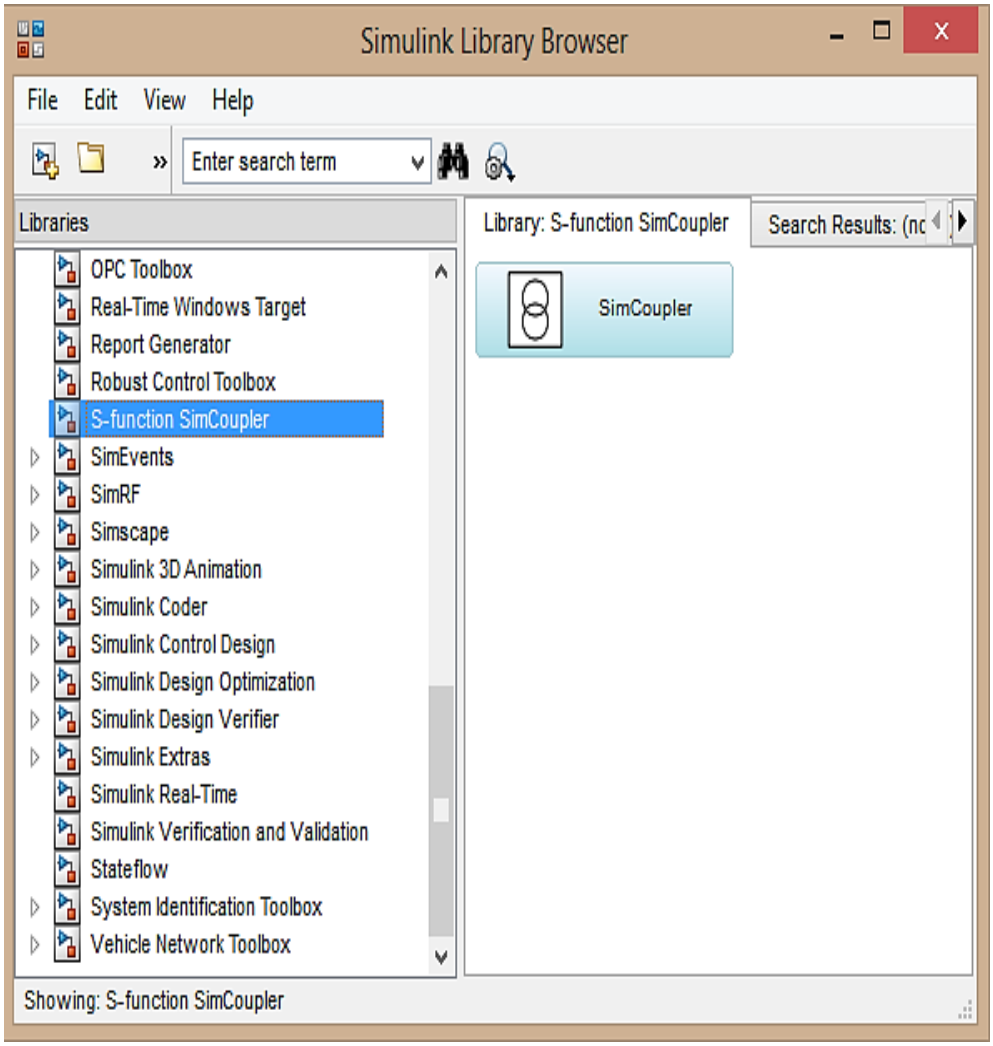
www.powerplantac.com



(شکل ۱۶.۱۱): کنترل‌کننده‌ی PID

مدار داخل کادر قرمز همان کنترل‌کننده‌ی PID ا ست. مقدار بلوک Gain۱ در (e-۰,۱ ۱/۳) تنظیم شـــده اســـت. مدار فوق را با نام Average_Current_Mode_MS.mdl در همان مســـیر فایل Average_Current_Mode_PSM.psimsch ذخیره می‌کنیم. حال برای تکمیل شـبیه‌سـازی باید بلوک SimCoupler را به مدار فوق اضـافه کنیم. برای این کار به کـتابخا نه‌ی ســـیمولی نک رفـته و از منوی S-function SimCoupler بلوک Simcoupler را به مدار اضافه می‌کنیم.

www.powerplantac.com

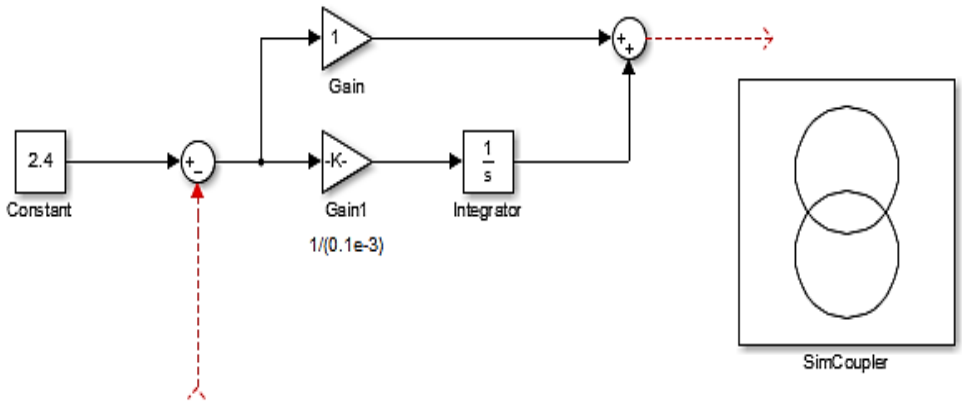


(شکل ۱۷.۱۱): کتابخانه مدار

توجه داشـــته باشـــید که منوی s – function SimCoupler در هنگام نصـــب نرم‌افزار PSIM به‌طور خودکار به کتابخانه‌ی سیمولینک MATLAB افزوده می شود. در صورتی

که این بلوک در کتابخانه‌ی سیمولینک وجود ندا شت می‌توان آن را از م سیر Utilities → SimCoupler Setup (در نرم‌افزار PSIM) به کتابخانه‌ی سیمولینک افزود. باید توجه کرد که تنظیمات فوق زمانی قابل اعمال اســت 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.

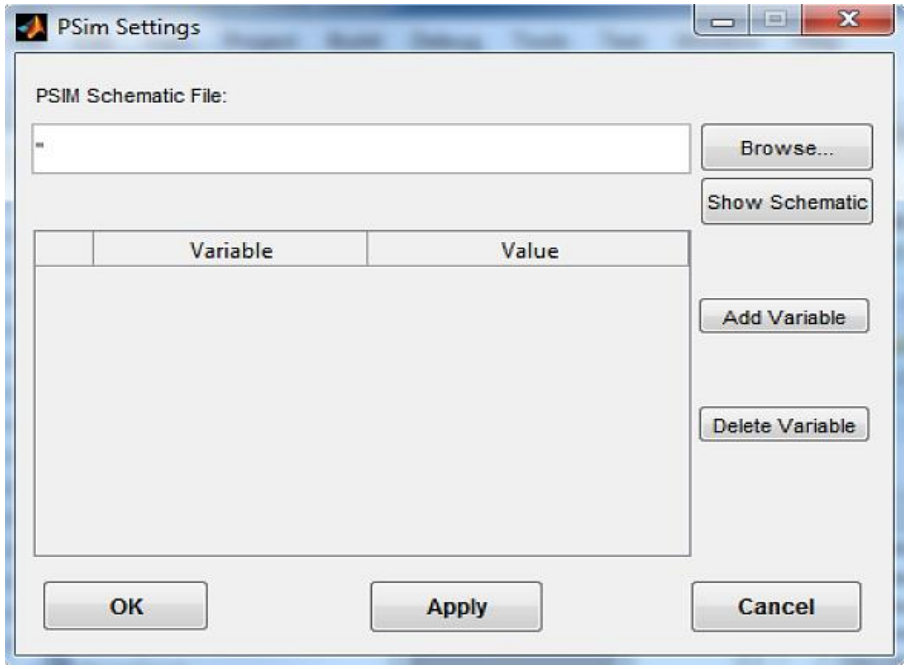
در شکل زیر بلوک SimCoupler به سیمولینک اضافه شده است.



(شکل ۱۸.۱۱): اضافه کردن بلوک SimCoupler

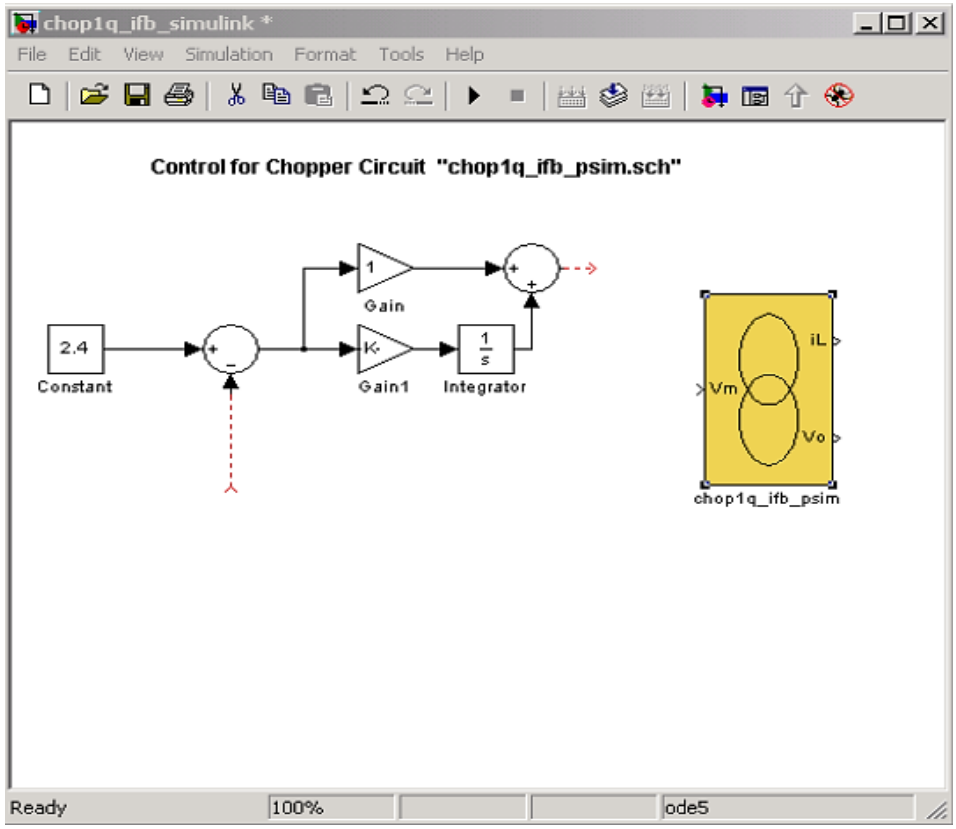
با دوبار کلیک روی بلوک SimCoupler پنجره‌ی زیر باز می‌شود.

www.powerplantac.com



(شکل ۱۹.۱۱): تنظیمات بلوک SimCoupler

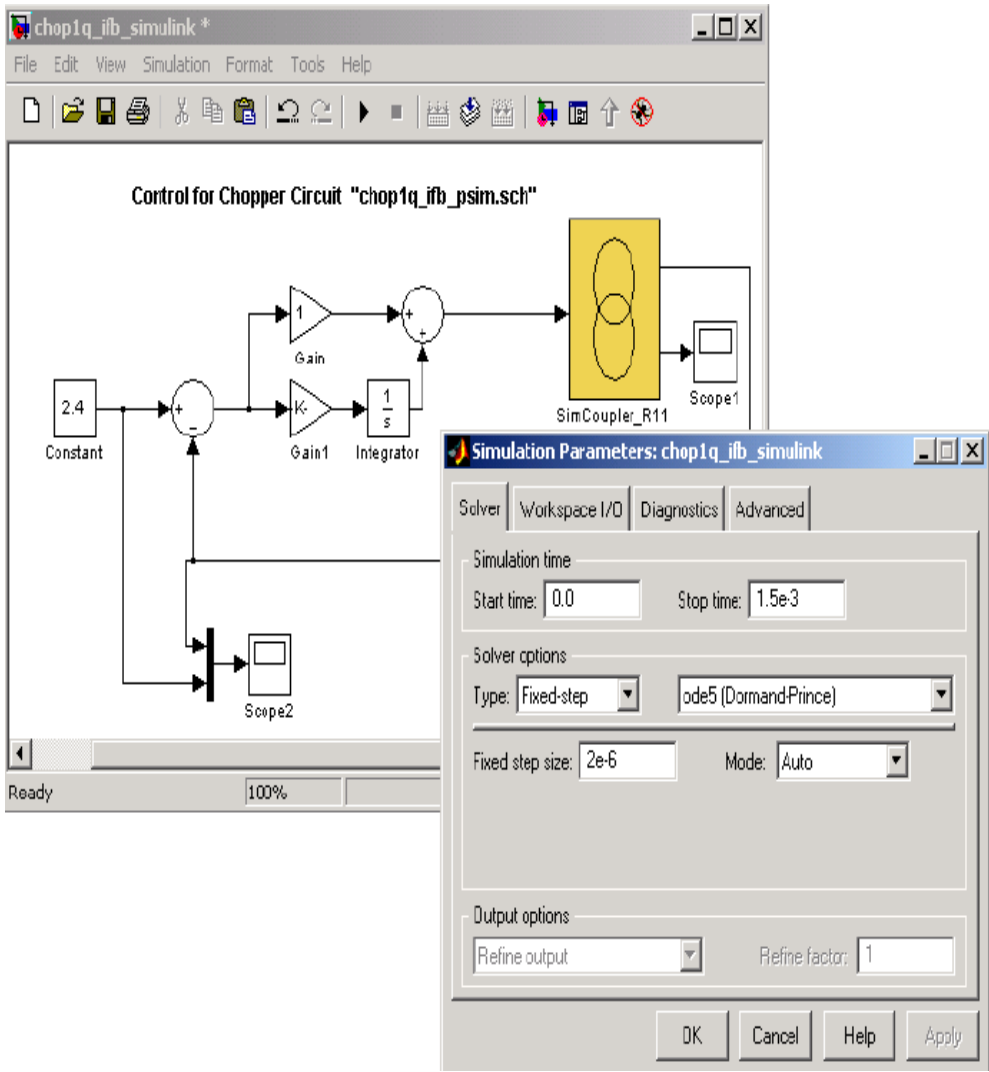
حال روی Browse کلیک کرده و فایل Average_Current_Mode_PSM.psimsch را در مسیری که ذخیره کرده‌ایم، انتخاب می‌کنیم. با کلیک روی دکمه‌ی OK پنجره‌ی فوق را می‌بندیم. با این کار شکل بلوک SimCoupler به‌گونه‌ای تغییر می‌کند تا تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها با تعداد In/Out Link Nodes در طرح PSIM برابر شوند که در اینجا 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 بعدا 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

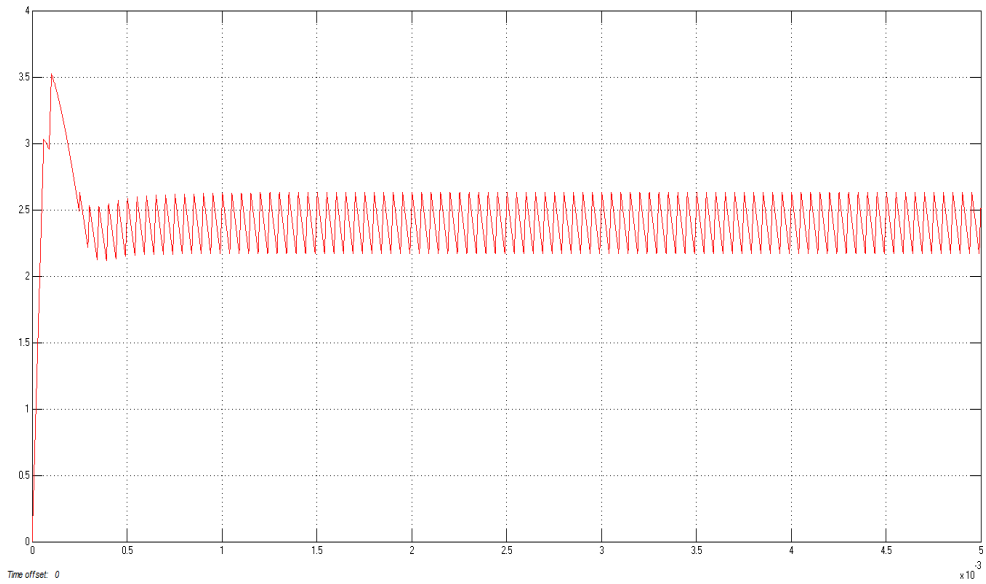
حل با گام ثابت انتخاب شود، گام‌های شبیه سازی با مقدار تنظیم شده در طرح PISIM مشابه خواهد بود. مدار سیمولینک مشابه شکل زیر خواهد شد:



(شکل ۲۱.۱۱): تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی

www.powerplantac.com

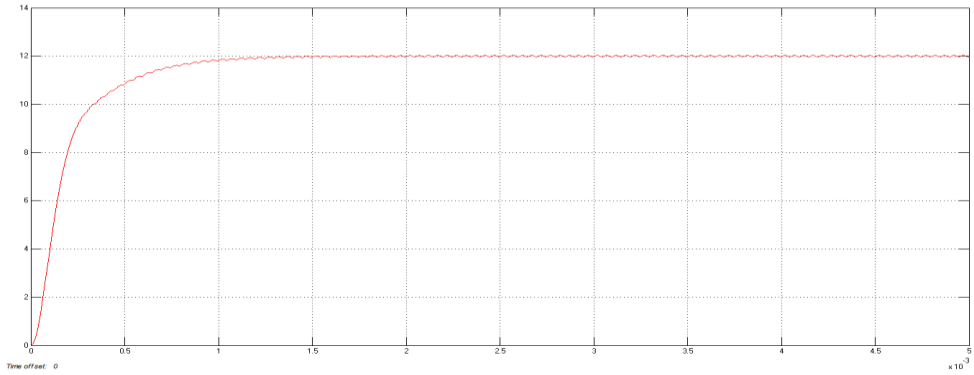
در اینجا طراحی مدار در محیط سیمولینک MATLAB نیز کامل می‌شود. حال می‌توان شبیه‌سازی را در محیط سیمولینک با رفتن به منوی Simulink و انتخاب Start انجام داد. خروجی‌های Vo و iL در سیمولینک MATLAB به صورت زیر هستند، شکل زیر خروجی iL را نمایش میدهد.



(شکل ۲۲.۱۱): iL در سیمولینک MATLAB

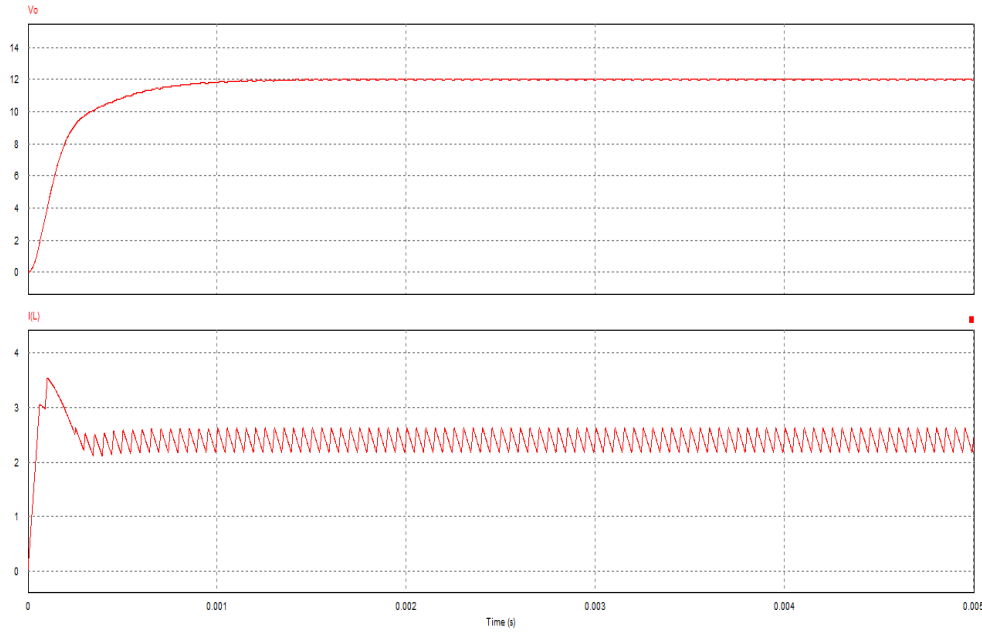
در شکل زیر نیز خروجی Vo در محیط سیمولینک شبیه‌سازی شده است.

www.powerplantac.com



(شکل ۲۳.۱۱): Vo در سیمولینک MATLAB

اشـــکال زیر همان خروجی‌ها را که در محیط PSIM شـــبیه‌ســـازی شـــده‌اند را نشـــان می‌دهد.



(شکل ۲۴.۱۱): Vo و iL در محیط psim

www.powerplantac.com

همانطور که ملاحظه می کنید، 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 شبیه سازی می شود و شبیه سازی 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.

www.powerplantac.com

www.powerplantac.com

فصل دوازدهم

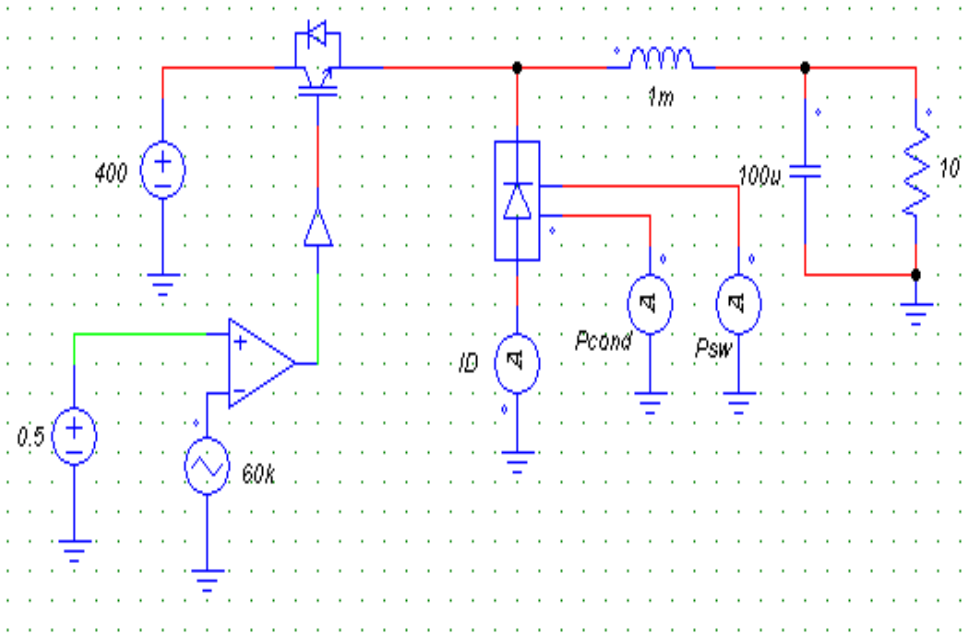
تجزیه و تحلیل حرارتی برای یک دیود

۱۲– مقدمه

در این فصل محاسبه تلفات هدایتی و کلیدزنی دیود (با مشخصه ۱۵۰EBU۰۴) در محیط نرم‌افزار PSIM توضیح داده خواهد شد.

www.powerplantac.com

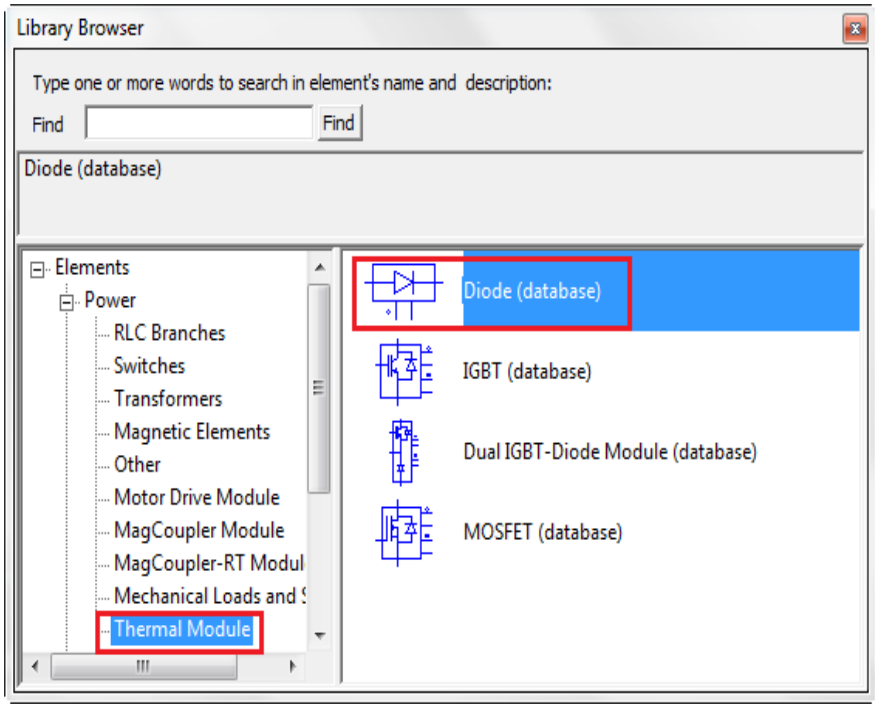
۱۲–۱– طرح مدار



(شکل ۱.۱۲): 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.



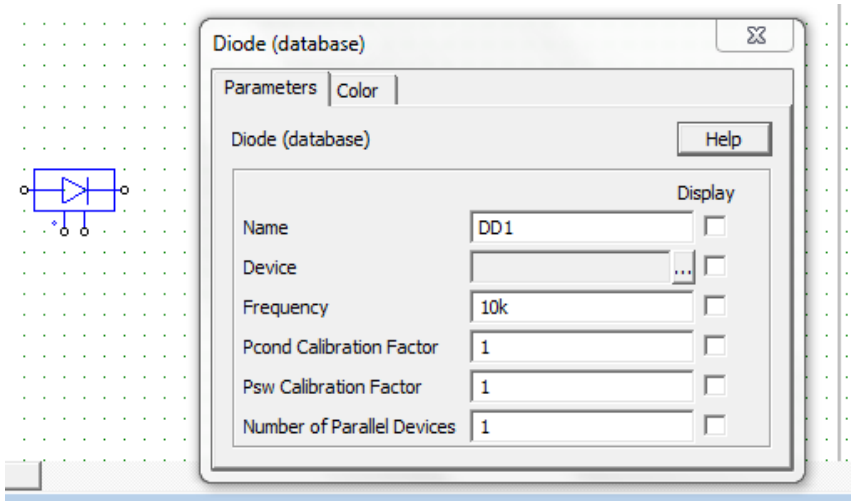
(شکل ۲.۱۲): کتابخانه نرم‌افزار

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 می شود. 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 می باشد و به صورت جریان در مدار ظاهر می‌شود. بنابراین برای

www.powerplantac.com

اندازه‌گیری تلفات باید در مسیر پایه‌ها یک آمپرمتر قرار داده و سر دیگر آمپرمتر 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 مثلا 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:

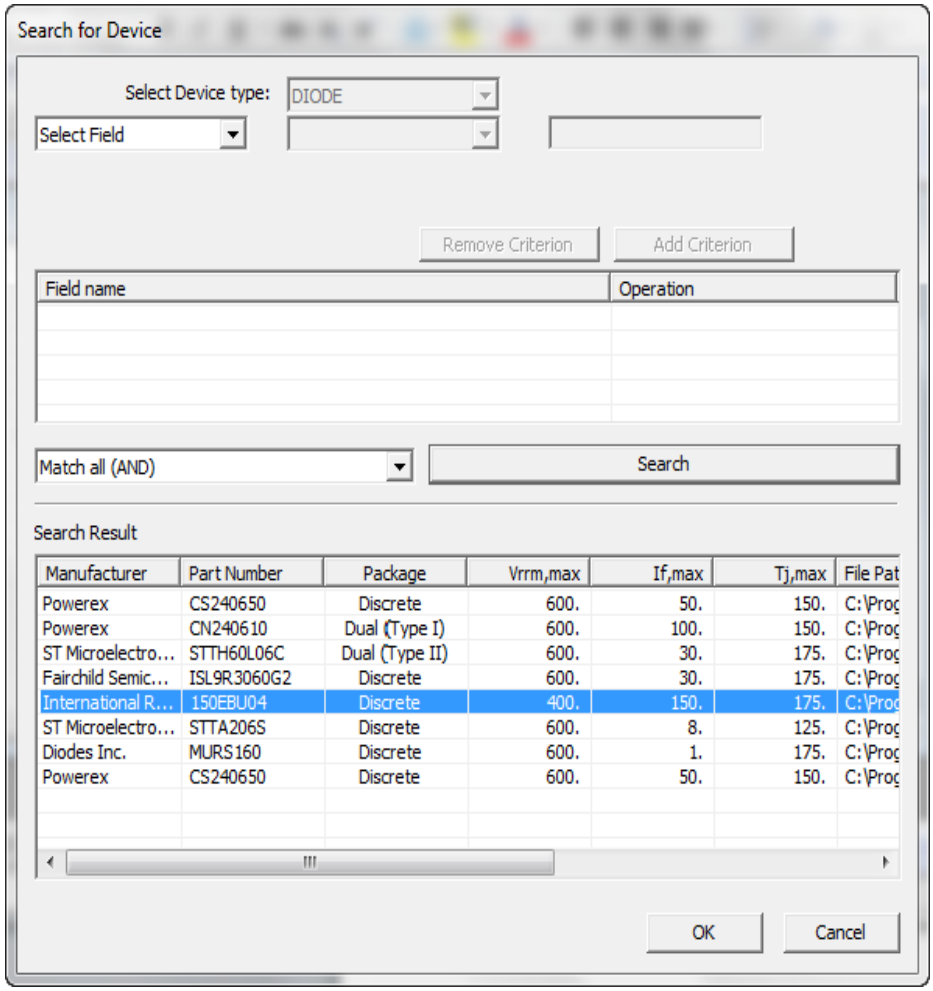
Pcond=Kcond*Pcond_cal

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:

Psw=Ksw*Psw_cal

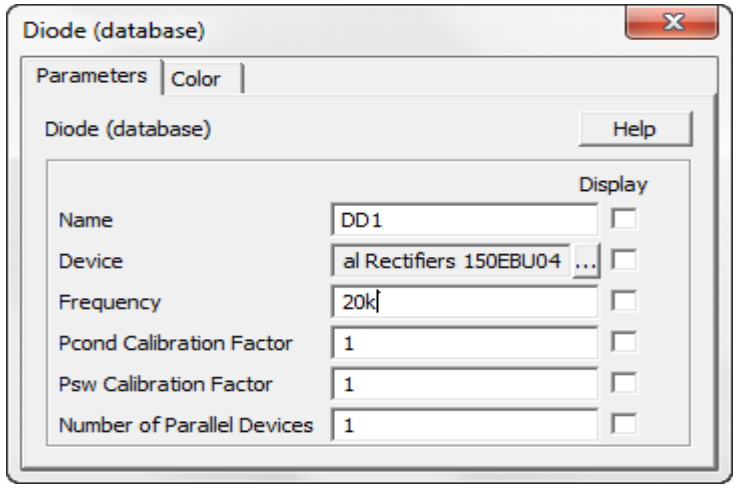
قبل از انجام شبیه سازی باید دیود مورد نظر را از دیتابیس نرم‌افزار انتخاب کنیم. برای این کار روی علامت ســه نقطه در کنار پارامتر Device کلیک می‌کنیم و پنجره‌ی زیر باز می‌شود.

www.powerplantac.com



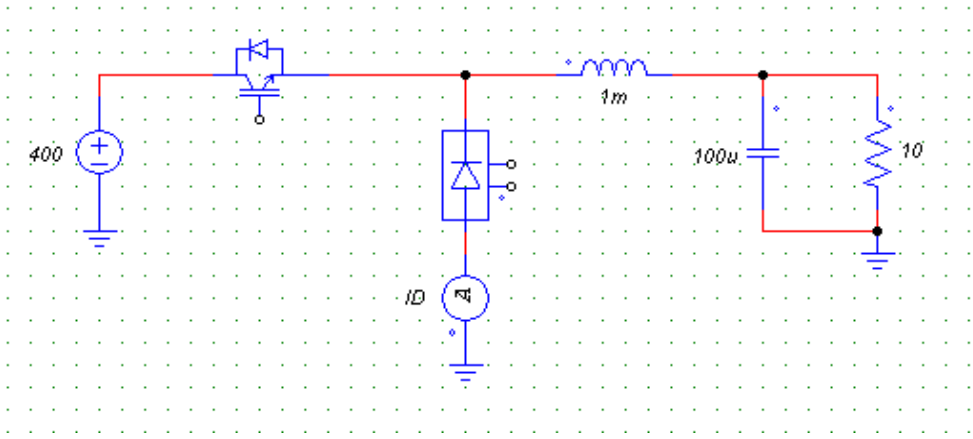
(شکل ۴.۱۲): انتخاب دیود از دیتابیس نرم‌افزار

در این پنجره دیود مورد نظر را انتخاب می‌کنیم. به عنوان مثال در این شبیه سازی از دیود ۱۵۰ EBU ۰٤ استفاده شده است. در تنظیمات دیود برای پارامتر Frequency عدد ۲۰ کیلو هرتز را وارد می‌کنیم.



(شکل ۵.۱۲): تنظیمات دیود

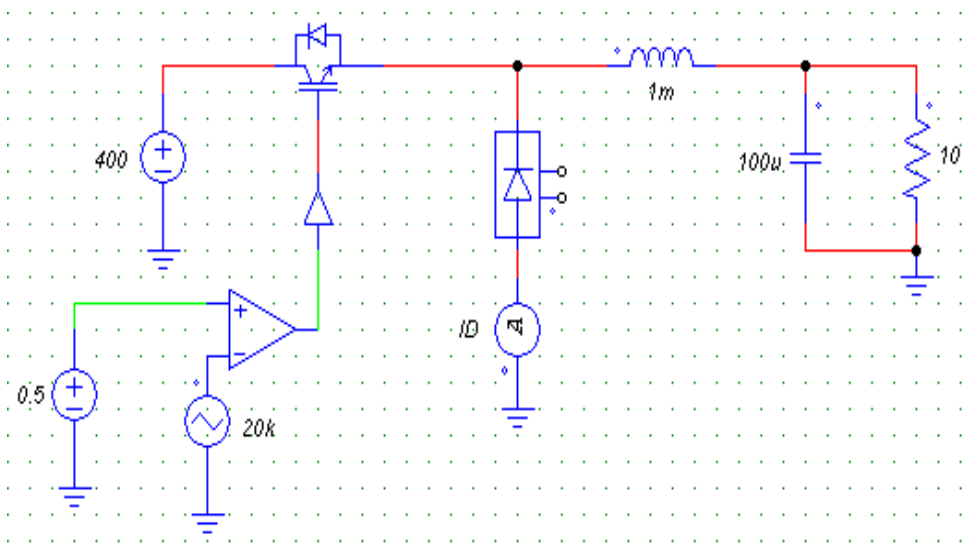
سـایر تنظیمات از قبیل ضـرایب اصـلاح را در حالت پیش‌فرض درنظر می‌گیریم. حال مدار را به‌صورت زیر تکمیل می‌نماییم.



(شکل ۶.۱۲): پیاده‌سازی مدار

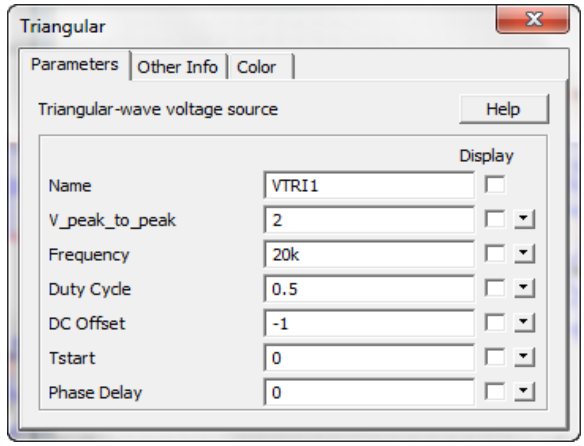
www.powerplantac.com

اندازه‌ی المان‌ها را طبق مقادیر نشـان داده‌شـده روی شـکل تنظیم می‌کنیم. حال باید مدار مربوط به سوییچ IGBT را تکمیل کنیم. برای این کار از مدار ساده‌ی زیر ا ستفاده می‌کنیم که در آن یک مقدار ثابت با سیگنال مثلثی مقایسه می‌شود تا پالس‌های مناسب برای کلید زنی تولید گردد.



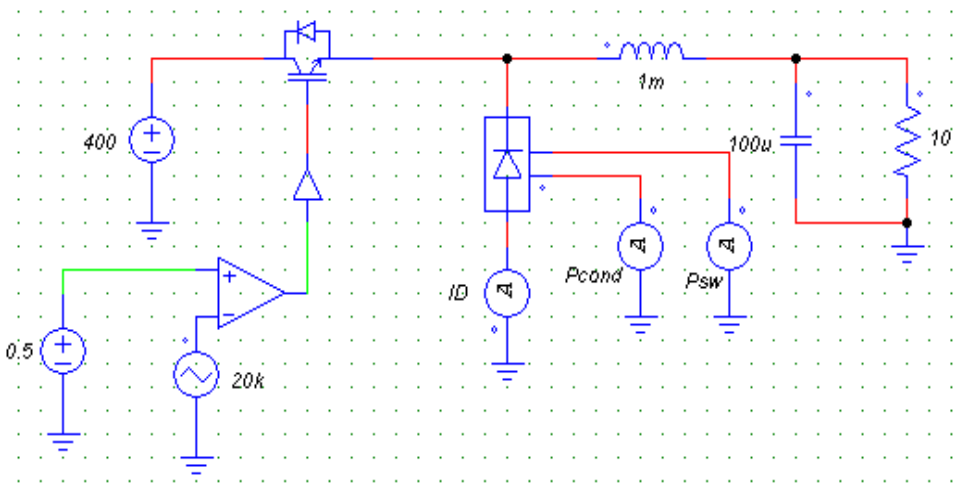
(شکل ۷.۱۲): اعمال پالس IGBT

دقت کنید که فرکانس سـیگنال مثلثی نیز در مقدار ۲۰ کیلوهرتز تنظیم شـده اسـت. سایر پارامترهای مربوط به این سیگنال نیز به‌صورت زیر است.



(شکل ۸.۱۲): تنظیم منبع مثلثی

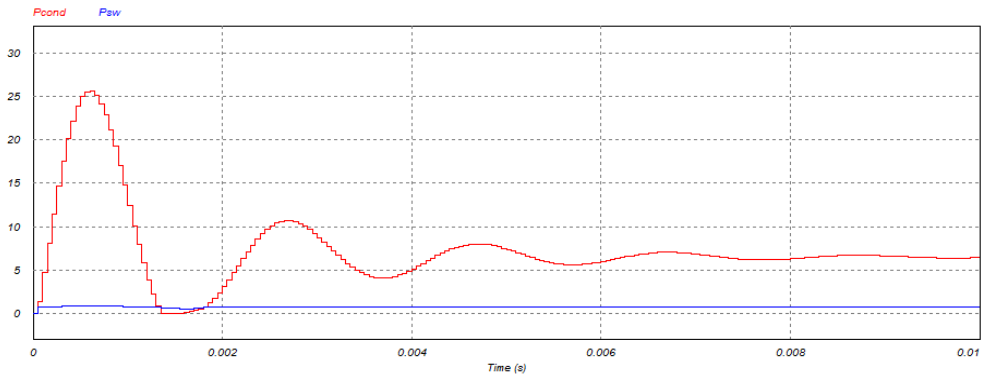
حال کافی است که در مسیر پایه‌های مربوط به تلفات دیود، یک آمپرمتر قرار دهیم تا بتوانیم تلفات محاسبه شده را رسم نماییم.



(شکل ۹.۱۲): روند تکمیل مدار

www.powerplantac.com

حال گام زمانی را در ۸e-۱ و زمان کل شـــبیه‌ســـازی را ۰/۰۱ ثانیه در Simulation Control تنظیم کرده و شبیه‌سازی را اجرا می‌کنیم. پس از اجرای شبیه‌سازی نمودارهای مربوط به Pcond و Psw را رسم میکنیم.



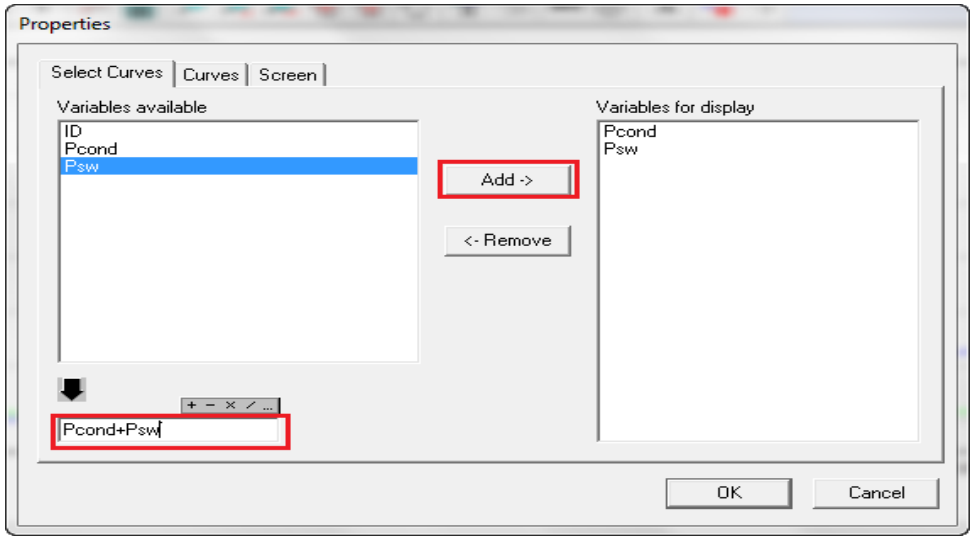
(شکل ۱۰.۱۲): Pcond و Psw

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

(شکل ۱۱.۱۲): نوار ابزار

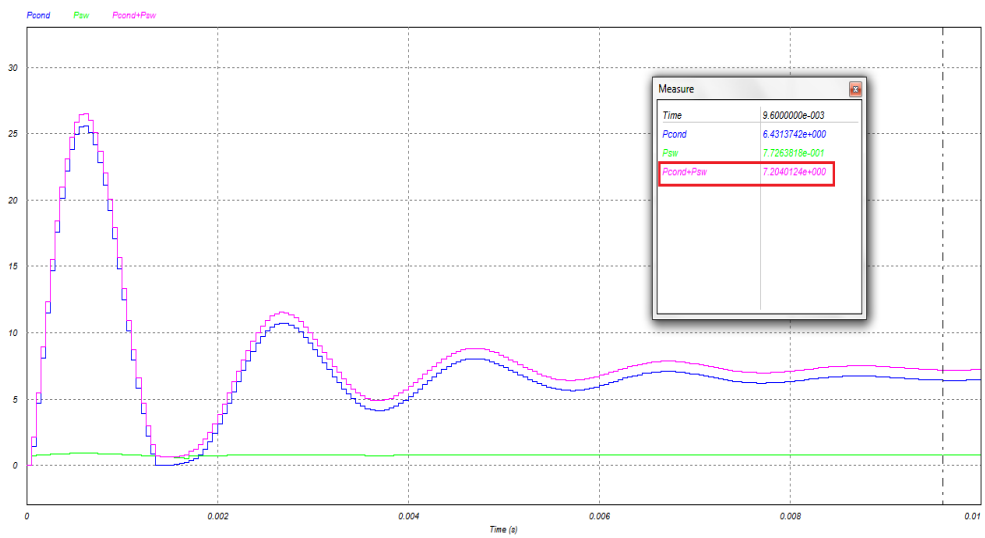
ســـپس در پنجره‌ی باز شـــده جمع دو نمودار Pcond و Psw را برای رســـم انتخاب می‌کنیم.

www.powerplantac.com



(شکل ۱۲.۱۲): تنظیمات Properties

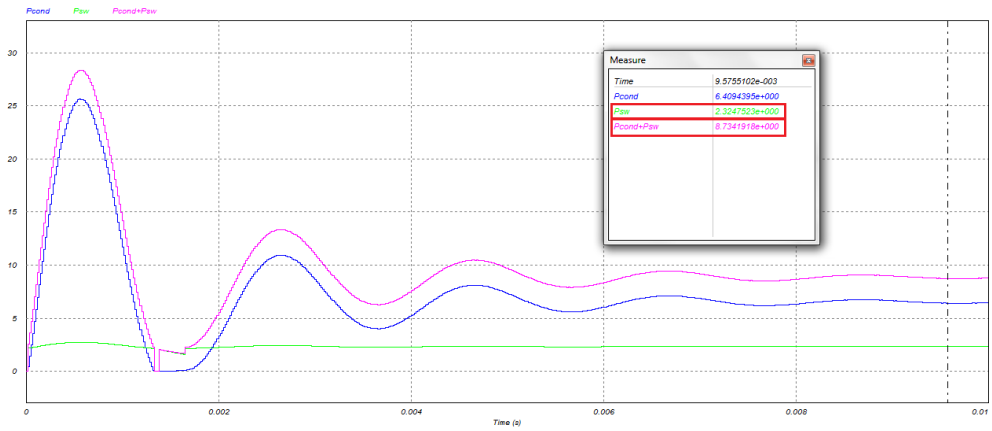
با زدن OK نمودار به‌صورت زیر رسم می‌شود.



(شکل ۱۳.۱۲): شکل موج‌های خروجی

www.powerplantac.com

همانطور که ملاحظه می‌کنید در کل تلفات در حالت پایدار برابر ۷/۲ وات اســـت. اگر فرکانس کلیدزنی یعنی فرکانس مربوط به ســـیگنال مثلثی را ۶۰ کیلوهرتز انتخاب کنیم، تلفات محاســـبه‌شـــده به‌صـــورت زیر خواهد بود. دقت کنید که حتما باید پارامتر فرکانس دیود نیز در ۶۰ 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 ۸/۷ وات رسیده است. همانطور که از نمودار مشخص است، این افزایش فقط ناشی از افزایش تلفات مربوط که کلیدزنی است و تلفات هدایتی با افزایش فرکانس کلیدزنی تقریبا تغییری نکرده است.

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

www.powerplantac.com

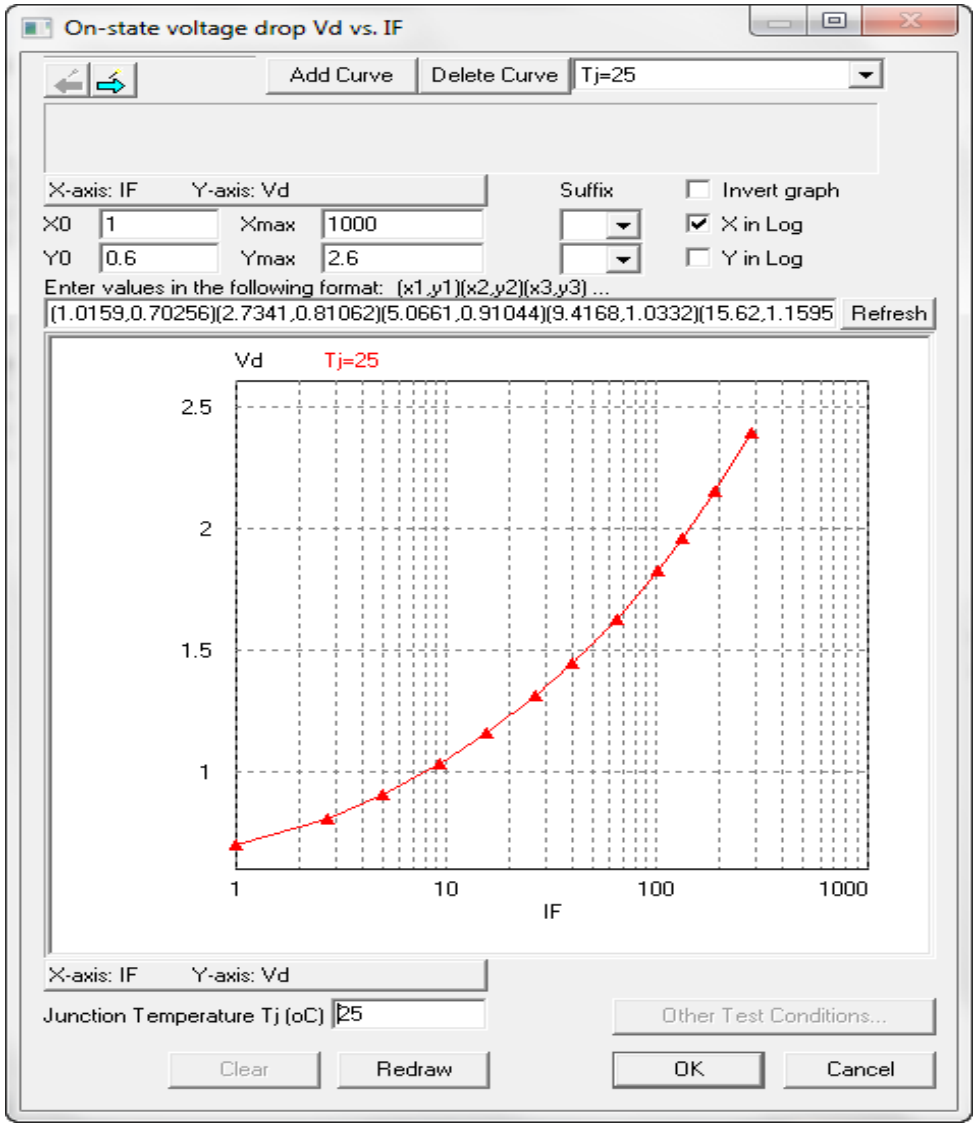
فصل سیزدهم

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

www.powerplantac.com

۱۳-۲-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[۱]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[۲] به‌دست آمده از شبیه‌سازی، نرم‌افزار PSIM به دیتابیس قطعه دسترسی یافته و تلفات هدایتی یا تلفات کلیدزنی محاسبه می‌شود.

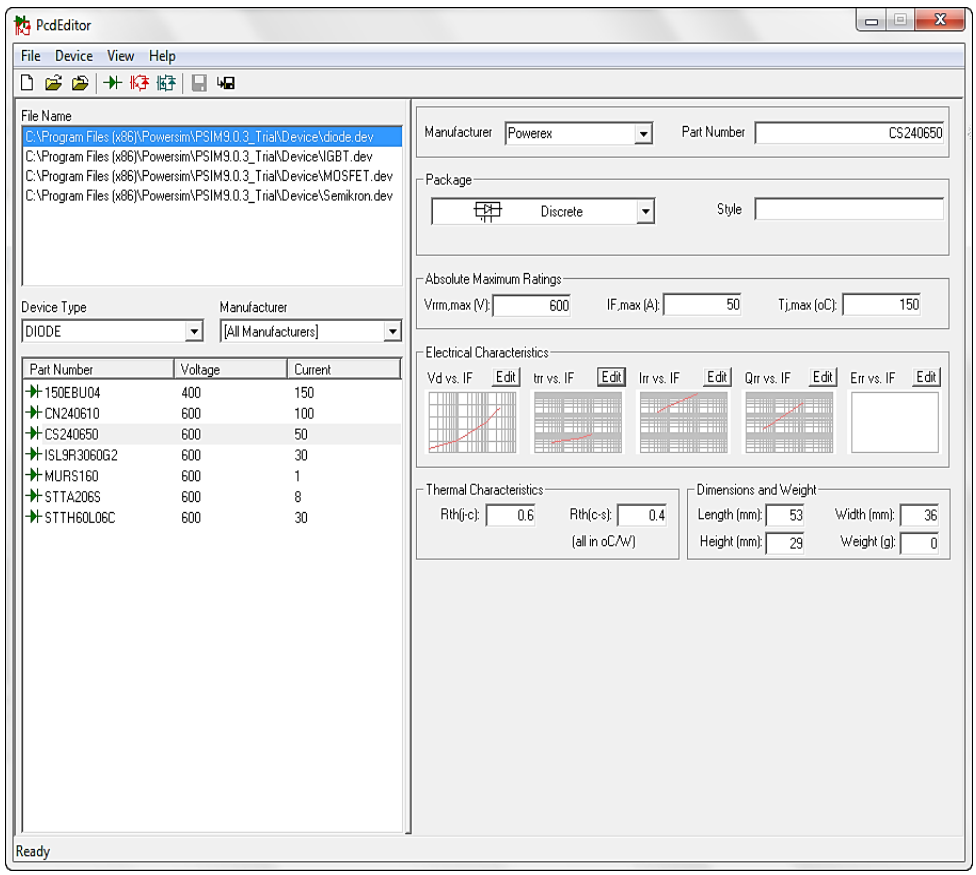
[۱] Database

[۲] Junction Temperature

www.powerplantac.com

۱۳-۳- ویرایش دیتابیس قطعات

در نرم‌افزار PSIM می‌توان قطعات جدیدی را برای تجزیه و تحلیل حرارتی اضـافه 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 شـــکل 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 گزینه‌هایNew Diod، New IGBT، New IGBT-Diod یا New MOSFET را انتخاب می‌کنیم.

۱۳-۴- افزودن یک قطعه به دیتابیس

در ادامه مراحل گام به گام اضـــافه 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 قســـمت 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 اســـتفاده از دیتاشـــیت دیود CS۲۴۰۶۵۰ اطلاعات زیر را در PcdEditor وارد میکنیم.

Manufacturer: Powerex

Part Number: CS240650

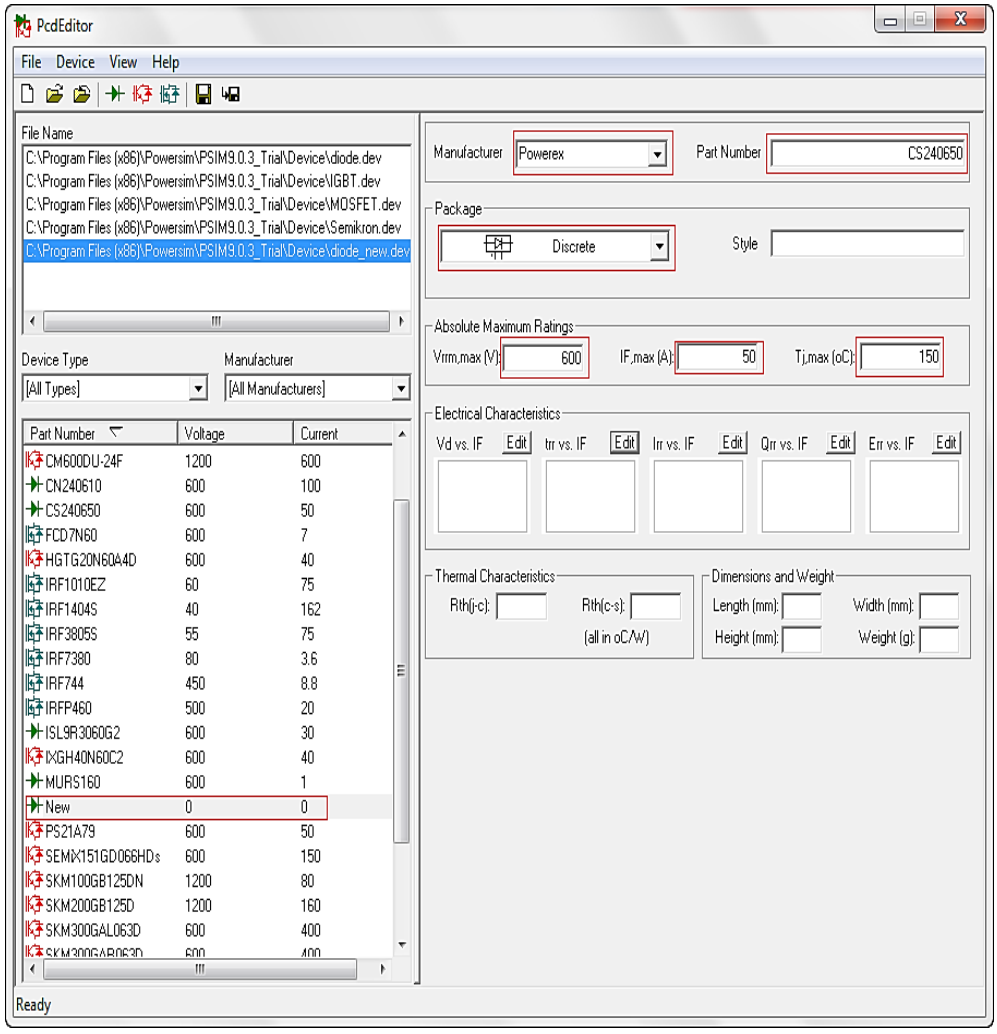
Package: Discrete

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

Vrrm,max (V): 600

IF,max (A): 50

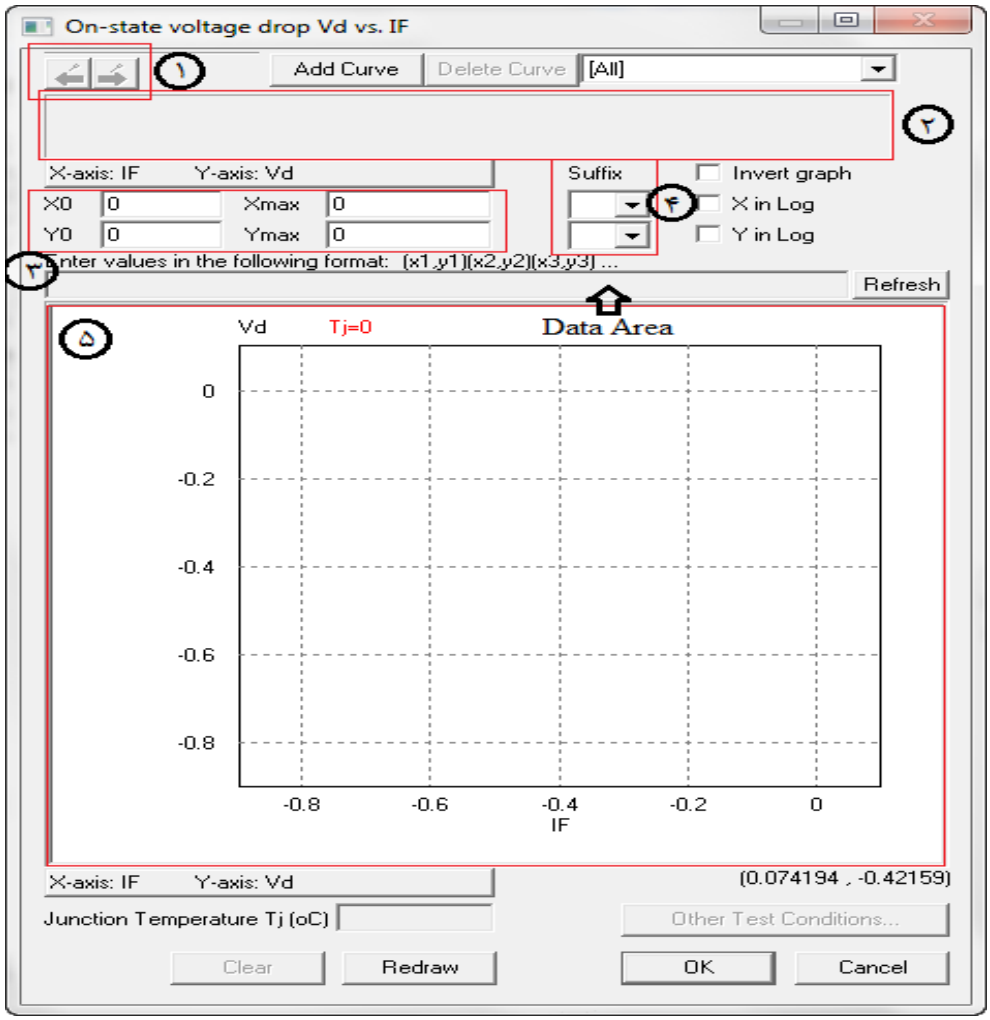
Tj,max (oC): 150



(شکل ۳.۱۳): ویرایش دیتابیس قطعات

www.powerplantac.com

حال م شخ صه‌ی ولتاژ م ستقیم (V_d) در برابر جریان (I_F) را در ق سمت م شخ صات الکتریکی با کلیک روی گزینه‌ی Edit تعریف می‌کنیم. با این کار پنجره‌ی شـــکل زیر ظاهر می‌شود.



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

www.powerplantac.com

قسمت‌های مختلف پنجره‌ی باز شده به‌صورت 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 به‌طور مستقیم از عکس دیتاشیت می‌باشد. تعریف دستی گراف معمولا زمانی صورت می‌گیرد که تعداد نقاط داده کم باشد. اگر تصویر گراف در دسترس باشد، راه ساده تر استفاده از همان تصویر برای رسم گراف است.

۱۳-۵- رسم گراف به‌صورت دستی

با توجه به حداکثر مشخصات حالت روشن دیود در دیتاشیت، مقادیر محورهای X/Y به صورت زیر تنظیم می‌شوند:

X0: 1

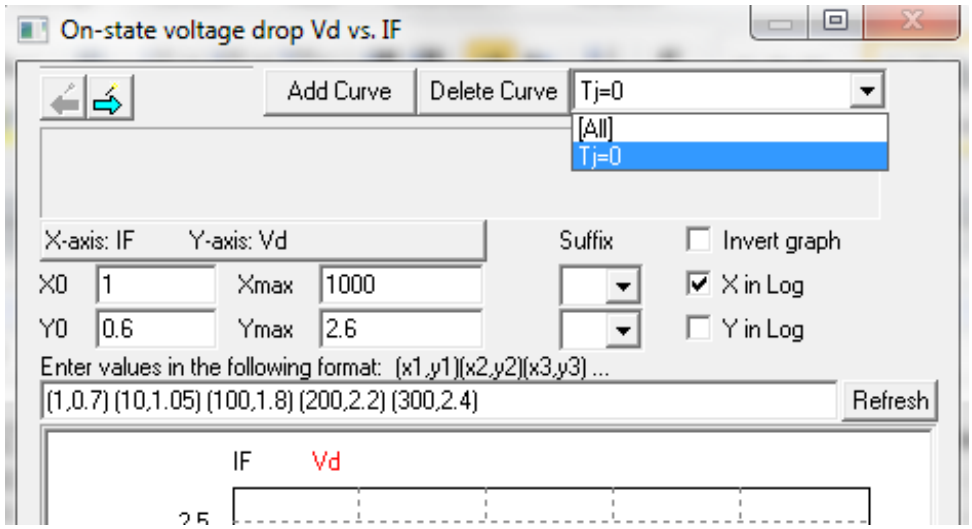
Xmax: 1000

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=۰ انتخاب شود):

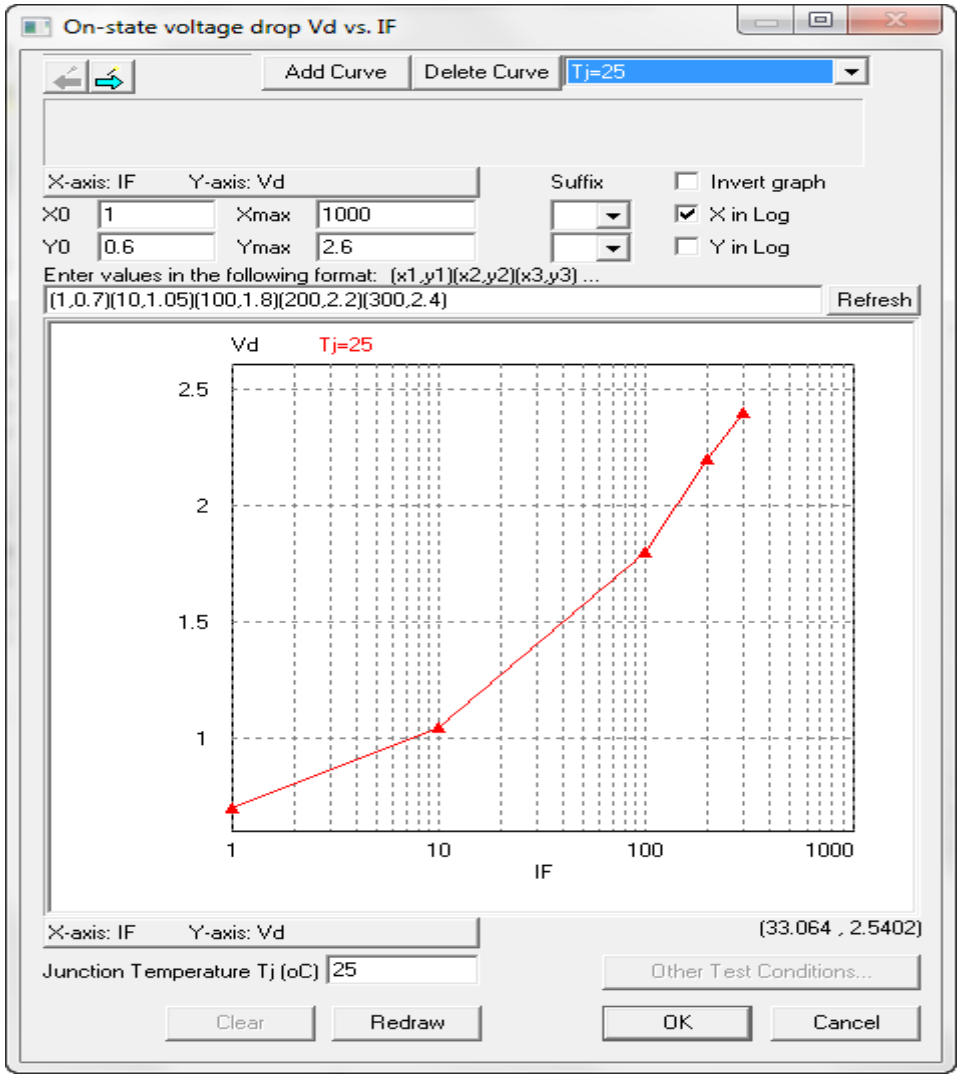


(شکل ۵.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم (V_d) در برابر جریان (I_F)

نقاط: (۳۰۰,۲,٤) (۲۰۰,۲,۲) (۱۰۰,۱,۸) (۱۰,۱,۰۵) (۱,۰,۷)

www.powerplantac.com

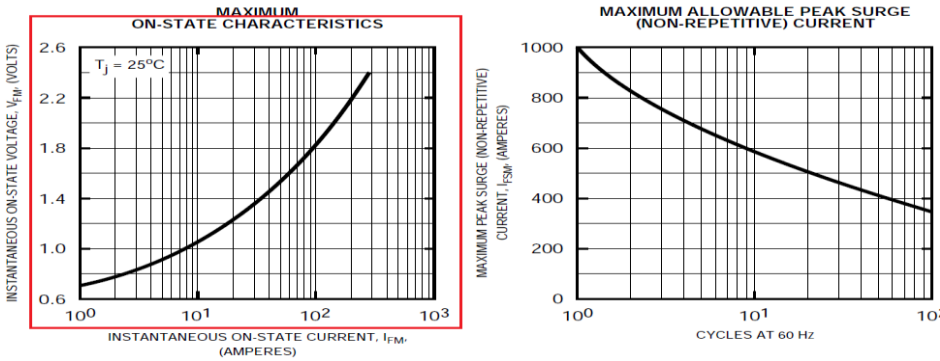
حال در قســـمت پایین Junction Temperature را در ۲۵ تنظیم کرده و با زدن روی دکمه‌ی Refresh منحنی رسم می‌شود.



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

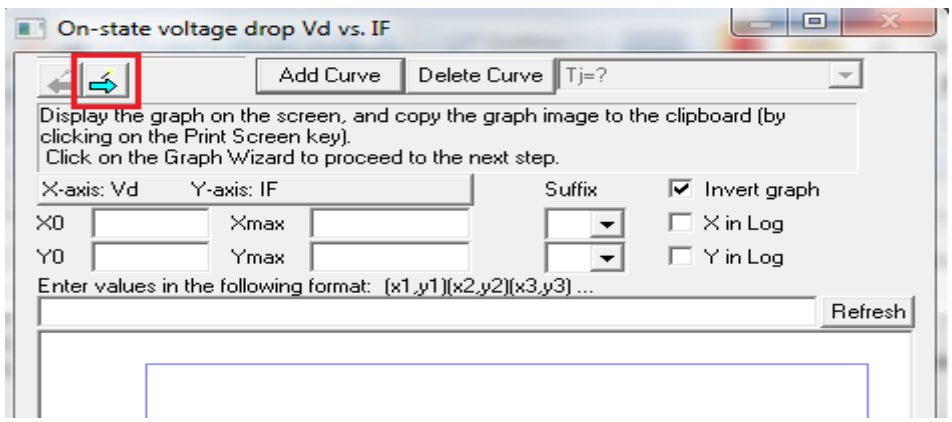
۱۳–۶– رسم گراف با استفاده از Graph Wizard

روی دکمه‌ی Add Curve کلیک می‌کنیم. سپس در دیتاشیت دیود، از منحنی مربوط به Vd در برابر IF پرینت اسکرین می گیریم.



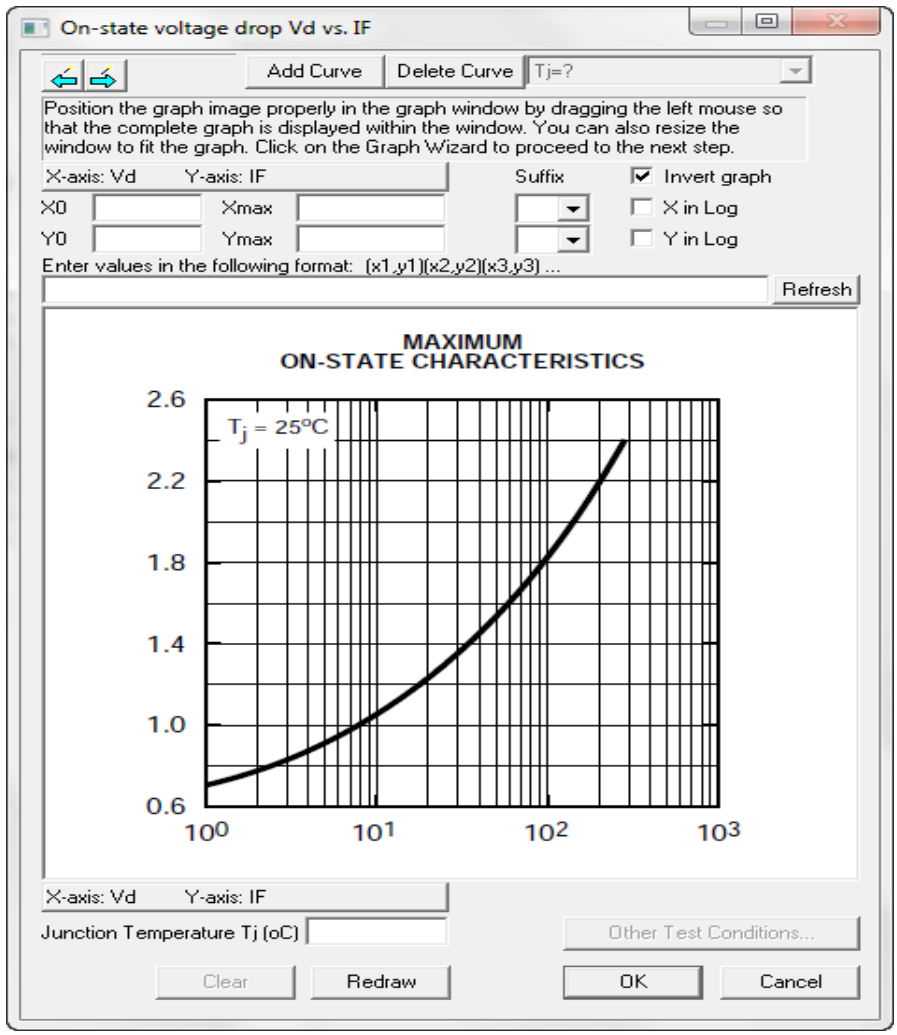
(شکل ۷.۱۳): منحنی Vd در برابر IF

حال از ابزارهای Graph Wizard دکمه‌ی Next را انتخاب می‌کنیم.



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

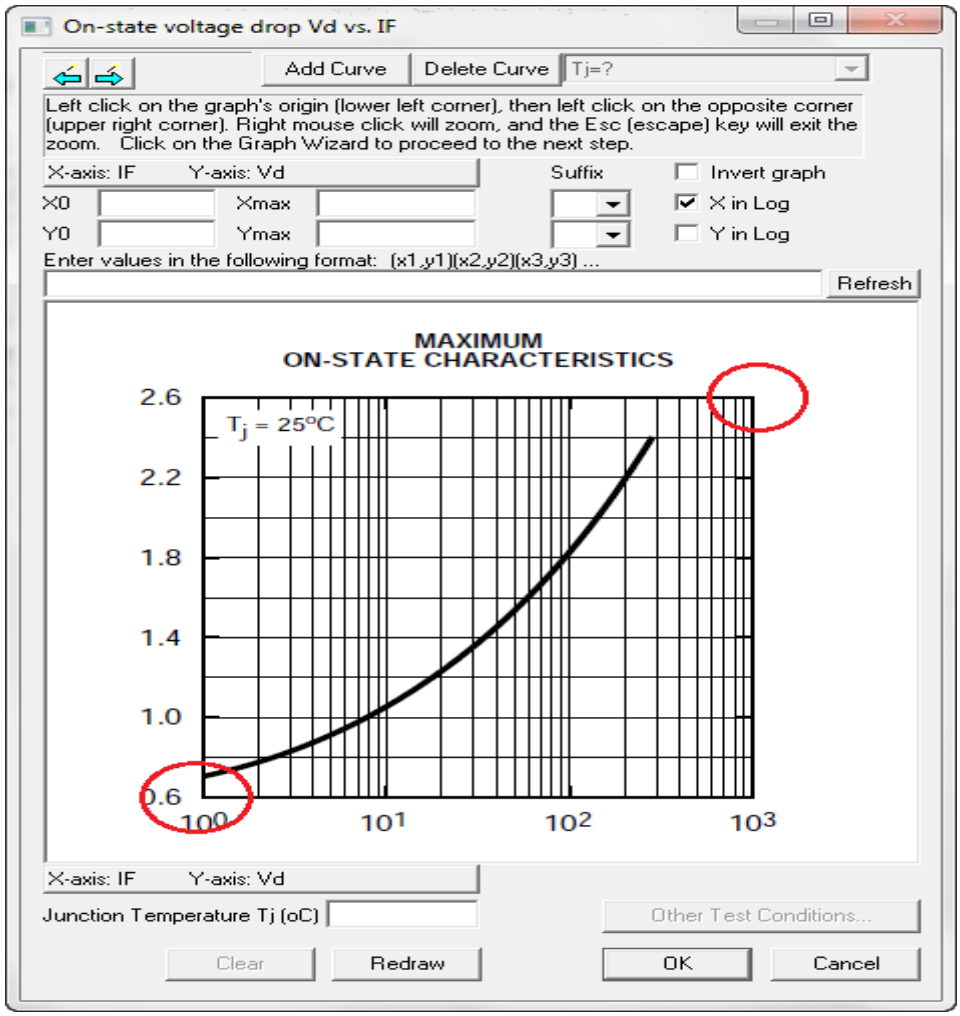
با انتخاب این دکمه، منحنی در قسمت پایین کپی می‌شود:



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

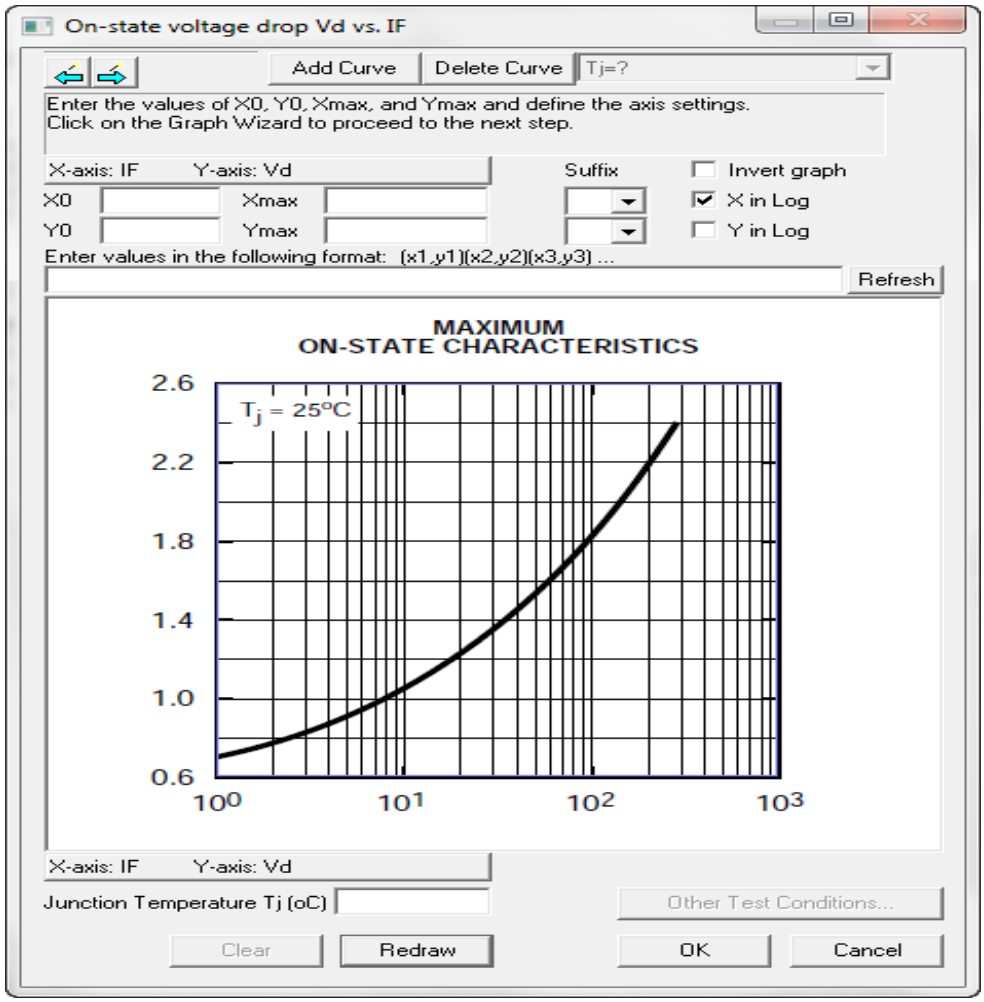
www.powerplantac.com

پس از اینکه منحنی نمایش داده شـد، 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 گوشــه‌ها ابتدا در هر گوشــه کلیک راســت را فشــار میدهیم تا گوشــه‌ی منحنی بزرگنمایی شــود ســپس با کلیک چپ موس آن گوشــه 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 به‌صورت زیر تنظیم کنیم:

X0: 1

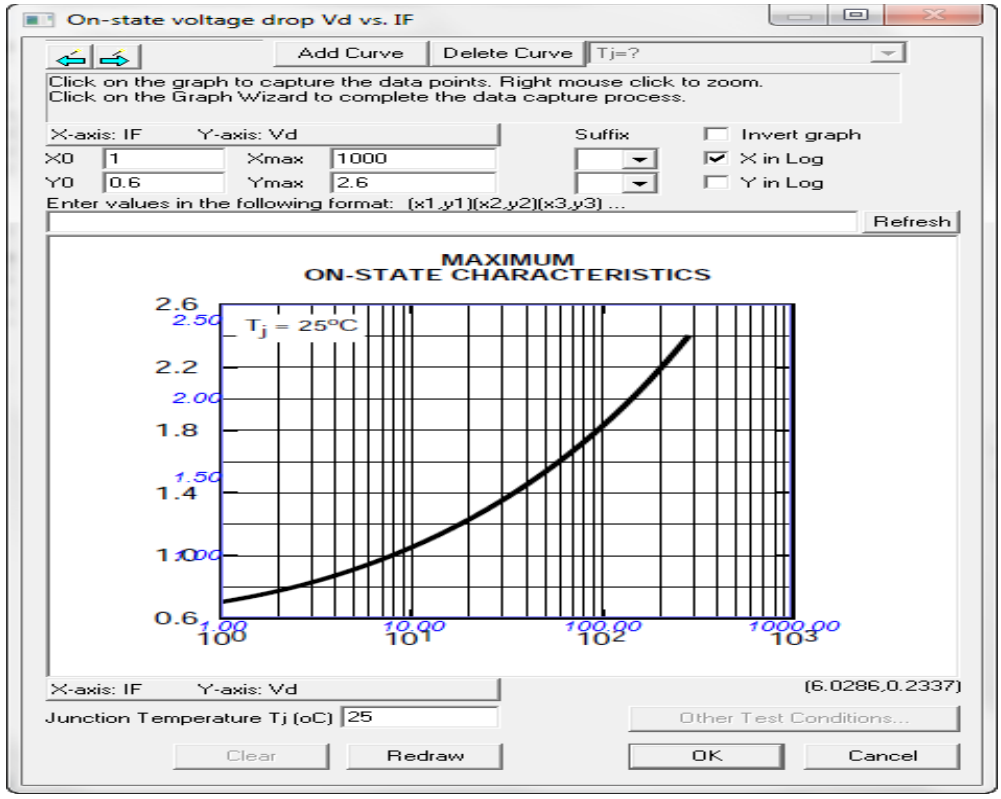
Xmax: 1000

Y0: 0.6

Ymax: 2.6

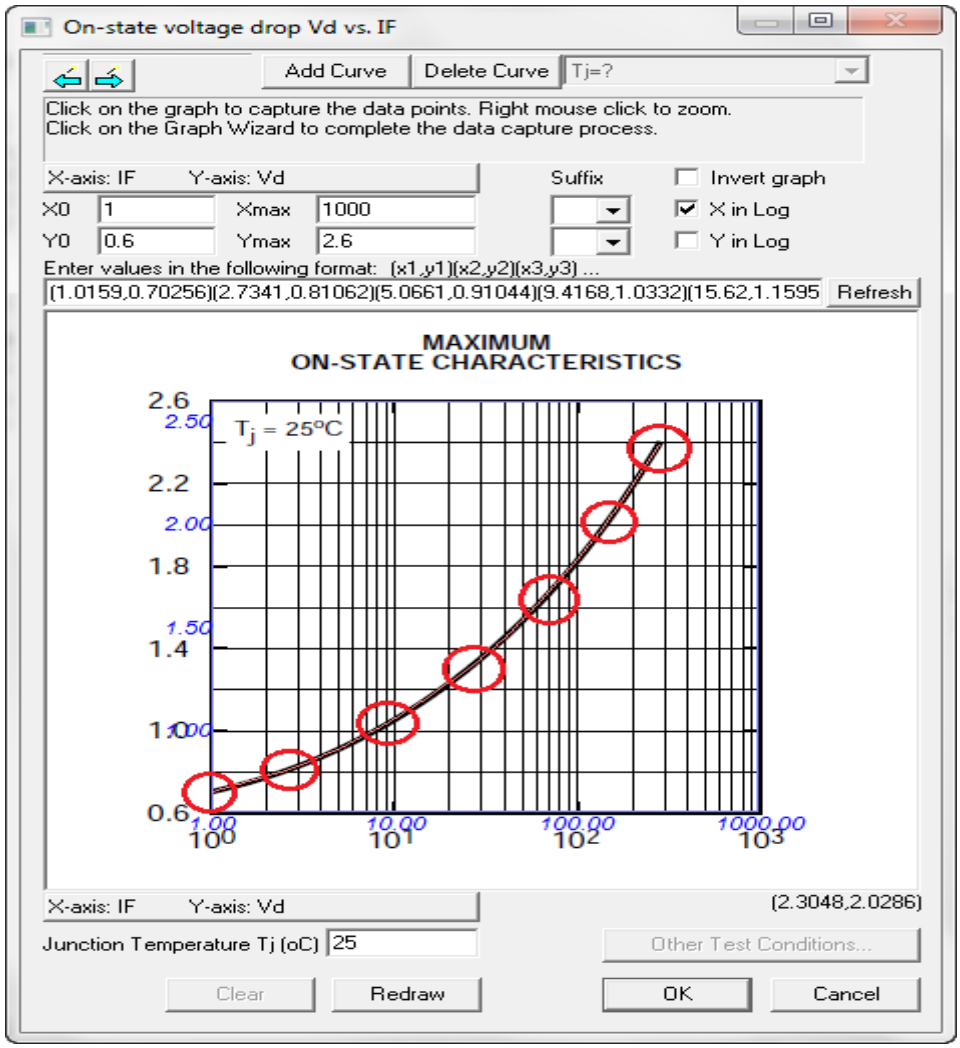
X in log: checked

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)

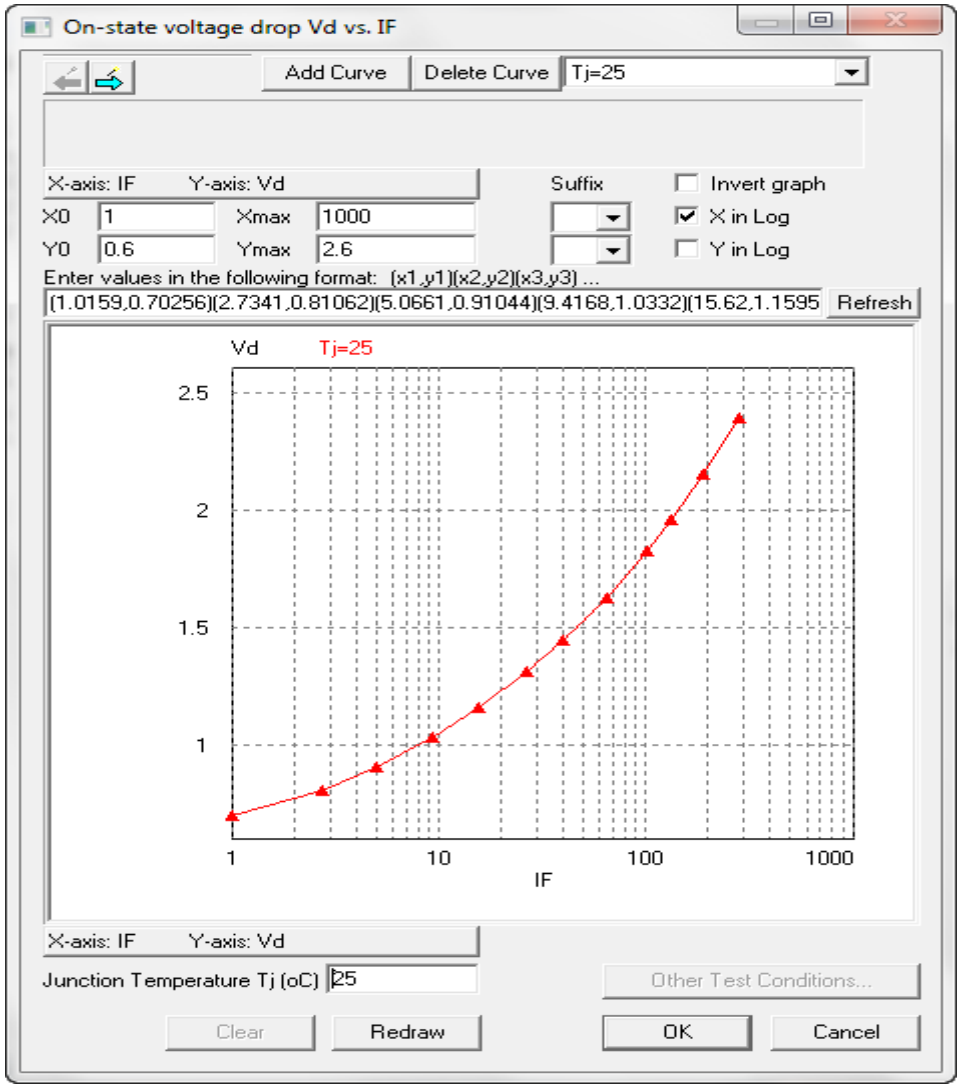
حال دوباره روی ابزار Next Step کلیک می‌کنیم. در این مرحله باید برای ر سم کامل، نقاطی را روی منحنی انتخاب کنیم. توجه داشته باشید که تعداد نقاط انتخابی محدودیتی ندارد.



(شکل ۱۳.۱۳): تنظیمات مشخصه‌ی ولتاژ مستقیم (V_d) در برابر جریان (I_F)

www.powerplantac.com

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



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

اگر برای دماهای مختلف، منحنی‌های مختلفی وجود داشـــته باشـــد؛ 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_{rr}-I_F، I_{rr}-I_F و Q_{rr}-I_f را نیز رسم کرد.

حال در قسـمت Thermal Characteristics مقادیر را با توجه به دیتاشـیت به‌صـورت زیر وارد می‌کنیم:

Rth(j-c): 0.6

Rth(c-s): 0.4

مقادیر مربوط به وزن و ابعاد نیز به‌صورت 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 فصـــل فرا گرفتیم که چگونه اطلاعات مربوط به یک دیود را با اســـتفاده از دیتاشیت مربوط به آن جهت تجزیه و تحلیل حرارتی در دیتابیس نرم‌افزار ذخیره کنیم.

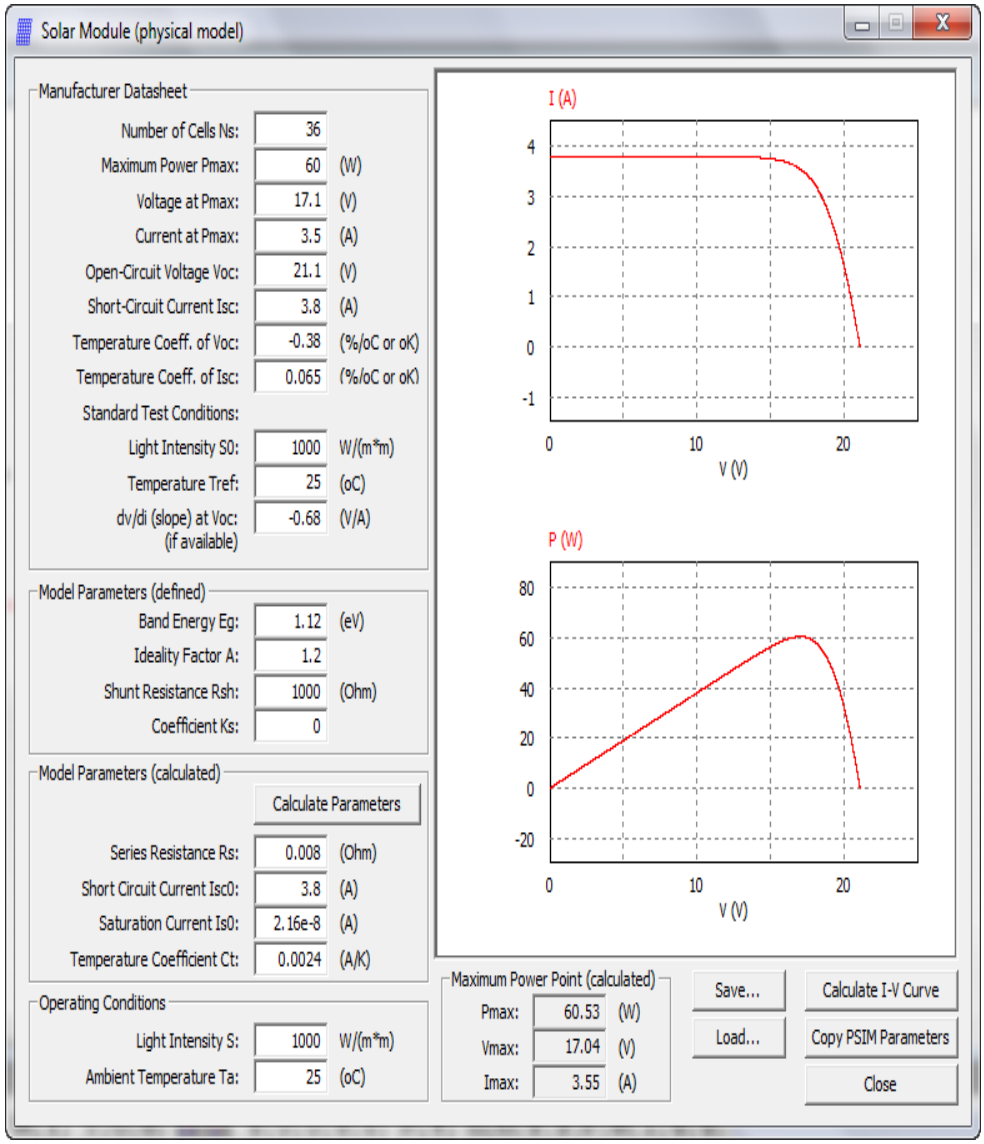
فصل چهاردهم

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.

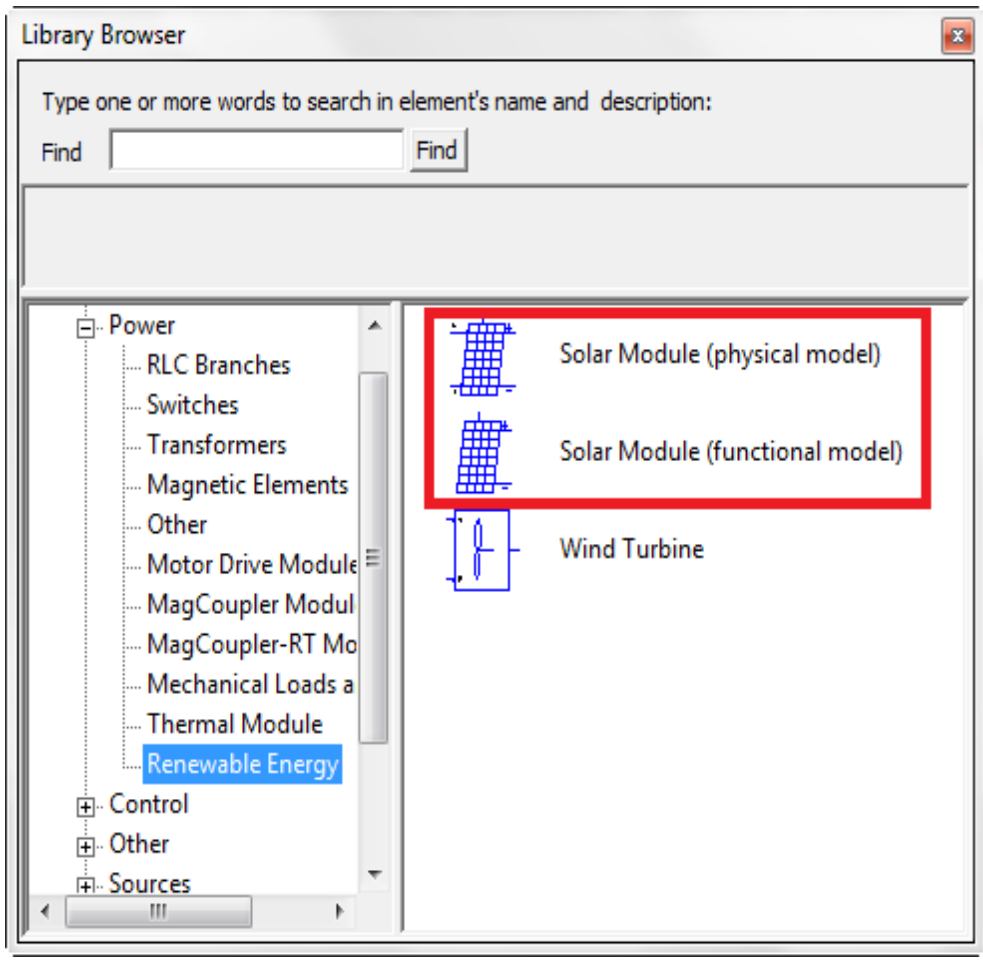
۱۴-۱- طرح مدار



(شکل ۱.۱۴): تنظیمات Solar Module

۱۴-۲- اجرای شبیه‌سازی

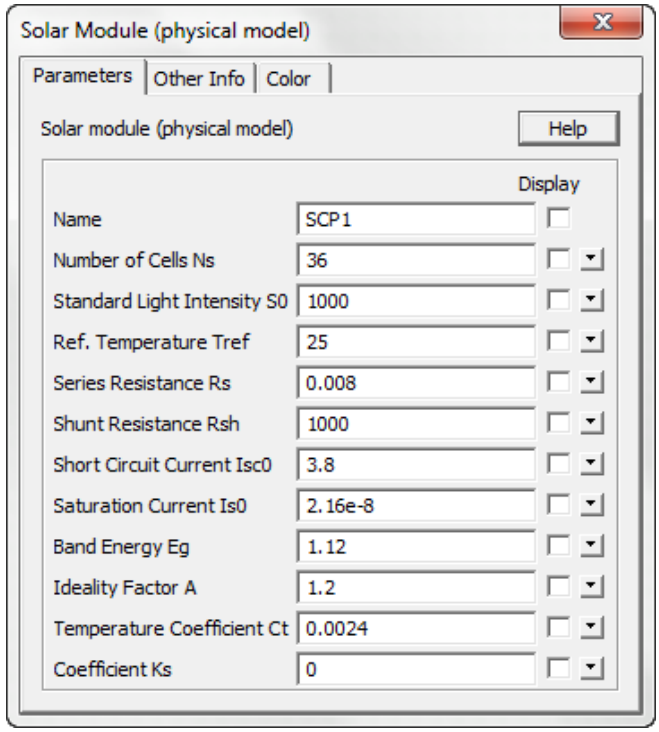
در نرم‌افزار PSIM دو نوع مدل برای سلول‌های خورشیدی فراهم شده است: مدل فیزیکی و مدل کاربردی.



(شکل ۲.۱۴): کتابخانه نرم‌افزار

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

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



(شکل ۳.۱۴): تنظیمات سلول خورشیدی، مدل فیزیکی

www.powerplantac.com

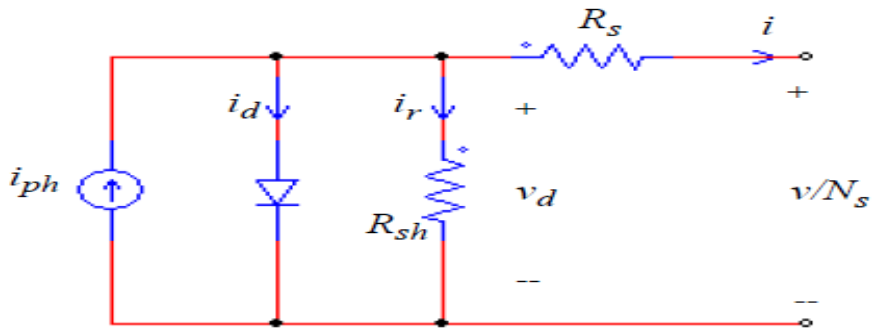
Number of Cells Ns: تعداد سلول‌های خورشیدی که به‌صورت سری هستند.
Standard Light Intensity S۰: شدت تابش تحت شرایط تست استاندارد بر حسب W/m^2 که معمولا این مقدار در دیتاشیت برابر ۱۰۰۰ W/m^2 است.
Ref. Temperature Tref: دمای T_{ref} تحت شرایط تست استاندارد بر حسب °C.
Series Resistance Rs: مقاومت سری هر سلول خورشیدی بر حسب اهم.
Shunt Resistance Rsh: مقاومت شنت (موازی) هر سلول خور شیدی بر حسب اهم.
Short Circuit Current Isc۰: جریان اتصال کوتاه هر سلول خور شیدی در دمای مرجع T_{ref} بر حسب آمپر.
Saturation Current Is۰: جریان اشباع دیود هر سلول خورشیدی در دمای مرجع T_{ref} بر حسب آمپر.
Band Energy Eg: انرژی باند هر سلول خورشیدی بر حسب الکترون-ولت (eV)؛ که این مقدار برای سیلیکون کریستالی حدود ۱/۱۲ و برای سیلیکون غیر بلوری حدود ۱/۷۵ الکترون-ولت است.

www.powerplantac.com

Ideality Factor A: ضریب ایده‌آلی هر سلول خورشیدی که ضریب تابش[۳] نیز نامیده می‌شود. مقدار آن برای سیلیکون بلوری حدود ۲ و برای سیلیکون غیر بلوری کم‌تر از ۲ است.
Temperature Coefficient Ct: ضریب دمایی C_t بر حسب A/°C یا A/K.
Coefficient Ks: 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 به‌صورت سری است.

مدار معادل مدل فیزیکی یک سلول خورشیدی در شکل زیر نشان داده شده است.

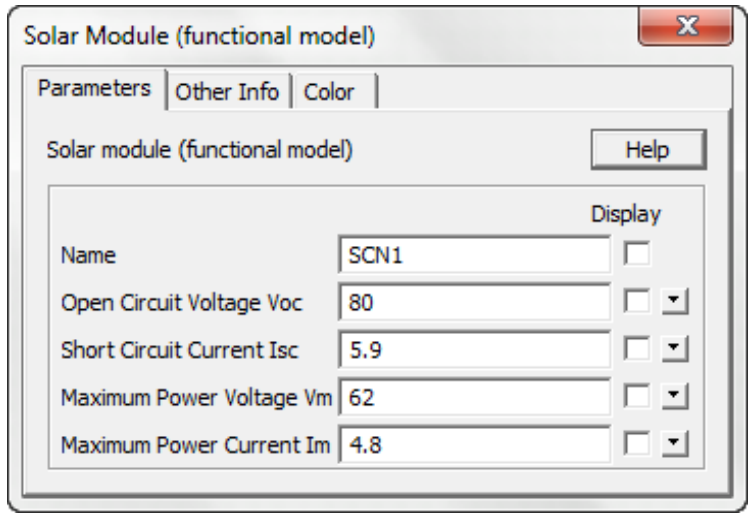


(شکل ۴.۱۴): مدار معادل مدل فیزیکی سلول خورشیدی

[۳] Emission coefficient

www.powerplantac.com

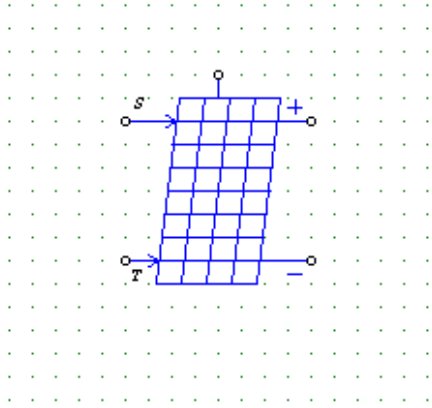
حال به معرفی پارامترهای مدل کاربردی می‌پردازیم.



(شکل ۵.۱۴): تنظیمات مدل خورشیدی

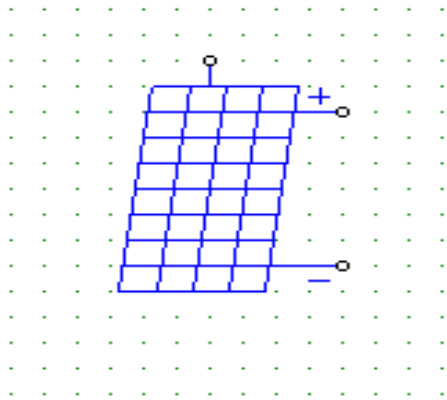
Open Circuit Voltage Voc: ولتاژ اندازه‌گیری شـــده بر حســـب ولت وقتی که ترمینال‌های سلول خورشیدی مدار باز هستند.
Short Circuit Current Isc: جریان اندازه‌گیری شـــده بر حســـب آمپر وقتی که ترمینال‌های سلول خورشیدی انصال کوتاه هستند.
Maximum Power Voltage Vm: ولتاژ ترمینال سلول خور شیدی بر ح سب ولت وقتی که توان خروجی حداکثر است.
Maximum Power Current Im: جریان ترمینال سلول خور شیدی بر ح سب 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 مربط به ترمینال‌های مثبت و منفی گره‌های مربوط به مدار قدرت و سایر گره‌ها همگی گره‌های کنترلی هستند.



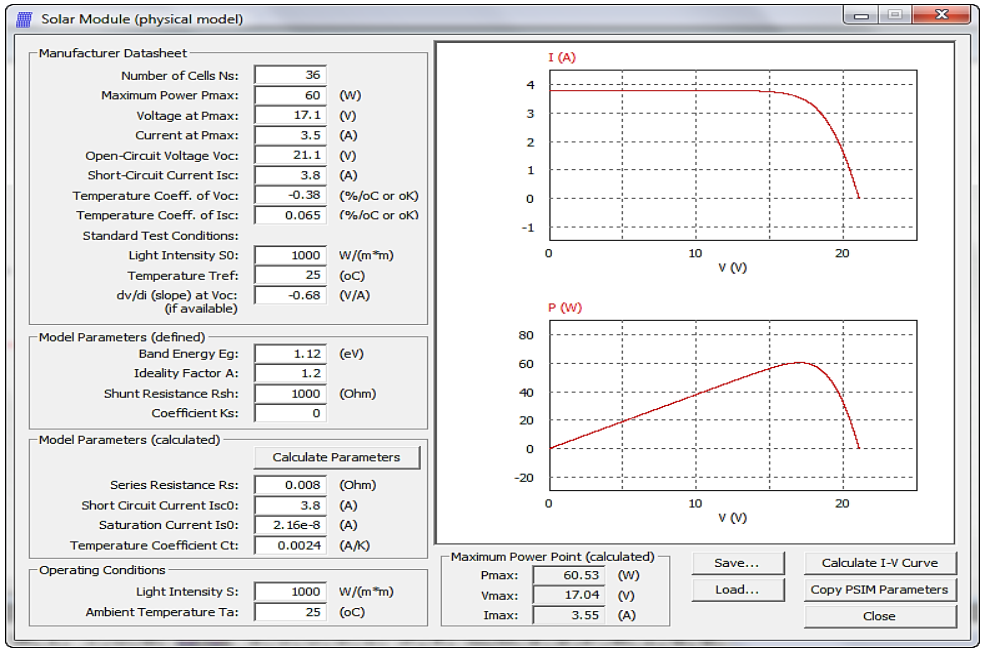
(شکل ۶.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

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 شـــده اســـت، هرچند که این مدل نیازمند پارامترهای ورودی بیشتری است. بعضی از این پارامترها را می‌توان از دیتاشیت‌ها به دست آورد در حالی که برای به‌دســـت آوردن مابقی پارامترها نیاز به آزمون و خطاســـت. در نرم افزار PSIM یک ابزار کابردی به نام Solar Module (physical model) در منوی Utility تعبیه شـــده اســـت که بوســـیله‌ی آن می‌توان با روش ســـاده‌تری پارامترهای یک ســـلول خورشـــیدی مشخص را تعریف کرد. در ادامه با این ابزار بیشتر آشنا خواهیم شد.



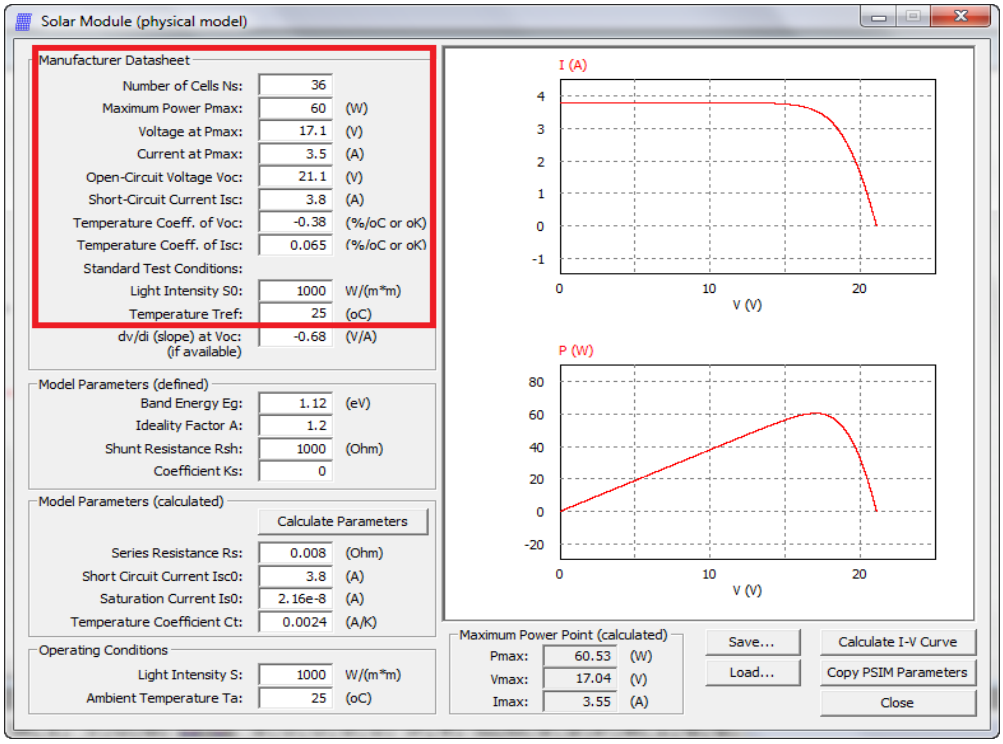
(شکل ۸.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

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
- ✓ به‌دست 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 مستقیما از روی دیتاشیت به‌دست 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[1]

	MSX-64	MSX-60
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±10)mV/°C	
Temperature coefficient of short-circuit current	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of power	−(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[2]	47±2°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 kW/m^2 (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;
- cell temperature of 25°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.

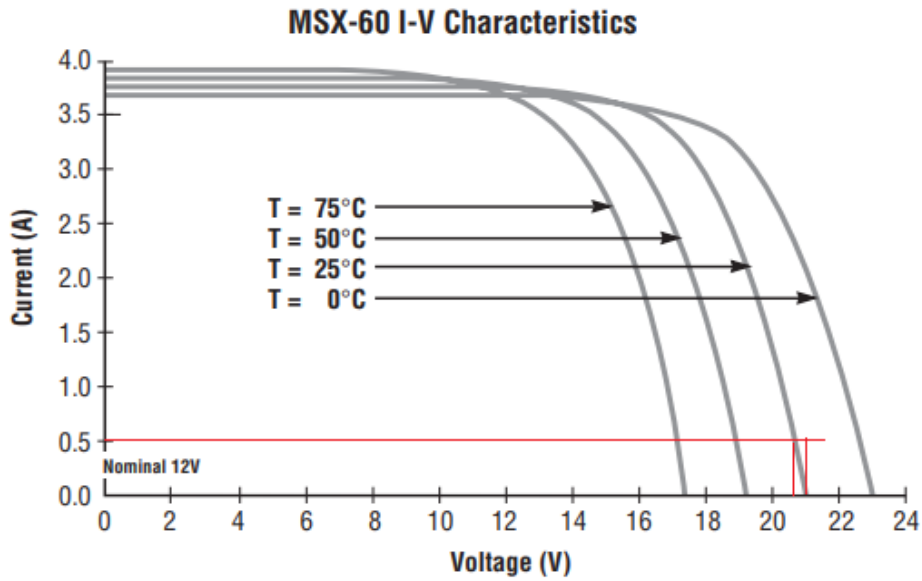
(2) Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m^2, and wind speed of 1 m/s.

(شکل ۱۰.۱۴): اطلاعات دیتاشیت

دقت کنید که در دیتا شیت ضریب دمای ولتاژ مدار باز با واحد mV/°C بیان شده است که باید به %/°C به صورت زیر تبدیل شود:

$$-۸۰\frac{mV}{°C} = -۸۰\frac{۱۰^{-۳}V}{V_{oc} \times °C} \times ۱۰۰ = -\frac{۸}{۲۱.۱}\frac{\%}{°C} = -۰.۳۸\frac{\%}{°C}$$

مقدار dv/di (slope) at 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 Eg، A، Rsh و Ks

معمولا این چهار پارامتر در دیتاشـــیت وجود ندارند و آن‌ها را باید پیش‌بینی کرد. یک حدس اولیه‌ی خوب برای Eg حدود ۱/۱۲ الکترون - ولت برای ســـیلیکون بلوری و حدود ۲ الکترون - ولت برای سیلیکون غیر بلوری است. یک حدس اولیه‌ی خوب برای A حدود ۲ برای ســـیلیکون بلوری و کم‌تر از ۲ برای ســـیلیکون غیربلوری اســـت؛ و هم‌چنین یک حدس اولیه‌ی خوب برای مقاومت موازی چندین هزار اهم است. Ks را در صورت نامعلوم بودن می‌توان در صفر تنظیم کرد.

در این مثال داریم:

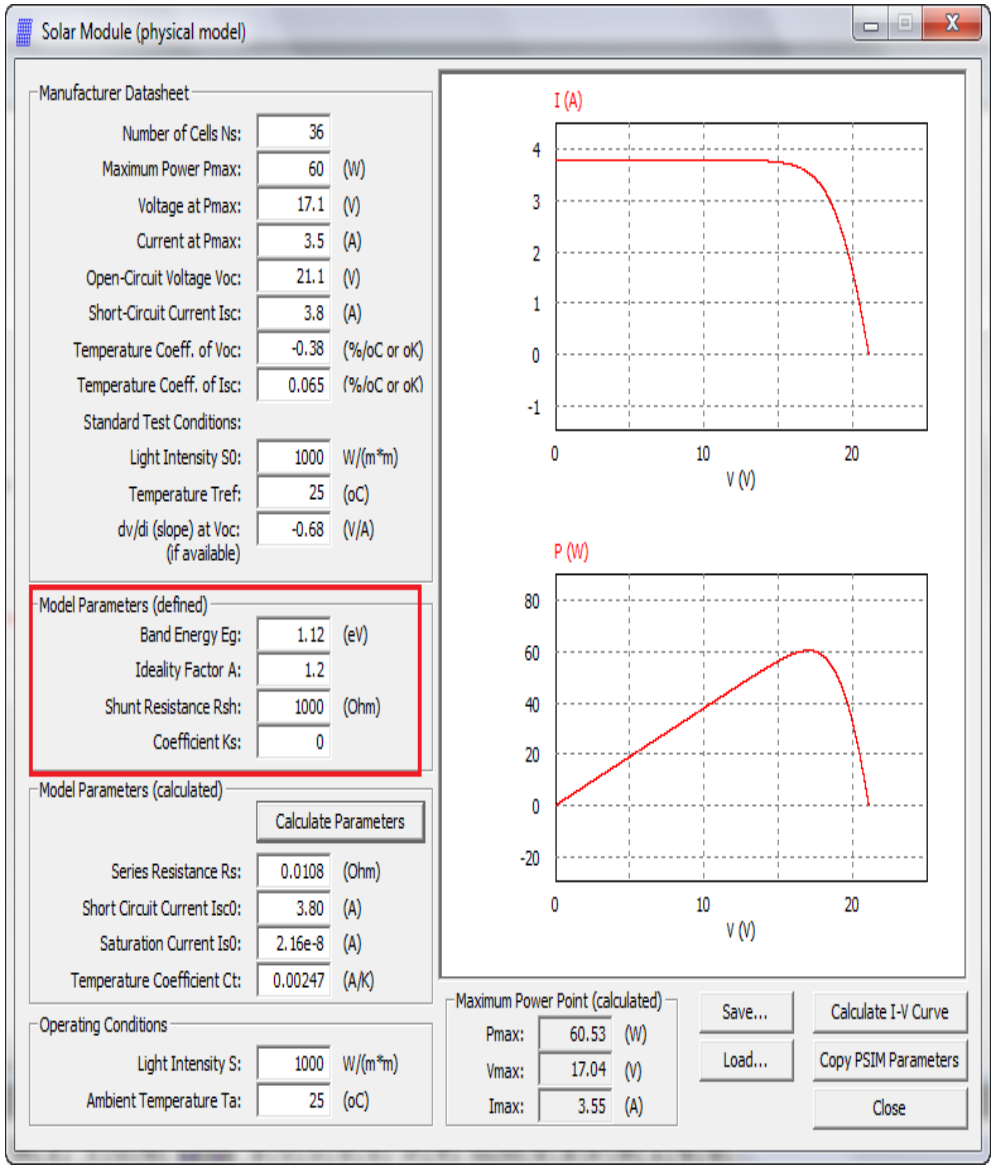
Eg = ۱.۱۲

A = ۱.۲

Rsh = ۱۰۰۰

Ks = ۰

www.powerplantac.com



(شکل ۱۲.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

۱۴-۳-۳- مرحله‌ی سوم - محاسبه‌ی پارامترهای Rs، Isc۰، Is۰ و Ct

براساس اطلاعات وارد شده از دیتا شیت و حدس‌های اولیه برای Eg، A، Rsh و Ks پارامترهای فوق با کلیک روی دکمه‌ی Calculate Parameters قابل محاسبه هستند. با این کار اعداد زیر نمایش داده می‌شوند:

Rs = ۰.۰۱۰۸

Isco = ۳.۸

Iso = ۲.۱۶ e-8

Ct = ۰.۰۰۲۴۷

دقت داشته باشید که این محاسبات تقریبی هستند و کاربر برای تطبیق منحنی محاسبه‌شده با منحنی داده‌شده در دیتاشیت، می‌تواند آن‌ها را تغییر دهد.

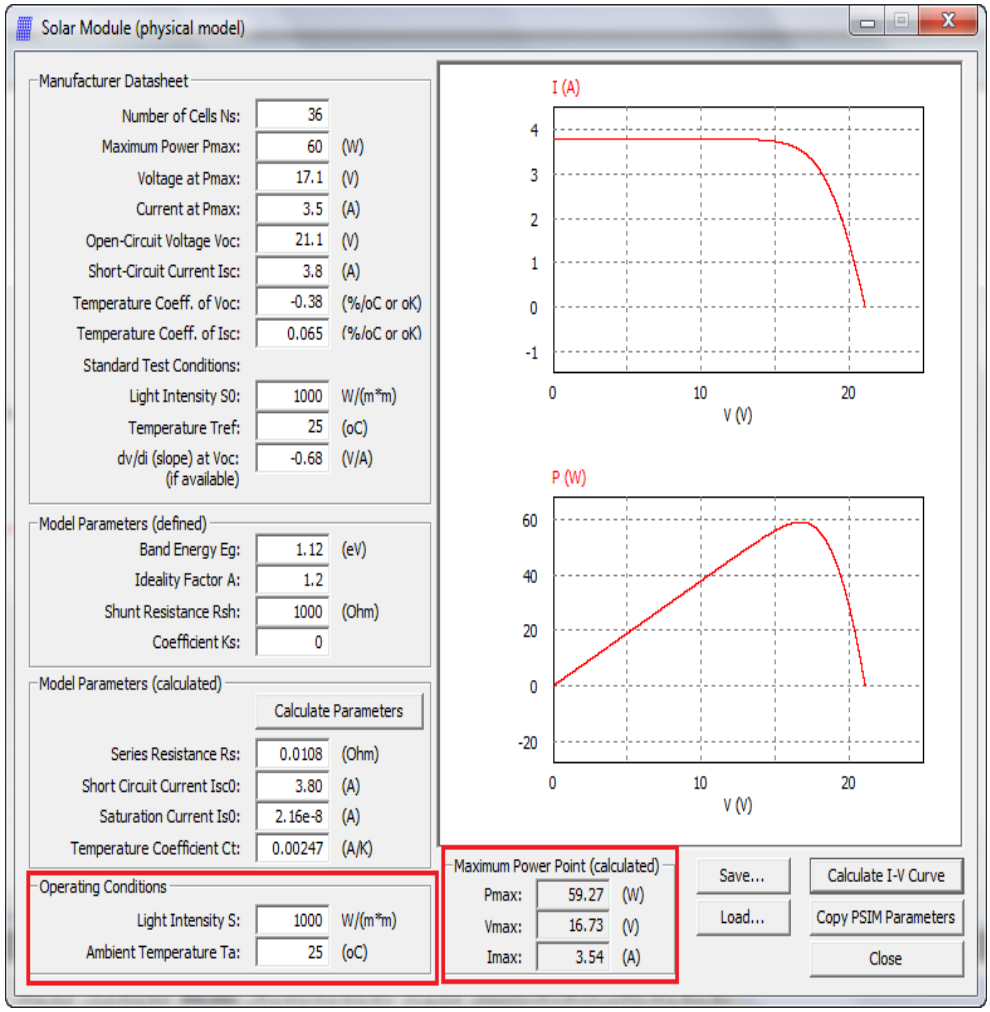
www.powerplantac.com

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

تحت شرایط بهره‌برداری داده‌شده 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.

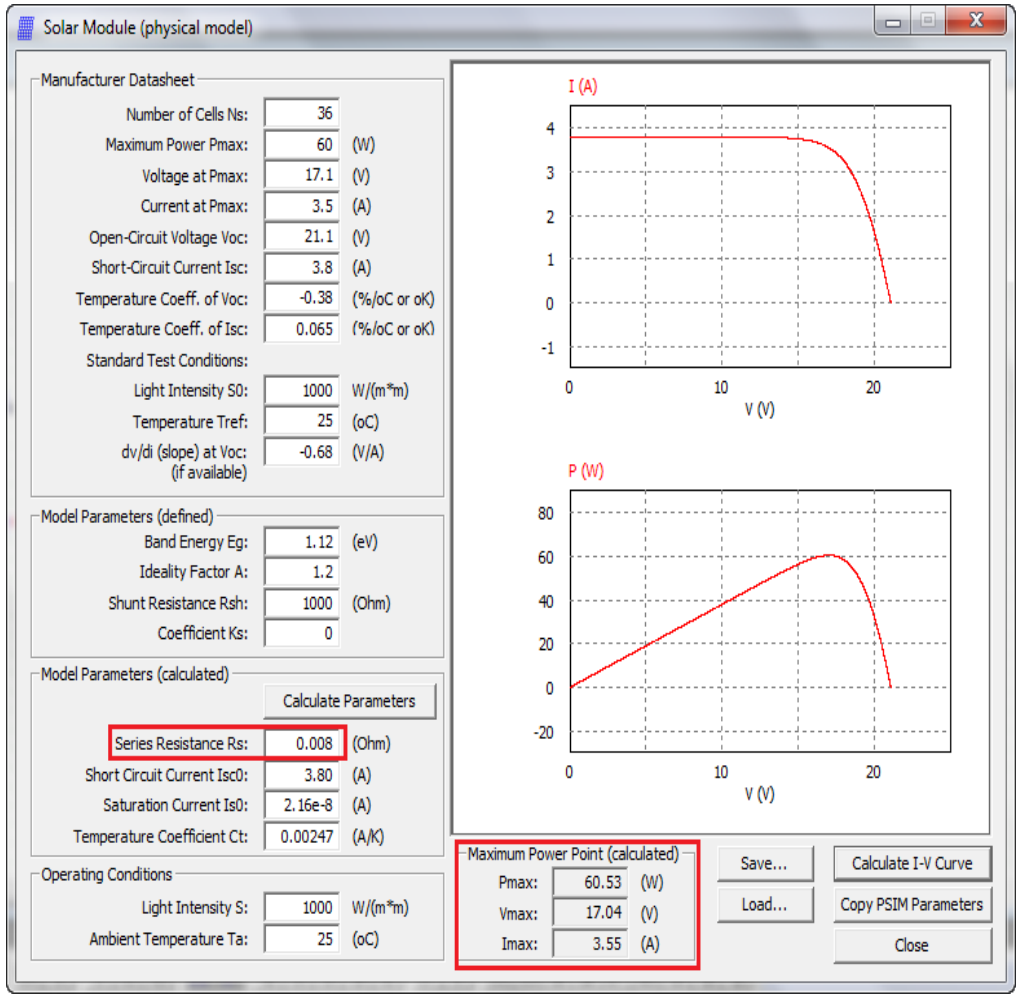
اگر $S=۱۰۰۰\ W/m^۲$ و $Ta=۲۵\ °C$ باشد، توان، ولتاژ و جریان حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم به ترتیب ۵۹/۲۷ وات، ۱۶/۷۳ ولت و ۳/۵۴ آمپر محاسبه خواهند شد که هم توان حداکثر و هم ولتاژ حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم از مقادیر درج شده در دیتاشیت که برای شدت تابش ۱۰۰۰ و دمای ۲۵ درج شده است، کم‌تر هستند (مقادیر درج شده در دیتاشیت برابر است با ۶۰ وات و ۱۷/۱ ولت). برای به‌دست آوردن تطبیق بهتر باید مقادیر پارامترهای Eg، A، Rsh، Ks، Rs، Is۰ و Ct را تغییر دهیم.

www.powerplantac.com



(شکل ۱۳.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

در این مثال اگر مقاومت ســـری را به ۰/۰۰۸ اهم تغییر دهیم، توان، ولتاژ و جریان حداکثر در نقطه‌ی توان ماکزیمم به ترتیب برابر ۶۰/۵۴ وات، ۱۷/۰۴ ولت و ۳/۵۵ آمپر محاسبه خواهند شد که به مقادیر دیتاشیت نزدیک‌تر است.



(شکل ۱۴.۱۴): تنظیمات مدل فیزیکی سلول خورشیدی

شـــاید تعداد زیادی تکرار و آزمون و خطا نیاز باشـــد تا به یک تطبیق خوب با مقادیر دیتا شیت بر سیم. 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. هم چنین فراگرفتید که پارامترهای مورد نیاز در مدل فیزیکی زیاد است و ممکن است که تمامی آن‌ها در دیتا شیت مربوطه موجود نبا شند. 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 ا ضافی نیز تخمین زده شوند. تخمین این پارامترهای ا ضافی ازطریق آزمون و خطا صورت می‌پذیرد.

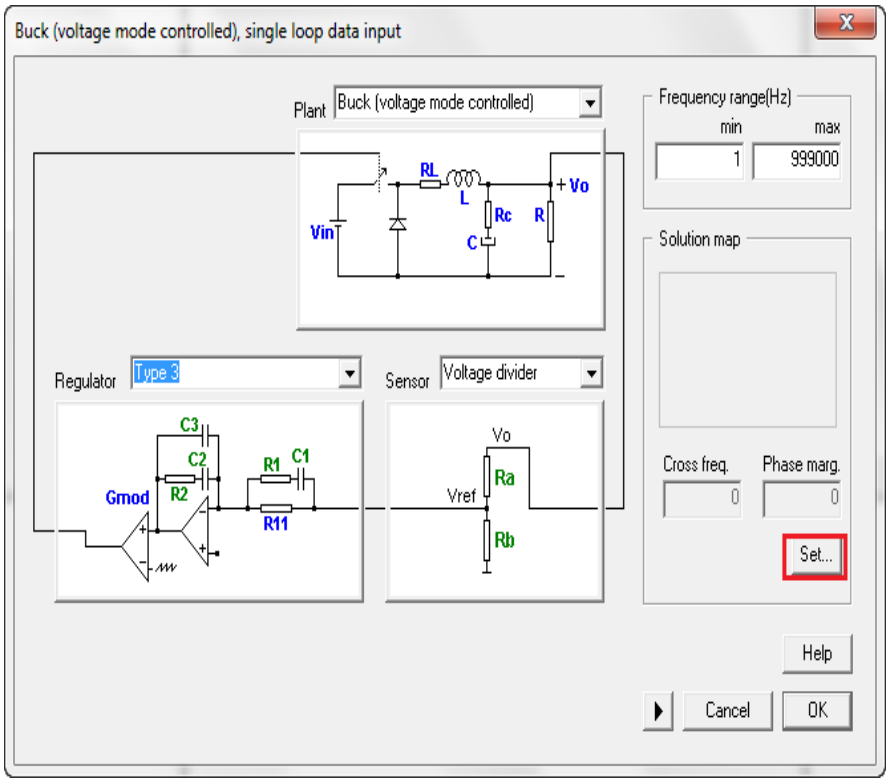
فصل پانزدهم

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 ۱.۱۵): شمای کلی مدار

۱۵–۲– اجرای شبیه‌سازی

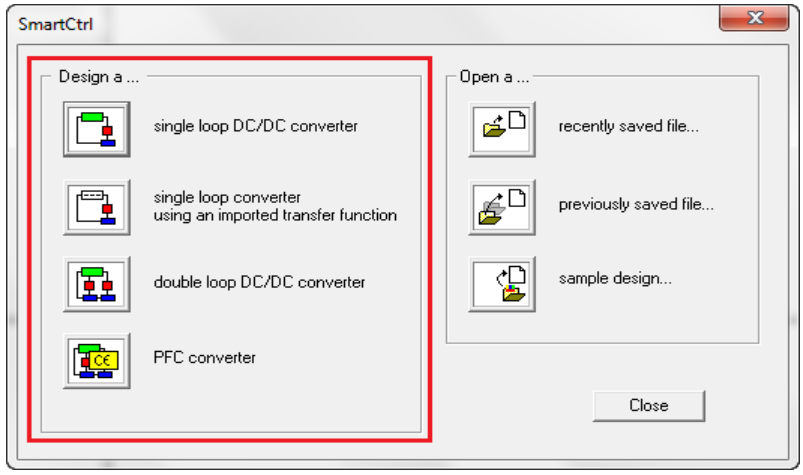
اســمارت کنترل (SmartCtrl) یک ابزار طراحی کنترل برای مدارات الکترونیک قدرت اســت. این ابزار یک رابط کاربری ســاده را برای طراحی حلقه‌های کنترلی فراهم می‌کند.

SmartCtrl شـــامل 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 به‌دست 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

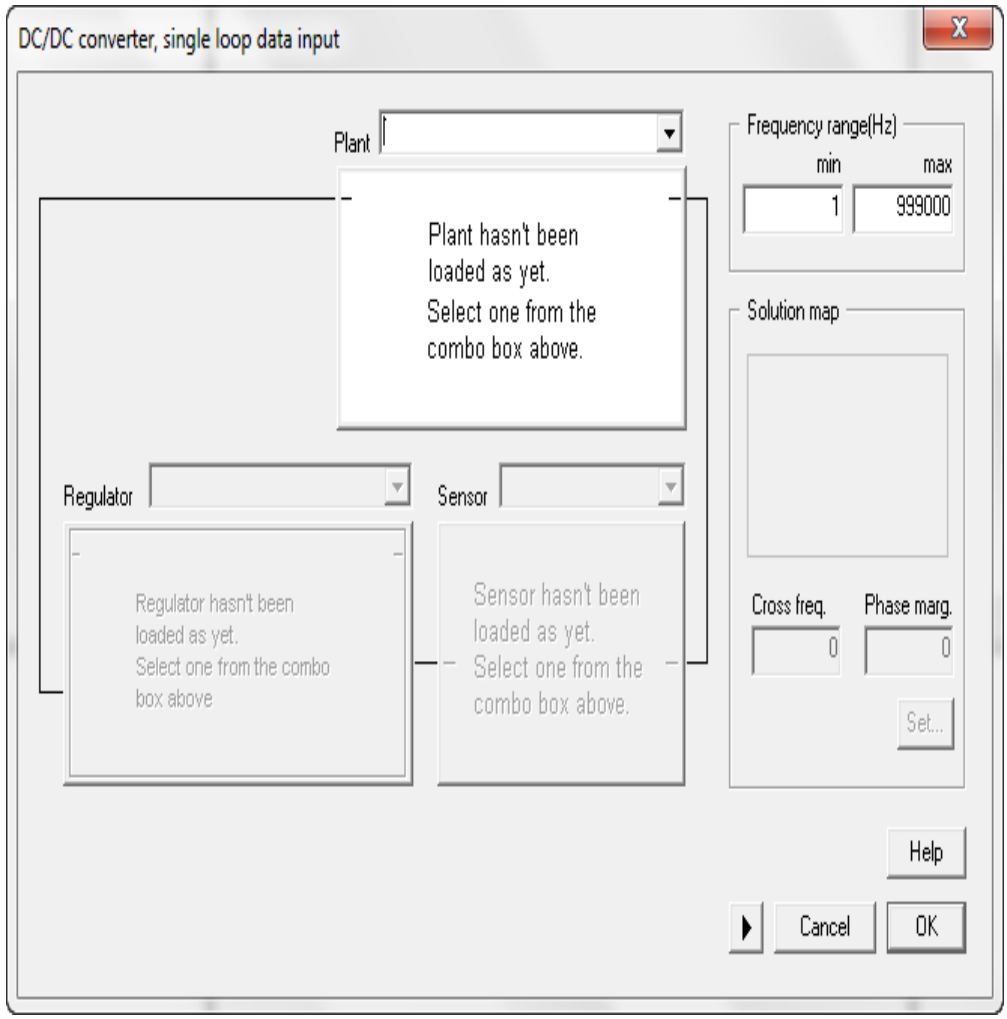
با کلیک روی این گزینه پنجره‌ی شکل (۳.۱۵) باز می‌شود:



(شکل ۳.۱۵): تنظیم SmartCtrl

www.powerplantac.com

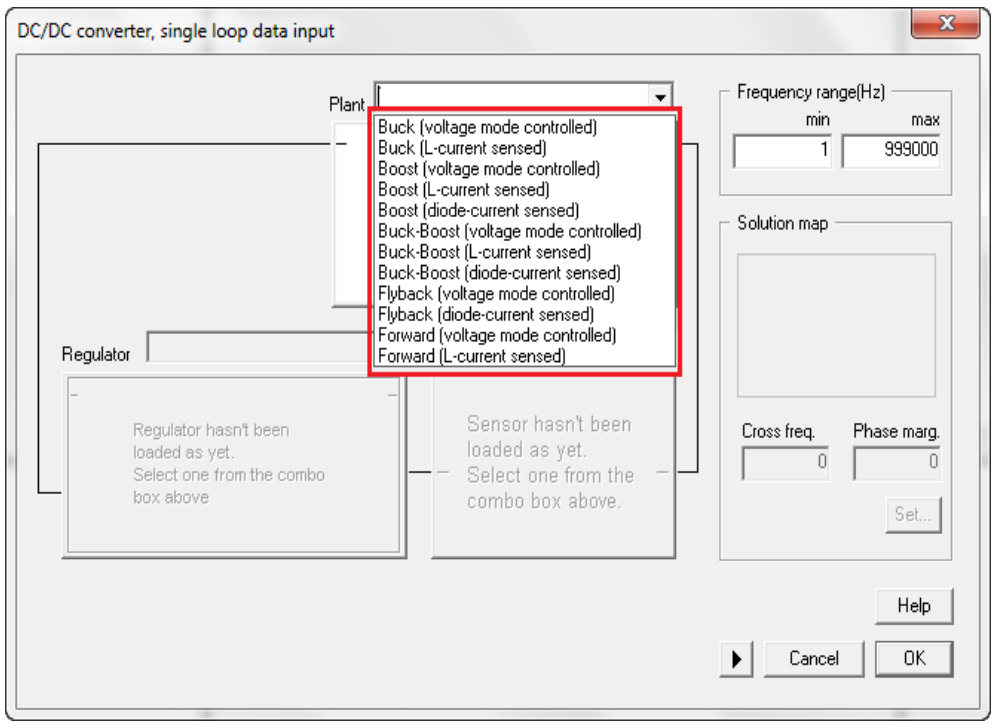
برای شـــروع کار با این ابزار روی ابزار مربوط به Single loop DC-DC Converter کلیک میکنیم. با این کار پنجره‌ی زیر باز می‌شود:



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

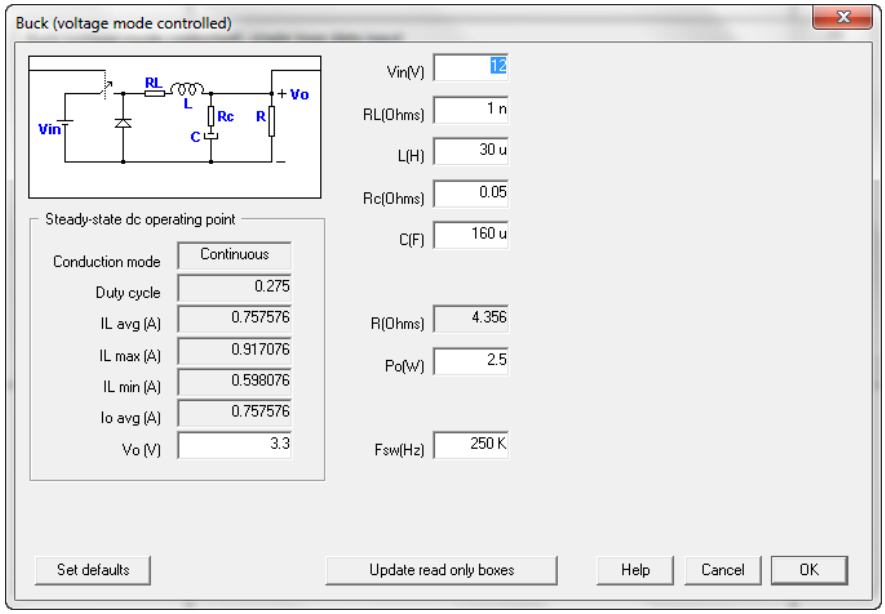
www.powerplantac.com

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:



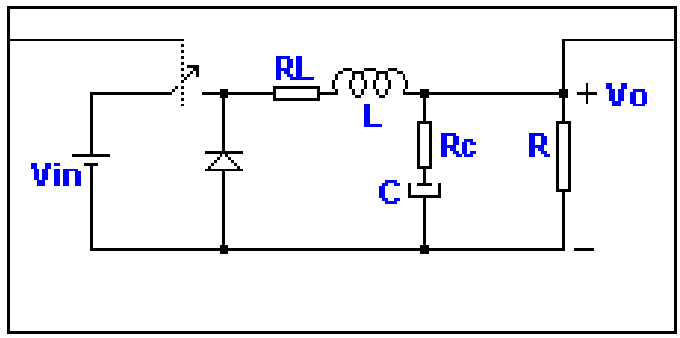
(شکل ۵.۱۵): تنظیم Single loop DC-DC Converter

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



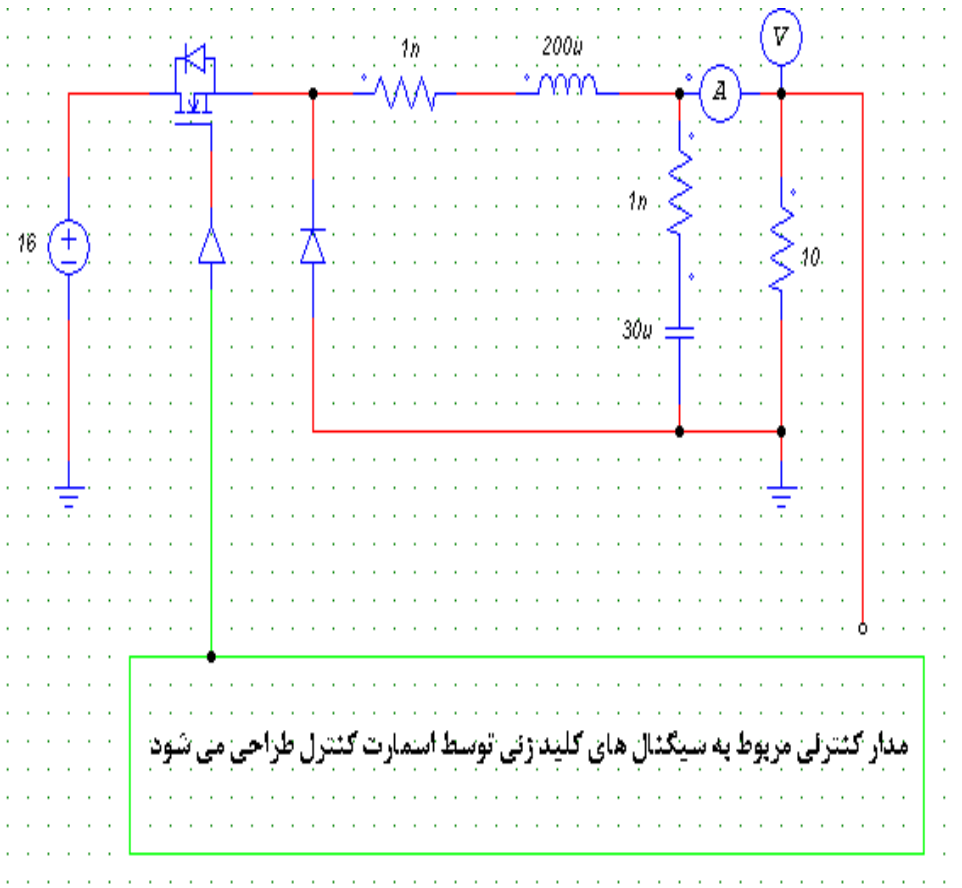
(شکل ۶.۱۵): تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

دقت کنید که در اینجا مدارها به صورت پیش‌فرض هستند بنابراین مدار طراحی شده در محیط PSIM نیز باید مطابق شکل زیر باشد.



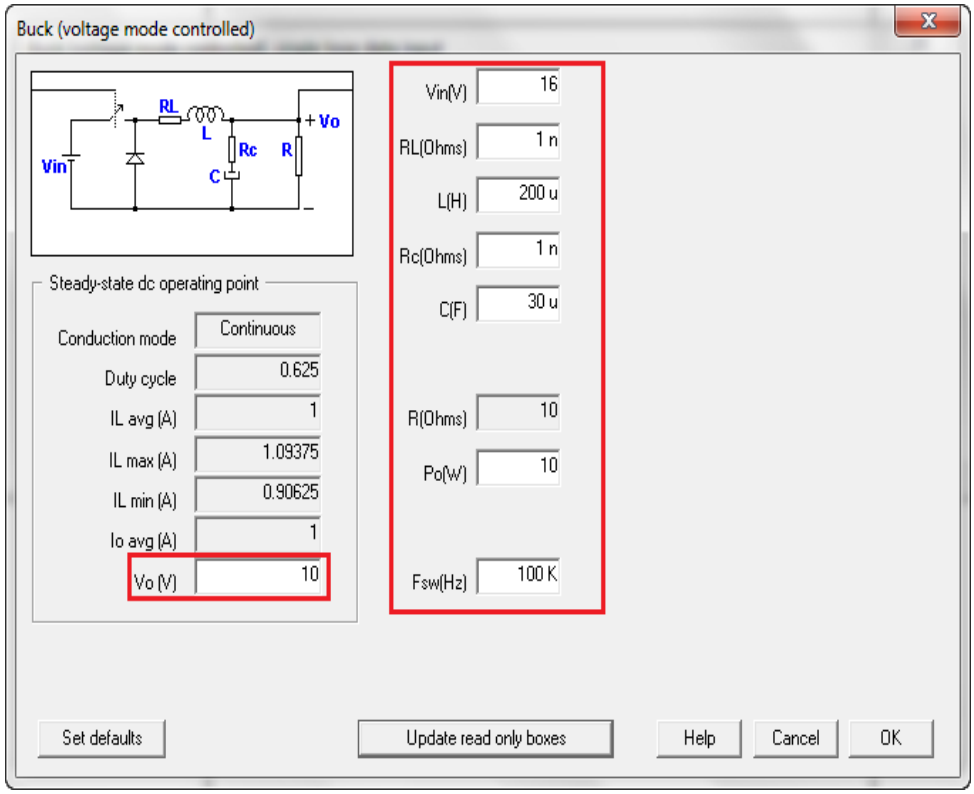
(شکل ۷.۱۵): مدار پیش‌فرض

بنابراین در محیط PSIM نیز این مدار را طراحی می‌کنیم.



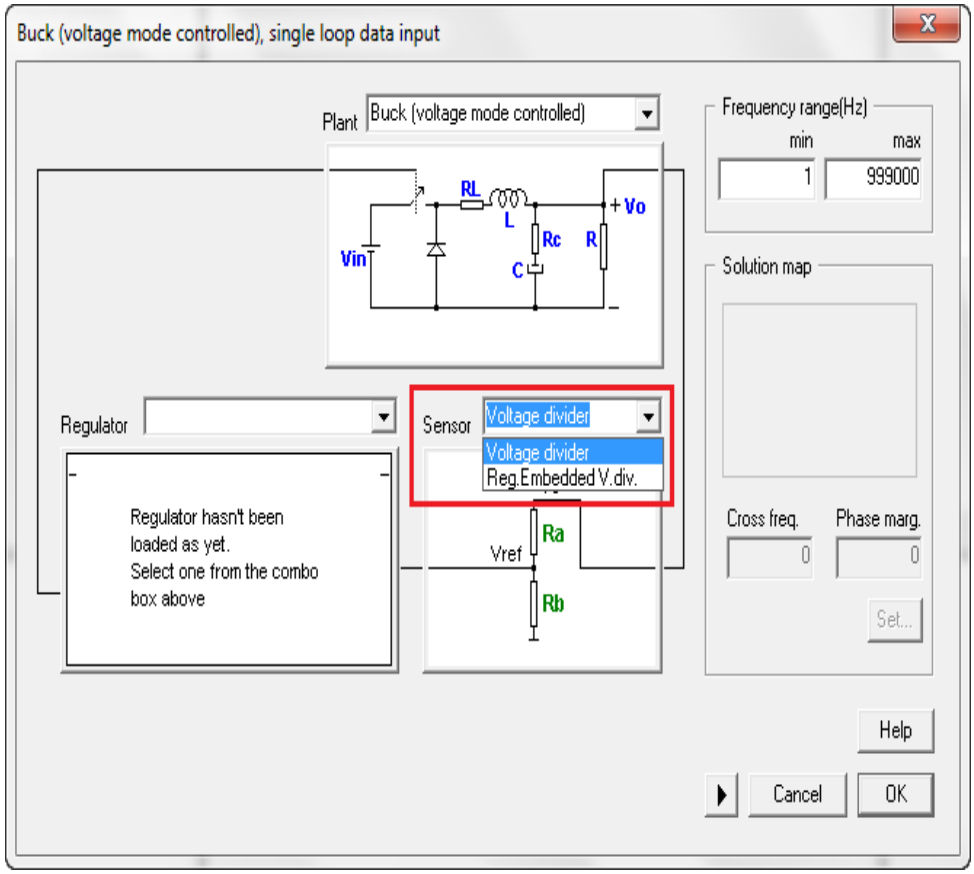
(شکل ۸.۱۵): پیاده‌سازی مدار

حال باید مقادیر مربوط به پارامترها را در SmartCtrl مطابق مدار طراحی شـــده تغییر می‌دهیم:



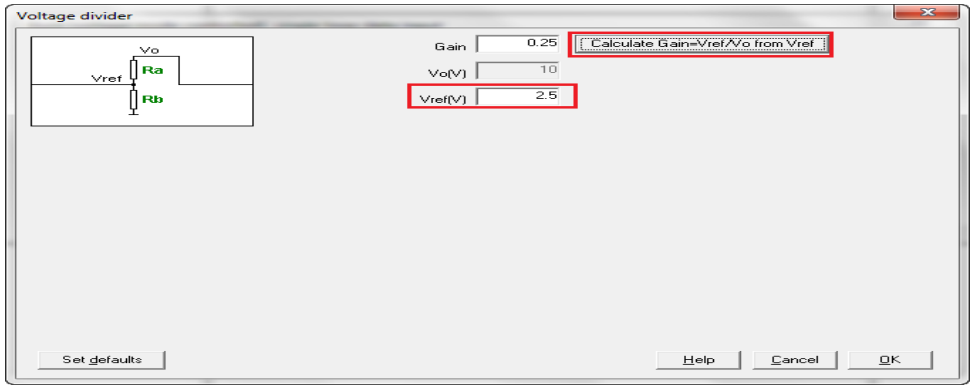
(شکل ۹.۱۵): تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

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



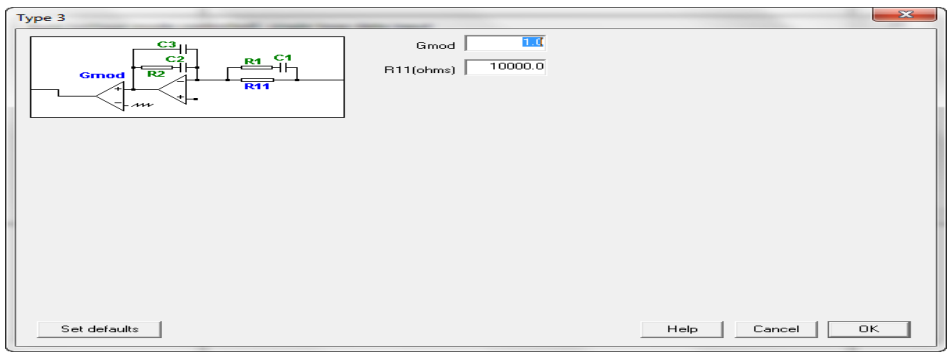
(شکل ۱۰.۱۵): تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

سنسور را از نوع تقسیم‌کننده ولتاژ انتخاب می‌کنیم تا به سیستم کنترلی ولتاژ کمتری وارد شـود. با انتخاب این سـنسـور پنجره‌ی زیر باز می‌شـود که در آن می‌توان با تعریف Vref و زدن دکمه‌ی محاسبه، بهره را تنظیم کرد.



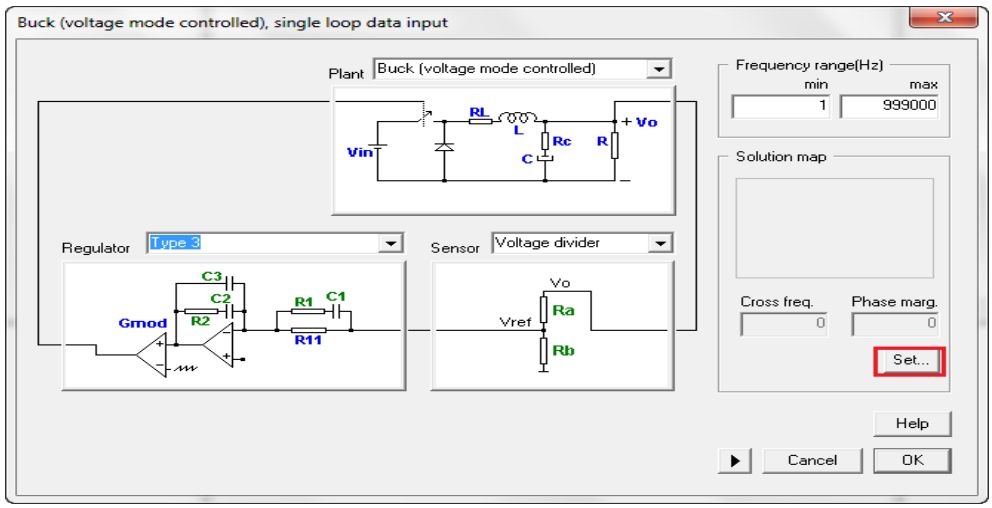
(شکل ۱۱.۱۵): تنظیمات تقسیم‌کننده ولتاژ

با تایید این پنجره نیز دوباره به پنجره‌ی قبلی بازمی‌گردیم. حال نوبت انتخاب نوع کنترل‌کننده اســـت که در اینجا کنترل‌کننده‌ی نوع ۳ (Type ۳) را انتخاب می‌کنیم. انتخاب نوع کنترل‌کننده مربوط به بحث کنترل ا ست که تو ضیح آن در اینجا منجر خارج شـدن از بحث اصـلی می‌شـود. با انتخاب کنترل‌کننده نیز پنجره‌ای مشـابه شـکل زیر باز می‌شود که پارامترها را در حالت پیش‌فرض رها می‌کنیم.



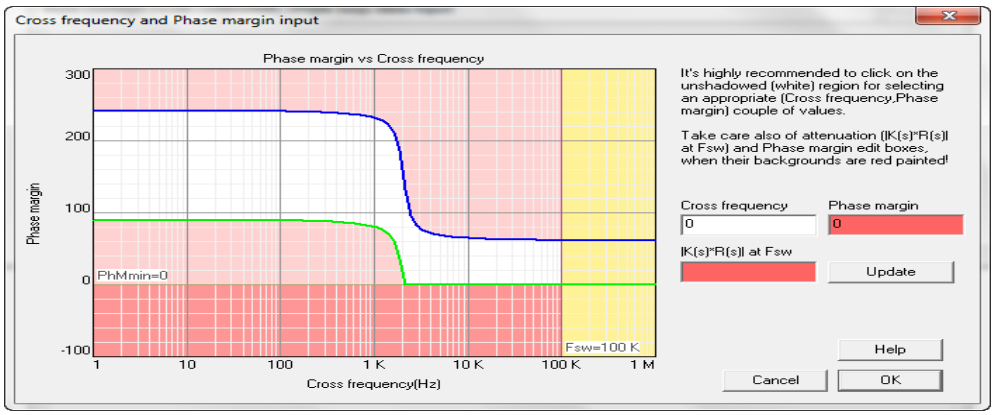
(شکل ۱۲.۱۵): انتخاب کنترل‌کننده

با تایید این قسمت شکل پنجره‌ی اصلی به‌صورت زیر خواهد بود:



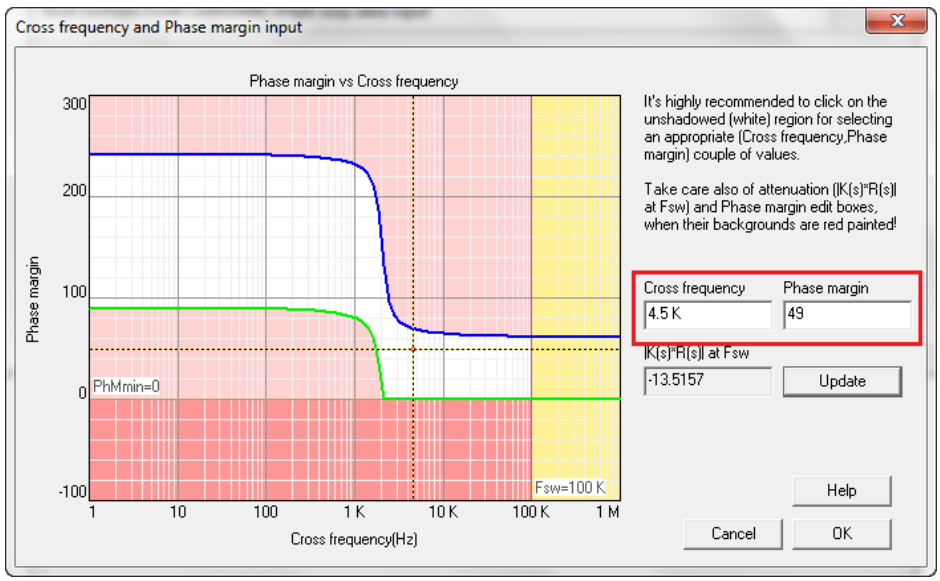
(شکل ۱۳.۱۵): تنظیم Buck (Voltage mode controlled)

حال با زدن دکمه‌ی Set پنجره‌ی زیر باز می‌شود:



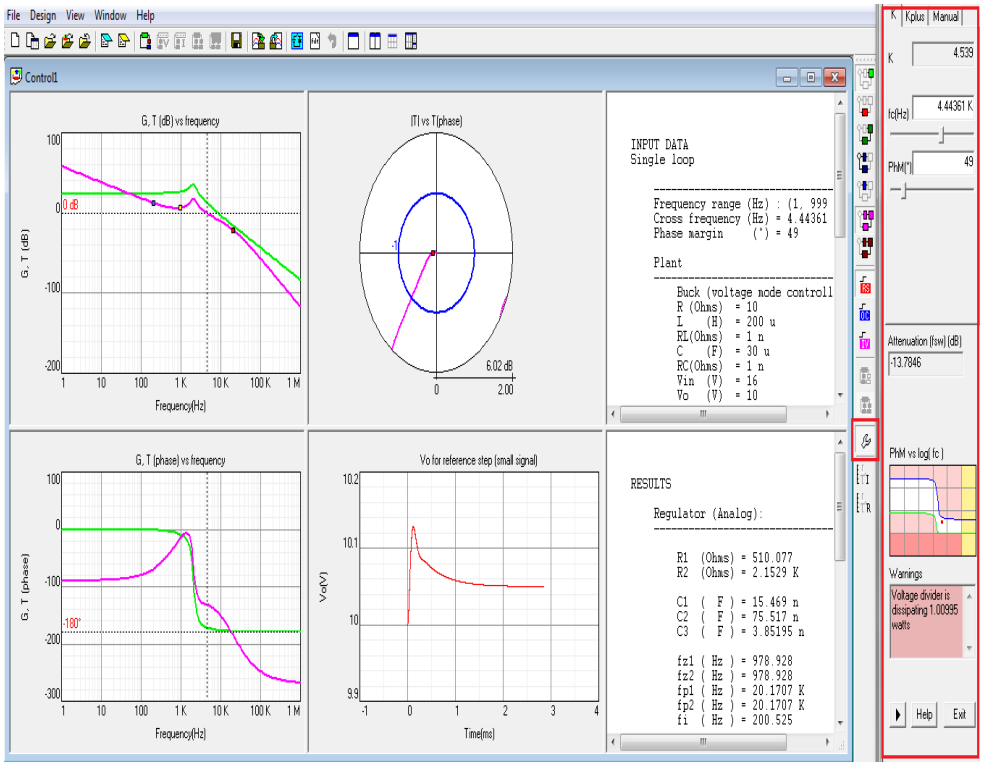
(شکل ۱۴.۱۵): تنظیم Cross frequency و Phase margin

در این پنجره باید Cross frequency و Phase margin را به‌گونه‌ای 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.



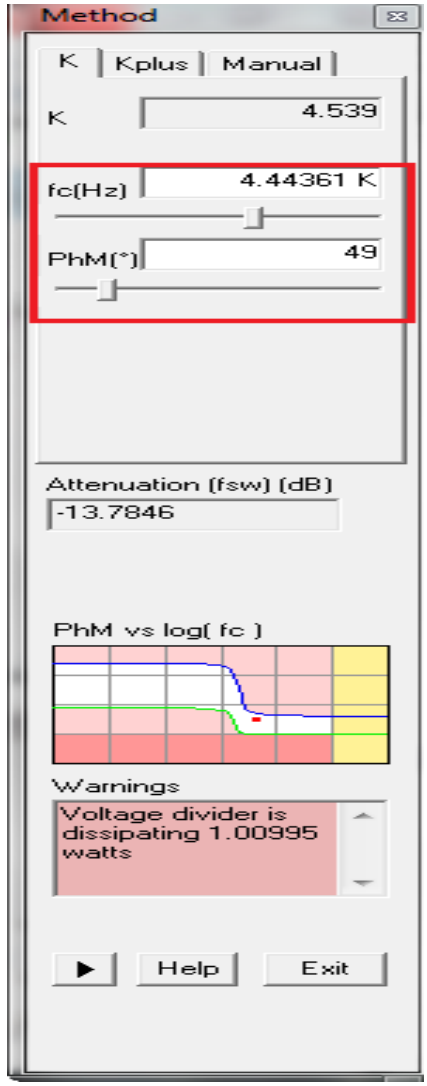
(شکل ۱۵.۱۵): تنظیم Cross frequency و Phase margin

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



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

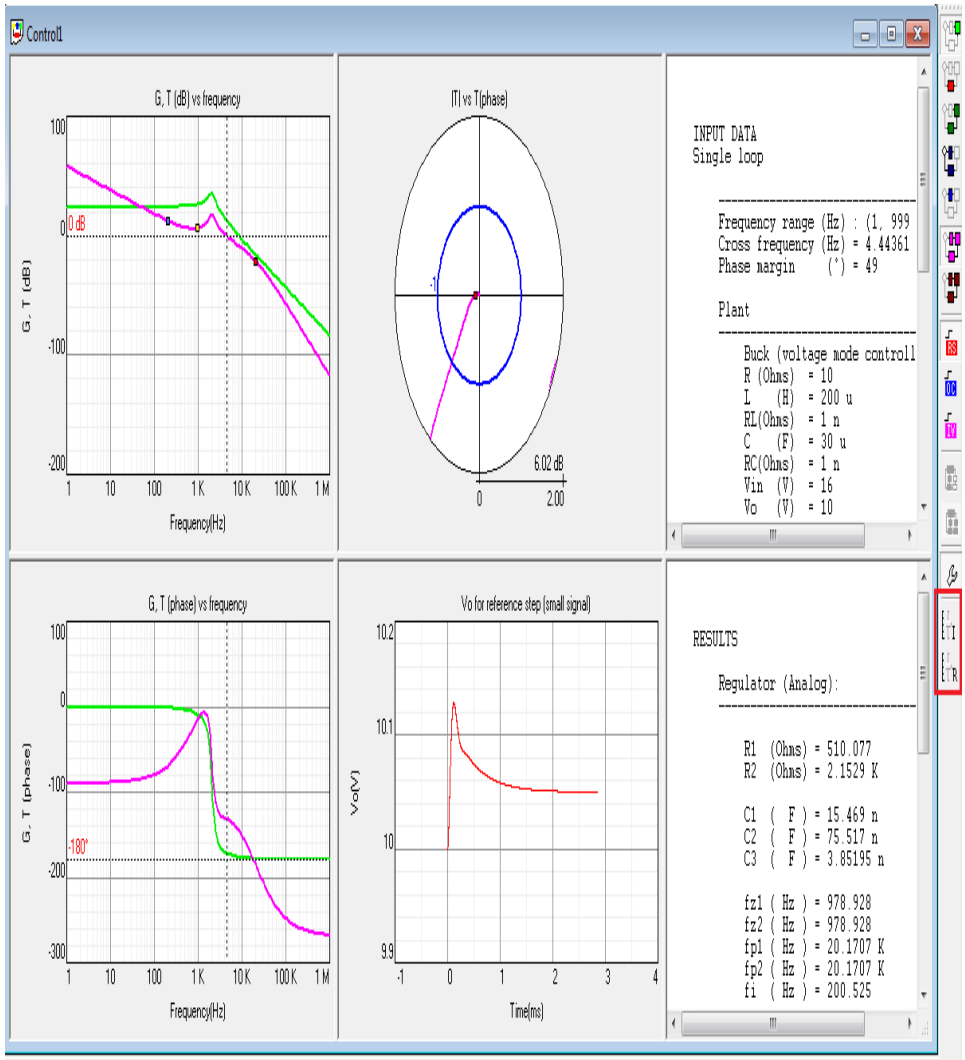
پنجره‌ی سمت راست که به پنجره‌ی Method معروف است با کلیک برروی ابزار قابل دسترسی است. از این پنجره می‌توان برای مشاهده‌ی وابستگی و تغییر نمودارها با تغییر پارامترها یا رسیدن به مقادیر مورد نظر استفاده کرد.



(شکل ۱۷.۱۵): تنظیمات Method

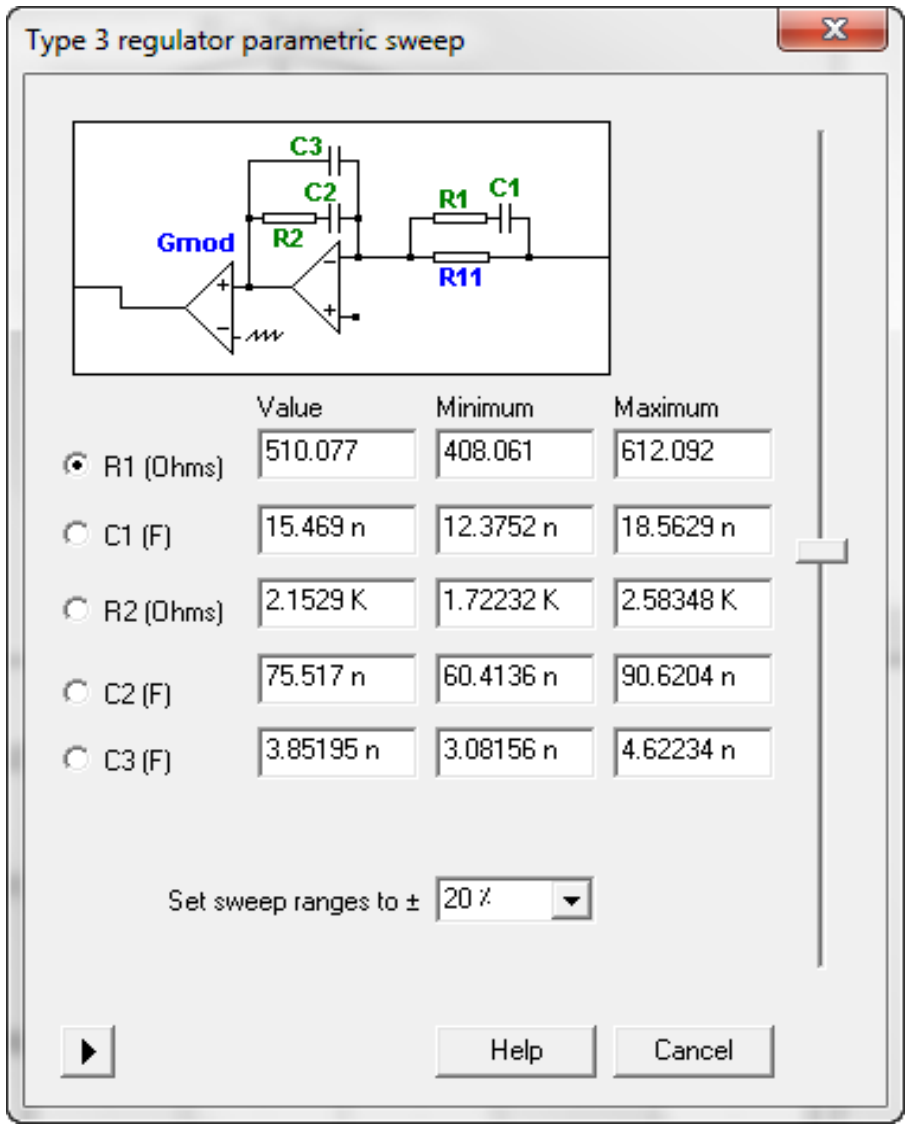
همچنین در پنجره‌ی اصلی دو ابزار دیگر قرار دارند که بوسیله‌ی آن‌ها می‌توان دیگر تغییرات را که نمودارها به آن‌ها وابسته هستند را مشاهده کرد. این دو ابزار، تغییر

پارامترهای ورودی و هم‌چنین رگولاتور را شـامل می‌شـود که در شـکل زیر نشـان داده شده‌اند.



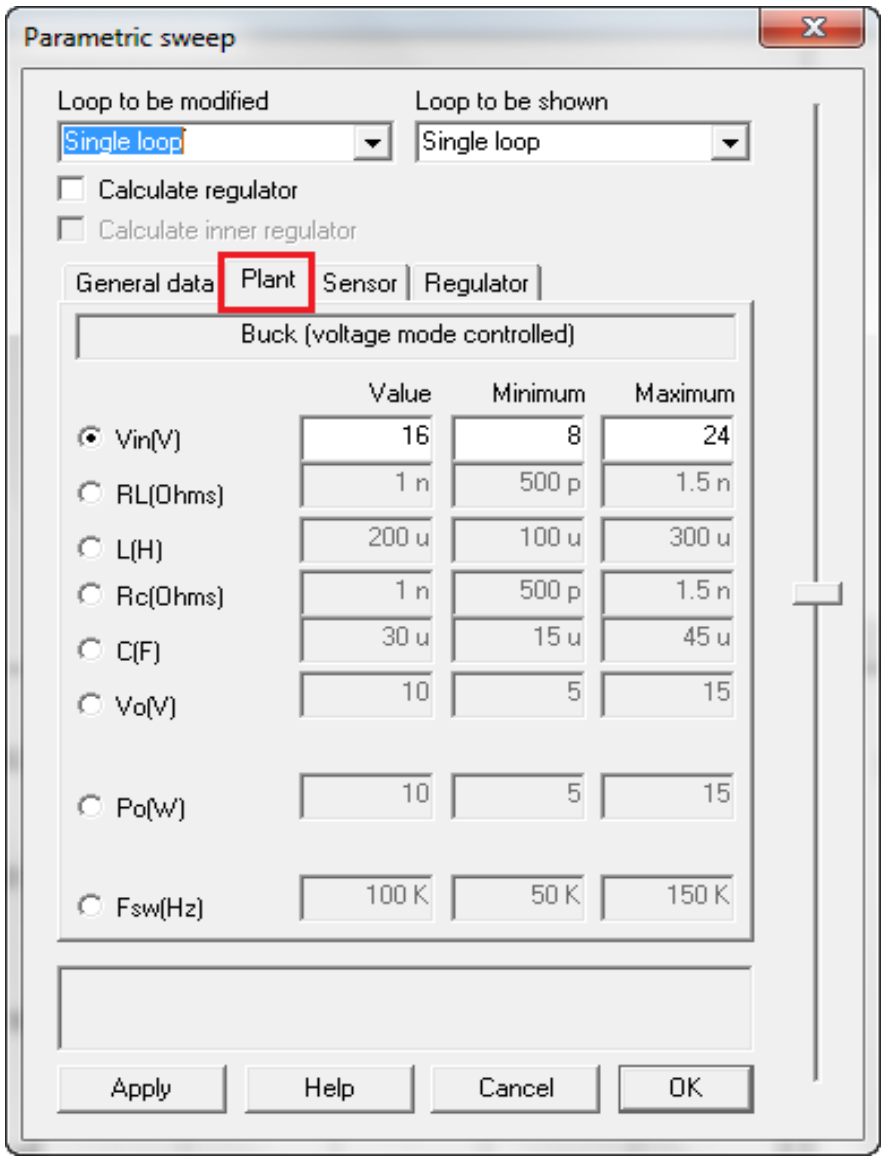
(شکل ۱۸.۱۵): ابزار نمایش نمودارهای خروجی

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



(شکل ۱۹.۱۵): تنظیم پارامترهای رگولاتور

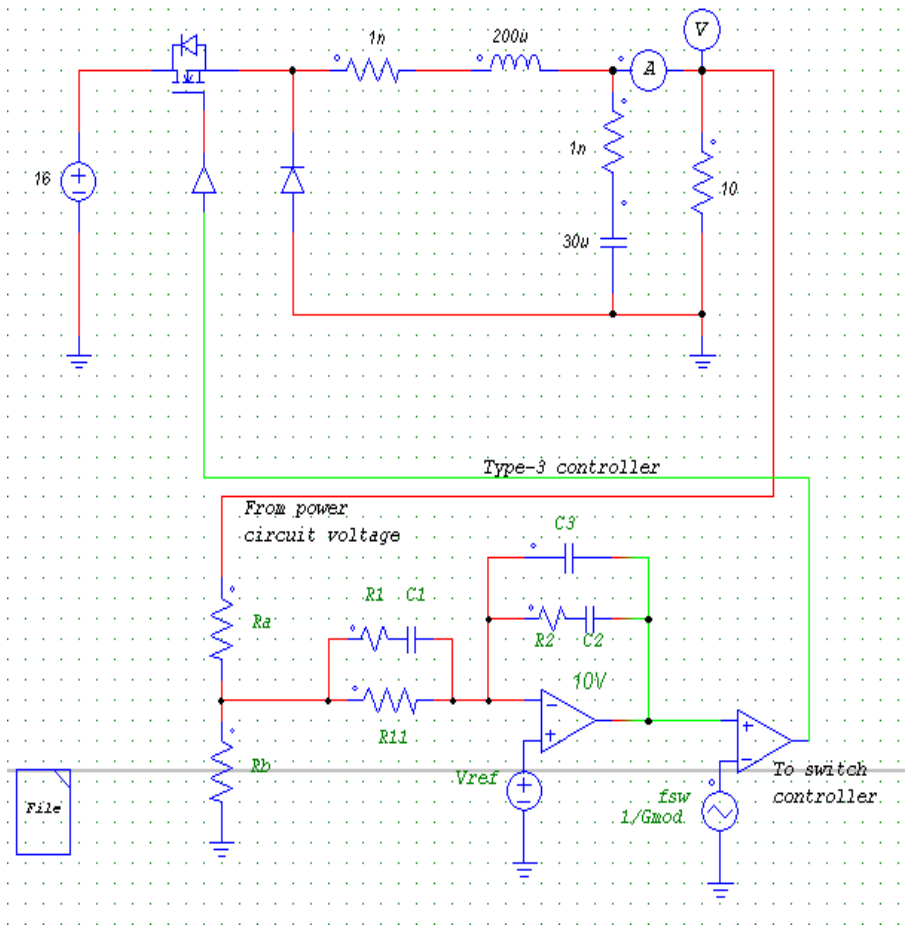
و با انتخاب ابزار مربوط به پارامترهای ورودی پنجره زیر نمایش داده می‌شود:



(شکل ۲۰.۱۵): تنظیم پارامترهای رگولاتور

www.powerplantac.com

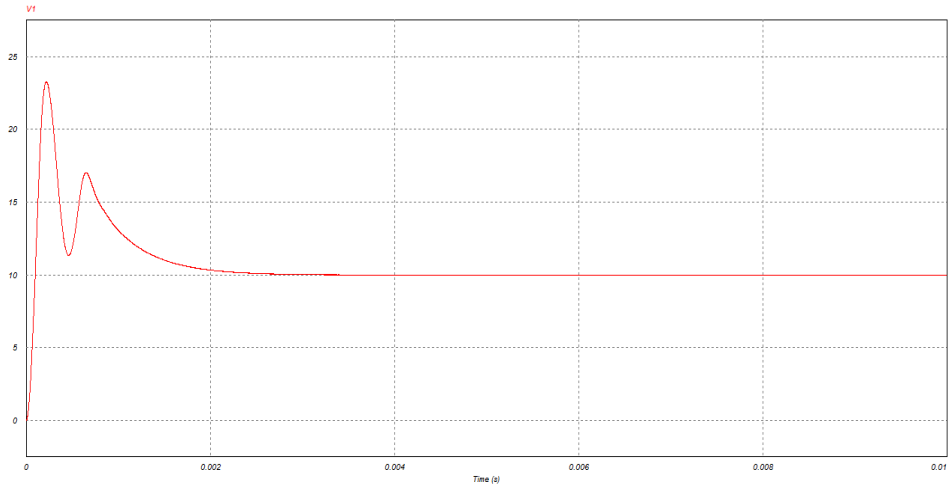
حال با کلیک روی ابزار Exports Regulator to PSIM که در شکل زیر نیز نشان داده شده است، سیستم کنترلی طراحی شده وارد محیط PSIM می‌گردد. با این کار پنجره‌ای باز می‌شود که در آن باید فایلی را که مدار مورد نظر در آن ذخیره شده است، انتخاب کنیم تا سیستم کنترلی به آن مدار اعمال شود.



(شکل ۲۱.۱۵): اعمال سیستم کنترلی به مدار

www.powerplantac.com

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.

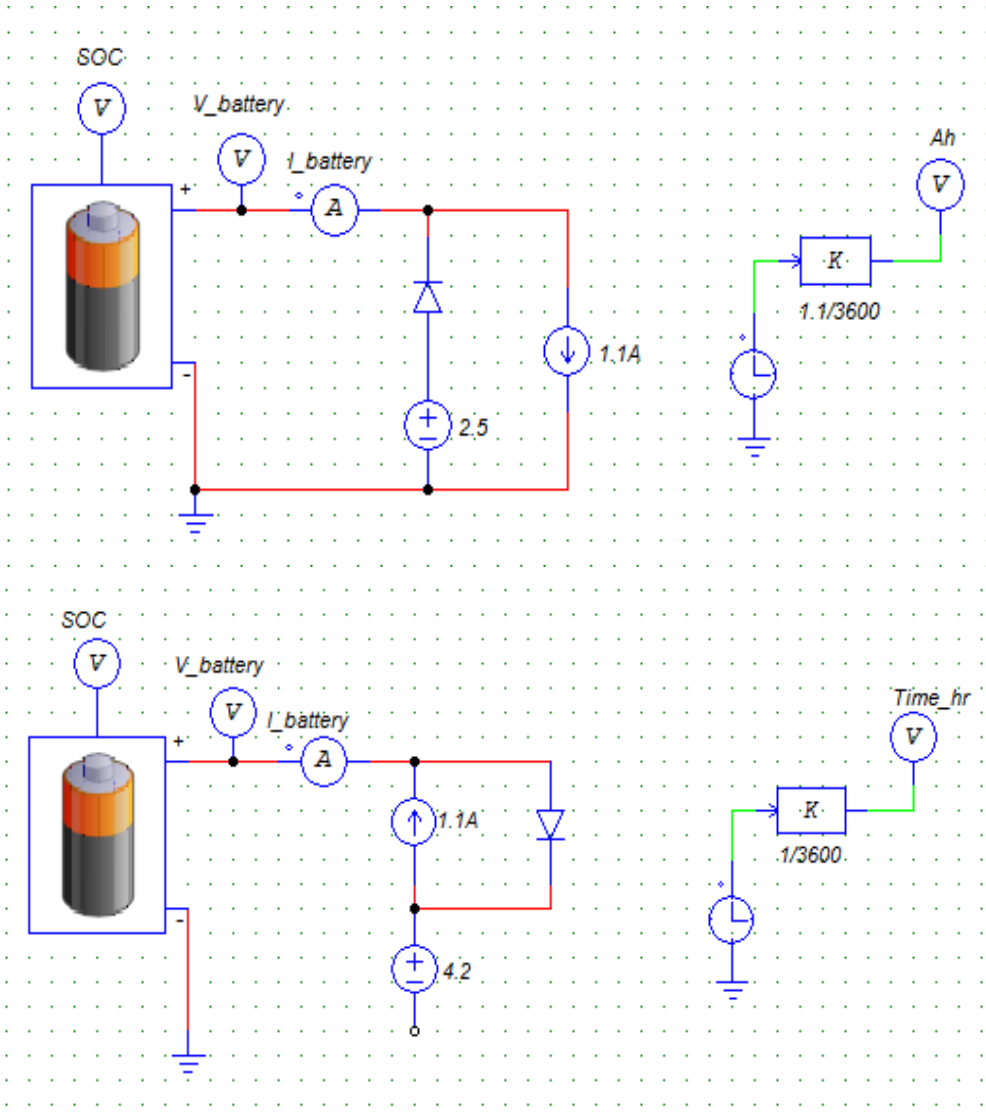
فصل شانزدهم

مدل باتری لیتیوم یونی

۱۶– مقدمه

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

۱۶–۱– طرح مدار

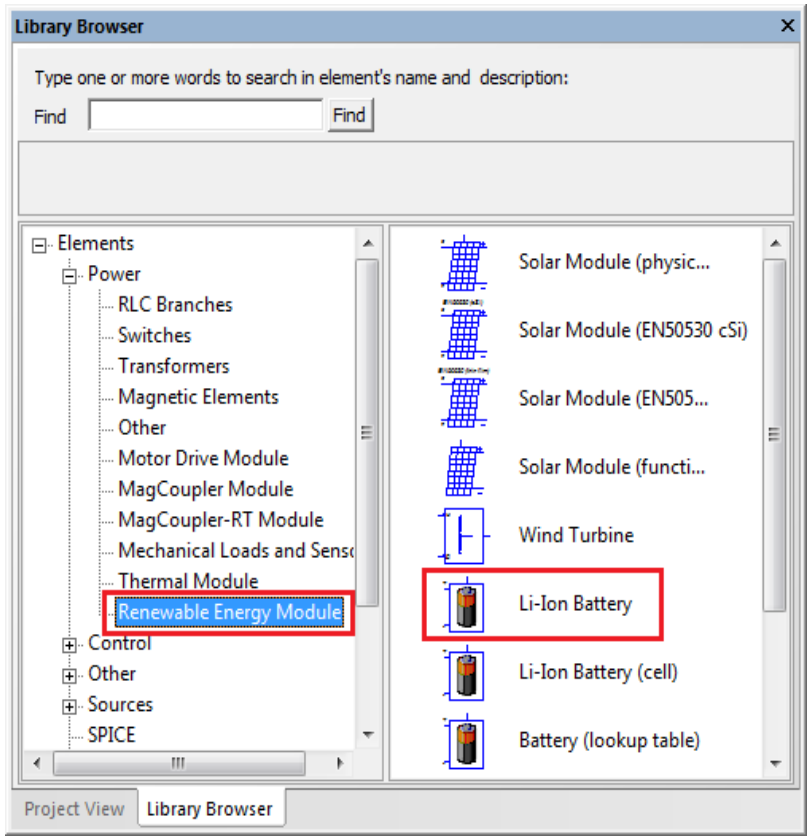


(شکل ۱.۱۶): شمای کلی مدار

www.powerplantac.com

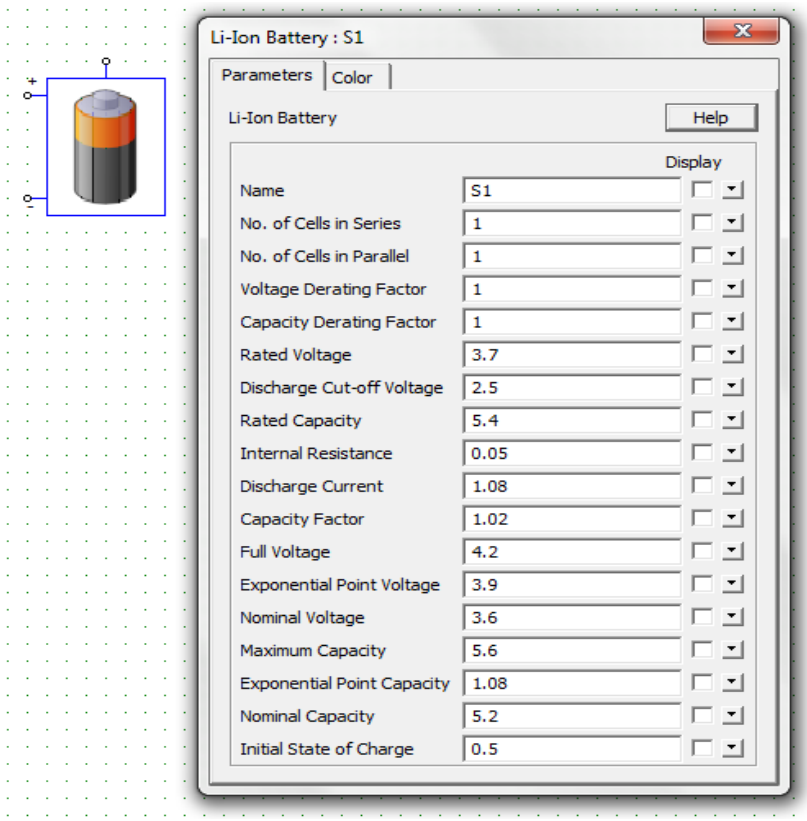
۱۶-۲-اجرای شبیه‌سازی

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 دوبار کلیک روی باتری، پنجره‌ی پارامترهای آن به‌صورت زیر باز می‌شود.



(شکل ۳.۱۶): تنظیم پارامترهای باتری

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

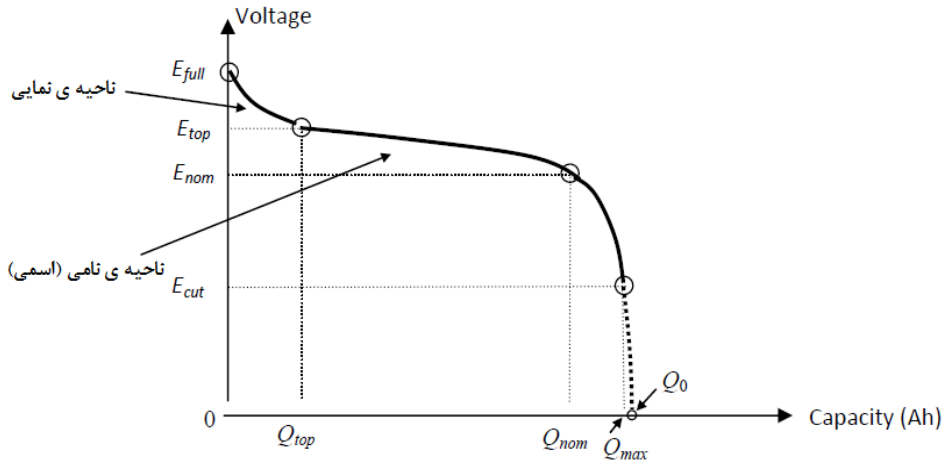
پامترهایی که برای مدل لازم هستند عبارتند از:

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: ضــریب 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 کاملا 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 برحسب آمپرساعت (Q_{max}).
Exponential Point Capacity: ظرفیت باتری در انتهای ناحیه‌ی نمایی در منحنی تخلیه بر حسب آمپر ساعت (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 مستقیما از دیتا شیت به‌د ست 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 به‌دست آورد. دقت کنید که مقادیر E_{top}، Q_{top}، E_{nom} و Q_{nom} دقیقا با نقاط انتقالی برابر نیستند و اغلب به طور دقیق مشخص نشده‌اند. برای به‌دست آوردن آن‌ها می‌توان مقادیر مختلف را امتحان کرد به‌گونه‌ای که مشخصه‌ی مدل با مشخصه‌ی واقعی تطبیق پیدا کند. ضریب ظرفیت تقریبا نسبت بین Qo (ظرفیت در ولتاژ صفر) و Q_{max} است که مقدار آن نزدیک به یک است و باید به گونه‌ای تنظیم شود که در SOC=۰ 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.

www.powerplantac.com

در این فصل از باتری لیتیم یونی قابل شارژ، مدل VL۳٤٥۷۰ 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_s و K_p در مقدار پیش‌فرض که همان یک است، رها می‌شوند.

www.powerplantac.com

Cell size references		R20 – D
Electrical characteristics		
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
Mechanical characteristics (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
Operating conditions		
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 مستقیما از روی دیتاشیت قابل دستیابی هستند عبارتند از:

Erated = 3.7 V

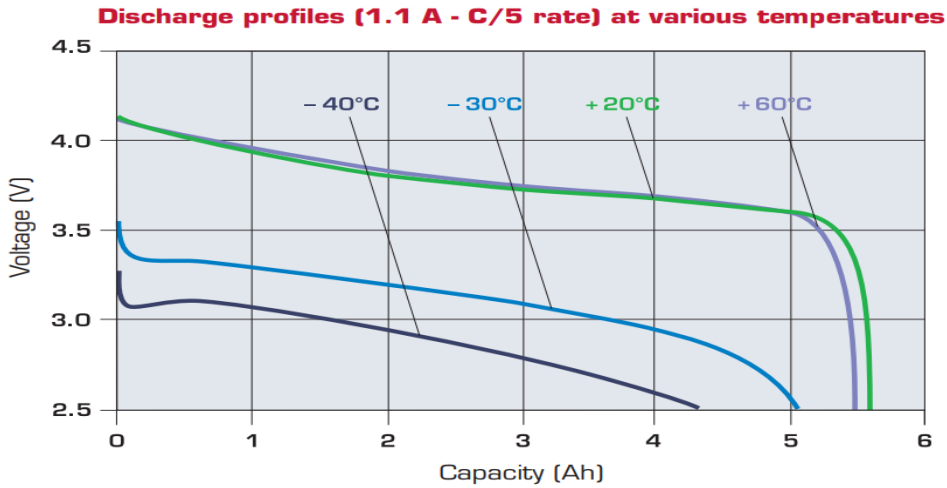
Qrated = 5.4 Ah

Ecut = 2.5 V

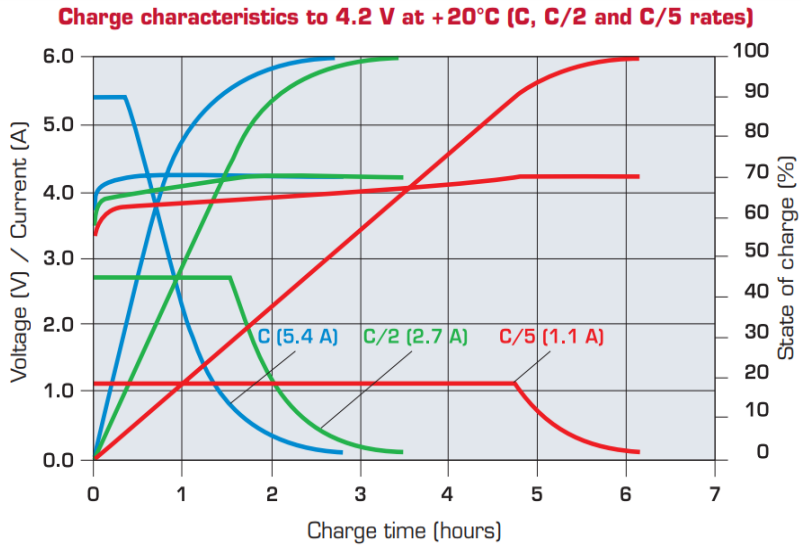
در دیتاشیت مربوط به این باتری به مقاومت داخلی باتری اشاره‌ای نشده است. در این حالت می‌توان باتوجه به سـایر باتری‌های لیتیوم یونی با مقادیر نامی مشـابه، یک تخمین اولیه زد. در این‌جا مقاومت داخلی باتری R_{batt}=۰٫۰۶۵ Ohm فرض شده است.

۱۶-۳-۲- گام دوم – تخمین مقادیر پارامترها از روی منحنی تخلیه‌ی باتری

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



(شکل ۶.۱۶): منحنی تخلیه‌ی باتری



(شکل ۷.۱۶): مشخصه‌های شارژ

با اســتفاده از منحنی تخلیه در دمای ۲۰ درجه‌ی ســانتی‌گراد (۱/۱ آمپر)، مقادیر زیر برای پارامترها به‌دست می‌آیند:

Efull = ۴,۲V

Etop = ۳,۷۵V

Qtop = ۲,۵Ah

Enom = ۳,۶V

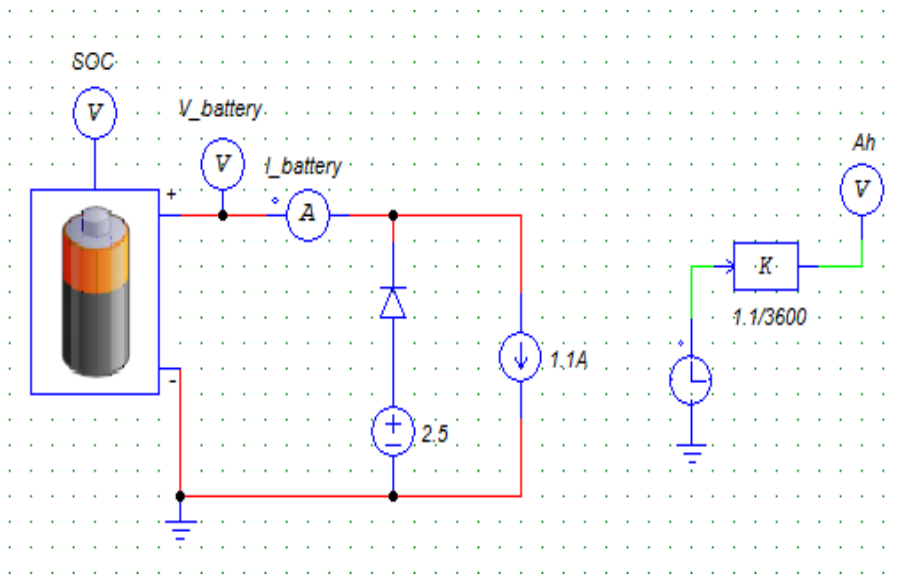
Qnom = ۵,۲Ah

Qmax = ۵,۶Ah

ضـریب K_c نیز در ۱/۰۲ تنظیم شـده اسـت. دقت کنید که به‌جز E_{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

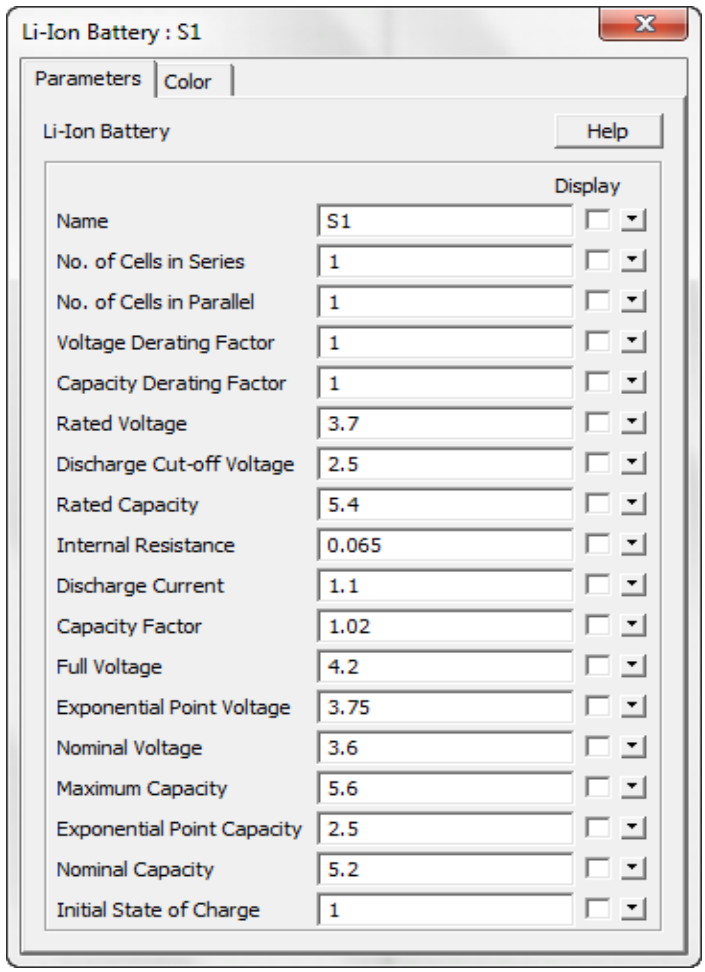
بعد از به‌دست آوردن پارامترها، باید منحنی‌های شارژ و تخلیه با شبیه‌سازی به‌دست آیند. مدار زیر مربوط به تخلیه‌ی باتری است.



(شکل ۸.۱۶): مدار تخلیه باتری

www.powerplantac.com

پارامترهای مربوط به باتری نیز به‌صورت زیر تنظیم شده است:



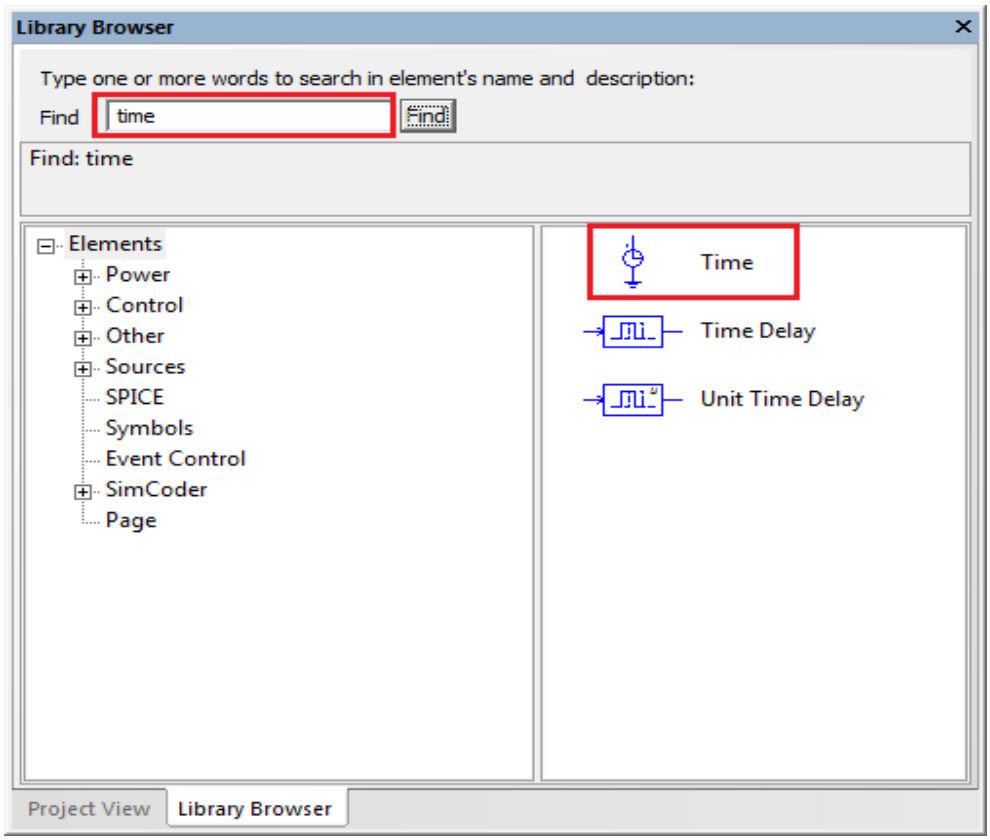
(شکل ۹.۱۶): تنظیمات باتری

در این مدار از یک منبع جریان ۱/۱ آمپر اســتفاده شــده اســت تا باتری را تخلیه کند.

دقت کنید که در منحنی تخلیه محور افقی برح سب آمپر ساعت ا ست؛ 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 به‌دست آید.

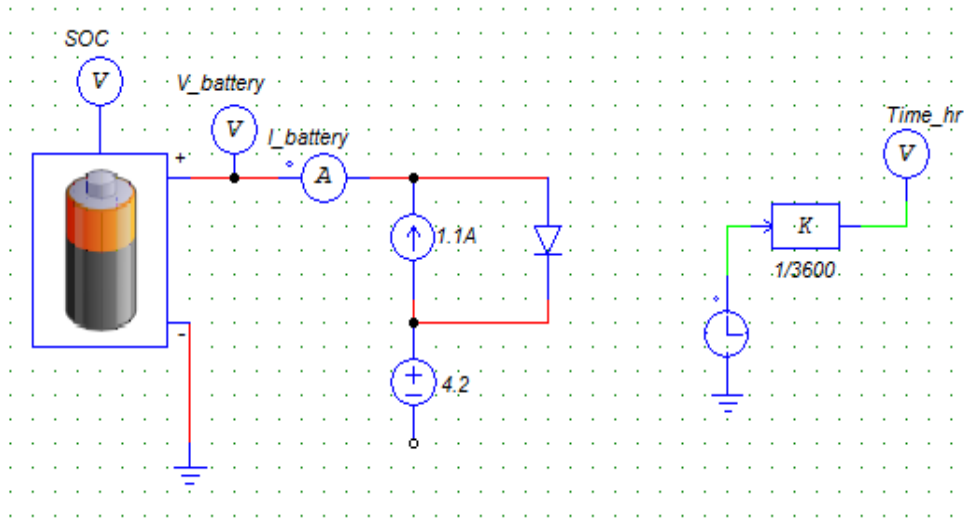
المانی که خروجی آن زمان اســـت، با جســـتجوی Time در کتابخانه‌ی نرم‌افزار قابل دستیابی است:



(شکل ۱۰.۱۶): کتابخانه نرم‌افزار

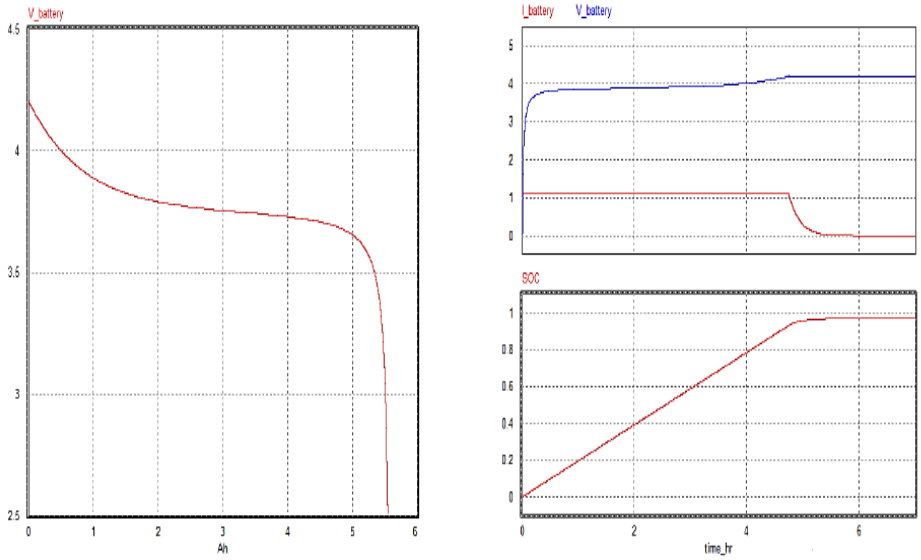
www.powerplantac.com

مدار مربوط به شارژ باتری نیز به‌صورت زیر طراحی می‌شود:



(شکل ۱۱.۱۶): مدار شارژ باتری

معمولا مدار واقعی شارژ باتری شامل یک مدار کنترل جریان ا ست که جریان شارژ و ولتاژ باتری را کنترل می‌کند. مدار فوق شکل بسیار ساده شده‌ی یک مدار شارژ واقعی ا ست. فرایند شارژ شامل دو مرحله ا ست: شارژ با جریان ثابت و شارژ با ولتاژ ثابت. در مرحله‌ی اولیه‌ی شارژ جریان شارژ به ۱/۱ آمپر محدود شده است و زمانی که ولتاژ باتری به ۴/۲ ولت نزدیک شود، مرحله‌ی شارژ با ولتاژ ثابت آغاز می‌شود. نمودارهای زیر م شخ صه‌های د شارژ و شارژ باتری را بر ا ساس پارامترهای اولیه نمایش می‌دهند که از شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند.



(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 شـــارژ می‌شـــود، ولتاژ اولیه‌ی باتری باید زمانی به مقدار حداکثر برسد که حالت شارژ صد در صد می شود 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 دیتا شیت به صورت تقریبی خوانده می‌شـــود. افزایش جزیی E_{top} ســـرعت تغییرات ولتاژ را به‌ویژه در شـــروع 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 دیتاشـــیت به‌صـــورت تقریبی خوانده می‌شود. افزایش جزیی 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 برســـد در آن باتری کامل شارژ نشده است ($SOC<۱۰۰٪$). هم‌چنین اگر مقدار Q_{max} خیلی زیاد یا

www.powerplantac.com

مقدار Q_{nom} خیلی پایین باشد، گوشه‌ی منحنی تخلیه در انتهای ناحیه‌ی نامی گردتر می‌شود در غیر این‌صورت 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 پی س سن

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