



دانشگاه مهندسی برق

# دستورالعمل آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱

تهیه کنندگان:

زهرا نصیری قیداری

محمد رضا ذوالقدری

ویرایش ۱-۴، بهمن ماه ۱۳۹۱

**در اینجا از زحمات کلیه اساتید و دانشجویانی که در تهیه و تدوین این جزوه همکاری داشته‌اند؛ تشکر می‌شود. اسامی برخی از این همکاران عبارت است از: آقایان مهندس سعید عونی، دکتر محمود شهبازی، مهندس سجاد توحیدی و مهندس احسان داوری نژاد**

شماره صفحه

عنوان

ب	مقدمه
۱	قوانین آزمایشگاه
۳	آشنایی با تجهیزات آزمایشگاه
۷	آزمایش ۱: بررسی عملکرد ترانسفورماتور تکفاز
۱۵	آزمایش ۲: بررسی اتصالات و عملکرد ترانسفورماتور سه فاز
۲۳	آزمایش ۳: تعیین مشخصه‌های ماشین سنکرون
۳۷	آزمایش ۴: راه‌اندازی و مشخصه خروجی موتور القایی با رتور سیم‌پیچی شده
۴۵	آزمایش ۵: راه‌اندازی، بدست آوردن پارامترها و مشخصه خروجی موتور القایی قفس سنجابی
۵۶	آزمایش ۶: تعیین مشخصه‌های موتور DC سری و شنت

پیوست‌ها

۷۳	پیوست ۱: شبیه‌سازی راه‌اندازی و کنترل سرعت موتورهای سنکرون آهنربای دایم (PMSM)
۷۸	پیوست ۲: شبیه‌سازی راه‌اندازی و کنترل سرعت موتورهای القایی
۸۴	پیوست ۳: شبیه‌سازی عملکرد راه‌اندازی و ترمز موتور DC
۹۳	پیوست ۴: خطرات انرژی الکتریکی و حفاظت در برابر آنها
۹۹	پیوست ۵: کمک‌های اولیه به فرد برق‌گرفته

این دستورالعمل به تدریج و با همکاری اساتید و دانشجویان دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف تهیه شده است. مطالب ارائه شده در آن منطبق با سرفصل‌های درس تبدیل انرژی (۱) است و به منظور ارائه هم‌زمان آزمایشگاه تبدیل انرژی (۱) با درس آن، تهیه شده است. در ابتدای هر آزمایش بخش‌های "آماده‌سازی جهت آزمایش" و "شبیه‌سازی" در نظر گرفته شده که دانشجویان محترم باید قبل از حضور در آزمایشگاه به سوالات و خواسته‌های آنها پاسخ دهند و نتایج را به صورت پیش‌گزارش تحویل نمایند. بخش شبیه‌سازی بر اساس استفاده از نرم‌افزار MATLAB-Simulink طراحی شده است و به نحوی تدوین گردیده که برای کسانی که با این نرم‌افزار آشنایی قبلی ندارند هم مفید باشد.

دانشجوی عزیز، ضمن خوشامد به شما برای ورود به آزمایشگاه تبدیل انرژی، خواهشمند است جهت استفاده بهینه از تجهیزات آزمایشگاه و جلوگیری از خطرات احتمالی، به موارد زیر توجه فرمایید.

- (۱) کمک‌های اولیه به فرد برق گرفته را بیاموزید. نحوه این کمک‌ها به صورت پیوست، در انتهای این گزارش کار آمده است.
- (۲) روی تمام میزها کلید قطع اضطراری وجود دارد؛ محل این کلید را از مسئول آزمایشگاه سوال کنید. در صورت وقوع حادثه، برای قطع برق آزمایشگاه این دکمه اضطراری را فشار دهید تا برق کلیه مدارها قطع شوند.
- (۳) در دیوارهای اطراف آزمایشگاه کپسول آتش‌نشانی نصب شده است. محل این کپسول‌ها را شناسایی کنید. طرز کار با آنها را بیاموزید و در صورت بروز حریق از آنها استفاده کنید.
- (۴) به قسمت‌هایی از مدار که احتمال برق گرفتگی در آنها وجود دارد (از قبیل سیم‌های لخت ترمینال‌ها، کلیدها و ...) دست نزنید.
- (۵) در آزمایشگاه و حین انجام آزمایش از خوردن و آشامیدن بپرهیزید.
- (۶) صحبت کردن با تلفن همراه در آزمایشگاه ممنوع می‌باشد.
- (۷) تاخیر بیش از پنج دقیقه در ورود به آزمایشگاه غیبت محسوب می‌شود.
- (۸) غیبت از آزمایشگاه حداکثر یک جلسه و با اطلاع استاد درس ممکن است و غیبت بیش از آن به منزله نمره صفر می‌باشد. به هر حال دانشجوی موظف به جبران آزمایش‌های عقب افتاده است.
- (۹) پیش از انجام آزمایش، دستورکار مربوط به آن را به دقت مطالعه فرمایید و از درک مطالب آن مطمئن شوید. زیرا قبل از آزمایش و در ضمن آن از شما سوالاتی خواهد شد.
- (۱۰) پیش از برقرار کردن مدار، همه اعضای گروه باید مدار را بررسی کنند. بعد از کنترل مدار توسط استاد، دستیار ایشان و یا مسئول آزمایشگاه، آن را به برق وصل نمایید.
- (۱۱) میزهای آزمایشگاه فقط جهت گذاشتن دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد، لذا از گذاشتن هر چیز دیگری که مربوط به آزمایش نمی‌باشد (کیف، تلفن همراه، لباس و ...) خودداری کنید.
- (۱۲) حین انجام آزمایش مراقب باشید لباس یا چادر شما به اجزای گردنده گیر نکنند.
- (۱۳) قبل از تغییر اتصالات مدار یا دستگاه‌های اندازه‌گیری، تغذیه مدار را قطع کنید.
- (۱۴) خراب شدن و یا از کار افتادن دستگاه‌ها را در حین انجام آزمایش به مسئول آزمایشگاه اطلاع دهید.
- (۱۵) پس از اتمام آزمایش مدار مورد آزمایش را باز کرده و سیم‌های بکار رفته و دستگاه‌های اندازه‌گیری را به صورت مرتب در محل‌های مربوطه قرار دهید.
- (۱۶) در هر موردی که دچار تردید شدید، از استاد درس، دستیار ایشان و یا مسئول آزمایشگاه سوال کنید.

۱۷) سیم‌های اضافی را از روی میز جمع کنید و مراقب باشید هیچ سیمی در مدار آزمایش بدون اتصال نباشد.

۱۸) از قدم زدن و جابجایی بی مورد که باعث اشتباه خود شما و پرت شدن حواس همکارانتان می‌شود؛ خودداری نمایید.

۱۹) هر دانشجو، پیش از انجام آزمایش باید پیش‌گزارشی شامل پاسخگویی به سوالات بخش "آماده‌سازی جهت آزمایش" تحویل دهد.

۲۰) هر گروه باید برای هر آزمایش گزارش جداگانه‌ای تحویل دهد که این گزارش شامل مطالب زیر می‌باشد:

- تاریخ آزمایش، ساعت شروع و خاتمه آزمایش

- هدف از آزمایش

- تئوری مربوط به آزمایش

- نحوه اجرای آزمایش

- مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده

- رسم نمودار و بحث در نتایج بدست آمده

- پاسخگویی به بخش "پرسش و محاسبه" در هر آزمایش

۲۱) حداکثر مهلت تحویل گزارش، یک هفته پس از انجام آزمایش خواهد بود.

۲۲) نمره نهایی آزمایشگاه، ترکیب نمرات امتحان کتبی، امتحان عملی، پیش‌گزارش‌ها، گزارش‌ها و پروژه تحقیقاتی (در صورت وجود) می‌باشد.

### ۱- مقدمه

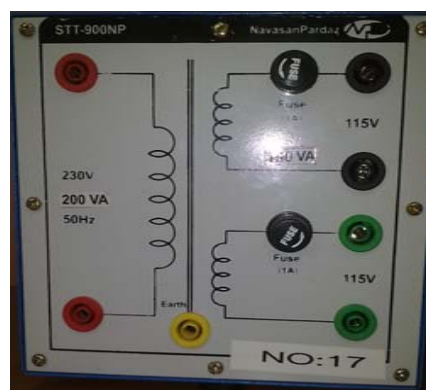
آزمایشگاه تبدیل انرژی (ماشین‌های الکتریکی و مبانی مهندسی برق) یکی از قدیمی‌ترین آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی برق است که به طور متوسط در هر سال ۲۰۰ دانشجوی رشته مهندسی برق در آزمایشگاه تبدیل انرژی (۱)، ۱۲ دانشجوی رشته مهندسی برق- قدرت در آزمایشگاه تبدیل انرژی (۲) و ۴۸ دانشجوی مهندسی مکانیک در آزمایشگاه مبانی مهندسی برق از آن استفاده می‌کنند.

### ۲- آشنایی با برخی تجهیزات آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱

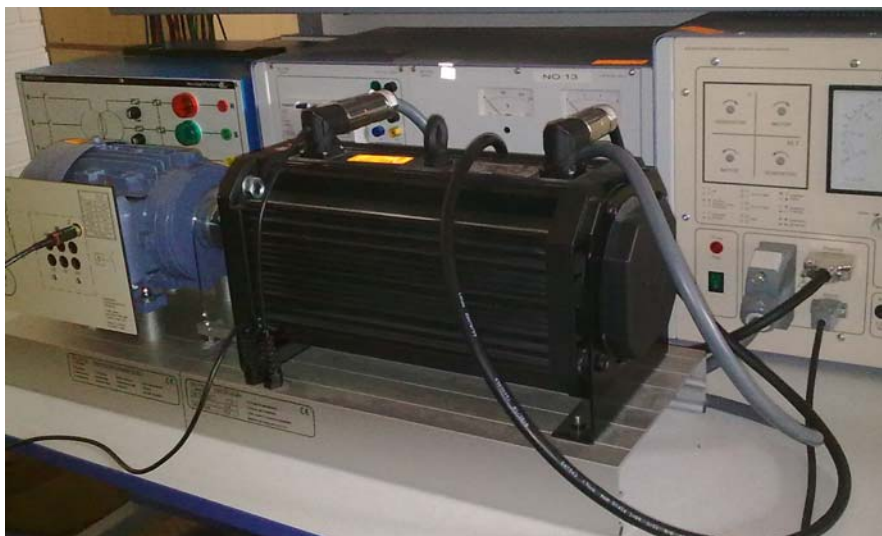
این تجهیزات شامل انواع ماشین‌های الکتریکی و تجهیزات اندازه‌گیری است.

#### الف) ماشین‌های الکتریکی

ترانسفورماتورهای مورد استفاده در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱، ساخت شرکت ایرانی نوسان پرداز است که نمونه آنها در شکل ۱، نشان داده شده است. ماشین‌های الکتریکی گردان مورد استفاده در این آزمایشگاه نیز ساخت شرکت آلمانی ELWE است. نمونه‌ای از ماشین‌های متعلق به این شرکت، در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه ترانسفورماتورهای تک‌فاز و سه فاز مورد استفاده در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱



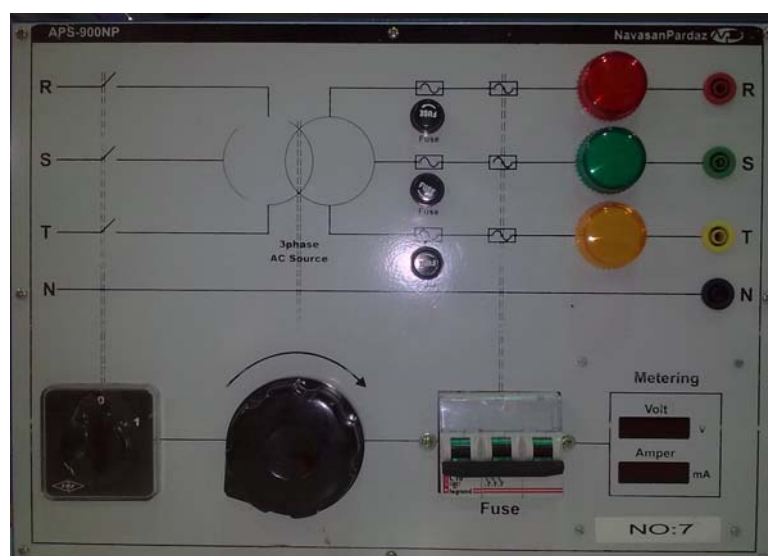
شکل ۲: نمونه‌ای از ماشین‌های الکتریکی گردان مورد استفاده در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱

## ب) سایر تجهیزات

در این قسمت برخی از تجهیزاتی که در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ معرفی می‌شوند.

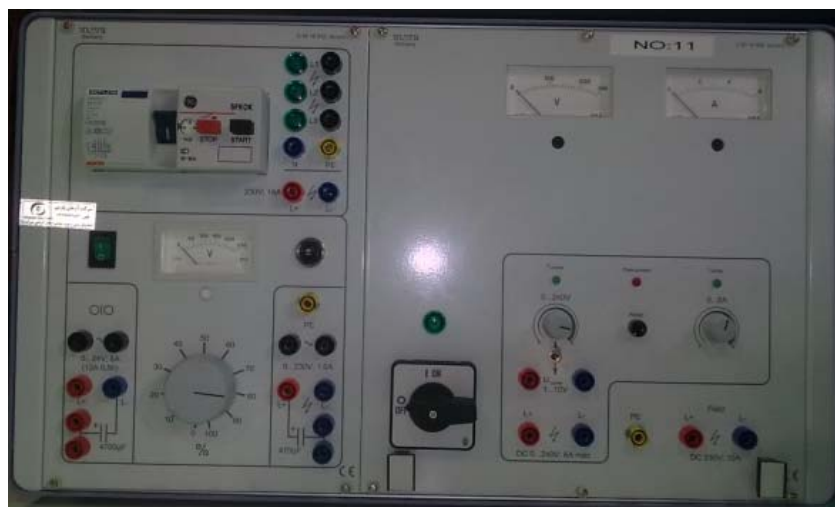
### ۱- منابع تغذیه

دو منبع تغذیه در این آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. منبع تغذیه متناوب متغیر سه فاز که توسط شرکت نوسان‌پرداز طراحی و ساخته شده است (شکل ۳-الف) و منبع تغذیه ساخت شرکت ELWE که در شکل ۳-ب، نشان داده شده است و به عنوان منبع تغذیه متناوب سه فاز ثابت و منبع تغذیه جریان مستقیم متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(الف)



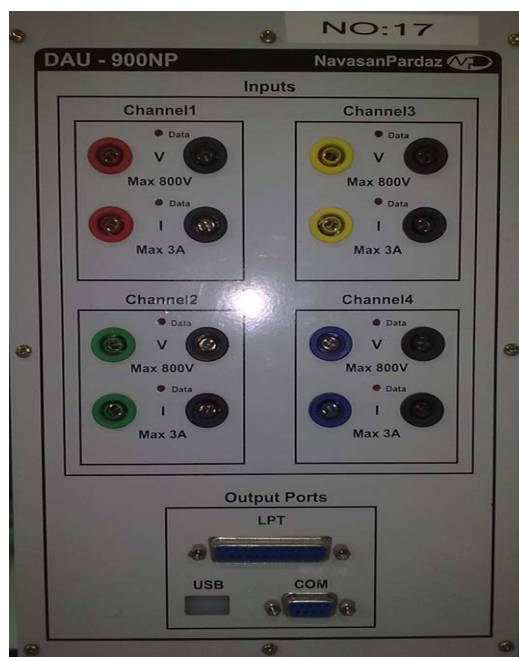


(ب)

شکل ۳: منابع تغذیه مورد استفاده در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱: (الف) منبع تغذیه متناوب متغیر و (ب) منبع تغذیه متناوب و جریان مستقیم

## ۲- دستگاه اندازه‌گیری ۴ کاناله

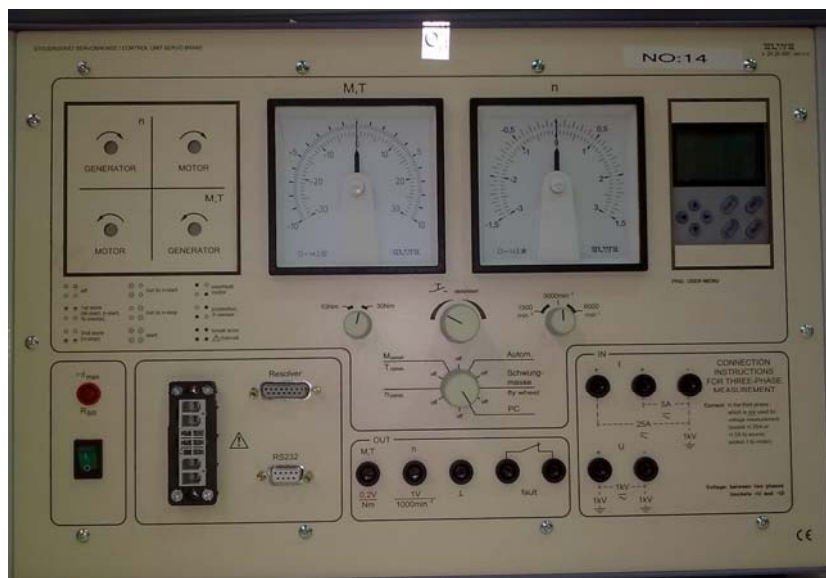
شکل ۴، دستگاه اندازه‌گیری چهار کاناله، ساخت شرکت نوسان‌پرداز را نشان می‌دهد. این دستگاه برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان متناوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ضمن، می‌توان اکتیو و راکتیو و ضریب توان را نیز محاسبه نماید. بدین منظور لازم تا دستگاه به رایانه متصل و از طریق رایانه شناسایی و فعال شده باشد.



شکل ۴: دستگاه اندازه‌گیری ۴ کاناله

### ۳- کنترل کننده سرو

شکل ۵، کنترل کننده چهار ربعی ساخت شرکت ELWE را نشان می‌دهد که برای کنترل سرو موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵: سرو درایو

### ۴- بار

برای تامین بار ژنراتور و ترانسفورماتور، از بارهای اهمی، سلفی و خازنی استفاده می‌شود. شکل ۶، نمونه این بارها را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمونه بارهای موجود در آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱



آزمایش ۱:

بررسی عملکرد ترانسفورماتور تکفاز



## ۱-۱ هدف آزمایش

هدف از انجام این آزمایش، به دست آوردن مشخصه‌های بی‌باری و با بار ترانسفورماتور تکفاز و نیز مدار معادل آن است. همچنین، شکل موج جریان تحریک ترانسفورماتور مشاهده خواهد شد.

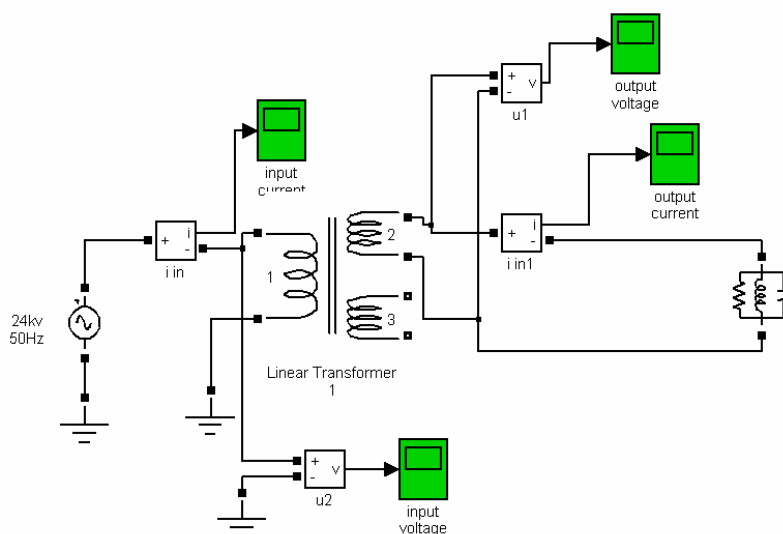
## ۱-۲ آماده‌سازی جهت آزمایش

- انواع تلفات در ترانسفورماتور را ذکر کرده و در مورد روش اندازه‌گیری آنها بحث کنید.
- شکل موج جریان بی‌باری ترانسفورماتور تکفاز را رسم کنید و در مورد آن بحث نمایید.
- مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز را رسم کنید و روش به دست آوردن پارامترهای مدار معادل را بیان نمایید.
- چگونه می‌توان تلفات فوکو را کاهش داد؟
- تفاوت بین ترانسفورماتورهای زرهی<sup>۱</sup> و هسته‌ای<sup>۲</sup> را بنویسید.
- دیاگرام برداری ترانسفورماتور با بار القایی را رسم نمایید.
- بازده روزانه ترانسفورماتور چگونه به دست می‌آید؟
- چرا معمولاً آزمایش بی‌باری را با تغذیه از طرف فشار ضعیف و آزمایش اتصال کوتاه را با تغذیه از طرف فشار قوی انجام می‌دهند؟
- بخش شبیه‌سازی را انجام دهید و نتایج آن را، همراه با پیش‌گزارش تحویل دهید.

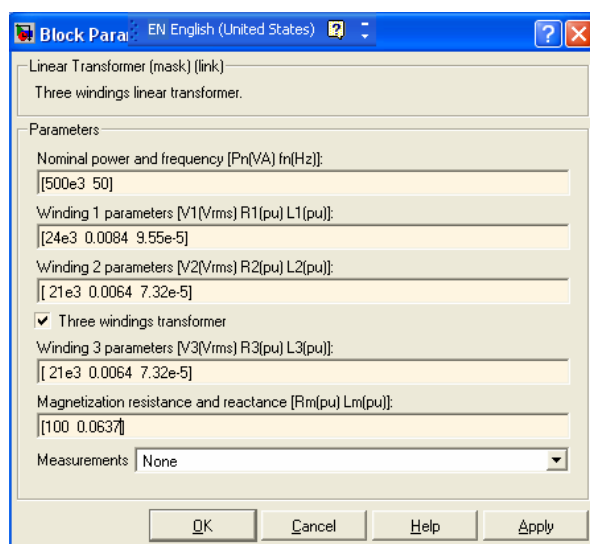
## ۱-۳ شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. برای این منظور نرم‌افزار را اجرا کنید. یک صفحه از جعبه‌افزار Simulink (از قسمت File\New\Model) باز کنید و آن را با نام LT1 ذخیره نمایید. سپس مدار شکل ۱، را با استفاده از باکس‌های موجود در SimPower Systems\Elements ایجاد نمایید. برای این منظور کتابخانه نرم‌افزار را از قسمت view\Library Browser باز کنید. سپس SimPower Systems\Elements\Linear Transformer را انتخاب کنید. روی Linear Transformer کلیک راست نمایید و گزینه Add to LT1 را انتخاب نمایید. روی شکل ترانسفورماتور دو بار کلیک کنید و پارامترهای آن را به صورت شکل ۲، تنظیم نمایید. سپس برای اضافه کردن منبع تغذیه از قسمت SimPower Systems\Electrical Sources روی AC Voltage Source کلیک کرده و به فایل شبیه‌سازی اضافه نمایید. با دوبار کلیک کردن روی منبع تغذیه، پارامترهای آن را به صورت شکل ۳، تنظیم کنید.

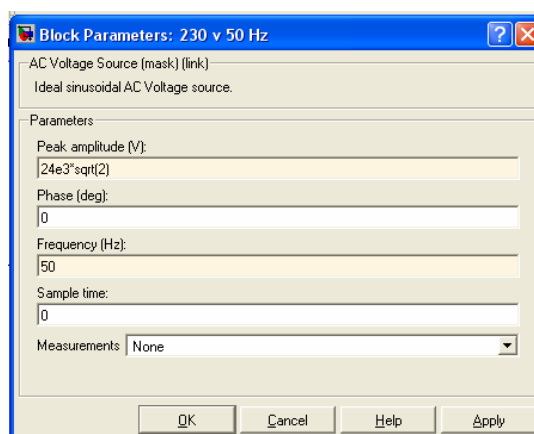
1 - Shell Type  
2 - Core Type



شکل ۱: مدار شبیه‌سازی برای آزمایش ترانس تکفاز

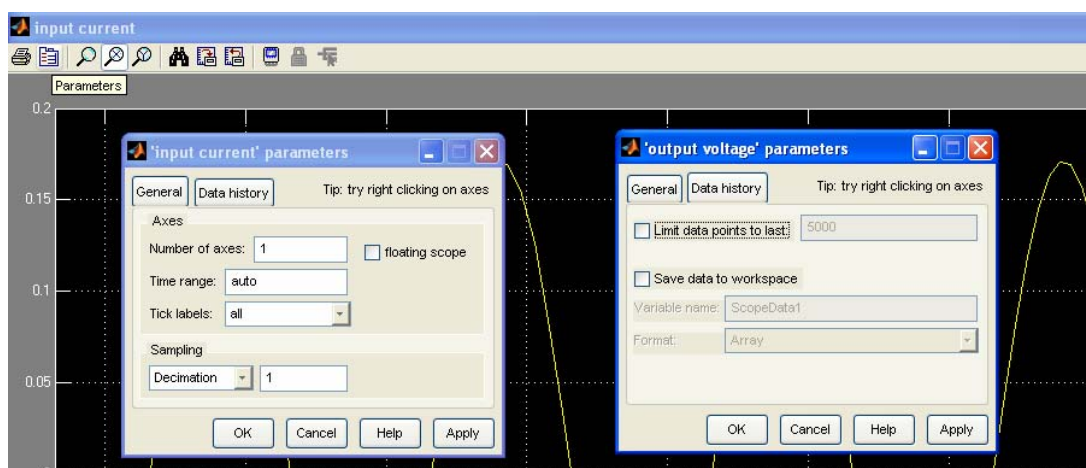


شکل ۲: پارامترهای ترانسفورماتور



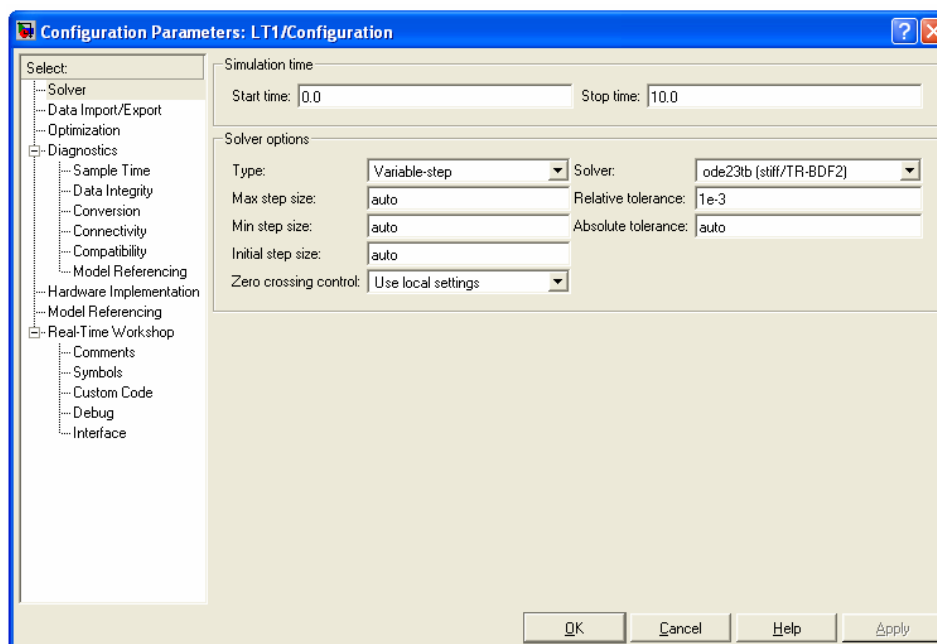
شکل ۳: پارامترهای منبع تغذیه

برای اضافه نمودن دستگاه‌های اندازه‌گیری (ولتاژ و جریان) به قسمت SimPower Systems\Measurements روی Current Measurement و Voltage Measurement کلیک کنید و به فایل شبیه‌سازی اضافه کنید. برای مشاهده شکل موج‌ها از اسکوپ (Simulink\Sinks\Scope) استفاده کنید و پارامترهای آن را به صورت زیر تنظیم نمایید:



شکل ۴: پارامترهای اسکوپ

از قسمت SimPower System\ Elements\ Ground المان زمین را به فایل شبیه‌سازی اضافه نمایید. سپس نوع حل مساله را از قسمت Simulation\ Configuration Parameters به صورت زیر تنظیم کنید:



شکل ۵: مشخصات حل مساله

در صورتی که از نسخه ۲۰۱۲ نرم افزار، استفاده می کنید؛ لازم است؛ نوع حل مساله را در بلوک PowerGUI از قسمت Configure Parameter آن Discrete با Sample time برابر  $5e-6$  تعیین کنید. در قسمت Solver نیز نوع حل مساله باید Discrete انتخاب گردد. سپس، برای اجرای شبیه سازی، از منوی Simulation گزینه Start را انتخاب کنید.

الف- با استفاده از مقادیر شکل ۲ مقادیر توان ظاهری ترانس، ولتاژ نامی سیم پیچ ها، جریان نامی سیم پیچ ها، مقادیر  $R_m$  و  $R_{eq}$ ،  $X_{eq}$ ،  $X_m$  را ابتدا بر حسب p.u. و سپس دیده شده از سمت سیم پیچ LV و در نهایت از دید سیم پیچ HV محاسبه نمایید (توجه کنید که مقدار اندوکتانس ها در شکل داده شده است نه مقدار راکتانس ها).

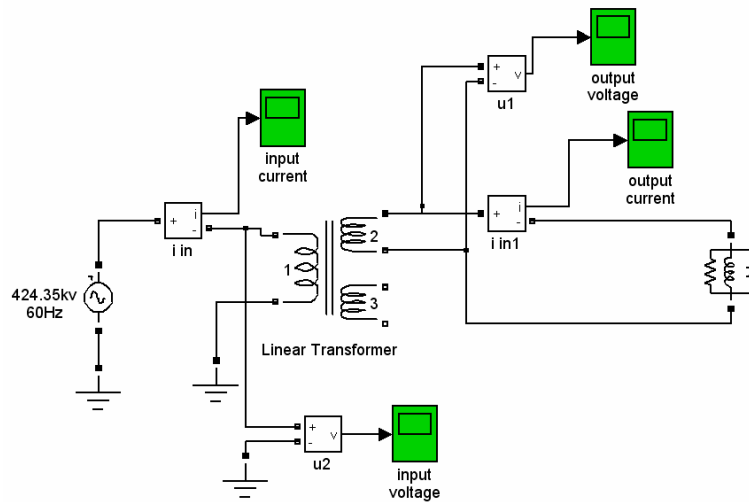
ب- با جابجا کردن آمپر متر و ولت متر، آزمایش های بی باری و اتصال کوتاه را شبیه سازی کنید و با استفاده از نتایج آن به سوالهای زیر پاسخ دهید:

۱- جریان سیم پیچ LV اگر اتصال کوتاه باشد در حالی که سیم پیچ HV با ولتاژ نامی تغذیه شده چقدر است.

۲- در صورتی که سیم پیچ LV اتصال کوتاه باشد، چه ولتاژی در سیم پیچ HV جریان این سیم پیچ را به جریان نامی آن محدود می کند. در این شرایط توان اکتیو و ضریب توان از دید منبع ولتاژ اعمال شده چقدر است. این ولتاژ چند درصد ولتاژ نامی این سیم پیچ است. در این شرایط جریان شاخه موازی ترانسفورماتور (جریان مغناطیس کنندگی) چقدر است و چند درصد جریان نامی است. در این شرایط جریان سیم پیچ LV چقدر است و چند درصد جریان نامی آن است. تلفات آهن در این شرایط چند درصد تلفات مسی می باشد.

۳- در صورتی که سیم پیچ HV مدار باز شده و سیم پیچ LV با ولتاژ نامی تغذیه شود؛ توان اکتیو و ضریب توان از دید منبع ولتاژ اعمال شده چقدر است؟ در این شرایط جریان شاخه موازی ترانسفورماتور (جریان مغناطیس کنندگی) چقدر است و چند درصد جریان نامی است. تلفات مسی در این شرایط چند درصد تلفات آهن می باشد.

ج- سپس برای انجام آزمایش باباری، مطابق شکل ۶، از قسمت SimPower System\ Elements بار RLC Loads را انتخاب کنید. توان اکتیو را ۱۵۰ کیلووات، توان راکتیو سلفی را ۱۵۰ کیلووار و توان راکتیو خازنی را ۱۳۰ کیلووار در نظر بگیرید. در حالی که سیم پیچ HV با ولتاژ نامی تغذیه شده است؛ شبیه سازی را در بار اهمی، اهمی-سلفی و اهمی- خازنی انجام دهید. ولتاژها و جریان های HV و LV. توان اکتیو و راکتیو تامین شده توسط منبع ولتاژ را در سه حالت با هم مقایسه نمایید.



شکل ۶: شبیه‌سازی آزمایش با باری

#### ۴-۱ انجام آزمایش

مقادیر نامی ترانسفورماتور را یادداشت کنید. سیم‌پیچ‌های LV و HV را شناسایی نمایید (توجه کنید که مجموع توان ظاهری دو سیم‌پیچ ثانویه، برابر توان ظاهری ترانسفورماتور است).

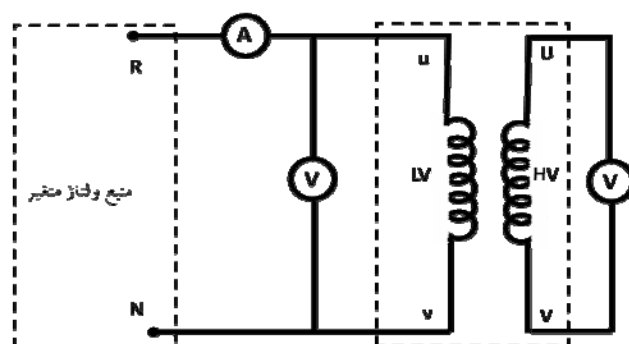
سیم‌پیچ فشار قوی (HV)		سیم‌پیچ فشار ضعیف (LV)		توان نامی
ولتاژ	جریان	ولتاژ	جریان	

#### ۴-۱-۱ آزمایش بی‌باری

مدار شکل ۷، را ببندید. یکی از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف ترانسفورماتور را شناسایی کنید و آن را به ولتاژ قابل تنظیم وصل کنید. در حالی که طرف فشار قوی مدار باز است؛ این ولتاژ را از صفر تا مقدار نامی تغییر دهید و مقادیر جریان، ولتاژ و توان اولیه و ولتاژ ثانویه را یادداشت کنید.

$V_1$										
$I_1$										
$P_1$										
$V_2$										





شکل ۷: شماتیک مداری آزمایش بی‌باری ترانسفورماتور

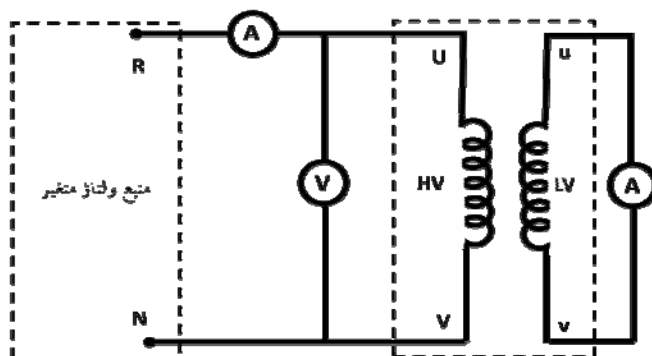
#### ۱-۴-۲ مشاهده شکل جریان بی‌باری

در نرم‌افزار ثبت نتایج از قسمت view وارد قسمت Diagram شوید و جریان بی‌باری ترانسفورماتور را در سه حالت ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۰٪ ولتاژ نامی رسم کنید.

#### ۱-۴-۳ آزمایش اتصال کوتاه

مدار شکل ۸، را ببندید. توجه کنید که قبل از شروع آزمایش، ولتاژ تغذیه صفر باشد. در این آزمایش حداکثر ولتاژ اعمالی، کمتر از ده درصد مقدار نامی است بنابراین ولتاژ اولیه را به آرامی افزایش دهید و جریان فشار قوی ترانسفورماتور را تا جریان نامی برسانید جدول زیر را کامل کنید.

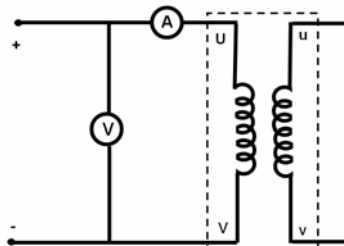
$V_1$										
$I_1$										
$P_1$										
$I_2$										



شکل ۸: شماتیک مداری آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور

#### ۴-۴-۱ تست DC

برای اندازه‌گیری مقاومت سیم‌پیچی فشار قوی، از تست DC استفاده می‌کنیم. مدار شکل ۹، را ببندید و ولتاژ DC را تا مقدار ۷ ولت، افزایش دهید. سپس مقدار جریان را یادداشت کنید. از حاصل تقسیم ولتاژ به جریان مقدار مقاومت را محاسبه کنید.



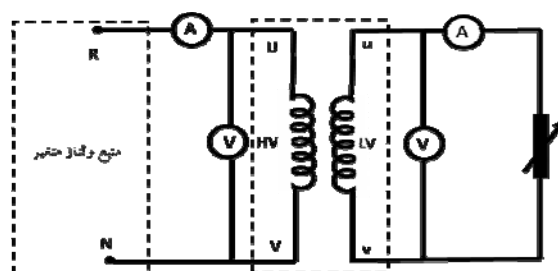
شکل ۹: شماتیک مداری آزمایش اندازه‌گیری مقاومت اهمی

#### ۴-۵-۱ آزمایش باباری

مدار آزمایش را مطابق شکل ۱۰، ببندید (برای تامین جریان نامی هر سه بار مقاومتی را موازی کنید). ولتاژ اولیه را برابر ولتاژ نامی تنظیم کنید و در طول آزمایش ثابت نگه دارید. یک بار اهمی، به ثانویه وصل کنید و جریان آن را از صفر تا جریان نامی ثانویه افزایش دهید. در هر مرحله مقادیر جریان اولیه و ثانویه، ولتاژ ثانویه و توان‌های اولیه و ثانویه را یادداشت کنید.

ثابت  $V_1 = \dots$

$I_1$										
$P_1$										
$V_2$										
$I_2$										
$P_2$										



شکل ۱۰: شماتیک مداری آزمایش باباری ترانسفورماتور

۱-۵ پرسش و محاسبه

- ۱) منحنی بی‌باری ترانسفورماتور را رسم کنید. هسته در چه ولتاژی به اشباع می‌رود؟
- ۲) با استفاده از نتایج آزمایش باباری، رگولاسیون ولتاژ را در بار نامی بدست آورید.
- ۳) با استفاده از نتایج آزمایش‌های بی‌باری و بارداری، تلفات آهنی و مسی را محاسبه کنید. بازده ایده‌آل در چه درصدی از بار نامی رخ می‌دهد؟
- ۴) با استفاده از نتایج دو آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه، پارامترهای مدار معادل را در سمت فشار قوی محاسبه کنید.
- ۵) با استفاده از آزمایش باباری، بازده ترانسفورماتور را در هر نقطه کار محاسبه کنید و تغییرات آن را بر حسب جریان بار رسم و در مورد آن بحث نمایید. آیا بهترین بازده با نتیجه پرسش (۳) همخوانی دارد؟
- ۶) در مورد شکل موج جریان بی‌باری ترانسفورماتور و علت تفاوت بین سه شکل موج به دست آمده بحث کنید.



**آزمایش ۲:**

**بررسی اتصالات و عملکرد ترانسفورماتور سه فاز**



## ۱-۲ هدف آزمایش

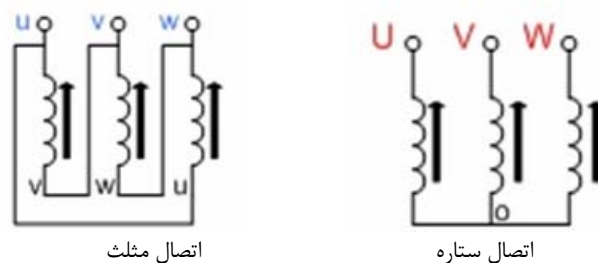
در این آزمایش یک ترانسفورماتور سه فاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. اتصالات مختلف آن بررسی شده و اثر بارهای اهمی، سلفی و خازنی روی تنظیم ولتاژ آن مطالعه می‌گردد. همچنین روش دو واتمتری در تعیین توان سه فاز معرفی می‌شود.

## ۲-۲ آماده‌سازی جهت آزمایش

- در یک ترانسفورماتور با تعداد دور اولیه  $N_1$  و ثانویه  $N_2$ ، نسبت ولتاژ خط ثانویه به اولیه را در حالتی که اولیه ستاره و ثانویه نیز ستاره سربندی شده است؛ بدست آورید. همین کار را برای حالتی که ثانویه مثلث سربندی شده است نیز تکرار کنید.
- مرحله قبل را با فرض اولیه مثلث تکرار کنید.
- چرا قبل از بستن کامل مثلث باید ولتاژ مثلث باز اندازه‌گیری شود.
- با صرف‌نظر از امپدانس شاخه عرضی، نمودار فازوری یک ترانسفورماتور سه فاز را در بار مختلط پیش‌فاز رسم نمایید و در مورد رگولاسیون ولتاژ آن بحث کنید.
- نشان دهید که در یک سیستم سه فاز سه سیمه، توان حقیقی را می‌توان با دو واتمتر تک‌فاز اندازه‌گیری نمود.
- بخش شبیه‌سازی را انجام دهید و نتایج آن را، همراه با پیش‌گزارش تحویل دهید.

## ۳-۲ شبیه‌سازی

در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/ Simulink اتصالات مختلف یک ترانسفورماتور سه‌فاز و عملکرد تحت بار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱ نحوه سربندی ترانسفورماتور سه فاز به صورت ستاره و مثلث را نشان می‌دهد.

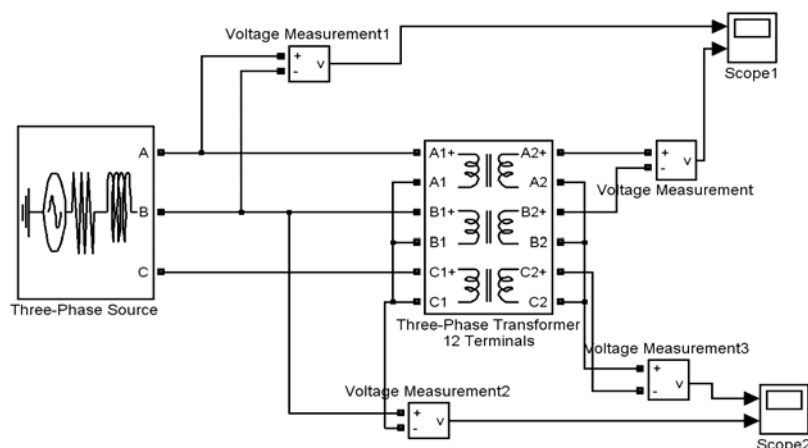


شکل ۱: نحوه اتصال ستاره و مثلث

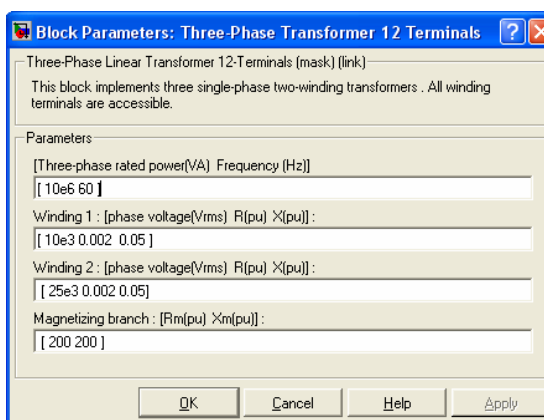
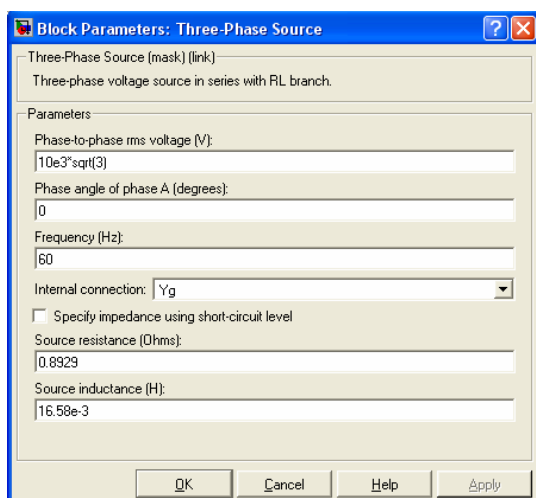
## ۱-۳-۲ بررسی اتصالات مختلف ترانسفورماتور

یک صفحه Simulink باز کنید و مدار شکل ۲ را رسم نمایید. پارامترهای ترانسفورماتور و منبع تغذیه را به صورت شکل ۳ تنظیم نمایید و نوع Solver را ode23t انتخاب کنید. در صورتی که

از نسخه ۲۰۱۲ نرم افزار، استفاده می کنید؛ لازم است؛ نوع حل مساله را در بلوک PowerGUI قسمت Configure Parameter آن Discrete با Sample time برابر 5e-6 تعیین کنید. در قسمت Solver نیز نوع حل مساله باید Discrete انتخاب گردد.



شکل ۲: مدار شبیه سازی برای بررسی اتصالات مختلف ترانسفورماتور



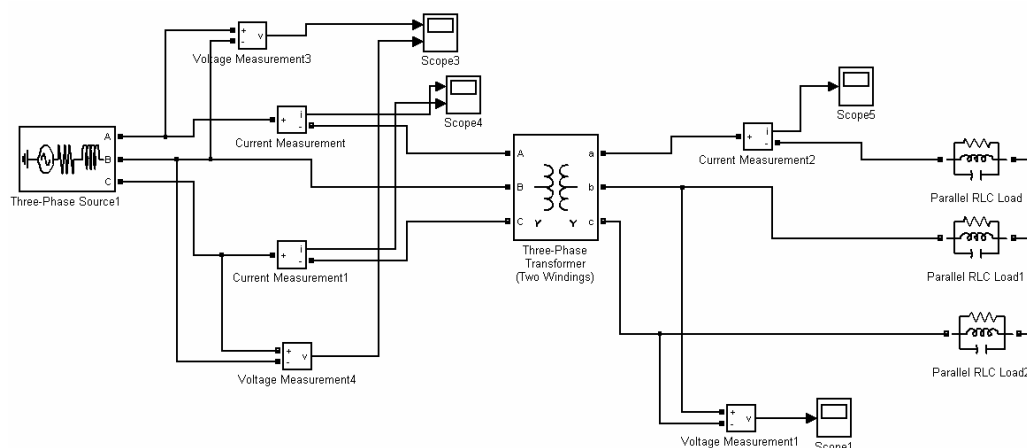
شکل ۳: پارامترهای ترانسفورماتور سه فاز و منبع تغذیه

شبیه سازی را در شرایط زیر انجام دهید:

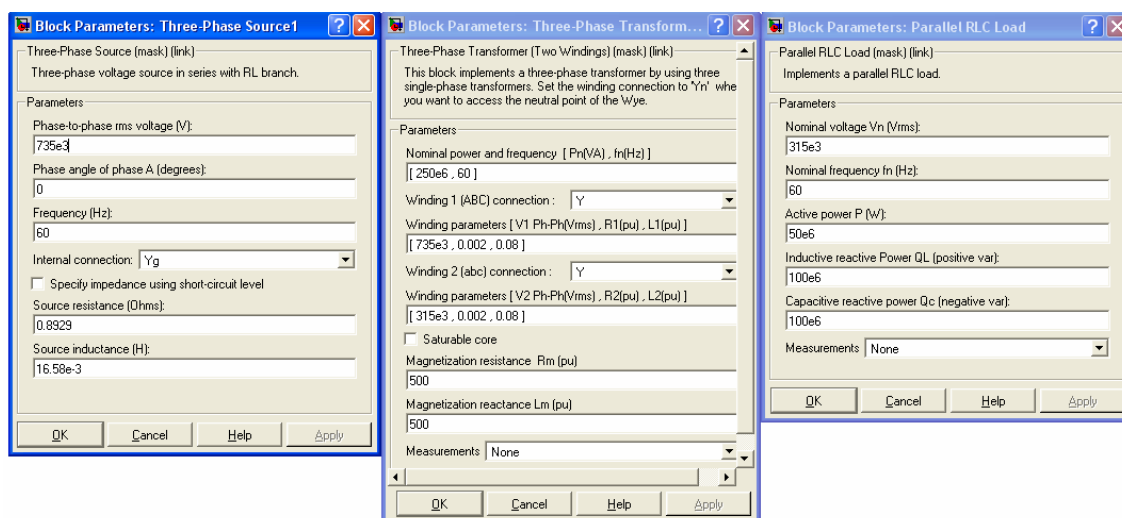
- اولیه و ثانویه ترانسفورماتور را به صورت ستاره سربندی کنید (مانند شکل ۲) و ولتاژ خط و فاز اولیه و ثانویه را مشاهده نمایید.
- اتصال ثانویه را در حالت مثلث قرار دهید. مثلث را باز کنید و ولتاژ مثلث باز را مشاهده نمایید.
- مقادیر ولتاژهای فاز و خط (اولیه و ثانویه) را در این اتصال (ستاره به مثلث) مشاهده نمایید.
- اولیه را به صورت مثلث ببندید و با ثانویه ستاره و مثلث شبیه سازی را تکرار کنید.

## ۲-۳-۲ شبیه‌سازی حالت باری

مدار شکل ۴ را در محیط Simulink رسم کنید. پارامترهای منبع تغذیه، ترانسفورماتور و بار را به صورت شکل ۵، تنظیم نموده و نوع Solver را ode23t انتخاب نمایید.



شکل ۴: مدار شبیه‌سازی در حالت باری



شکل ۵: پارامترهای منبع تغذیه، ترانسفورماتور و بار

شبیه‌سازی را با بار اهمی (در این شرایط مقدار QL و QC را در پارامترهای بار صفر انتخاب کنید)، بار اهمی-القایی (در این شرایط مقدار QC را در پارامترهای بار صفر انتخاب کنید) و بار اهمی-خازنی (در این شرایط مقدار QL را در پارامترهای بار صفر انتخاب کنید) انجام دهید. با توجه به اینکه برای اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو در سیستم سه فاز می‌توان از دو واتمتر تکفاز نیز استفاده کرد (روش دو واتمتری)، دو واتمتر تکفاز به اولیه ترانسفورماتور شکل ۴، اضافه کنید و شبیه‌سازی را با بار اهمی، اهمی-القایی و اهمی-خازنی، تکرار کنید.

## ۲-۴ انجام آزمایش

مقادیر نامی ترانسفورماتور را یادداشت کنید و سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه را مشخص نمایید. در این آزمایش برای تغذیه ترانسفورماتور از یک اتوترانسفورماتور سه فاز استفاده می‌شود که از خروجی آن برای تغذیه سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور سه فاز مورد آزمایش، استفاده می‌شود.

## ۲-۴-۱ بررسی اتصالات مختلف ترانسفورماتور

- سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۲۳۰ ولت (تپ وسط) را انتخاب و به صورت ستاره سر بندی کنید. سیم‌پیچ ثانویه با مقدار نامی ۱۱۵ ولت را نیز به صورت ستاره ببندید. ولتاژ فاز اولیه را با استفاده از اتوترانسفورماتور، برابر ۲۳۰ ولت تنظیم کنید و مقادیر ولتاژ خط اولیه و ولتاژهای فاز و خط ثانویه را یادداشت کنید.
- اتصال ثانویه را در حالت مثلث قرار دهید. مثلث را باز کنید و یک ولت‌متر را در مسیر سری کنید و دوباره مثلث را ببندید. ولتاژ مثلث باز را اندازه گیری نمایید. اندازه این ولتاژ چقدر است. شکل ولتاژ را ببینید و در مورد آن توضیح دهید.
- مقادیر ولتاژهای فاز و خط (اولیه و ثانویه) را در این اتصال (ستاره به مثلث) اندازه‌گیری نمایید.
- اولیه را به صورت مثلث ببندید و با ثانویه ستاره و مثلث آزمایش را تکرار کنید.
- ولتاژ مثلث باز را در این حالت با حالت قبل مقایسه نمایید. شکل ولتاژ را ببینید و در مورد آن توضیح دهید.

## ۲-۴-۲ آزمایش باباری

آزمایش باباری، با استفاده از بار اهمی و بار مختلط (اهمی- سلفی و اهمی- خازنی) انجام می‌شود. در این آزمایش بازده و درصد تنظیم ولتاژ ترانسفورماتور قابل محاسبه است.

## الف) بار اهمی خالص

پیش از انجام آزمایش، در ثانویه ترانسفورماتور، دو سیم‌پیچ را با هم سری کنید تا ثانویه به مقدار نامی ۲۳۰ ولت برسد. ترانسفورماتور را به صورت اتصال ستاره به ستاره با نسبت تبدیل ۴۰۰ به ۲۳۰ ببندید. با توجه به اینکه اتصال ستاره به ستاره بدون سیم چهارم است اثبات کنید که چگونه می‌توان با دو وات‌متر تک‌فاز توان سه فاز را اندازه‌گیری نمود.

مطابق شکل ۶-الف، در ورودی ترانسفورماتور که از اتوترانسفورماتور می‌آید دو آمپر متر از کانال ۱ و ۲ سری کنید که به ترتیب جریان فاز ۱ و ۳ را بخواند. همچنین ولت‌متر موجود در کانال ۱ باید ولتاژ خط  $V_{12}$  و ولت‌متر کانال ۲ ولتاژ خط  $V_{32}$  را اندازه‌گیری نماید. بار مقاومتی را به صورت ستاره بسته و به ثانویه ترانسفورماتور وصل کنید و در یکی از فازها یک آمپر متر به منظور خواندن جریان خط بار قرار دهید. همچنین ولتاژ خط به خط خروجی را نیز توسط یک ولت‌متر اندازه‌گیری نمایید.



ولتاژ خط به خط اولیه را برابر مقدار ۳۸۰ ولت تنظیم کنید و آن را در طول آزمایش ثابت نگه دارید. با استفاده از بار اهمی، از ترانسفورماتور بار بگیرید. مقادیر جریان اولیه و ثانویه و ولتاژ اولیه و ثانویه و توان ورودی را در جدول زیر با تغییر مقدار مقاومت بار یادداشت کنید.

$$V_{L1} = 380 \text{ (volt)} = \text{ثابت}$$

$I_{11}$								
$I_{12}$								
$P_{11}$								
$P_{12}$								
$V_2$								
$I_2$								

#### ب) بار اهمی - سلفی (مختلط)

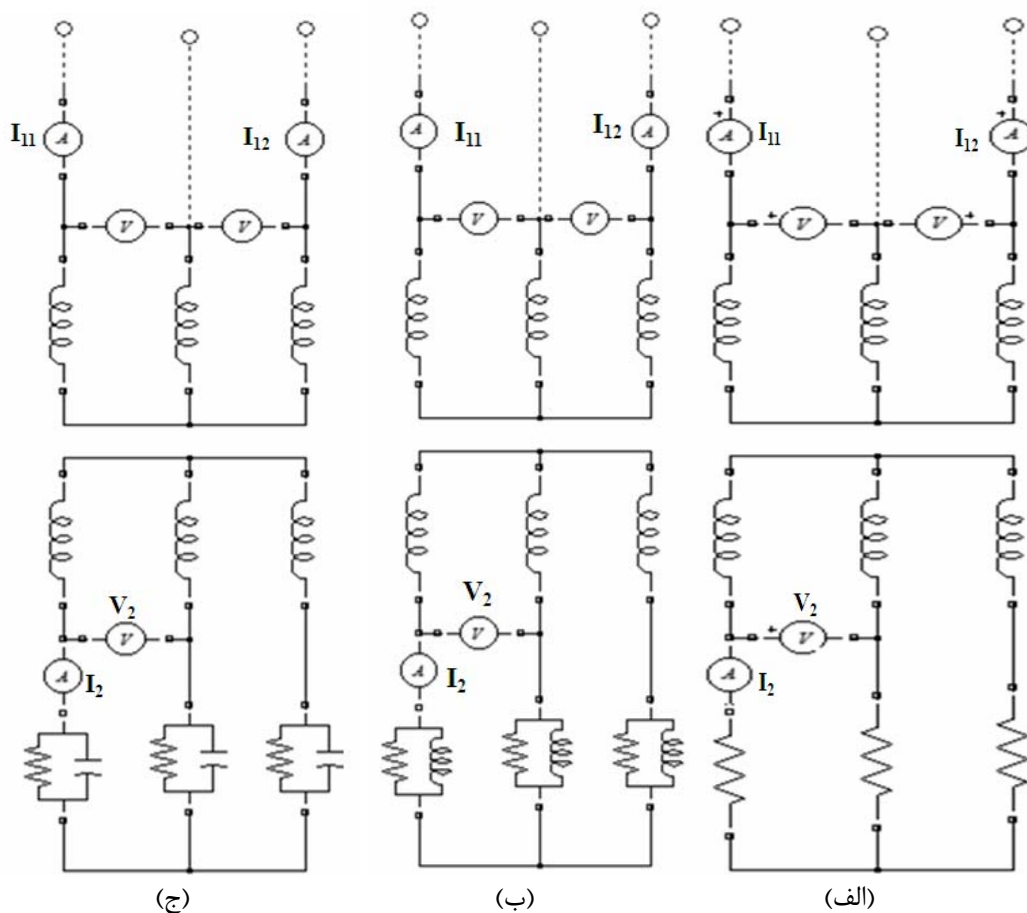
در این مرحله مطابق شکل ۶-ب، سه سلف را با سه مقاومت موازی و ترکیب را به صورت ستاره ببندید. سپس آن را به ثانویه ترانسفورماتور متصل نمایید. بار اهمی را در پله دوم قرار دهید و مقدار بار سلفی را در هر مرحله تغییر دهید و آزمایش قبل را تکرار کنید.

$I_{11}$								
$I_{12}$								
$P_{11}$								
$P_{12}$								
$V_2$								
$I_2$								

#### ج) بار اهمی - خازنی (مختلط)

در این مرحله مطابق شکل ۶-ج، سه خازن را با سه مقاومت موازی و ترکیب را به صورت ستاره ببندید. سپس آن را به ثانویه ترانسفورماتور متصل نمایید. بار اهمی را در پله دوم قرار دهید و مقدار بار خازنی را در هر مرحله تغییر دهید و آزمایش قبل را تکرار کنید.

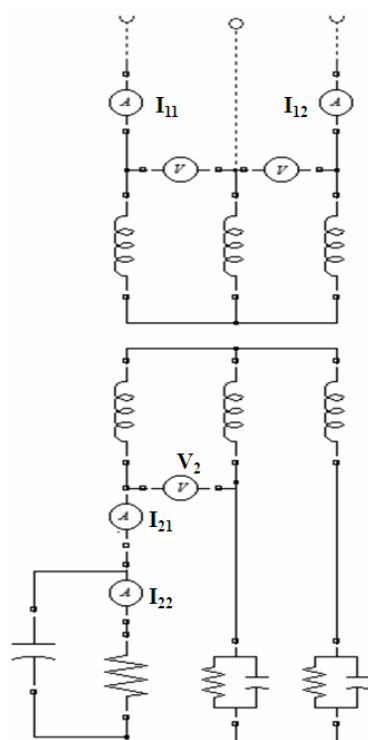
$I_{11}$								
$I_{12}$								
$P_{11}$								
$P_{12}$								
$V_2$								
$I_2$								



شکل ۶: مدارهای مربوط به آزمایش باباری

## ۲-۴-۳ تعیین ضریب توان

مطابق شکل ۷، به مدار شکل ۶-ج، یک آمپر متر اضافه کنید تا جریان مقاومتی را بخواند. حال مقدار مقاومت و خازن را آنقدر تغییر دهید تا ضریب توان  $0.5$  شود (چگونه می‌توان این کار را انجام داد؟) در این حالت مقادیر جریان‌های اولیه ( $I_{11}$  و  $I_{12}$ )، جریان‌های ثانویه ( $I_{21}$  و  $I_{22}$ )، ولتاژ اولیه ( $V_1$ ) و ثانویه ( $V_2$ ) و توان ورودی ( $P_{11}+P_{12}$ ) را یادداشت کنید.



شکل ۷: مدار آزمایش تعیین ضریب توان مشخص کردن  $I_{11}$  و  $I_{12}$

$V_1$	$I_{11}$	$I_{12}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$V_2$	$I_{21}$	$I_{22}$

## ۲-۵ پرسش و محاسبه

- (۱) در آزمایش ۲-۴-۱، نسبت ولتاژ ثانویه به اولیه را بدست آورید و با تئوری مقایسه کنید.
- (۲) رگولاسیون ولتاژ را در بار اهمی، به ازای مقادیر مختلف جریان محاسبه کنید.
- (۳) رگولاسیون ولتاژ را در بار مختلط (پسفاژ و پیشفاژ) محاسبه کنید و پس از مقایسه با بار اهمی علت اختلاف را شرح دهید.
- (۴) مشخصه خارجی ترانسفورماتور را در بار اهمی و مختلط (  $V_r = f(I_{r1})$  و  $V_r = f(I_{r2})$  ) رسم نمایید.



آزمایش ۳:

تعیین مشخصه‌های ماشین سنگرون

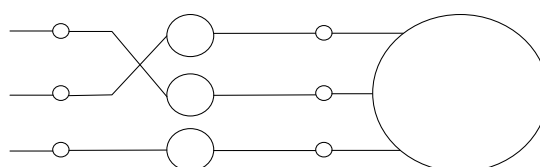


### ۱-۳- هدف آزمایش

در این آزمایش مشخصه مدار باز و اتصال کوتاه یک ماشین سنکرون به دست می‌آید. همچنین، مشخصه باباری ژنراتور تعیین و رفتار جریان اتصال کوتاه نسبت به تغییرات سرعت مشاهده می‌شود. سپس با فرآیند سنکرون کردن ماشین سنکرون با شبکه، آشنا می‌شوید. همچنین عملکرد ماشین سنکرون متصل به شبکه در دو حالت موتوری و ژنراتوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۳- آماده‌سازی جهت آزمایش

- ساختمان یک ژنراتور سنکرون را شرح دهید.
- انواع ژنراتور سنکرون را نام ببرید و موارد کاربرد هر یک را بیان کنید.
- مشخصه بی‌باری یک ژنراتور سنکرون را رسم کرده و در مورد شرایط استخراج آن توضیح دهید.
- مدار معادل ساده شده ژنراتور سنکرون را رسم کنید.
- با استفاده از مدار معادل، تاثیر تغییر سرعت را بر جریان اتصال کوتاه شرح دهید.
- شرایط لازم برای موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه را بیان کنید.
- منحنی V شکل ماشین سنکرون چیست؟
- روش دیگری در فرآیند سنکرون کردن با استفاده از سه لامپ با بستن لامپ‌ها به صورت شکل ۱ ممکن است. در این روش، چگونه می‌توان فهمید که شرایط سنکرونیزاسیون فراهم شده است؟ قبل از وصل کلید، چگونه می‌توان فهمید آیا ماشین سنکرون با سرعت بیشتر یا کمتر از سرعت سنکرون در حال چرخش است؟



شکل ۱: روش دو لامپی سنکرونیزاسیون ماشین سنکرون

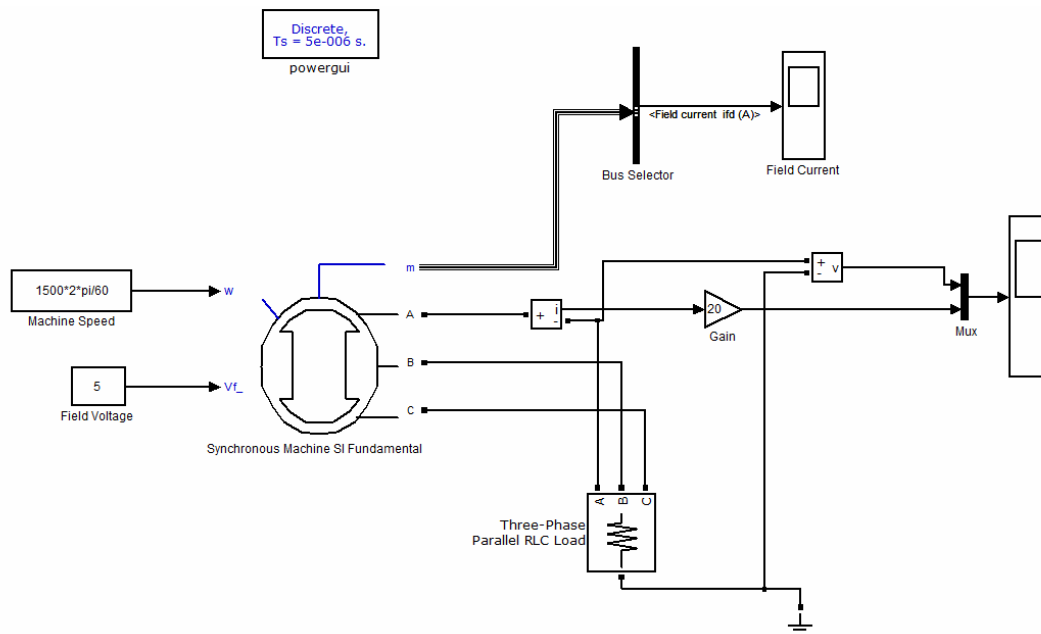
- اگر پس از موازی شدن ژنراتور سنکرون با شبکه، محرکی که محور ژنراتور را می‌چرخاند خاموش شود چه اتفاقی می‌افتد؟
- بخش شبیه‌سازی را انجام دهید و نتایج آن را، همراه با پیش‌گزارش تحویل دهید.

### ۳-۳- شبیه‌سازی

#### ۱-۳-۳- مشخصه با باری

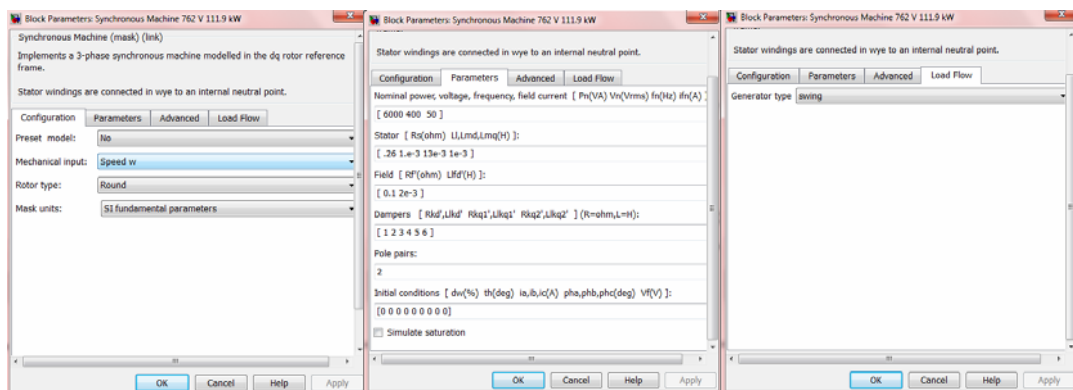
یک فایل جدید در Simulink باز کرده و مدار شکل ۲ را در آن ایجاد نمایید. در این مدار ژنراتور را از نوع Synchronous Machine SI Fundamental از کتابخانه SimPowerSystems/Machines انتخاب نمایید. همچنین نوع حل مساله را در بلوک PowerGUI از

قسمت Configure Parameter آن Discrete با Sample time برابر  $5e-6$  تعیین کنید. در قسمت Solver نیز نوع حل مساله باید Discrete انتخاب گردد. المان‌های Bus Selector و Mux در کتابخانه‌ی Simulink/Signal Routing در دسترس هستند.



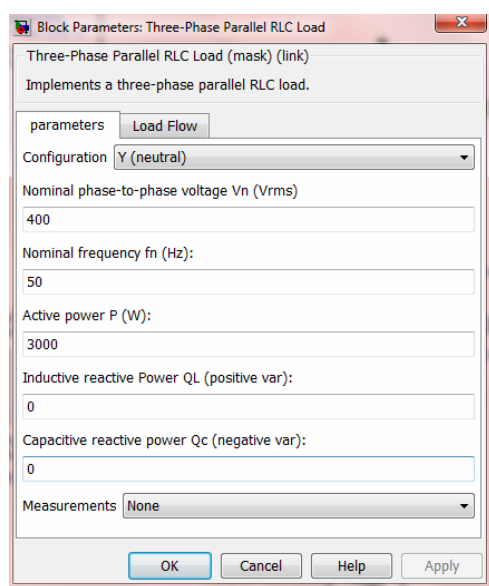
شکل ۲: مدار فایل simulink برای حالت با باری ژنراتور سنکرون

پارامترهای ژنراتور را به صورت زیر (شکل ۳) وارد نمایید:



شکل ۳: پارامترهای ژنراتور فایل simulink برای حالت با باری ژنراتور سنکرون

پارامترهای بار را نیز به صورت شکل ۴ تنظیم کنید:



شکل ۴: پارامترهای بار فایل simulink برای حالت با باری ژنراتور سنکرون

شبه سازی را به صورت زیر انجام دهید:

- (۱) مقدار توان راکتیو سلفی و خازنی را صفر کنید و در حالت مقاومتی با توان ۳۰۰۰ وات خالص شکل موج ولتاژ و جریان را مشاهده نمایید.
- (۲) با ثابت نگه داشتن مقدار توان اکتیو در ۳۰۰۰ وات، توان راکتیو سلفی را از مقدار ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ وار تغییر داده و شکل موج ولتاژ و جریان فاز را مشاهده نمایید.
- (۳) با ثابت نگه داشتن مقدار توان اکتیو در ۳۰۰۰ وات، توان راکتیو خازنی را از مقدار ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ وار تغییر داده و شکل موج ولتاژ و جریان فاز را مشاهده نمایید.
- (۴) با استفاده از بخش ۱ و ۳ منحنی ولتاژ بار بر حسب توان راکتیو بار را رسم کرده در مورد آن توضیح دهید.

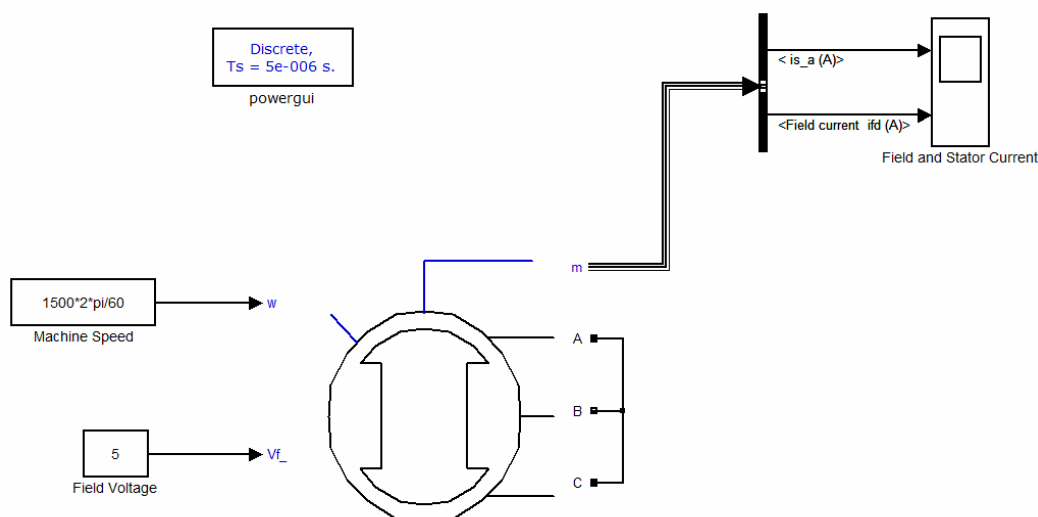
### ۳-۲-۳ مشخصه اتصال کوتاه

برای شبه‌سازی این قسمت مدار شکل ۵ را در فایل Simulink ایجاد و پارامترهای PowerGUI و Solver را همانند بخش قبل تنظیم نمایید. در این بخش نیز پارامترهای ماشین سنکرون را همانند بخش قبل وارد کرده و شبه سازی را به صورت زیر انجام دهید:

- (۱) مقدار ولتاژ تحریک را از یک ولت تا ۵ ولت تغییر داده و جریان استاتور را مشاهده کنید. نمودار ولتاژ تحریک بر حسب جریان استاتور را رسم نمایید و در مورد آن توضیح دهید.
- (۲) با قرار دادن ولتاژ تحریک در مقدار ۵ ولت، سرعت ماشین را از ۵۰۰ دور بر دقیقه تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه تغییر داده و شکل موج جریان استاتور را مشاهده نمایید. نمودار جریان استاتور بر حسب سرعت ماشین سنکرون را رسم نمایید و در مورد آن توضیح دهید.

۳) برای رسم نمودار جریان استاتور بر حسب پارامترهای ذکر شده باید مقدار rms این جریان را در نظر گرفت که از تقسیم مقدار ماکزیمم جریان استاتور بر  $\sqrt{2}$  حاصل می‌شود و یا می‌توان از یک آمپر متر استفاده نمود.

**نکته:** برای شبیه‌سازی این قسمت می‌توان برای تغییر پله‌ای ولتاژ تحریک و همچنین سرعت ماشین سنکرون از دستور Sim('File name') استفاده نمود. با این دستور فایل شبیه سازی Simulink با نامی که داخل دستور نوشته می‌شود، اجرا خواهد شد. با استفاده از بلوک To Workspace در کتابخانه Simulink/Sinks موجود است؛ می‌توان هر متغیری را به صورت Structure در Workspace در اختیار داشت که به این ترتیب با نوشتن یک حلقه در M-File و تکرار دستور Sim('File Name') در هر بار تکرار، ماکزیمم جریان استاتور و در نتیجه نمودار خروجی جریان استاتور بر حسب سرعت و جریان تحریک را به دست آورد.



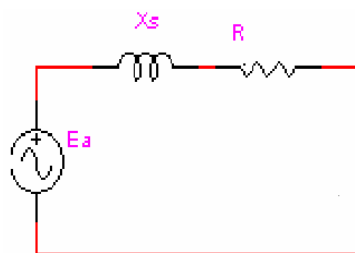
شکل ۵: مدار شبیه‌سازی حالت اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون

### ۳-۴- تئوری آزمایش

تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها به طور عمده توسط ژنراتورهای سنکرون صورت می‌گیرد. محور این ژنراتورها به محور توربین متصل بوده و توسط آن گردانده می‌شود. بر روی رتور سیم پیچ تحریک قرار دارد که توسط منبع DC تغذیه می‌شود و با چرخش رتور در یک سرعت ثابت (سنکرون) در سه سیم پیچ استاتور که با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند؛ ولتاژ سه فازی با فرکانس متناسب با سرعت سنکرون القا می‌کند.

در شکل ۶ مدار معادل تکفاز یک ژنراتور سنکرون در حالت کار دائمی که شامل ولتاژ داخلی ژنراتور ( $E_a$ )، مقاومت استاتور ( $R$ ) و راکتانس سنکرون ( $X_s$ ) آن می‌باشد؛ نشان داده شده است.





شکل ۶: مدار معادل بر فاز ژنراتور سنکرون

برای تعیین راکتانس سنکرون، از آزمایش‌های بی‌باری و اتصال کوتاه استفاده می‌شود. اگر ژنراتور سنکرون سه فاز در حالت مدار باز تحت سرعت سنکرون چرخانده شود؛ با تغییر جریان تحریک ( $I_f$ ) می‌توان ولتاژ خروجی ( $V_t$ ) و نیرو محرکه القایی را اندازه‌گیری کرد. زیرا در حالت مدار باز ( $V_t = E_a$ ) در این صورت می‌توان به مشخصه مدار باز<sup>۳</sup> ژنراتور دست یافت. این منحنی تغییرات  $E_a$  بر حسب  $I_f$  را نشان می‌دهد. خطی که بر قسمت خطی این منحنی مماس می‌شود؛ خط شکاف هوایی<sup>۴</sup> نام دارد. در آزمایش اتصال کوتاه، پایانه‌های ژنراتور سنکرون سه فاز را اتصال کوتاه می‌کنیم و ماشین را تحت سرعت سنکرون می‌چرخانیم. سپس جریان  $I_f$  را تغییر داده و تغییرات  $I_a$  بر حسب  $I_f$  را رسم می‌کنیم. این مشخصه، مشخصه اتصال کوتاه نام دارد. راکتانس سنکرون از تقسیم ولتاژ بی-باری بر جریان اتصال کوتاه به ازای جریان تحریک مشخص حاصل می‌شود.

اگر به ژنراتور سنکرون بار الکتریکی اعمال شود ولتاژ پایانه‌های آن به علت عبور جریان از امپدانس مدار معادل نسبت به ولتاژ بی‌باری متفاوت خواهد بود. بسته به نوع بار اعمال شده (اهمی، پس‌فاز و یا پیش‌فاز) اندازه این ولتاژ متفاوت خواهد بود. بار اهمی و سلفی ولتاژ را کمتر می‌کند در حالی که بار خازنی می‌تواند موجب افزایش ولتاژ در پایانه‌های ژنراتور گردد. به مشخصه ولتاژ پایانه-های ژنراتور نسبت به جریان استاتور مشخصه باباری یا خروجی ژنراتور گفته می‌شود.

ماشین‌های سنکرون جزو ماشین‌های AC محسوب می‌شوند و پس از موازی شدن با شبکه با سرعت ثابت و متناسب با فرکانس ولتاژ آرمیچر (با توجه به تعداد قطب‌های استاتور) می‌چرخند. این ماشین‌ها در هر دو حالت کاری موتور و ژنراتوری قابل استفاده‌اند. ساختمان ژنراتور و موتور سنکرون سه فاز شبیه یکدیگر است. ماشین‌های سنکرون در دو نوع رتور سیم‌پیچی شده و مغناطیس دائم ساخته می‌شوند. یکی از مزایای موتورهای سنکرون به خصوص نوع رتور سیم‌پیچی شده، این است که با کنترل جریان تحریک می‌توانند از شبکه توان راکتیو دریافت (حالت پس‌فاز یا اندوکتیو) و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کنند (حالت پیش‌فاز یا خازنی). ماشین‌های سنکرون با رتور سیم‌پیچی شده جزء ماشین‌های دو تحریکه محسوب می‌شوند؛ زیرا سیم‌پیچ رتور آنها توسط منبع DC تغذیه می‌شود و از سیم‌پیچ استاتورشان جریان AC می‌گذرد. شار شکاف هوایی در این ماشین‌ها نتیجه شارهای حاصل از جریان رتور و استاتور محسوب می‌شود. در حالی که موتورهای القایی همواره در حالت پس-

3- Open Circuit Characteristic

4- Air Gap Line

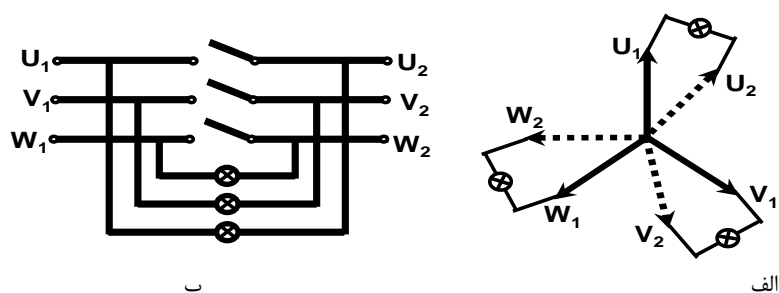
فاز کار می‌کنند اما در موتورهای سنکرون اگر مدار رتور جریان تحریک لازم را فراهم سازد؛ استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و موتور در حالت با ضریب توان واحد کار خواهد کرد. اگر جریان تحریک رتور نسبت به این حالت کاهش یابد؛ توان راکتیو از شبکه به موتور سرازیر می‌شود. در این صورت موتور سنکرون سه فاز در حالت پس‌فاز کار خواهد کرد. اگر جریان تحریک رتور نسبت به حالتی که با ضریب توان واحد کار می‌کرد؛ زیادتر شود (میدان رتور افزایش یابد). در این صورت جریان پیش‌فاز از شبکه کشیده می‌شود تا با میدان رتور مخالفت کند. در این صورت موتور در حالت پیش‌فاز کار می‌کند و توان راکتیو به شبکه تحویل می‌دهد. به این ترتیب با تغییر جریان تحریک رتور، می‌توان ضریب توان موتور سنکرون سه فاز با تحریک DC را کنترل نمود. شایان ذکر است در تمامی مراحل فوق موتور می‌تواند متناسب با بار مکانیکی خود از شبکه توان اکتیو دریافت کند. اما توان راکتیو موتور به دامنه جریان تحریک بستگی دارد.

موتورهای سنکرون خود راه‌انداز نیستند؛ به عبارت دیگر اگر استاتور موتور به برق سه فاز AC وصل شود و جریان تحریک ( $I_f$ ) رتور نیز برقرار گردد؛ موتور شروع به حرکت دورانی نخواهد کرد. برای راه‌اندازی موتورهای سنکرون سه فاز از روش‌های ذیل استفاده می‌شود:

- ۱- استفاده از مبدل فرکانس یا منبع تغذیه با فرکانس متغیر
  - ۲- راه‌اندازی موتور سنکرون به صورت موتور القایی (آسنکرون) با استفاده از دمپر در رتور
  - ۳- راه‌اندازی با استفاده از محرکه‌های مکانیکی نظیر موتور دیزل و یا موتور DC
- در بسیاری از موارد (و در بخشی از این آزمایش) موتور سنکرون بوسیله یک محرک مکانیکی به حرکت درمی‌آید و با شبکه موازی (سنکرون) شده و پس از سنکرون شدن با شبکه (سنکرونیزاسیون) موتور محرک آن قطع می‌گردد. برای سنکرون کردن ماشین سنکرون با شبکه، باید شرایط زیر برقرار باشد:

- ۱) تساوی فرکانس دو سیستم
  - ۲) تساوی دامنه ولتاژها
  - ۳) یکسان بودن توالی فازها
  - ۴) هم‌فاز بودن ولتاژ فازهای هم‌نام دو سیستم
- شرایط فوق توسط دستگاهی به نام سنکروسکوپ<sup>۵</sup> بررسی می‌گردد. وضعیت عقربه در این دستگاه اختلاف فاز ولتاژ ژنراتور و ولتاژ شبکه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بررسی توالی فازها توسط این دستگاه امکان‌پذیر نیست و قبل از سنکرون نمودن، باید این مساله مورد تایید قرار گیرد. اغلب علاوه بر سنکروسکوپ یک فرکانس‌متر و یک ولت‌متر که به ترتیب فرکانس و ولتاژ هر دو سیستم را نشان می‌دهد؛ در کنار سنکروسکوپ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به جای استفاده از سنکروسکوپ می‌توان از سه لامپ جهت بررسی شرایط لازم برای موازی کردن ژنراتور با شبکه استفاده کرد. نحوه اتصال لامپ‌ها در شکل ۷، نشان داده شده است. سرعت چرخش محور را می‌توان طوری تنظیم کرد

که فرکانس ژنراتور با فرکانس شبکه مساوی گردد. با تغییر جریان تحریک ( $I_f$ ) می‌توان اندازه ولتاژ ژنراتور را با ولتاژ شبکه یکی کرد. در این حال اگر توالی فازها یکسان باشد؛ لامپ‌ها درخشندگی یکسانی خواهند داشت و در حالت هم‌فاز هر سه لامپ خاموش می‌شوند.



شکل ۷: سنکرونیزاسیون با استفاده از سه لامپ خاموش، الف: نمودار برداری ب: نمودار شماتیکی

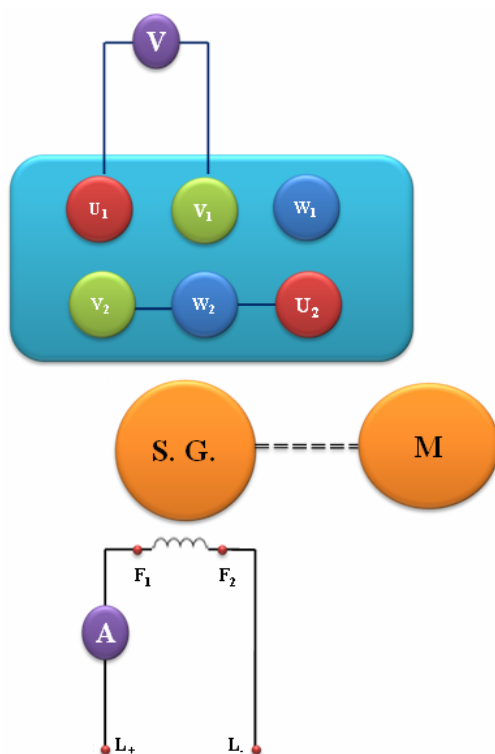
### ۳-۵ انجام آزمایش

ابتدا پارامترهای نامی ماشین را مشاهده کرده و در جدول زیر یادداشت کنید.

مد عملکرد	توان	ولتاژ	جریان	سرعت	ضریب توان	فرکانس	ولتاژ تحریک	جریان تحریک
ژنراتوری								
موتوری								

### ۳-۵-۱ آزمایش مدار باز

مدار این آزمایش به صورت شکل ۸، می‌باشد. دقت شود که در این حالت منظور از موتور  $M$ ، سروموتور می‌باشد. دو سر مدار تحریک نیز به  $X_3$  و  $X_4$  منبع تغذیه (تغذیه صفر تا ۲۴۰ ولت DC) وصل می‌گردد. همچنین دقت نمایید که سیم‌پیچی استاتور به صورت ستاره سربندی شده و سه سر آن مدار باز است و به منبع تغذیه وصل نمی‌شود. برای اندازه‌گیری ولتاژ خروجی ژنراتور از سرو استفاده کنید. با استفاده از کلید اصلی، واحد کنترل را روشن کنید. در این حالت نباید هیچ‌کدام از لامپ‌های تابلوی کنترل سرو روشن باشد. در غیر این صورت اشتباهی به صورت یکی از موارد زیر رخ داده است:



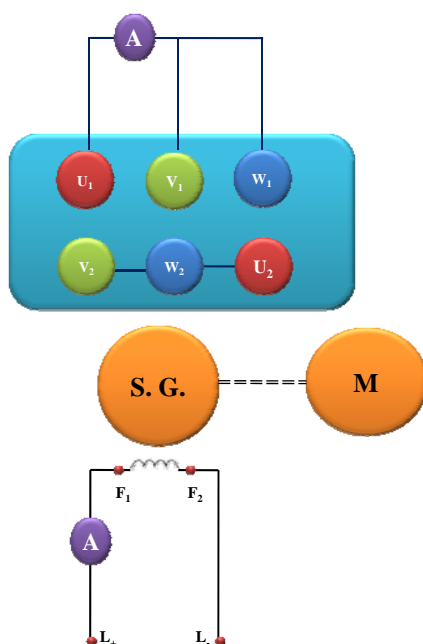
شکل ۸: مدار آزمایش بی‌باری

- محافظ حلقه (Loop guard) کوپل نشده است.
  - حفاظ حلقه مربوط به کاور انتهای محور فراموش شده است.
  - فیش کنترل دمای موتور متصل نیست.
  - موتور خیلی داغ شده است.
- توجه کنید که کنترل کننده روی حالت PC تنظیم شده باشد. سپس مراحل زیر را به ترتیب انجام دهید:
- نرم‌افزار `servoma.exe` را اجرا کنید.
  - در قسمت تنظیم دستی (Manual) سرعت را برابر ۱۵۰۰ تنظیم نمایید.
  - از قسمت `Tools\Multimeter\view` یک ولت‌متر برای ولتاژ استاتور، یک آمپر متر برای جریان تحریک و یک سرعت‌سنج انتخاب نمایید.
  - ولتاژ تحریک DC را به تدریج افزایش دهید و مقدار ولتاژ و جریان تحریک را یادداشت کنید. این کار را تا جریان تحریک نامی انجام دهید (به دلیل محدودیت منبع تغذیه جریان را حداکثر تا ۴ آمپر افزایش دهید). سپس مشخصه بی‌باری را در یک نمودار رسم کنید.

$I_f$ (A)								
$V_t$ (v)								

### ۳-۵-۲ آزمایش اتصال کوتاه

در این قسمت پایانه‌های استاتور را با استفاده از یک آمپر متر (از دستگاه اندازه‌گیری چهار کاناله)، به صورت زیر اتصال کوتاه کنید. یادآوری می‌شود که در اینجا هم استاتور به منبع تغذیه وصل نمی‌شود. مشابه حالت قبل، سرعت سروموتور را روی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم نمایید. حال مقدار جریان تحریک را (با تغییر ولتاژ تغذیه DC) تغییر داده و در هر مرحله جریان اتصال کوتاه ژنراتور را در جدول زیر یادداشت کنید.



شکل ۸: مدار مربوط به آزمایش اتصال کوتاه

$I_f$ (A)								
$I_{sc}$ (A)								

سپس منحنی جریان اتصال کوتاه را بر حسب جریان تحریک رسم کنید.

### ۳-۵-۳ رفتار جریان اتصال کوتاه نسبت به تغییر دور

مدار اتصال کوتاه را مانند شکل ۵ بسته و این بار جریان تحریک را در مقدار نامی ثابت نگه دارید. سرعت را در قسمت تنظیم دستی روی ۱۰۰۰ دور در دقیقه تنظیم کنید و سپس آن را تا ۱۵۰۰ دور در دقیقه افزایش دهید. در هر مرحله مقدار جریان استاتور را یادداشت نمایید.

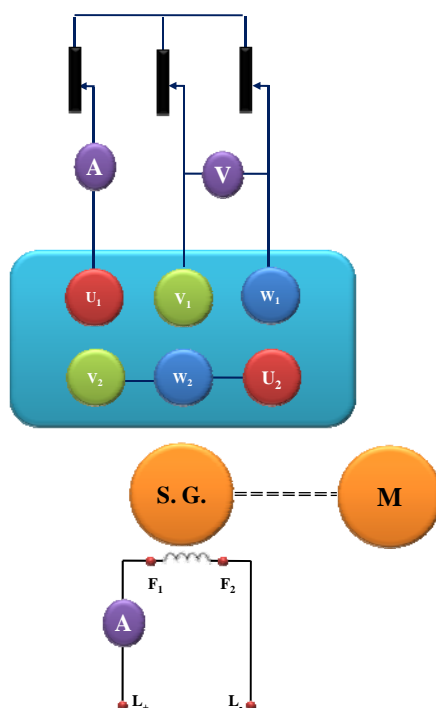
لازم به ذکر است که برای انجام این قسمت آزمایش می‌توانید از سرو در حالت اتوماتیک استفاده کنید و محدوده تغییرات سرعت فوق را وارد کرده، نتیجه را به صورت نمودار جریان بر حسب سرعت مشاهده نمایید.

$$I_f = \text{ثابت} =$$

n(rpm)										
$I_{sc}$ (A)										

### ۳-۵-۴ مشخصه با باری ژنراتور

مدار آزمایش را به صورت شکل ۹ ببینید. توجه کنید که قبل از انجام آزمایش دمنده مربوط به بانک مقاومتی را روشن نمایید (با وصل کردن کلید مربوط به بانک مقاومتی به پریز برق روی میز آزمایش). ضمناً در این حالت نیز پایانه‌های استاتور به منبع سه فاز وصل نمی‌شوند.



شکل ۹: مدار آزمایش بارداری

برای اندازه‌گیری جریان تحریک از آمپر متر منبع تغذیه استفاده کنید و جریان و ولتاژ استاتور را با استفاده از آمپر متر و ولت متر استاتور قرائت نمایید. مشابه قسمت‌های قبلی، سروموتور را راه‌اندازی کرده و در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم کنید. جریان تحریک را نیز در مقدار نامی تنظیم نموده و ولتاژ بی‌باری را اندازه‌گیری کنید. سپس بار اهمی را به ژنراتور اعمال کنید. در هر مرحله مقدار بار را تغییر داده و مقدار ولتاژ را در جدول زیر یادداشت کنید. سپس منحنی ولتاژ بر حسب جریان استاتور را در یک نمودار رسم کنید.

ثابت  $I_f =$  (A)

پله‌های بار مقاومتی								
$V_t$ (V)								
$I_a$ (A)								

اکنون بار خازنی را با مقاومت موازی کنید و مقدار مقاومت را در پله ۲، تنظیم کنید. بار خازنی را تغییر دهید و آزمایش قبل را برای بار اهمی - خازنی تکرار نمایید.

ثابت  $I_f =$  (A)

پله بار مقاومتی	۲			
پله‌های بار خازنی	۱	۲	۳	۴
$V_t$ (V)				
$I_a$ (A)				

این آزمایش را با بار اهمی - سلفی تکرار کنید.

ثابت  $I_f =$  (A)

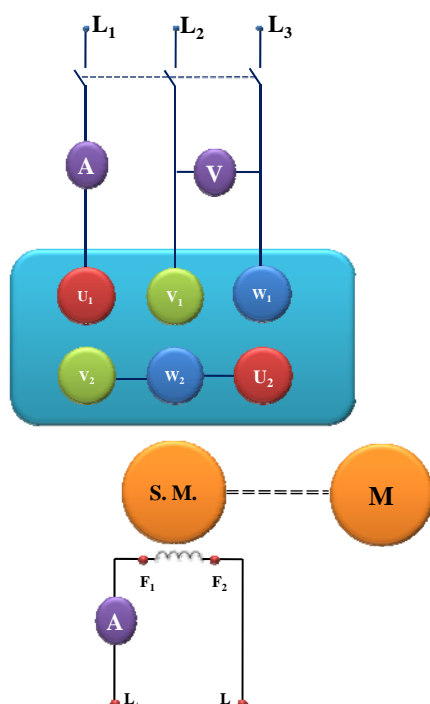
پله بار مقاومتی	۲			
پله‌های بار سلفی	۱	۲	۳	۴
$V_t$ (V)				
$I_a$ (A)				

### ۳-۵-۵ راه‌اندازی موتورهای سنکرون

مدار شکل ۱۰ را ببندید. جریان تحریک را برابر سه آمپر تنظیم نمایید. دقت کنید که در تمامی آزمایش‌ها، در صورتی که از مد کنترل گشتاور استفاده می‌کنید؛ ابتدا اعمال گشتاور را قطع نمایید؛ سپس مدار تحریک و بعد از آن مدار آرمیچر را وصل نمایید. در هنگام خاموش کردن موتور نیز برعکس عمل کنید.

برای مدت زمان کوتاهی تغذیه آرمیچر را وصل کنید. نتیجه را شرح دهید. سپس پایانه F1 و پایانه مرکزی را به هم وصل کنید. توجه کنید که در این حالت، رتور دارای یک سیم‌پیچی با تحریک DC و یک سیم‌پیچی اتصال کوتاه شده می‌باشد و بنابراین سیم‌پیچی رتور برای ولتاژهای AC مشابه یک سیم‌پیچ سه فاز اتصال کوتاه شده (مشابه دمپر) عمل می‌کند.

گشتاور سرو را روی صفر تنظیم کنید. جریان تحریک را برابر ۳ آمپر تنظیم کنید. موتور را راه‌اندازی نموده و نتیجه را بیان کنید. علت تفاوت در نتیجه راه‌اندازی با حالت قبلی چیست؟ این نحوه راه‌اندازی، کدامیک از سه روش راه‌اندازی مذکور می‌باشد؟



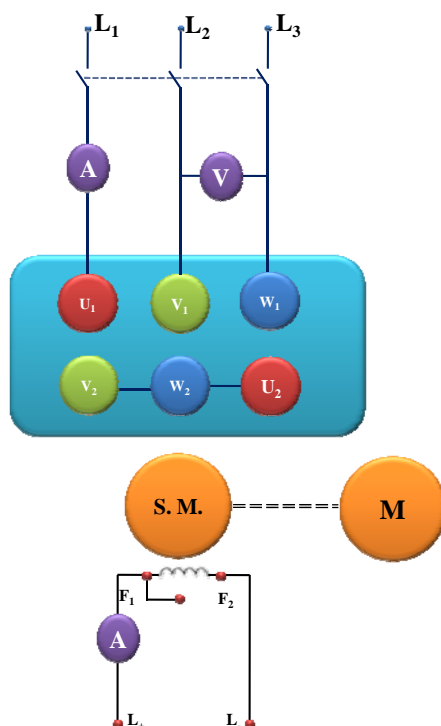
شکل ۱۰: مدار مربوط به آزمایش راه‌اندازی موتور سنکرون

### ۳-۵-۶ بدست آوردن منحنی V شکل موتور

مدار شکل ۱۱ را ببندید. وضعیت selector را روی مد pc گذاشته، نرم‌افزار را باز نموده، RS232 را detect کنید. در صورتی که کابل RS232 متصل و مد PC درست باشد ارتباط برقرار می‌گردد. گزینه AC motor را انتخاب نمایید. جریان تحریک را در ۸ پله از ۱۲۰ درصد تا ۵۰ درصد مقدار نامی تنظیم کنید. در نرم افزار کنترل سرو، ابتدا مود manual و کنترل گشتاور را انتخاب کنید. پیش از شروع آزمایش جهت مثبت چرخش موتور را بررسی کنید (در صورتی که جهت چرخش درست نبود، با جابجا کردن دو فاز، آن را اصلاح کنید). در هر مرحله گشتاور ثابت ۱ نیوتون متری را اعمال کرده و مقادیر جریان استاتور و ضریب توان را یادداشت کنید. برای اندازه‌گیری ضریب توان، ولتاژ دو فاز را به پایانه های ولت متر تابلوی سرو متصل کنید و جریان فاز دیگر را با رعایت جهت مناسب به پایانه های آمپر متر آن وصل نمایید. در این حالت می‌توانید ضریب توان را روی رایانه مشاهده کنید.

6- اگر به هر دلیلی تحریک قطع شد (مثلاً منبع DC در اثر over current قطع شد)، حتماً اول گشتاور اعمالی توسط سرو درایو را قطع کنید؛ سپس استاتور را قطع کنید و در نهایت تغذیه DC تحریک را ریست کنید.





شکل ۱۱: مدار مربوط به استخراج منحنی  $V$  شکل موتور سنکرون

T (N.m.)	1							
$I_f$ (A)								
$I_s$ (A)								
$\cos \phi$								

مراحل فوق را برای گشتاورهای ۲ و ۱/۵ و ۰/۵ نیوتن متری تکرار کنید.

T (N.m.)	0.5							
$I_f$ (A)								
$I_s$ (A)								
$\cos \phi$								

T (N.m.)	1.5							
$I_f$ (A)								
$I_s$ (A)								
$\cos \phi$								

T (N.m.)	2							
$I_f$ (A)								
$I_s$ (A)								
$\cos \varphi$								

### ۳-۶ پرسش و محاسبه

- (۱) تاثیر جریان تحریک بر ولتاژ پایانه‌های یک ژنراتور بی‌بار به چه صورتی است؟
- (۲) آیا مجازیم که جریان تحریک را برای دست یافتن به ولتاژ بیشتر به هر میزان افزایش دهیم؟
- (۳) جریان اتصال کوتاه در یک ژنراتور سنکرون نسبت به جریان تحریک و سرعت چگونه تغییر می‌کند؟ چرا؟
- (۴) ولتاژ پایانه‌های ژنراتور با افزایش بار الکتریکی چه تغییری می‌کند؟ چرا؟
- (۵) اثر ضریب توان بار در تغییر ولتاژ چگونه است؟
- (۶) امپدانس ژنراتور سنکرون آزمایش شده چقدر است؟
- (۷) نواحی زیرتحریک و فوق تحریک را در منحنی‌های V شکل به دست آمده مشخص کنید. در کدام ناحیه، موتور توان راکتیو به شبکه تزریق می‌نماید؟
- (۸) با توجه به نتایج قسمت ۳-۵-۶، چرا حد پایین جریان تحریک در بارهای زیاد کمتر از حد پایین جریان تحریک در بارهای کم می‌باشد؟



آزمایش ۴:

راه اندازی و مشخصه خروجی موتور القایی

ر تور سیم پیچی شده



#### ۴-۱ هدف آزمایش

در این آزمایش ابتدا راه اندازی موتور القایی رتور سیم پیچی شده سه فاز با استفاده از مقاومت-های راه انداز مختلف بررسی و سپس مشخصه گشتاور-سرعت آن رسم می شود.

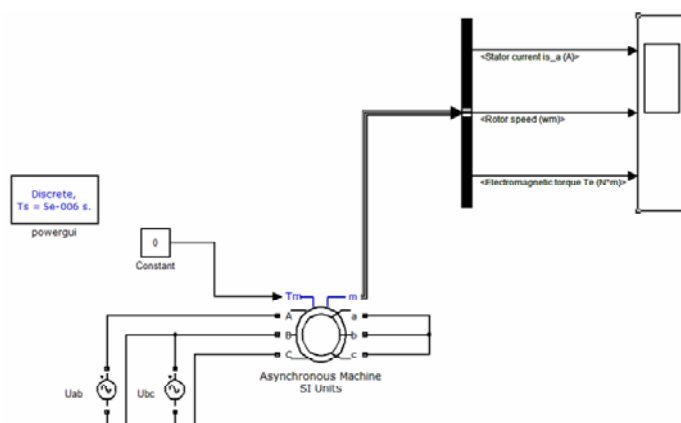
#### ۴-۲ آماده سازی جهت آزمایش

- مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی را رسم کنید و در مورد اثر مقاومت رتور بر آن بحث کنید.
- با استفاده از مدار معادل موتور القایی در مورد دامنه جریان راه اندازی موتور القایی و اثر مقاومت رتور بر آن توضیح دهید.
- رابطه گشتاور حداکثر را در موتور القایی بدست آورید و در مورد اثر مقاومت رتور بر آن توضیح دهید.
- با استفاده از مشخصه گشتاور سرعت، در مورد اثر مقاومت رتور در بازده موتور القایی توضیح دهید (گشتاور بار را ثابت فرض نمایید).
- تغییر سرعت در یک موتور القایی با رتور سیم پیچی شده چگونه صورت می گیرد؟
- بخش شبیه سازی را انجام دهید و نتایج آن را همراه پیش گزارش تحویل نمایید.

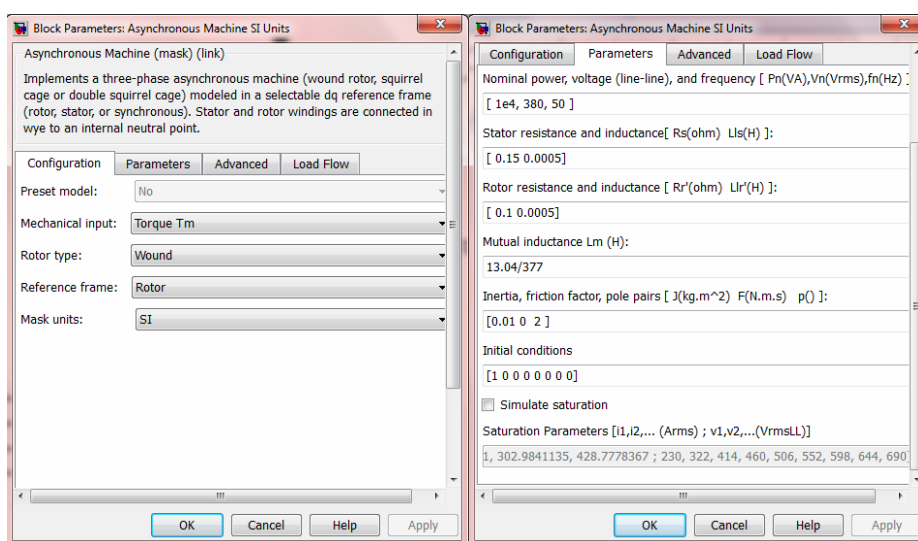
#### ۴-۳ شبیه سازی

##### ۴-۳-۱ راه اندازی موتور بدون مقاومت رتور

برای شبیه سازی این قسمت مدل زیر را در فایل Simulink ایجاد و پارامترهای ماشین القایی را به صورت نشان داده شده تنظیم نمایید. روش حل را در بلوک PowerGUI از نوع Discrete با زمان نمونه برداری  $5e-6$ ، و در قسمت Configuration Parameter از منوی Tool، نوع حل مساله را Discrete تعیین کنید.

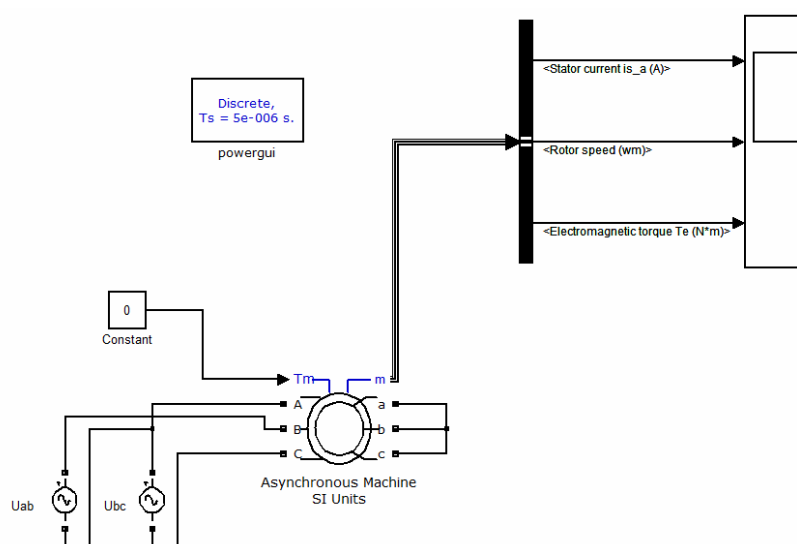


شکل ۱: مدل سیستم شبیه سازی راه اندازی موتور القایی رتور سیم پیچی شده



شکل ۲: پارامترهای ماشین القایی

- با استفاده از Help موتور، روابط به کار رفته برای مدل سازی موتور را بنویسید.
- رتور را به صورت نشان داده شده در شکل اتصال کوتاه نموده و با گشتاور صفر، فایل را اجرا کرده و شکل موج جریان را مشاهده و رسم نمایید.
- مطابق شکل ۳، جای دوفاز را عوض کنید و جهت سرعت رتور را مشاهده نمایید.

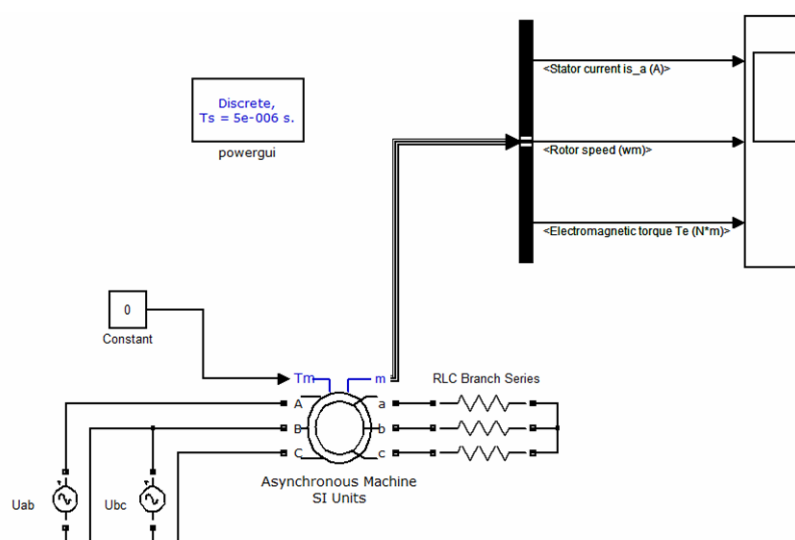


شکل ۳: تعویض فازها برای تغییر جهت چرخش موتور القایی

#### ۴-۳-۲ راه اندازی موتور با مقاومت رتور

در این قسمت به سیم پیچی های رتور همانند شکل ۴، مقاومت راه اندازی را به صورت اتصال ستاره اضافه نمایید. برای اضافه نمودن مقاومت می توانید از کتابخانه SimPowerSystems/Elements/Series RLC Branch استفاده نموده و در قسمت تنظیم

پارامترهای این المان، نوع آن را مقاومت انتخاب نمایید. جریان و زمان راه اندازی را برای پله های مقاومتی ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۲ اهم با نتایج به دست آمده در حالت قبل مقایسه نمایید.



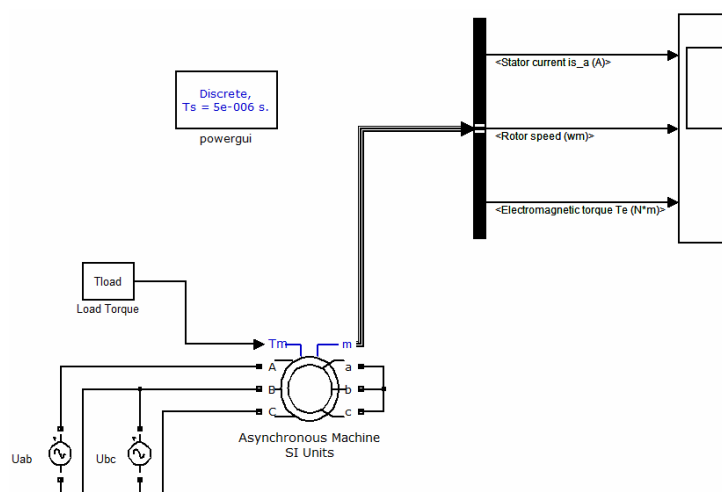
شکل ۴: اضافه کردن مقاومت راه اندازی برای موتور القایی رتور سیم پیچی شده

### ۳-۳-۴ بررسی مشخصه گشتاور-سرعت

از قسمت Configuration در مشخصات ماشین القایی، Torque  $T_m$  را از Mechanical Input به  $W$  Speed تغییر دهید. برای شبیه سازی این قسمت سرعت موتور را که به عنوان ورودی تعیین شده است؛ برای پله های مقاومتی ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۲ اهم، از  $1500 \times 2\pi/60$  تا  $3000 \times 2\pi/60$  تغییر داده و در هر مرحله گشتاور حالت ماندگار ماشین و جریان استاتور را مشخص نمایید. نمودار گشتاور بر حسب سرعت و همچنین جریان استاتور بر حسب سرعت را در نواحی کاری مختلف رسم کنید. توجه داشته باشید در این قسمت با نزدیک شدن سرعت ماشین به صفر، گشتاور حالت گذرا نوسانی است و برای مشاهده گشتاور حالت پایدار باید زمان شبیه سازی را بیشتر کرد.

### ۴-۳-۴ تأثیر گشتاور بار بر سرعت موتور

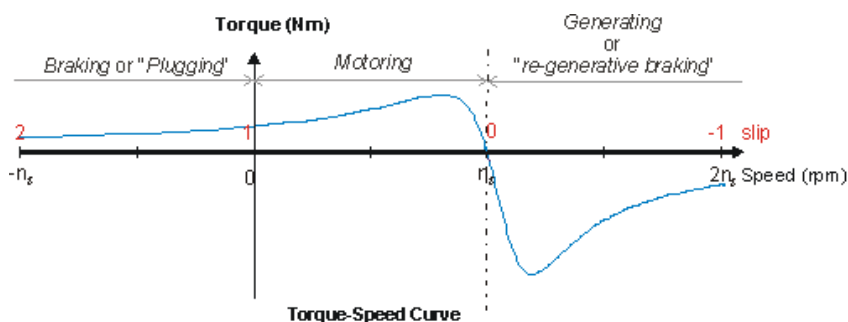
برای شبیه سازی این قسمت، مدل زیر را در فایل Simulink ایجاد نمایید. سپس شبیه سازی را برای گشتاورهای ورودی صفر، ۳۰ و ۶۰ نیوتن-متر اجرا کنید و مقادیر سرعت و جریان استاتور را مشخص نمایید. برای حالتی که سیم پیچی های رتور به مقاومت ۰/۵ و ۰/۲ اهمی متصل هستند نیز شبیه سازی را تکرار کنید و تأثیر افزایش مقاومت رتور را بر سرعت و جریان استاتور مشاهده و بررسی نمایید.



شکل ۵: تأثیر گشتاور بار روی سرعت موتور

#### ۴-۴ تئوری آزمایش

موتور القایی با رتور سیم پیچی شده علاوه بر سه سیم پیچ استاتور دارای سیم پیچ سه فاز در رتور می باشد. سه سر این سیم پیچی با استفاده از حلقه لغزان و جاروبک همراه پایانه های استاتور در دسترس می باشد. در هنگام راه اندازی به منظور محدود کردن جریان راه اندازی مقاومتی با سیم پیچی رتور سری می شود. پس از راه اندازی موتور به منظور کاهش تلفات این مقاومت از مدار خارج می شود. برای تحلیل اثر مقاومت رتور بر مشخصه موتور القایی در مدار معادل موتور، اتصال سری این مقاومت با مقاومت رتور در نظر گرفته می شود. با تغییر این مقاومت به دلیل متفاوت شدن امپدانس مدار معادل مقادیر گشتاور، سرعت، جریان راه اندازی و ... تغییر می کند. برای تعیین گشتاور در لغزش های مختلف باید توان عبوری از فاصله هوایی را بر سرعت زاویه ای سنکرون تقسیم نماییم. در این صورت مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی به صورت شکل ۶ خواهد بود. در این شکل، نواحی کار موتوری، ژنراتوری و ترمزی مشخص شده اند. اگر گشتاوری به محور ماشین القایی اعمال شود که سرعت آن بیشتر از سرعت سنکرون شود، ماشین القایی در مد ژنراتوری کار می کند. برای سرعت های کمتر از صفر (دور معکوس)، ماشین القایی در مد ترمزی کار خواهد کرد.



شکل ۶: منحنی گشتاور-سرعت موتور القایی

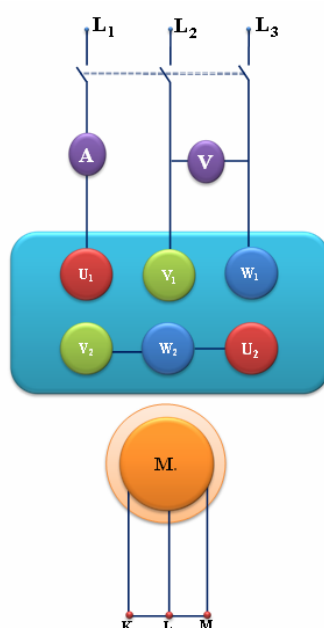
#### ۵-۴ انجام آزمایش

پارامترهای نامی ماشین را مشاهده کرده و در جدول زیر یادداشت کنید.

توان نامی	ولتاژ نامی	جریان نامی	سرعت نامی	ضریب توان	فرکانس

#### ۴-۵-۱ اندازه گیری مشخصات راه اندازی در حالت اتصال کوتاه بودن رتور

مدار آزمایش را مطابق شکل ۷ ببندید. توجه کنید که آمپر متر در فاز اول و ولت متر بین فازهای دوم و سوم وصل شود تا توان سه فاز و ضریب توان توسط کنترلر سرو درست اندازه گیری شود. ضمناً جهت چرخش موتور بهتر است؛ به صورت ساعتگرد (جهت مثبت سرو موتور) باشد<sup>۱</sup>. سیم-پیچی استاتور به صورت ستاره سربندی شده و رتور نیز اتصال کوتاه شده است.



شکل ۷: مدار مربوط به راه اندازی موتور القایی با رتور اتصال کوتاه شده

در این حالت موتور را در گشتاور صفر راه اندازی نمایید و شکل موج جریان راه اندازی را مشاهده نمایید. برای این منظور سرو را در مد PC راه اندازی کنید و در حالت Manual، کنترلر گشتاور را انتخاب کنید و عدد صفر را وارد نمایید. نمودار جریان بر حسب زمان را باز کنید (از قسمت New graph)، کلید Continuous را فشار دهید و به محض اینکه علامت ضربدر روی گراف زمان صفر را نشان داد، موتور را روشن کنید.

<sup>۱</sup> - در غیر این صورت مطابق قسمت ۴-۵-۲، جهت چرخش را تغییر دهید.

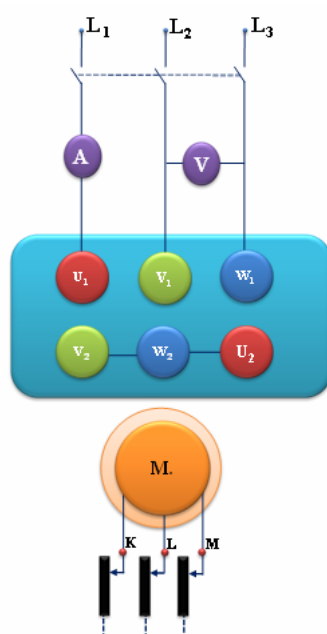


#### ۴-۵-۲ تغییر جهت چرخش موتور

جای دو تا از فازهای استاتور را عوض کنید. موتور را روشن کرده و تغییر جهت چرخش موتور را مشاهده کنید. سپس دوباره ترتیب فازها را مرتب نمایید تا موتور به صورت راست گرد بچرخد.

#### ۴-۵-۳ راه اندازی موتور با وجود مقاومت در رتور

مدار آزمایش را مطابق شکل ۸ ببندید (به محل قرار گرفتن آمپر متر و ولت متر توجه کنید و جهت چرخش موتور بعد از راه اندازی باید به صورت راست گرد باشد). مقاومت رتور را در وضعیت ۱ و ۳ و ۶ (مقاومت صفر) قرار دهید و با راه اندازی موتور در هر حالت تاثیر افزایش مقاومت رتور بر جریان و زمان راه اندازی را مشاهده نموده و توضیح دهید.



شکل ۸: مدار مربوط به راه اندازی موتور القایی با تغییر مقاومت رتور (اتصالات خط چین وصل شده است)

#### ۴-۵-۴ تاثیر مقاومت رتور بر مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی

در مدار قسمت قبل برای حالتی که مقاومت رتور در وضعیت ۱، ۳، و ۶ (مقاومت صفر) است؛ سرعت سرو را بین ۱۵۰۰ تا ۵۰- دور در دقیقه تغییر داده، (در زمان ۳۵ ثانیه) نمودار گشتاور، جریان، بازده و ضریب توان را بر حسب تغییرات سرعت مشاهده و ثبت نمایید.

#### ۴-۵-۵ تاثیر گشتاور بار بر سرعت موتور القایی

مدار را مطابق شکل ۹، ببندید. در قسمت control options گشتاور را مطابق جدول زیر بین صفر تا ۲ نیوتن-متر تغییر داده، مقادیر سرعت، جریان استاتور، ضریب توان، توان های ورودی و خروجی و بازده را در جدول ثبت نمایید.

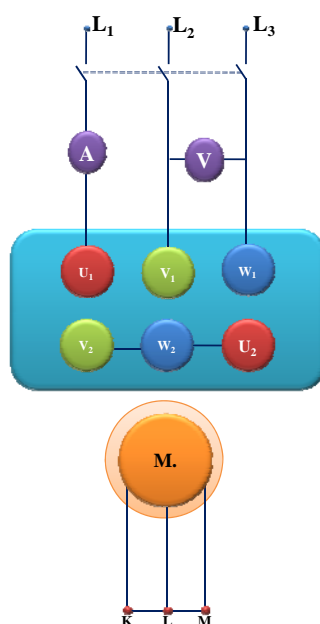
رتور	اتصال کوتاه (بدون مقاومت راه انداز)				
T(N.m)	0	0.5	1	1.5	2
N(rpm)					
I <sub>st</sub> (a)					
cosφ					
P <sub>in</sub> (W)					
P <sub>out</sub> (W)					
η (%)					

سپس، سه سر سیم پیچی رتور را به مقاومت راه اندازی متصل نمایید. مراحل فوق را برای مقاومت های یک و سه انجام داده، تاثیر افزایش مقاومت رتور را بر مقادیر مشاهده شده بررسی کنید.

رتور	مقاومت راه اندازی در پله یک				
T(N.m)	0	0.5	1	1.5	2
N(rpm)					
I <sub>st</sub> (a)					
cosφ					
P <sub>in</sub> (W)					
P <sub>out</sub> (W)					
η (%)					

رتور	مقاومت راه اندازی در پله سه				
T(N.m)	0	0.5	1	1.5	2
N(rpm)					
I <sub>st</sub> (a)					
cosφ					
P <sub>in</sub> (W)					
P <sub>out</sub> (W)					
η (%)					

سپس موتور را خاموش نمایید. گشتاور سرو را در مقدار ۳ نیوتن متر قرار دهید. توجه کنید که این مقدار بیشتر از گشتاور نامی موتور است لذا آزمایش را در حداقل زمان ممکن انجام دهید. برای حالتی که سیم پیچ رتور اتصال کوتاه است؛ موتور را راه اندازی کنید. سپس برای مقاومت راه اندازی ۱ و ۳ این کار را تکرار نمایید. مشاهده خود را با توجه به منحنی های گشتاور سرعت بدست آمده در بخش قبل تحلیل نمایید.



شکل ۹: مدار مربوط به بخش ۴-۵-۵

#### ۴-۶ پرسش و محاسبه

- (۱) با توجه به نتایج آزمایش، تاثیر تغییر مقاومت رتور را بر جریان و زمان راه اندازی موتور القایی بیان نموده، سپس در مورد علت آن بحث کنید.
- (۲) تاثیر تغییر مقاومت رتور بر سرعت حالت کار دائم چگونه است؟ چرا؟
- (۳) با توجه به پاسخ سؤال ۲، فکر می کنید که سرعت موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده را چگونه می توان با مقاومت رتور کنترل کرد؟ عیب این روش چیست؟
- (۴) با مقایسه منحنی های گشتاور- سرعت موتور القایی به ازای مقاومت های مختلف رتور چه کمیتی در سه منحنی ثابت می ماند؟ چرا؟



**آزمایش ۵:**

**راه اندازی، بدست آوردن پارامترها و مشخصه  
خروجی موتور القایی قفس سنجابی**



### ۵-۱ هدف آزمایش

در این آزمایش جریان راه اندازی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز مشاهده می شود. سپس مشخصه گشتاور- سرعت این موتور به دست می آید. همچنین پارامترهای مدار معادل ماشین در این آزمایش محاسبه می شود.

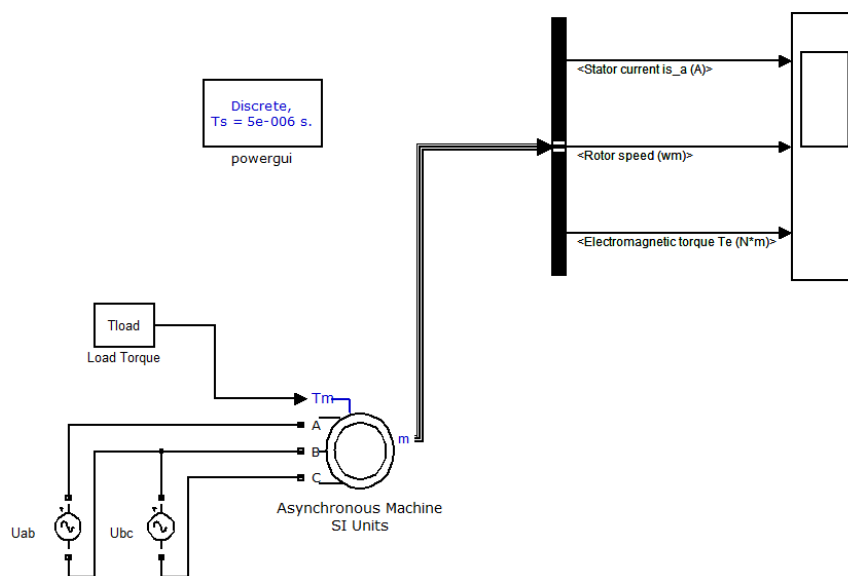
### ۵-۲ آماده سازی جهت آزمایش

- رابطه ولتاژ فاز و خط در اتصال ستاره و مثلث را با هم مقایسه نمایید.
- روشهای ممکن برای کاهش جریان راه اندازی را ذکر نموده اثر هر یک را در جریان و گشتاور راه اندازی ذکر نمایید.
- نسبت تقریبی جریان راه اندازی یک موتور را وقتی بصورت ستاره راه اندازی می شود به جریان راه اندازی همان موتور وقتی بصورت مثلث راه اندازی می شود محاسبه نمایید.
- مدار معادل موتور القایی را رسم کنید و در مورد پارامترها و نحوه اندازه گیری آنها توضیح دهید.
- مشخصه گشتاور- سرعت موتور القایی را رسم کنید. نواحی سه گانه کار ماشین القایی را مشخص کنید. با استفاده از مدار معادل در این نواحی توضیح دهید آیا ماشین میتواند در ناحیه ای توان را کتیو تولید کند؟
- با استفاده از رابطه توان فاصله هوایی و توان تبدیل شده با تلفات مسی در رتور، جهت انتقال توانهای مکانیکی و الکتریکی (در ورودی ماشین) را در حالت های موتوری، ژنراتوری و ترمزی نمایش دهید.
- بخش شبیه سازی را انجام دهید و نتایج آن را به همراه پیش گزارش تحویل نمایید.

### ۵-۳ شبیه سازی

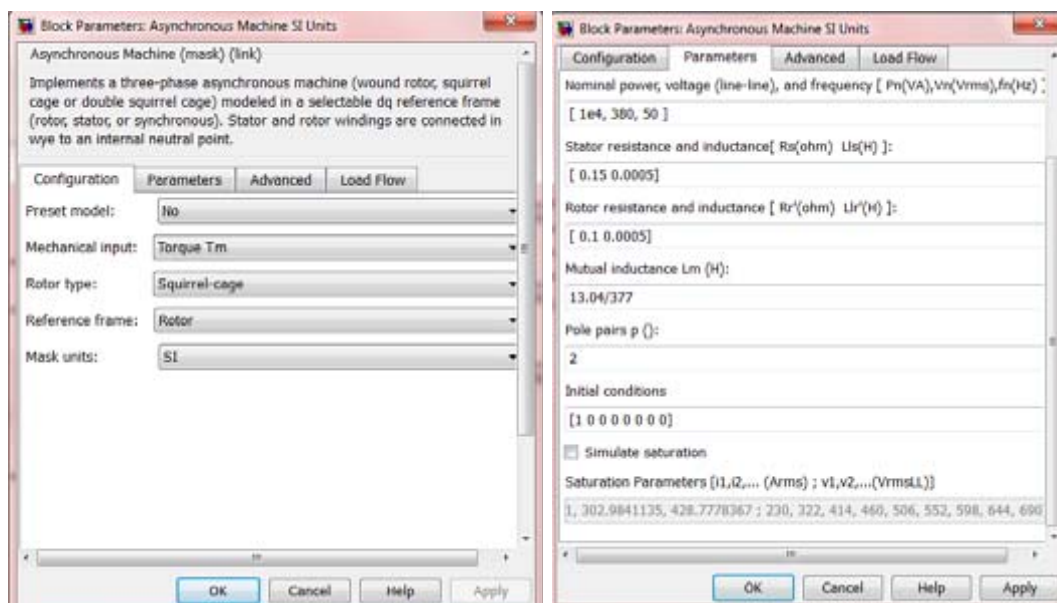
#### ۵-۳-۱ راه اندازی موتور

برای شبیه سازی این قسمت مدل زیر را در یک فایل جدید Simulink ایجاد نمایید. موتور القایی را می توانید از کتابخانه SimPowerSystems/Machines/Asynchronous Machine SI Units انتخاب کنید. همچنین روش حل در بلوک PowerGUI را Discrete با زمان نمونه برداری 5e-6 و در قسمت Configuration 5 Parameter، از منوی Tool نوع حل مساله را Discrete تعیین کنید.



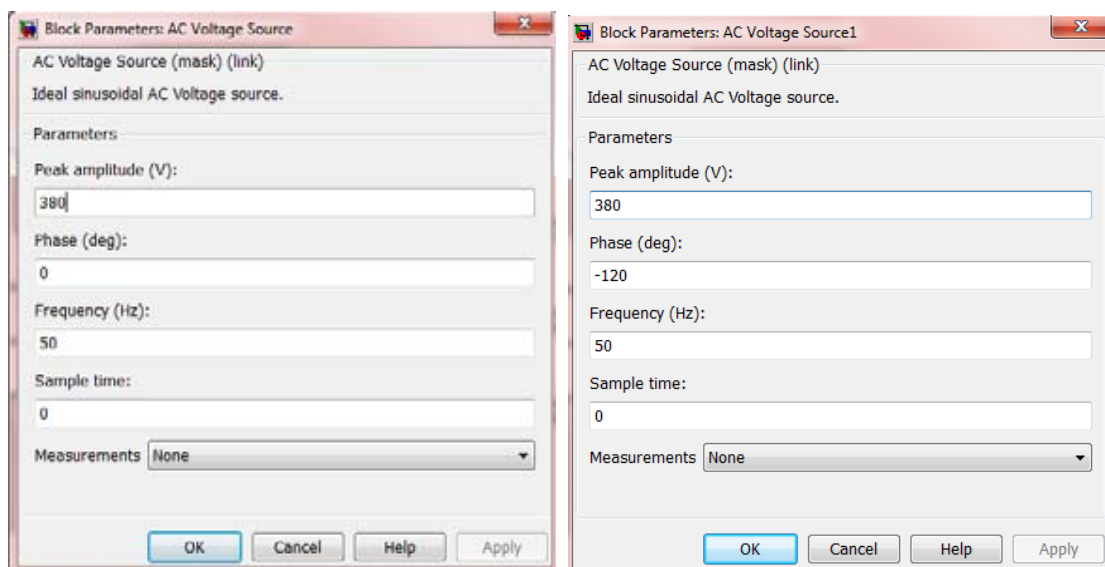
شکل ۱: راه اندازی موتور القایی قفس سنجابی

پارامترهای ماشین القایی را به صورت زیر تنظیم نمایید:



شکل ۲: پارامترهای موتور القایی قفس سنجابی

همچنین پارامترهای ولتاژهای ورودی موتور  $U_{ab}$  و  $U_{bc}$  را همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، وارد کنید. دقت کنید که فاز ولتاژ  $U_{bc}$ ،  $120^\circ$  - درجه می باشد.



شکل ۳: پارامترهای منبع تغذیه

شبیه سازی را به صورت زیر انجام دهید:

۱. مقدار گشتاور ماشین را بر اساس توان و سرعت سنکرون محاسبه کرده و 50 درصد این مقدار را به عنوان ورودی گشتاور به ماشین القایی اعمال نمایید. مدل را اجرا کرده و جریان راه اندازی موتور را مشاهده و رسم نمایید. همچنین سرعت موتور در حالت دائمی را نیز مشخص کنید.
۲. شبیه سازی فوق را برای ورودی صفر گشتاور انجام داده نتایج را مشاهده و رسم نمایید.

### ۵-۳-۲ تعیین مشخصه سرعت-گشتاور

در این بخش از قسمت Configuration در مشخصات ماشین القایی Mechanical Input را از Torque  $T_m$  به Speed  $W$  همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، تغییر دهید.



شکل ۴: مشخصات ماشین القایی

برای شبیه سازی این قسمت سرعت موتور را که به عنوان ورودی تعیین شده است از-  $1500 \times 2\pi/60$  تا  $3000 \times 2\pi/60$  تغییر داده و در هر مرحله گشتاور حالت ماندگار ماشین و جریان استاتور را مشخص نمایید.

نمودار گشتاور بر حسب سرعت و همچنین جریان استاتور بر حسب سرعت را در نواحی کاری مختلف رسم کنید. توجه داشته باشید در این قسمت با نزدیک شدن سرعت ماشین به صفر، گشتاور حالت گذرا نوسانی بوده و برای مشاهده گشتاور حالت پایدار باید زمان شبیه سازی را بیشتر کرد.

### ۳-۳-۵ استخراج پارامترهای موتور

شبیه سازی را در حالت بی باری، انجام دهید. سرعت بی باری، جریان بی باری و رابطه آن با جریان نامی، ضریب توان و توان بی باری را یادداشت کنید. سپس حالت رتور قفل شده را نیز شبیه سازی نمایید. در این حالت یک بار شبیه سازی را با ولتاژ نامی، انجام دهید و بار دیگر ولتاژی را اعمال کنید که جریان استاتور موتور نامی شود و مشخصات اتصال کوتاه موتور را یادداشت کنید. درمورد تفاوت مقدار جریان وقتی موتور با ولتاژ نامی و ولتاژ کاهش یافته تغذیه می شود، توضیح دهید.

در نهایت با استفاده از نتایج دو آزمون پارامترهای مدار معادل را محاسبه و با پارامترهای اولیه موتور مقایسه نمایید.



## ۵-۴ تئوری آزمایش

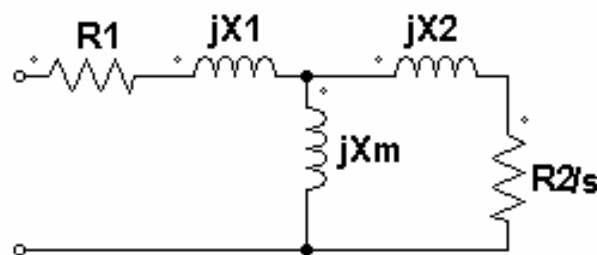
در موتور القایی سه فاز قفس سنجابی، بر روی استاتور سه سیم پیچ قرار گرفته که ۱۲۰ درجه با هم اختلاف فاز دارند. اگر به این سه سیم پیچ یک دسته جریان سه فاز اعمال شود میدان گردانی در فاصله هوایی ایجاد می شود که با سرعت متناسب با فرکانس جریان اعمالی می چرخد. رتور اینگونه موتورها از شیارهای اتصال کوتاه شده تشکیل شده است که به صورت قفس سنجاب می باشد. میله های رتور تغییرات میدان چرخان را دیده و با توجه به قانون فارادی در آنها ولتاژ القا می شود و چون اتصال کوتاه شده اند جریانی در آنها به وجود می آید که طبق قانون لنز می خواهد عامل به وجود آورنده خود را تضعیف کند. لذا میدان ناشی از این جریان نیز میدان گردانی می شود که با سرعت میدان گردان استاتور حرکت می کند. بدین ترتیب گشتاور تولید می شود و رتور را در جهت میدان چرخان استاتور به حرکت در می آورد ( اگر گشتاور تولیدی از گشتاور بار بیشتر باشد).

اختلاف سرعت رتور و سرعت میدان چرخان استاتور را با لغزش بیان می کنند به طوری که:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

در هنگام راه اندازی که رتور در حالت سکون است مقدار لغزش ۱ و در سرعت نامی لغزش در نزدیکی صفر خواهد بود ولی هیچوقت صفر نمی شود زیرا در این صورت رتور میدان چرخان استاتور را ساکن دیده و در آن ولتاژ القا نمی شود.

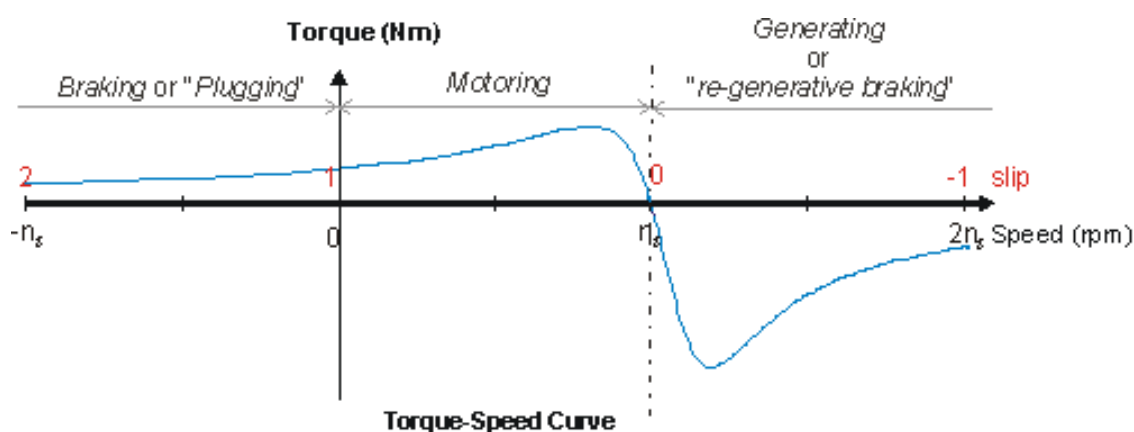
در شکل زیر مدار معادل موتور القایی شامل مقاومت و راکتانس نشتی استاتور، شاخه موازی مدل کننده تلفات هسته و اندوکتانس مدار مغناطیسی، مقاومت و راکتانس نشتی رتور نشان داده شده است.



شکل ۵: مدار معادل ماشین القایی

جریان استاتور از تقسیم ولتاژ آن بر امپدانس مدار معادل حاصل می شود. در راه اندازی میزان لغزش بزرگ بوده و مقاومت رتور کوچک می باشد و لذا جریان راه اندازی موتورهای القایی معمولاً زیاد می باشد.

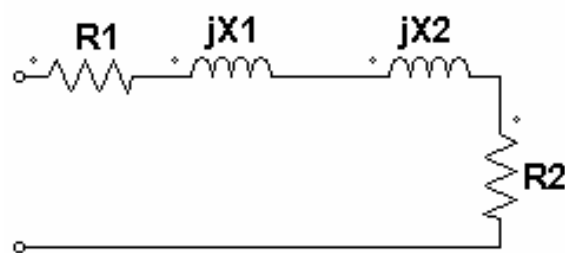
برای تعیین گشتاور در لغزشهای مختلف باید توان عبوری از فاصله هوایی را بر سرعت زاویه ای سنکرون تقسیم نماییم. در این صورت مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی به صورت شکل ۶ خواهد بود.



شکل ۶: منحنی گشتاور-سرعت موتور القایی

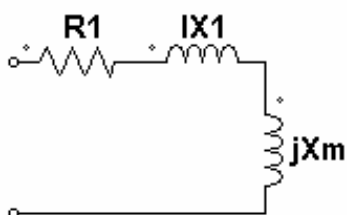
در منحنی گشتاور-سرعت فوق، نواحی کار موتوری، ژنراتوری و ترمزی مشخص شده اند. اگر گشتاوری به محور ماشین القایی وارد شود به نحوی که سرعت ماشین به سرعت بیشتر از سرعت سنکرون رسانده شود، ماشین القایی در حالت ژنراتوری کار میکند. برای سرعت های کمتر از صفر (دور معکوس)، ماشین القایی در حالت ترمزی کار خواهد کرد.

برای بدست آوردن پارامترهای مدار معادل ماشین القایی از سه آزمایش رتور قفل شده، بی باری و تعیین مقاومت dc استفاده می شود. در آزمایش رتور قفل شده، رتور ماشین ثابت نگه داشته میشود و با اعمال ولتاژ، سعی میشود جریان نامی در استاتور تولید شود. در این حالت  $s=1$  و با صرف نظر کردن از شاخه موازی مدار معادل به صورت زیر در خواهد آمد:



شکل ۷: مدار معادل در حالت آزمایش رتور قفل شده

در این حالت جریان، ولتاژ و توان ورودی موتور اندازه گیری می شوند. در آزمایش بی باری، موتور بدون بار مکانیکی کار میکند و جریان، ولتاژ و توان ورودی مجدداً اندازه گیری میشوند. در این حالت سرعت ماشین نزدیک سرعت سنکرون و بنابراین  $s \approx 0$  است. مدار معادل ماشین در این حالت به شکل زیر در می آید. لازم به ذکر است که در این حالت، مقاومت اندازه گیری شده علاوه بر مقاومت استاتور، معرف تلفات چرخشی نیز خواهد بود.



شکل ۸: مدار معادل در حالت آزمایش بی باری

با در نظر گرفتن مجموعه تلفات آهن و تلفات مکانیکی بی باری به عنوان تلفات چرخشی، با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در این آزمایش ها و با توجه به مدار معادل در هر حالت، میتوان پارامترهای ماشین القایی و کمیت تلفات چرخشی را محاسبه کرد. مقاومت استاتور را می توان با اندازه گیری مقاومت DC سیم پیچ با اعمال ولتاژ DC و اندازه گیری جریان، اندازه گیری نمود.

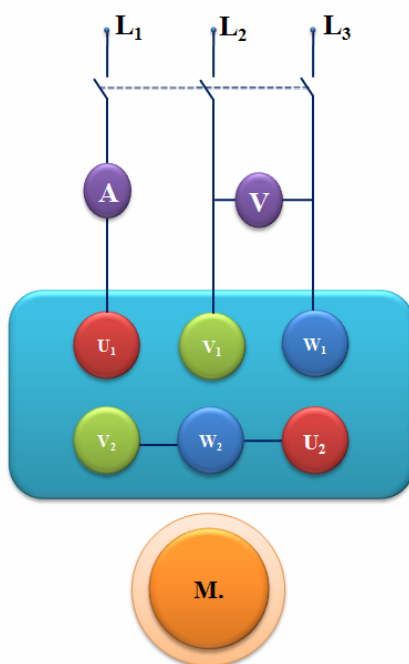
## ۵-۵ انجام آزمایش

ابتدا پارامترهای ماشین را در جدول زیر یادداشت نمایید. به رابطه ولتاژهای نامی در اتصال ستاره و مثلث دقت کنید.

توان نامی	ولتاژ نامی Y	ولتاژ نامی D	جریان نامی Y	جریان نامی D	سرعت نامی	ضریب توان

## ۵-۵-۱ راه اندازی موتور با اتصال ستاره

موتور را در اتصال ستاره براساس شکل زیر وصل کنید.

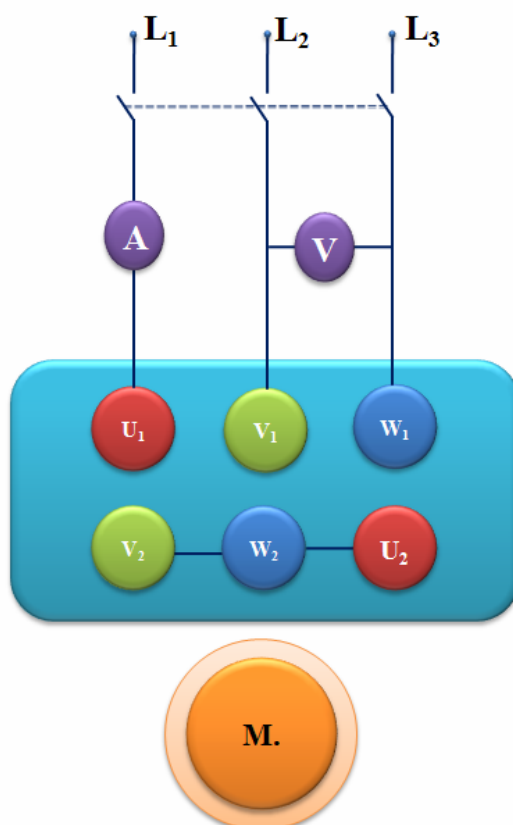


شکل ۹: مدار مربوط به راه اندازی در حالت ستاره

گشتاور نامی را از داده‌های پلاک موتور و با استفاده از رابطه  $T = \frac{P_n}{2\pi n / 60}$  که در آن  $P_n$  توان نامی بر حسب وات و  $n$  سرعت بر حسب دور در دقیقه است، تعیین کنید. گشتاور سروموتور را برابر ۵۰ درصد این مقدار تنظیم کنید. برای این منظور لازم است سرو را در مود pc راه اندازی کرده و در مود manual، کنترل گشتاور را انتخاب کنید. اتصال بین محور موتور القایی و بار مکانیکی (سروموتور) را برقرار نمایید. کلید manual را فشار دهید و گشتاور مورد نظر را وارد کنید. سپس کلید Continuous را فشار دهید. برای اندازه گیری و ترسیم جریان موتور، از آمپر متر موجود روی تابلوی کنترل سرو استفاده کنید. از قسمت new graph، یک نمودار جدید بسازید. در محور افقی، زمان و در محور عمودی جریان استاتور و سرعت را مشاهده کنید. به محض اینکه علامت ضربدر روی صفر قرار گرفت، موتور را راه اندازی کرده و جریان راه اندازی  $I_{AY}$  در اتصال ستاره را را مشاهده و ترسیم کنید. زمان شتاب گیری  $t_y$  را نیز در اتصال ستاره اندازه گیری نمایید. همچنین، سرعت موتور را در حالت دائمی یادداشت نمایید. آزمایش های فوق را یک بار دیگر برای گشتاور صفر تکرار کنید و نتایج را با حالت قبلی مقایسه کنید و توضیح دهید.

#### ۵-۲ تعیین مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی قفس سنجابی در اتصال ستاره

اتصالات را بر اساس شکل ۱۰ وصل کنید. (برای اندازه گیری توان و ضریب توان از ولت متر و آمپر متر کنترل سرو استفاده نمایید). جهت تعیین مشخصه گشتاور سرعت، مجدداً مود pc را انتخاب کنید. در این مرحله هدف این است که سرعت را از بالاتر از سرعت سنکرون تا سرعت منفی تغییر دهیم و منحنی گشتاور، بازده و جریان استاتور بر حسب سرعت موتور را مشاهده نماییم. نمودار جدیدی باز کنید. موتور القایی را به شبکه متصل کنید، دقت کنید که جهت چرخش موتور با جهت مثبت سرو یکسان باشد. سپس در این حالت، پارامترهای کنترل سرعت سرو را مشابه شکل ۷ تنظیم کنید تا در زمان آزمایش موتور در ۵ ثانیه به سرعت ۱۵۵۰ و سپس در ۳۰ ثانیه به سرعت ۵۰- برسد. منحنی های بدست آمده را مشاهده و تفسیر کنید.



شکل ۱۰: مدار مربوط به آزمایش مشخصه گشتاور-سرعت

**Testing conditions**

**Automatic mode**

Parameter to modify: **n [rpm]**

Start value: **1550** Stop value: **-50**

Time to reach start value: **5** sec Time to reach stop value: **30** sec

**Manual mode**

Parameter to modify: **n [rpm]**

Actual value: **0**

Increment: **10**

Time to reach new value: **short** (selected) **long** 1.05 s

**Protection**

Maximum TORQUE allowed: **23.29** Nm Minimum SPEED allowed: **0** rpm

**OK** **Cancel**

شکل ۱۱: تنظیم کنترل سرعت برای بدست آوردن منحنی گشتاور-سرعت

## ۵-۶ تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی

برای تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی، می توان از آزمایش های رتور قفل شده، بی باری و تست DC استفاده کرد.

### ۵-۶-۱ آزمایش بی باری

مدار شکل ۱۰ را با استفاده از منبع تغذیه سه فاز متغیر ببندید. ولتاژ منبع تغذیه را به تدریج تا ولتاژ نامی افزایش دهید. از کنترل دستی سرو موتور در مود PC، گشتاور را روی صفر ثابت کنید و مقادیر ولتاژ، جریان و توان الکتریکی موتور القایی را اندازه گیری نمایید.

### ۵-۶-۲ آزمایش رتور قفل

در این قسمت باید با استفاده مشخصه جریان-سرعت که قبلاً بدست آورده اید، ولتاژ مناسب برای داشتن جریان نامی را در حالت رتور قفل شده محاسبه نموده به ماشین اعمال نمایید. برای این منظور از کنترل سرعت سرو موتور در مود PC، سرعت را روی صفر ثابت کنید (آزمایش رتور قفل شده). سپس ولتاژ منبع ولتاژ متغیر را به آهستگی افزایش دهید تا جریان استاتور برابر مقدار نامی شود. توجه کنید که ولتاژ لازم برای انجام این آزمایش کم است. مقادیر جریان، توان و ولتاژ را در این حالت نیز اندازه گیری نمایید.

### ۵-۶-۳ تست DC

برای بدست آوردن مدار معادل به مقاومت استاتور نیز نیاز خواهید داشت. برای اندازه گیری مقاومت استاتور ترمینالهای سه فاز را دو به دو به ولتاژ DC منبع تغذیه قابل کنترل، متصل و جریان را اندازه گیری نمایید. با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده، پارامترهای مدار معادل را محاسبه کنید (موتور را یکبار کلاس A و بار دیگر کلاس B فرض نمایید).

## ۵-۷ پرسش و محاسبه

۱) آیا موتور موجود را می توان با شبکه سه فاز 380V با اتصال مثلث راه اندازی نمود؟ توضیح دهید.

۲) جریان بی باری موتور را با جریان نامی آن مقایسه نمایید. چرا این نسبت خیلی کوچک نمی باشد؟

۳) فکر می کنید که جریان راه اندازی زیاد چه تاثیری می تواند بر روی منبع تغذیه داشته باشد؟

۴) با توجه به منحنی بازده اندازه گیری شده بر حسب سرعت، بازده در چه سرعتی حداکثر است؟ چه نتیجه ای از این قسمت می گیرید؟

۵) با استفاده از پارامترهای بدست آمده، موتور القایی را شبیه سازی کنید و منحنی گشتاور-سرعت آن را با منحنی ای که در این آزمایش بدست آوردید مقایسه کنید. (موتور را یک بار کلاس A و بار دیگر کلاس B فرض نمایید)



**آزمایش ۶:**

**تعیین مشخصه‌های موتور DC سری و شنت**





## ۱-۶ هدف آزمایش

در این آزمایش مشخصه گشتاور، جریان آرمیچر و توان ورودی بر حسب سرعت یک موتور DC سری و سپس شنت به ازای ولتاژهای مختلف آرمیچر تعیین می‌شود.

## ۲-۶ آماده‌سازی جهت آزمایش

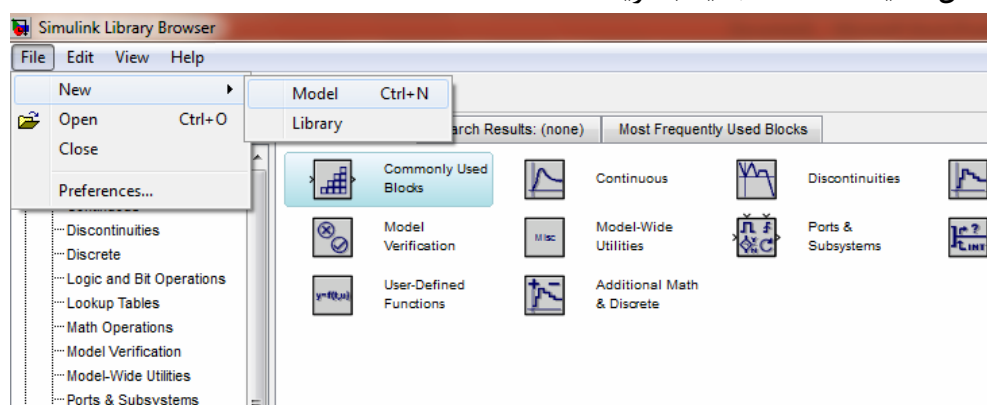
- تغییر سرعت در یک موتور DC سری و شنت چگونه صورت می‌گیرد؟
- مدار معادل موتورهای جریان مستقیم سری و شنت را رسم کرده و با توجه به آن، روابط گشتاور - سرعت آنها را با فرض خطی بودن تحریک بنویسید.
- مشخصه‌های گشتاور - سرعت موتورهای جریان مستقیم سری و شنت را در جریان تحریک نامی و ۵۰ درصد آن رسم کنید. در مورد این منحنی‌ها بحث کنید.
- اثر عکس‌العمل آرمیچر بر منحنی‌های قسمت قبلی چگونه خواهد بود؟
- با استفاده از مدار معادل در مورد دامنه جریان راه اندازی موتورهای DC سری و شنت توضیح دهید.
- اگر تحریک موتور شنت قطع یا اتصال کوتاه شود، چه اتفاقی می‌افتد؟
- آیا موتور DC سری را می‌توان بدون بار راه‌اندازی نمود؟ چرا؟
- بخش شبیه‌سازی را انجام دهید و نتایج آن را به همراه پیش‌گزارش تحویل دهید.

## ۳-۶ شبیه‌سازی

در این قسمت، دستورالعمل شبیه‌سازی عملکرد موتورهای DC مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که مدت زمان شبیه‌سازی در همه قسمت‌ها، به جز قسمت ج از بخش ۶-۳-۲، سه ثانیه می‌باشد.

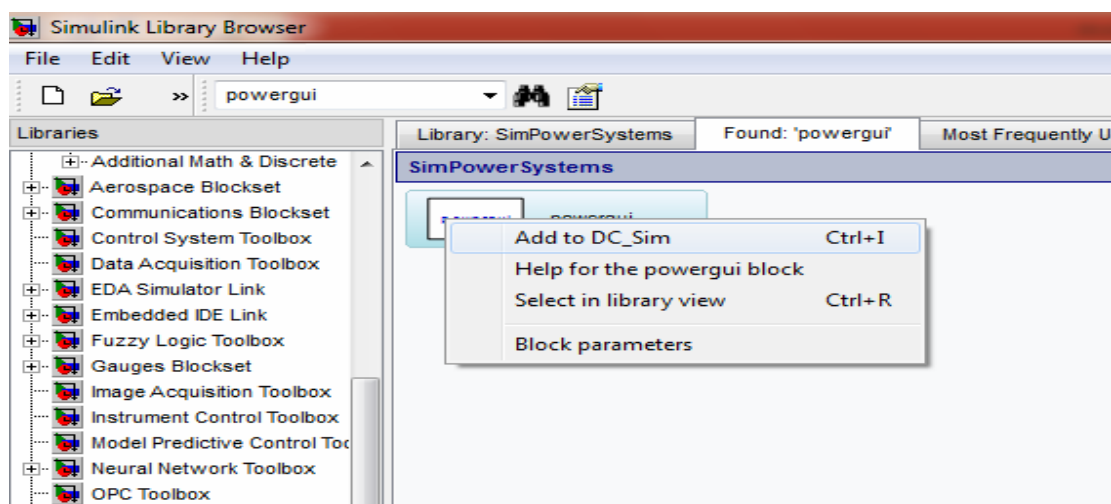
## ۱-۳-۶ موتور DC سری

مطابق شکل ۱، یک Model جدید بسازید:



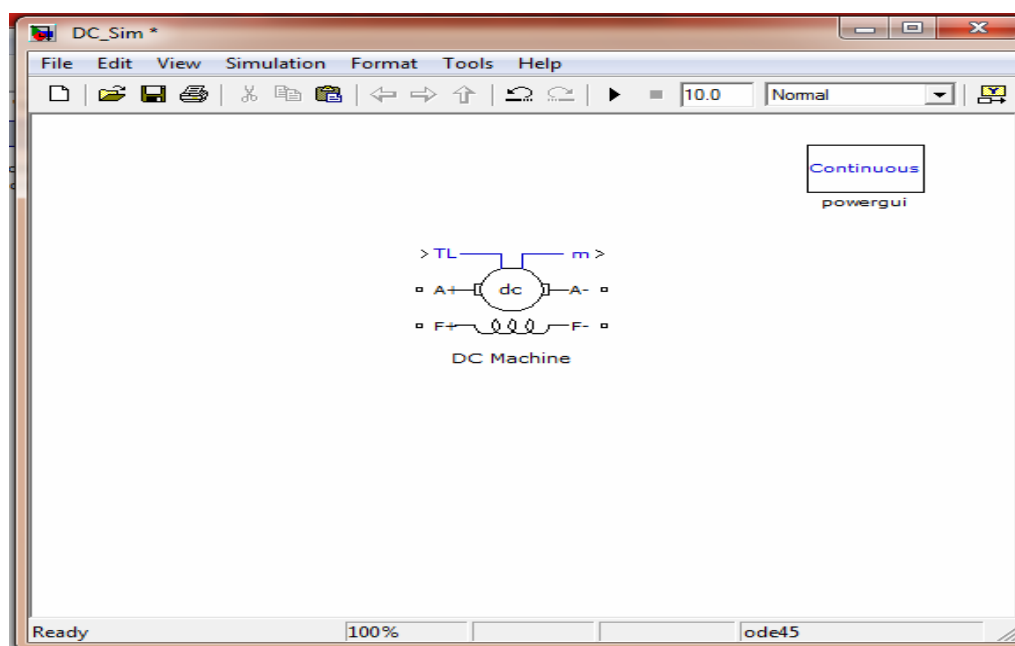
شکل ۱: ایجاد مدل

المان‌های مورد نیاز را وارد مدل کنید؛ ابتدا یک powergui به مدل وارد کنید. برای این کار در پنجره Simulink Library Browser در قسمت جستجو عبارت powergui را تایپ کنید و پس از پیدا کردن، آن را وارد مدل کنید که با کشیدن المان به مدل یا کلیک راست کردن روی المان و انتخاب گزینه Add to ... این کار امکان پذیر است (شکل ۲).



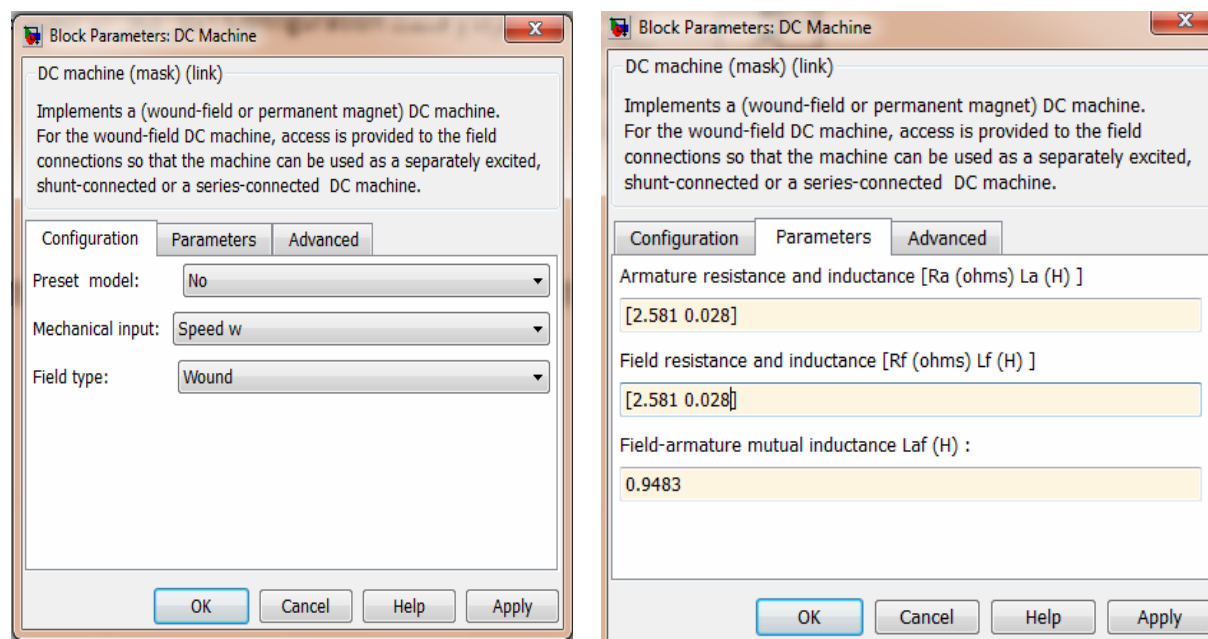
شکل ۲: اضافه کردن المان‌ها به مدار

حال باید یک DC Machine وارد مدل کنید که با تایپ این عبارت در قسمت جستجو و سپس کشیدن آن به مدل به شکل ۳ می‌رسیم:



شکل ۳: اضافه کردن ماشین DC

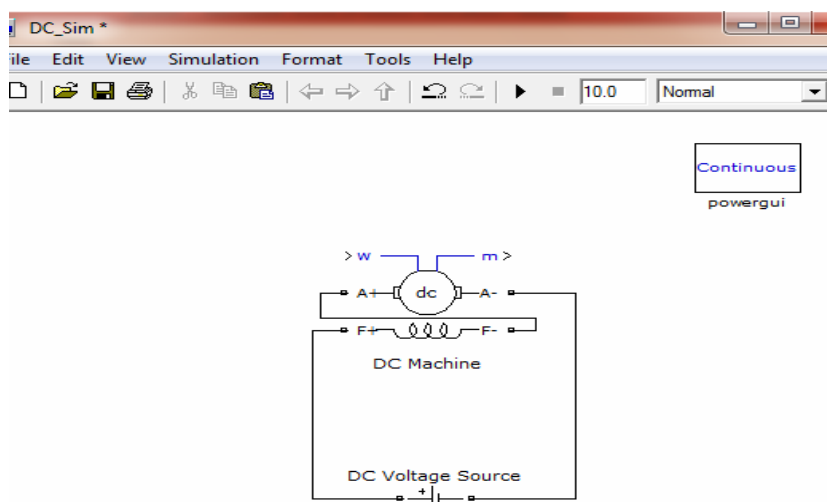
روی DC Machine کلیک کرده قسمت Configuration و Parameters را مثل شکل زیر تنظیم کنید:



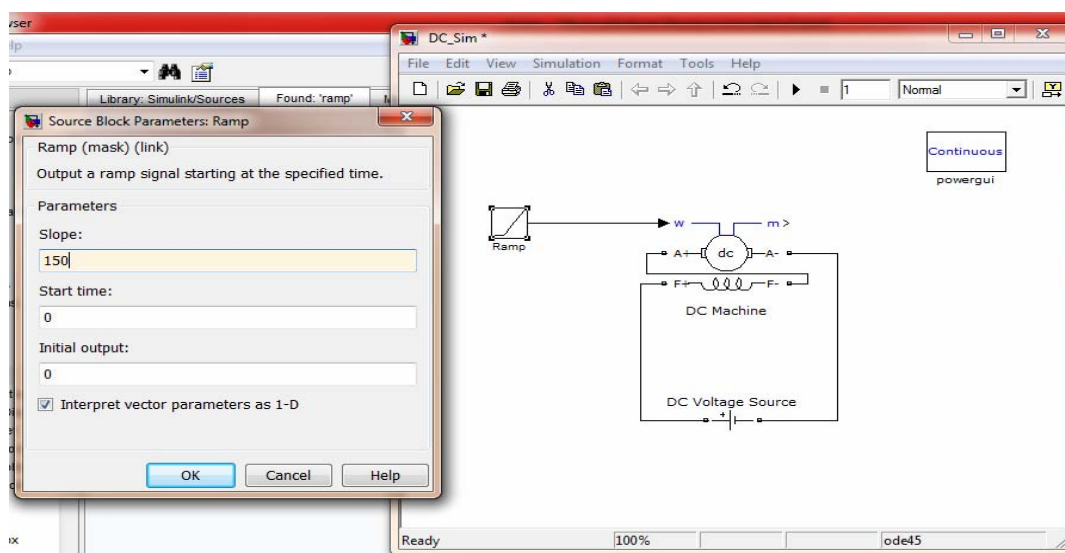
شکل ۴: تنظیم پارامترهای موتور

#### الف) مشخصه گشتاور - سرعت

حال یک DC Voltage Source به مدل اضافه کرده و مقدار آن را ۳۰۰ ولت قرار دهید، موتور را به صورت سری ببندید یعنی سر مثبت منبع ولتاژ به  $F^+$  و  $F^-$  را به  $A^+$  و  $A^-$  را به سر منفی منبع ولتاژ وصل کنید (شکل ۵). سپس یک ورودی Ramp مطابق شکل ۶، به عنوان سرعت موتور در واحد رادیان بر ثانیه به موتور بدهید، فرض می شود که این سرعت نامی موتور ۱۵۰ رادیان بر ثانیه می باشد و می خواهیم نمودار گشتاور سرعت را از سرعت ۰ تا ۱۵۰ رسم کنیم؛ بنابراین اگر زمان شبیه سازی را سه ثانیه قرار دهیم، شیب تابع Ramp باید ۵۰ باشد.

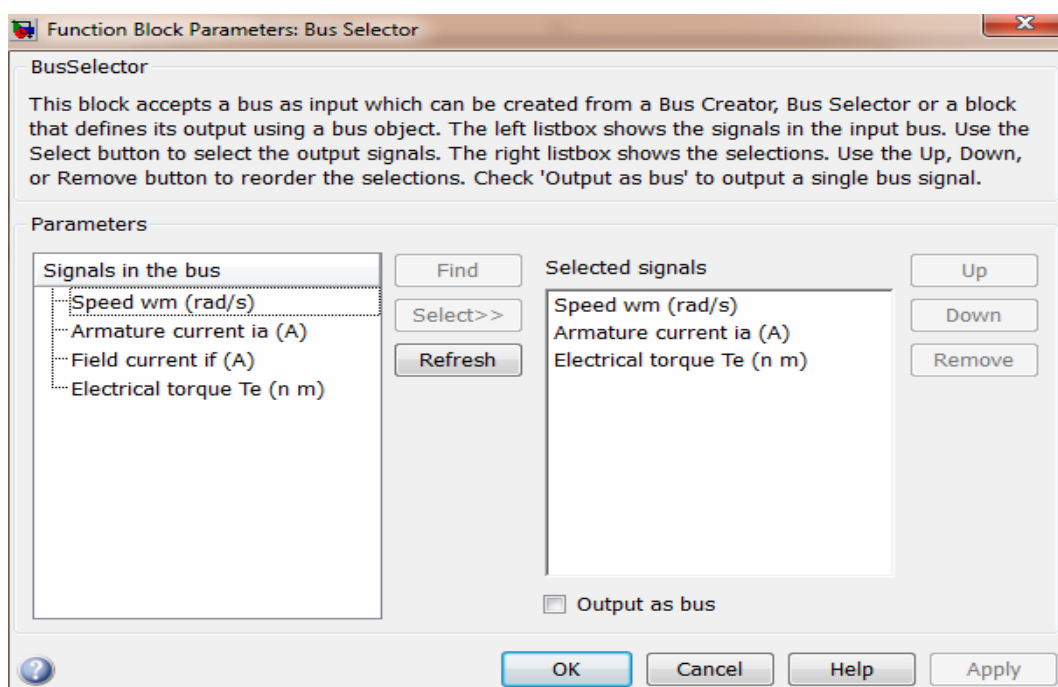


شکل ۵: اضافه کردن منبع ولتاژ



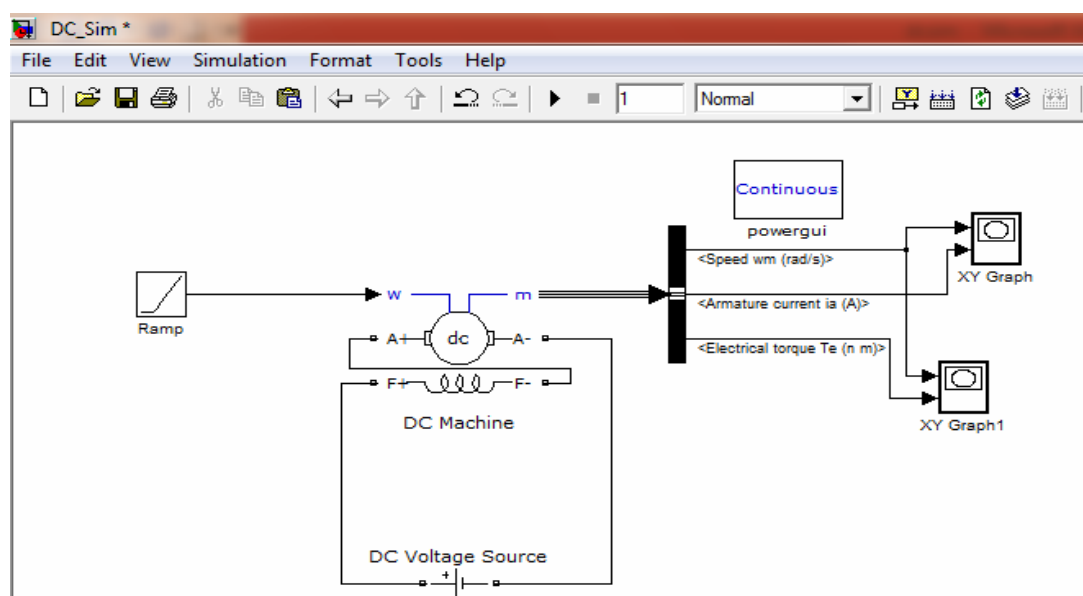
شکل ۶: اضافه کردن ورودی Ramp، به عنوان سرعت موتور

برای مشاهده خروجی‌های موتور، مطابق شکل ۷، یک Bus Selector به مدل اضافه کرده و m موتور را به ورودی آن وصل کنید، روی Bus Selector کلیک کرده و از ستون سمت چپ سرعت، جریان آرمیچر و گشتاور موتور را انتخاب کرده و با زدن Select این متغیرها را به ستون سمت راست منتقل کنید.



شکل ۷: اضافه کردن Bus Selector برای مشاهده خروجی‌های موتور

برای رسم نمودار گشتاور-سرعت و جریان-سرعت باید دو عدد XY Graph به مدل اضافه کنید (شکل ۸) و به اولین ورودی هر دو، سرعت موتور را وصل کنید و به دومین ورودیها جریان و گشتاور را وصل کنید. روی XY Graph ها کلیک کرده و مقادیر مینیمم و ماکزیمم X را ۰ و ۱۶۰ و برای Y را ۰ و ۱۰۰ قرار دهید.



شکل ۸: مدل کامل شده

نمودار گشتاور-سرعت و جریان-سرعت موتور را با run کردن برنامه بالا رسم کنید. گشتاور راه اندازی را از روی نمودار بدست بیاورید. (لازم است y-max را در xy graph1 به مقدار زیادی افزایش دهید).

#### ب) بررسی تاثیر مقاومت سری

المان Series RLC Branch را به مدل اضافه کنید، روی آن کلیک کرده و در Branch Type گزینه R را انتخاب کنید. این مقاومت را در مسیر جریان موتور قرار دهید.

- منحنی گشتاور سرعت و جریان سرعت موتور را برای سه مقدار ۱ اهم، ۵ اهم و ۱۰ اهم رسم کنید.

- یک روش کنترل سرعت موتور سری استفاده از مقاومت اضافی به صورت سری با موتور می باشد، آیا در یک گشتاور بار ثابت با افزایش مقاومت سری اضافی سرعت کم می شود یا زیاد؟ عیب این روش کنترل سرعت را توضیح دهید.

#### ج) بررسی تغییر ولتاژ روی مشخصه موتور DC

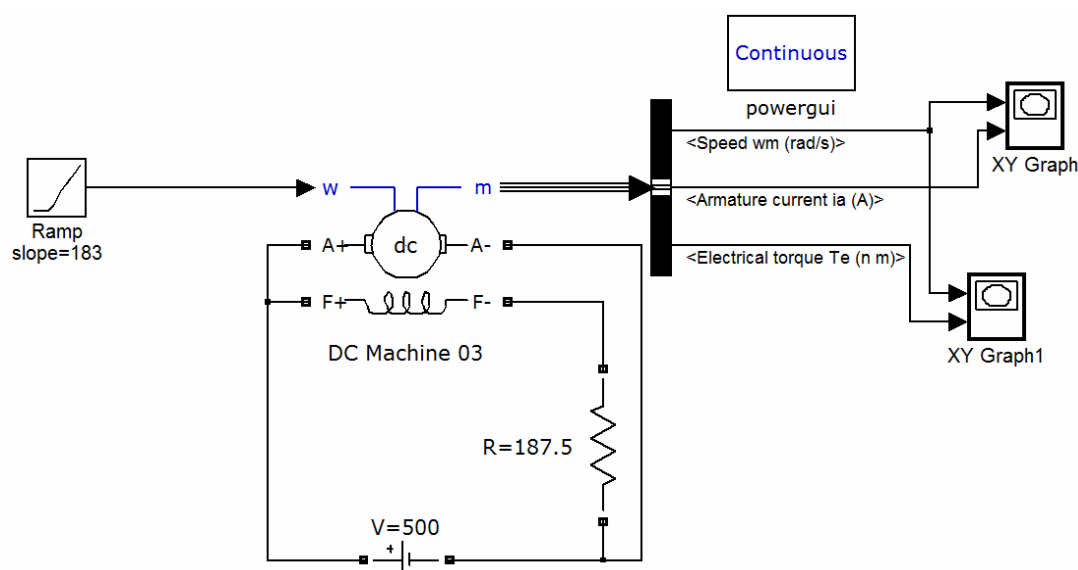
- منحنی گشتاور سرعت و جریان سرعت موتور را برای سه مقدار ولتاژ ۱۰۰ ولت، ۲۰۰ ولت و ۳۰۰ ولت رسم کنید.

- یک روش دیگر کنترل سرعت موتور سری تغییر ولتاژ اعمالی به موتور می باشد، آیا در یک گشتاور بار ثابت با افزایش ولتاژ سرعت کم می شود یا زیاد؟

#### ۶-۳-۲ موتور DC شنت

##### الف) منحنی گشتاور سرعت موتور شنت

مطابق شکل ۹، موتور قسمت قبل را به صورت شنت ببندید و مقاومت را در مدار تحریک قرار دهید. روی موتور کلیک کرده و در قسمت Preset Model موتور نوع ۰۳ را انتخاب کنید. برای فیلد این موتور ولتاژ ۳۰۰ ولت و برای آرمیچر ولتاژ ۵۰۰ ولت مورد نیاز است. اگر بخواهید موتور را به صورت شنت ببندید و از ولتاژ ۵۰۰ ولت استفاده کنید باید مقدار مقاومت را برابر ۱۸۷/۵ اهم قرار دهید تا جریان فیلد نامی با ولتاژ ۵۰۰ ولت و مقاومت سری حاصل شود. سرعت نامی موتور rpm ۱۷۵۰ یا ۱۸۳ رادیان بر ثانیه است، پس شیب ورودی Ramp را  $\frac{183}{3}$  قرار دهید. مقدار Max X در XY Graph را ۱۹۰ قرار دهید.



شکل ۹: تعیین منحنی گشتاور سرعت موتور شنت

- نمودار گشتاور سرعت و جریان سرعت را با اجرای شبیه سازی بالا رسم کنید و با نمودار گشتاور سرعت موتور سری مقایسه کنید.
- گشتاور راه اندازی موتور شنت را از روی نمودار بدست بیاورید و با موتور سری مقایسه کنید . با توجه به نتایج به دست آمده، یک کاربرد برای موتور سری نام ببرید.

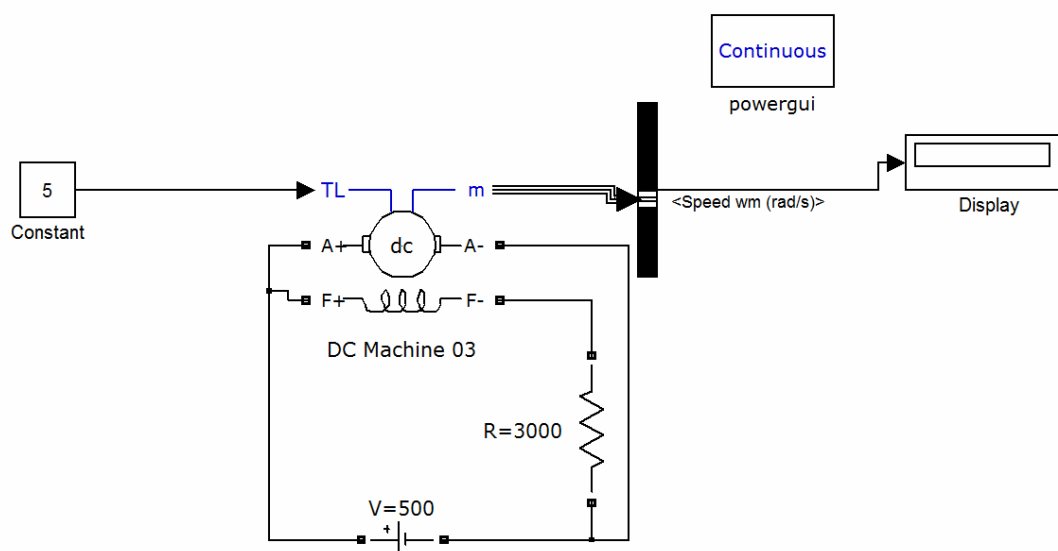
### ب) بررسی تاثیر مقاومت سری در مدار تحریک

- نمودار گشتاور سرعت و جریان سرعت را برای سه مقدار  $R=160, R=190, R=220$  اهم رسم کنید.
- یک روش کنترل سرعت موتور شنت تغییر مقاومت مدار تحریک موتور می باشد، آیا در یک گشتاور بار ثابت با افزایش مقاومت مدار تحریک ، سرعت کم می شود یا زیاد؟

### ج) کنترل سرعت به روش تضعیف میدان

- ورودی را به جای سرعت، گشتاور قرار دهید و مقدار آن را توسط المان Constant برابر ۵ قرار دهید. سرعت موتور را توسط المان Display بخوانید. زمان شبیه سازی را ۱۰ ثانیه قرار دهید.
- مقاومت مدار تحریک را برابر  $R=150, R=190, R=220$  اهم قرار دهید و سرعت موتور را بخوانید. در گشتاور بار ثابت (در اینجا ۵) با افزایش مقاومت مدار تحریک، سرعت زیاد می شود یا کم؟

- مطابق شکل ۱۰، مقاومت مدار تحریک را ۳۰۰۰ اهم قرار داده و اثر آن را روی سرعت موتور ملاحظه کنید و توضیح دهید در صورت قطع شدن مدار تحریک موتور شنت چه مشکلی پیش می‌آید. توجه کنید که سرعت نامی این موتور ۱۸۳ رادیان بر ثانیه است.



شکل ۱۰: بررسی اثر افزایش مقاومت تحریک روی سرعت موتور

#### د) کنترل سرعت به روش تغییر ولتاژ

- در مدار شکل ۱۰، مقاومت را ۱۸۷,۵ قرار دهید و گشتاور همان ۵ باقی بماند. ولتاژ را ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰ ولت قرار داده و سرعت موتور را بخوانید. در بار ثابت با افزایش ولتاژ توضیح دهید که آیا سرعت زیاد می‌شود یا کم؟

#### ه) کنترل سرعت به روش تغییر مقاومت سری با آرمیچر

- ولتاژ را ۵۰۰ و مقاومت تحریک را ۱۸۷,۵ قرار دهید، گشتاور همان ۵ نیوتن متر باقی می‌ماند. یک مقاومت با آرمیچر سری کنید و سه مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰ اهم به آن بدهید و سرعت موتور را بخوانید. در بار ثابت با افزایش مقاومت سری با آرمیچر توضیح دهید که آیا سرعت زیاد می‌شود یا کم؟



## ۶-۴ تئوری آزمایش

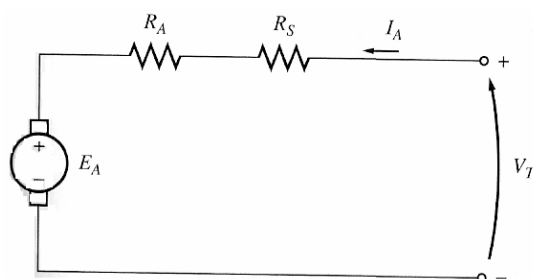
در موتورهای DC دو سیم‌پیچ تحریک و آرمیچر وجود دارد. با اعمال جریان‌های مستقیم به این دو سیم‌پیچ میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده و از تقابل این میدانها گشتاوری در موتور تولید می‌شود که باعث چرخش آن می‌گردد.

## ۶-۳-۱ موتور DC سری

در موتور DC سری، سیم‌پیچ‌های آرمیچر و تحریک به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند. لذا جریان آرمیچر و تحریک (میدان) یکی هستند. اگر سیستم مغناطیسی را خطی فرض کنیم؛ خواهیم داشت:

$$E_A = K I_A \omega$$

$$T = K I_A I_F = K I_A^2$$



شکل ۱۱: مدار معادل موتور DC سری

با توجه به مدار فوق، می‌توان نوشت:

$$E_A = V_T - (R_A + R_S) I_A$$

از ترکیب سه رابطه اخیر، عبارت زیر به دست می‌آید که بیان‌گر مشخصه خروجی موتور DC سری است:

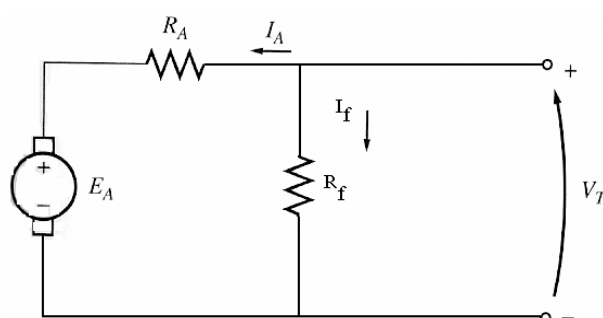
$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{KT}} - \frac{R_A + R_S}{K}$$

با توجه به این رابطه، می‌توان با تغییر ولتاژ آرمیچر سرعت را کنترل نمود. با افزایش ولتاژ آرمیچر سرعت موتور زیاد و با کاهش آن سرعت کم می‌شود. همچنین سرعت موتور را می‌توان با افزودن یک مقاومت به صورت سری و تغییر دادن آن تنظیم کرد (چگونه؟). از طرف دیگر با توجه به صفر بودن ولتاژ القایی آرمیچر در لحظه راه اندازی، لازم است که موتور با ولتاژهای پایین راه اندازی شده و ولتاژ آرام آرام زیاد شود و یا از یک مقاومت راه انداز در موتور به

صورت سری با مدار آرمیچر استفاده شود و پس از اینکه موتور راه‌اندازی شد و نیروی محرکه در آن به وجود آمد این مقاومت برای کاهش تلفات خارج شود.

### ۶-۳-۲ موتور DC موازی (شنت)

در این موتورها سیم‌پیچی تحریک به صورت موازی با سیم‌پیچی آرمیچر قرار گرفته است و هر دو توسط یک منبع مشترک تغذیه می‌شوند. در شکل ۱۲ یک موتور DC موازی نشان داده شده است.



شکل ۱۲: مدار معادل موتور DC شنت

مشابه موتور سری می‌توان برای این موتور نیز رابطه بین سرعت، گشتاور و ولتاژ آرمیچر را نوشت. این کار را انجام داده و راههای کنترل سرعت آن را با توجه به رابطه به دست آمده بیان نمایید.

### ۶-۴-۱ انجام آزمایش

#### ۶-۴-۱-۱ مشخصه موتور DC سری

#### الف) مشخصه با باری

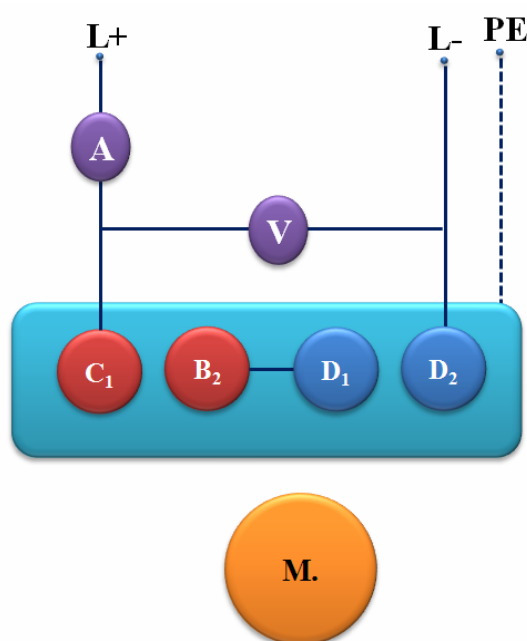
ابتدا ماسک موتور سری (12M) را بر روی ترمینال‌های موتور قرار دهید تا سیم‌پیچ‌های تحریک سری و آرمیچر مشخص شود. مقادیر نامی موتور را از روی ماسک بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

ولتاژ	جریان	توان	سرعت

پایانه‌های سیم‌پیچ سری ( $D_1, D_2$ ) و آرمیچر  $A_1, A_2$  می‌باشد (این دو پایانه در ماسک موتور سری قابل رویت نیستند). به منظور جبران نمودن عکس‌العمل آرمیچر دو سیم‌پیچ کمکی با سیم پیچ آرمیچر سری شده است. بدین ترتیب پایانه‌های  $C_1, B_2$  به عنوان پایانه‌های مجموعه سیم پیچ آرمیچر و سیم پیچ کمکی استفاده می‌شود.

قبل از سیم‌بندی آزمایش، دقت نمایید که منبع ولتاژ را از دو سر  $L+$  و  $L-$  منبع تغذیه (ولتاژ متغیر صفر تا ۲۳۰ ولت و ۶ آمپر) بگیرید. مقدار ولتاژ خروجی این منبع با تنظیم کننده موجود قابل تغییر است.

موتور DC سری را به صورت زیر سیم‌بندی کنید. در واقع مثبت منبع تغذیه DC متغیر را به مثبت آمپر متر، سر دیگر آمپر متر را به  $C_1$ ،  $B_2$  را به  $D_1$  و  $D_2$  را به منفی منبع تغذیه وصل نمایید. یک ولت‌متر نیز به دو سر منبع تغذیه وصل شود. با استفاده از یک سیم، زمین موتور را نیز به فیش زمین منبع تغذیه وصل نمایید.



شکل ۱۳: نحوه اتصال موتور به صورت سری

واحد کنترل را روشن نموده و در این حالت باید چراغ‌های قرمز خاموش باشند. در غیر این صورت اتصالات حفاظتی (پروب حفاظت دما، کاورها و یا کاور انتهایی) برقرار نمی‌باشد. وضعیت selector را روی مد pc گذاشته، نرم‌افزار را باز نموده، RS232 را detect کنید. در صورتی که کابل RS232 متصل و مد PC درست باشد ارتباط برقرار می‌گردد. گزینه DC motor را انتخاب - نمایید.

ولتاژ را از صفر به تدریج تا ۱۵۰ ولت افزایش دهید و موتور را راه‌اندازی نمایید<sup>۱</sup>. توجه کنید که در هر مرحله از انجام آزمایش چنانچه، سرعت موتور از حد مجاز افزایش پیدا کرد، منبع تغذیه و واحد کنترل سرو را خاموش نمایید. سپس مد اتوماتیک سرعت را از مقدار نامی تا ۹۰ درصد آن تغییر دهید و نمودار گشتاور، توان ورودی و خروجی، جریان و ولتاژ را بر حسب دور رسم نمایید.

### ب) بررسی تاثیر دامنه ولتاژ

آزمایش مرحله قبل را به ازای ولتاژهای ۱۲۰، ۱۰۰ و ۸۰ ولت تکرار کنید و نتایج را با مرحله قبل مقایسه نمایید.

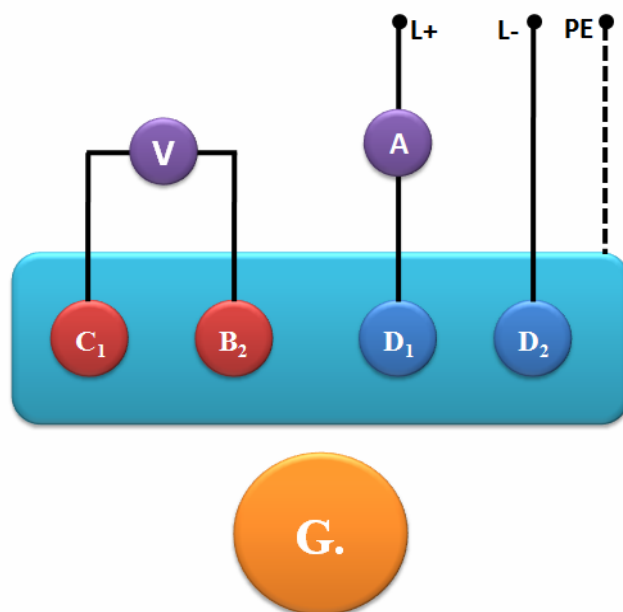
### ج) منحنی مغناطیس شونددگی

در این بخش هدف بدست آوردن منحنی تغییرات ولتاژ القا شده در دو سر آرمیچر بر حسب جریان میدان (منحنی مغناطیس شونددگی ماشین DC) در سرعت نامی موتور می باشد. برای این منظور از ماشین DC در مد ژنراتوری استفاده می‌شود. ابتدا مطابق شکل ۱۴، سیم‌پیچ تحریک سری را به منبع تغذیه DC متغیر متصل کنید و مقدار ولتاژ منبع را روی صفر قرار دهید. سیم‌پیچی آرمیچر باید مدار باز باشد. سرعت را روی مقدار نامی تنظیم کنید (در صورت استفاده از سرو در مد سرعت ثابت، با استفاده از ولوم افزایش سرعت، سرعت را به مقدار نامی برسانید و در صورت استفاده از مد PC، سرعت را در مد manual (کنترل سرعت)، روی مقدار نامی تنظیم نمایید). حال مقدار جریان تحریک<sup>۲</sup> را با افزایش ولتاژ منبع در ۵ پله از صفر تا مقدار نامی تغییر دهید و در هر مرحله ولتاژ دو سر آرمیچر ( $C_1$  و  $B_2$ ) را یادداشت کنید. در نهایت با استفاده از مقادیر بدست آمده منحنی ولتاژ بر حسب جریان تحریک را رسم کنید.

---

۱- روش صحیح‌تر این است که کنترلر را در مد کنترل گشتاور با گشتاور صفر قرار دهیم و ولتاژ منبع تغذیه را به تدریج افزایش دهیم تا سرعت موتور به سرعت نامی برسد. ولی به دلیل محدودیت کنترلر، در این شرایط سرعت موتور از کنترل خارج می‌شود و به شدت افزایش می‌یابد. لذا، در این آزمایش به هیچ عنوان از مد کنترل دستی استفاده نکنید مگر اینکه در دستو کار به صراحت قید شده باشد.

۲- توجه کنید که در موتور سری، جریان تحریک همان جریان آرمیچر است.



شکل ۱۴: مدار آزمایش منحنی مغناطیس شونده

#### ۴-۲-۶ مشخصه موتور DC شنت

ماسک موتور را عوض کرده و ماسک موتور DC شنت را بر روی ترمینال‌های موتور قرار دهید. در این حالت پایانه های سیم‌پیچی تحریک موتور  $E_1, E_2$  خواهد بود و پایانه های سیم‌پیچ آرمیچر  $A_1, A_2$  می‌باشد. به منظور جبران نمودن عکس‌العمل آرمیچر دو سیم‌پیچ کمکی با آن سری شده است و می‌توان دو سر  $C_1, B_2$  را به عنوان دو سر آرمیچر داشت. مجدداً مقادیر نامی موتور را از روی ماسک بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

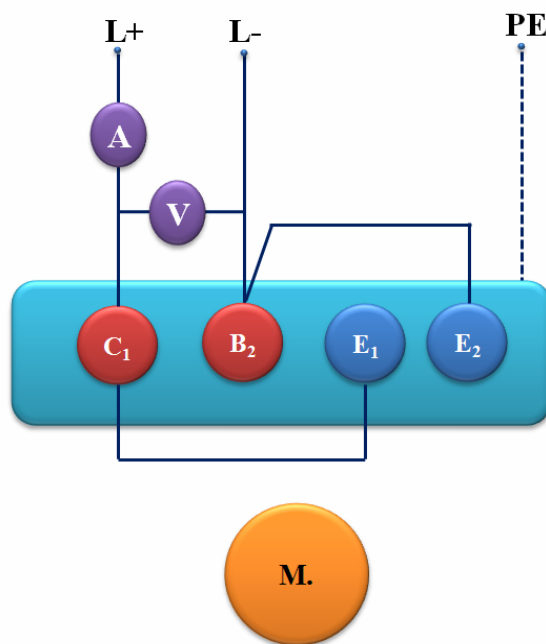
ولتاژ	جریان	توان	سرعت	ولتاژ تحریک	جریان تحریک

در این قسمت نیز توجه کنید که در هر مرحله از انجام آزمایش چنانچه، سرعت موتور از حد مجاز افزایش پیدا کرد، منبع تغذیه و واحد کنترل سرو را خاموش نمایید.

#### الف) مشخصه با باری

موتور را به صورت زیر سیم‌بندی کنید. مثبت منبع تغذیه را به مثبت آمپر متر، سر منفی آمپر متر را به  $C_1$ ،  $B_2$  را به سر منفی منبع تغذیه ببرید. سیم‌پیچ تحریک را با مدار آرمیچر موازی

نمایید، یعنی  $E_1$  را به  $C_1$  و  $E_2$  را به  $B_2$  وصل کنید. یک ولت‌متر نیز با دو سر منبع تغذیه مانند قسمت قبل موازی شود. با استفاده از یک سیم، زمین موتور را نیز به فیش زمین منبع تغذیه وصل نمایید.



شکل ۱۵: اتصال موتور در حالت شنت

واحد کنترل را روشن، نرم‌افزار را اجرا کنید. در این جا نیز مانند قبل موتور را با ولتاژ پایین راه-اندازی نموده و ولتاژ را تا رسیدن به ولتاژ نامی افزایش دهید سپس مد کنترل کنترل اتوماتیک سرعت را از سرعت نامی تا ۹۰ درصد آن، تنظیم کنید و مشخصه گشتاور خروجی، توان و جریان ورودی و نیز توان خروجی بر حسب سرعت موتور رسم نمایید.

### ب) بررسی تاثیر مقاومت سری در مدار تحریک

در این مرحله، هدف بررسی تاثیر یک مقاومت سری در مدار تحریک روی مشخصه های موتور شنت است. در اینجا از مقاومت نشان داده شده در شکل ۱۶ استفاده کنید و آن را به صورت سری در مدار تحریک قرار دهید. پیش از استفاده از مقاومت هر سه مقاومت را با هم موازی کنید. سپس برای مقاومت‌های حالت ۸ و ۵ آزمایش قبل را تکرار نمایید. نتایج را با هم مقایسه کنید و اثر مقاومت را توضیح دهید.

نکته: قبل از آزمایش از قطع نبودن مقاومت به علت سوختن فیوز مطمئن شوید. (چگونه؟ چرا؟)

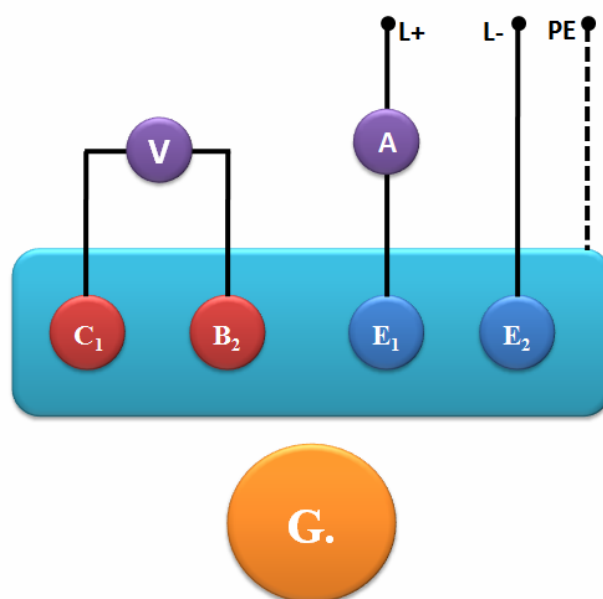


شکل ۱۶: مقاومت سری در مدار تحریک شنت

### ج) منحنی مغناطیس شونددگی در ماشین شنت

در این بخش هدف بدست آوردن منحنی تغییرات ولتاژ القا شده در دو سر آرمیچر بر حسب جریان میدان شنت (منحنی مغناطیس شونددگی ماشین DC) در سرعت نامی موتور می باشد. برای استخراج منحنی مغناطیس شونددگی ماشین DC، مطابق شکل ۱۷ در مد ژنراتوری، دو سر سیم پیچ تحریک را به منبع تغذیه DC متغیر (ولتاژ متغیر صفر تا ۲۳۰ ولت و ۶ آمپر) متصل نمایید. سیم پیچ آرمیچر باید مدار باز باشد. سرعت سرو را روی مقدار نامی تنظیم کنید (با استفاده از مد PC، سرعت را در مد manual (کنترل سرعت) روی مقدار نامی تنظیم نمایید). حال با افزایش ولتاژ منبع مقدار جریان تحریک<sup>۱</sup> را در ۵ پله از صفر تا مقدار نامی تغییر دهید و در هر مرحله ولتاژ دو سر آرمیچر را یادداشت کنید. با استفاده از این مقادیر منحنی مغناطیس شونددگی را رسم نمایید و رفتار آن را توضیح دهید.

۱- توجه کنید که مقدار جریان تحریک در موتور شنت بسیار کمتر از جریان تحریک موتور سری می باشد (چرا؟).



شکل ۱۷: مدار آزمایش منحنی مغناطیس‌شوندگی در ماشین شنت

#### د) بررسی اثر گشتاور بار و جریان تحریک

از مدار قسمت (ب) استفاده کنید. سیم‌پیچی آرمیچر را به منبع تغذیه متصل کنید. فعلاً مقاومت سری قرار داده شده در مدار تحریک شنت را اتصال کوتاه کنید. ابتدا باید ولتاژ را برابر مقدار نامی قرار دهید تا سرعت و جریان تحریک نیز به مقادیر نامی برسند. در اینجا نیز لازم است این کار را به آرامی انجام دهید تا از کشیده شدن جریان بیش از حد آرمیچر جلوگیری کنید. پس از این که کمیت‌های یاد شده به مقادیر نامی خود رسیدند، سرو را در مد کنترل گشتاور قرار دهید. برای این منظور، در مد PC، در قسمت manual کنترل گشتاور را انتخاب کنید. مقدار گشتاور را در ۵ مرحله از صفر تا ۱ نیوتون متر افزایش دهید و در هر مرحله سرعت و جریان آرمیچر را یادداشت کنید. منحنی سرعت-گشتاور و جریان-گشتاور را رسم کنید و آن‌ها را توضیح دهید. مقدار جریان تحریک این حالت را نیز یادداشت کنید.

گشتاور	۰	۰.۲	۰.۴	۰.۶	۱
سرعت	۲۹۸۹	۲۱۸۸	۲۱۲۹	۲۰۱۶	۱۹۱۶
جریان آرمیچر	۰.۸۵	۱.۱۹	۱.۴	۱.۶۲	۲.۰۱



سپس موتور را خاموش کرده و برای بررسی اثر جریان تحریک، مقاومت مدار تحریک را وارد مدار نمایید. از آنجا که با اضافه شدن مقاومت در مدار تحریک، سرعت موتور در ولتاژ ثابت افزایش می‌یابد (چرا؟) مقدار مقاومت اضافه شده باید کوچک باشد. برای این منظور، مانند قسمت قبل هر سه شاخه مقاومت سه فاز را موازی کنید و مقدار مقاومت را نیز در کمترین مقدار (پله ۸) تنظیم کنید. در این حالت سعی کنید موتور را به آرامی راه اندازی کنید تا ولتاژ آرمیچر به ولتاژ نامی برسد. سرعت موتور در این حالت نباید بیشتر از ۲۸۰۰ دور بر دقیقه باشد. مقدار جریان تحریک را در این حالت یادداشت نمایید. مجدداً آزمایش قبلی را برای ۵ مقدار گشتاور از صفر تا ۱ نیوتون متر تکرار کنید و منحنی‌های سرعت-گشتاور و جریان-گشتاور را رسم کنید. با استفاده از این منحنی‌ها و نتایج قسمت قبل، تاثیر گشتاور بار و جریان تحریک را بر سرعت موتور و جریان آرمیچر توضیح دهید.

گشتاور	۰				۱
سرعت					
جریان آرمیچر					

#### ۵-۶ پرسش و محاسبه

- ۱) با توجه به نتایج آزمایش، تاثیر تغییرات ولتاژ پایانه را بر مشخصه‌های موتورهای سری و شنت بیان نموده، در مورد علت آن بحث کنید.
- ۲) تاثیر افزایش مقاومت تحریک بر مشخصه‌های گشتاور-سرعت موتورهای سری و شنت را توضیح دهید.
- ۳) یکی از مهم‌ترین کاربردهای موتورهای سری در حمل و نقل و به خصوص در مترو می‌باشد. با توجه به مشخصه گشتاور-سرعتی که به دست آورده‌اید، می‌توانید علل این امر را بیان کنید؟
- ۴) محدوده تغییرات سرعت در موتورهای سری بیشتر از بقیه انواع موتورهای DC است. فکر می‌کنید چرا؟
- ۵) منحنی‌های مغناطیس شوندگی بدست آمده در آزمایش را مقایسه و تفسیر کنید.
- ۶) روشهای کنترل سرعت موتورهای DC (در هر دو حالت موتور سری و شنت) را مقایسه کنید، مزایا و معایب آنها را نام ببرید و محدودیتهای آنها را توضیح دهید.



پیوست ۱:

**شبیه‌سازی راه‌اندازی و کنترل سرعت موتورهای  
سنکرون آهنربای دایم (PMSM)**



### پ ۱-۱ هدف آزمایش

با انجام و تکمیل این آزمایش، راه‌اندازی و روش‌های کنترل سرعت حلقه باز و حلقه بسته موتورهای سنکرون آهنربای دایم ((Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) معرفی و در محیط SIMULINK-MATLAB اجرا می‌شود.

### پ ۱-۲ آماده‌سازی جهت آزمایش

- چرا موتورهای سنکرون با وصل به شبکه راه‌اندازی نمی‌شوند؟
- چگونه می‌توان با استفاده از مبدل فرکانس موتور سنکرون را راه‌اندازی نمود؟
- چرا در راه‌اندازی و کنترل سرعت ماشینهای AC نسبت  $V/f$  را ثابت نگه می‌داریم؟
- توضیح دهید که چگونه می‌توان ولتاژ AC با دامنه و فرکانس قابل کنترل تولید نمود؟
- انواع مبدلهای فرکانس استاتیکی را نام ببرید و در مورد ساختار آنها توضیح دهید.

### پ ۱-۳ تئوری آزمایش

روش‌های مختلفی برای راه‌اندازی موتور سنکرون مانند راه‌اندازی به صورت موتور القایی، چرخاندن رتور با محرک خارجی و رساندن سرعت آن به سرعت سنکرون و سپس موازی کردن با شبکه و در نهایت استفاده از مبدل فرکانس استفاده می‌شود. در راه‌اندازی با مبدل فرکانس، فرکانس ولتاژ یا جریان تغذیه استاتور از مقادیر کم شروع می‌شود و به تدریج افزایش می‌یابد. بدین ترتیب رتور با دنبال کردن افزایش کند فرکانس شتاب می‌گیرد. در روشهای حلقه باز، فرکانس تغذیه با شیبی که از قبل تعریف شده است افزایش می‌یابد در حالی که در روش‌های حلقه بسته کنترل سرعت، فرکانس بر اساس سرعت ماشین و اختلاف آن با سرعت مورد نظر به گونه‌ای که کنترل‌کننده سرعت مشخص می‌نماید تغییر می‌کند. در این سیستم‌ها با توجه به اندازه‌گیری سرعت امکان خارج شدن از حالت سنکرون وجود ندارد. بدین ترتیب مبدل فرکانس می‌تواند ضمن استفاده برای راه‌اندازی برای کنترل سرعت در حالت کار دائمی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

امروزه برای ایجاد ولتاژ AC با دامنه و فرکانس متغیر از مبدلهای فرکانس استاتیکی استفاده می‌شود. کنترل سرعت موتورهای سنکرون به دو روش حلقه باز و حلقه بسته امکان‌پذیر است. در روش حلقه باز پس از انتخاب فرکانس ورودی، ولتاژ DC اعمالی به مبدل سه فاز (اینورتر) متناسب با این فرکانس انتخاب می‌گردد.  $(\frac{V}{f} \text{ ثابت})$ . مقدار ضریب مورد نیاز از شرایط نامی موتور به دست می‌-

آید. (به عنوان مثال برای یک موتور ۳۸۰ ولت و ۵۰ هرتز این ضریب  $\frac{220\sqrt{2}}{50}$  می‌باشد).

در مواردی که از کنترل برداری برای کنترل مبدل فرکانس استفاده می‌شود می‌توان علاوه بر دامنه و فرکانس ولتاژ، فاز آن را نیز کنترل نمود.

## پ ۱-۴ انجام آزمایش

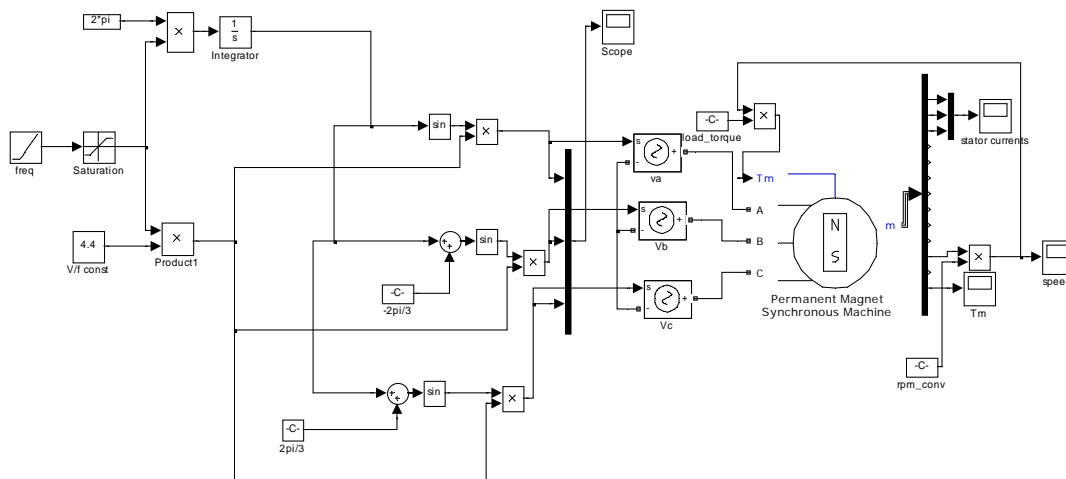
### پ ۱-۴-۱ راه‌اندازی

الف- ابتدا راه‌اندازی موتور با ثابت نگه داشتن نسبت ولتاژ به فرکانس را آزمایش می‌کنیم. مدار این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. فایل pmsm\_1.mdl فایل تهیه شده برای این بخش می‌باشد. آن را باز نموده و دقت نمایید که پارامترهای موتور مطابق شکل ۲ تنظیم شده باشد. شیب ورودی فرکانس را به گونه‌ای انتخاب نمایید تا در مدت ۱ ثانیه فرکانس به ۵۰ هرتز برسد. شبیه‌سازی را برای ۲ ثانیه اجرا نمایید. با مشاهده سرعت، گشتاور و جریان در مورد نتیجه راه‌اندازی بحث نمایید.

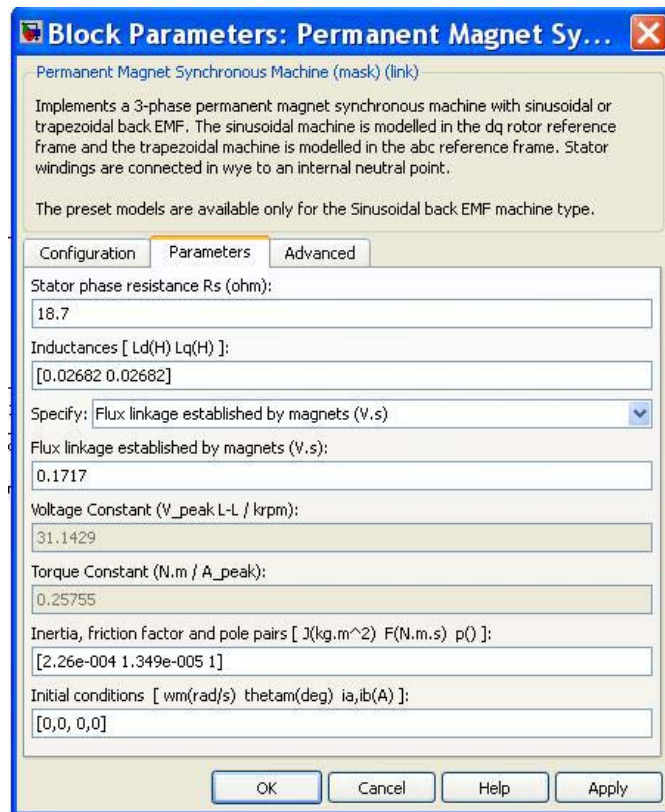
با توجه به سیستم شبیه‌سازی شده سرعت نهایی، گشتاور و توان خروجی را محاسبه نمایید. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، توان ورودی و ضریب توان نهایی را محاسبه نمایید. ب- بار دیگر شیب ورودی فرکانس را به گونه‌ای انتخاب نمایید تا در مدت ۰/۰۵ ثانیه فرکانس به ۵۰ هرتز برسد.

شبیه‌سازی را برای ۲ ثانیه اجرا نمایید. با مشاهده سرعت، گشتاور و جریان در مورد نتیجه راه‌اندازی بحث نمایید.

Continuous  
powergui



شکل ۱: مدار آزمایش راه‌اندازی با استفاده از منابع سینوسی ایده‌آل

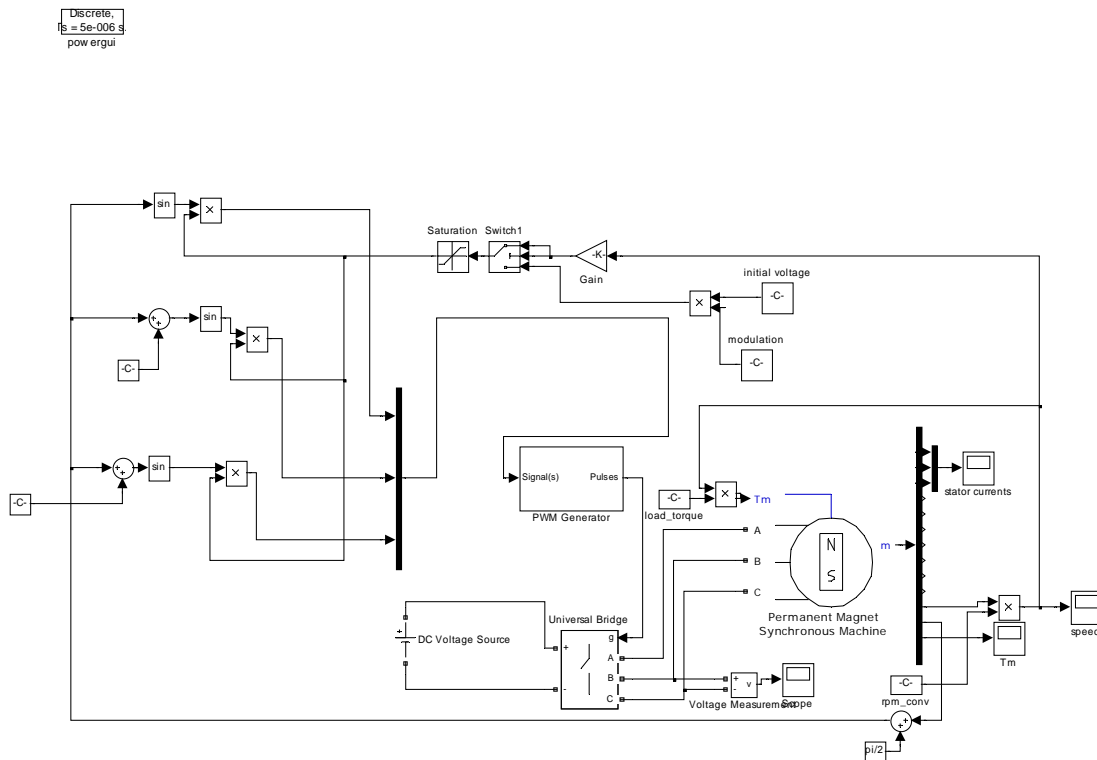


شکل ۲: پارامترهای موتور سنکرون مغناطیس دائم

در سیستم‌های عملی، اغلب از مجموعه یکسو ساز و اینورتر به عنوان مبدل فرکانس استاتیکی استفاده می‌شود. شکل ۴ مدار راه‌اندازی با استفاده از مبدل فرکانس استاتیکی را نشان می‌دهد. یکسو ساز با یک منبع ولتاژ DC مدل شده است. برای شبیه‌سازی این حالت فایل pmsm\_2.mdl را باز نمایید. مطمئن شوید که پارامترهای موتور مطابق شکل ۲ تنظیم شده است. با استفاده از help هر بلوک در مورد نحوه تغذیه و کنترل ماشین توضیح دهید.

بهره‌های مختلف و ثابتهای بکار رفته را مشاهده نمایید و در مورد علت انتخاب آنها توضیح دهید.  
پ- فرکانس ورودی را مشابه حالت الف تنظیم نمایید. شبیه‌سازی را برای ۲ ثانیه اجرا نمایید. با مشاهده سرعت، گشتاور و جریان در مورد نتیجه راه‌اندازی بحث نمایید.  
شکل موج ولتاژ اعمالی به موتور، جریان موتور و گشتاور موتور را مشاهده و با حالت ب مقایسه نمایید.  
ت- زمان شبیه‌سازی را ۳ ثانیه انتخاب نمایید و پس از حدود ۱/۵ ثانیه گشتاور بار را به گونه‌ای انتخاب نمایید تا گشتاور بار ۲ برابر شود. با مشاهده سرعت، جریان و گشتاور موتور در مورد اثر افزایش بار روی عملکرد سیستم توضیح دهید.  
مسئله را با گشتاور ۳ برابر و ۴ برابر تکرار نمایید.  
ث- حال به جای استفاده از ramp برای فرکانس، ورودی فرکانس را به شرح زیر انتخاب نمایید: رمپ با شیب ۵۰ برای یک ثانیه، ثابت برای یک ثانیه، رمپ با شیب ۵۰- برای نیم ثانیه و ثابت برای بعد.





شکل ۴: مدار راه‌اندازی موتور با استفاده از اینورتر ولتاژ و روش  $\delta$  ثابت

ت- فایل pmsm\_3.mdl را باز نمایید. با بررسی بلوک‌های بکاررفته در مورد عملکرد مدار و روش بکاررفته برای کنترل راه‌اندازی ماشین توضیح دهید.

زاویه بار را برابر ۷۵ درجه انتخاب نموده شبیه‌سازی را برای ۱/۵ ثانیه اجرا نمایید. با مشاهده سرعت، گشتاور و جریان در مورد نتیجه راه‌اندازی بحث نمایید.

حال زاویه بار را یکبار ۹۰ درجه و بار دیگر ۶۰ درجه انتخاب و با مشاهده سرعت، گشتاور و جریان و مقایسه آنها با حالت قبل در مورد اثر زاویه بار بحث نمایید.

## پ۱-۵ پرسش و محاسبه

- (۱) در بخش الف توابع سینوسی چگونه ساخته شده‌اند؟
- (۲) برای موتوری که با روش  $\delta$  ثابت کنترل می‌شود و دامنه ولتاژ متناسب با فرکانس کنترل می‌شود، مشخصه گشتاور سرعت را محاسبه نمایید. (از مقاومت استاتور صرف‌نظر نمایید)
- (۳) کدامیک از روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون را نمی‌توان برای موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده کرد؟ چرا؟



پیوست ۲:

## شبیه‌سازی راه‌اندازی و کنترل سرعت موتورهای القایی





## پ ۱-۲ هدف آزمایش

با انجام و تکمیل این آزمایش، روش‌های مختلف راه‌اندازی و تغییر سرعت موتورهای القایی معرفی و در محیط SIMULINK-MATLAB اجرا می‌شود.

## پ ۲-۲ تئوری آزمایش

در موتورهای القایی سه فاز، ولتاژ سه فاز به سیم‌پیچ‌های استاتور اعمال می‌گردد که در نتیجه آن یک میدان گردان با سرعت متناسب با فرکانس ولتاژ استاتور ایجاد می‌شود. این میدان در هادیهای رتور جریان القا می‌نماید. تقابل بین میدان رتور و میدان مغناطیسی گردان استاتور موجب ایجاد گشتاور و حرکت در موتور می‌شود. با این حال جریان زیاد موتور در لحظه راه‌اندازی یکی از مشکلات مهم موتورهای القایی می‌باشد. در بسیاری از کاربردها لازم است که سرعت موتور در رنج مشخصی تغییر کند. روش‌های کنترل سرعت موتورهای القایی عبارتند از:

۱. تغییر تعداد قطبهای استاتور

۲. تغییر ولتاژ استاتور

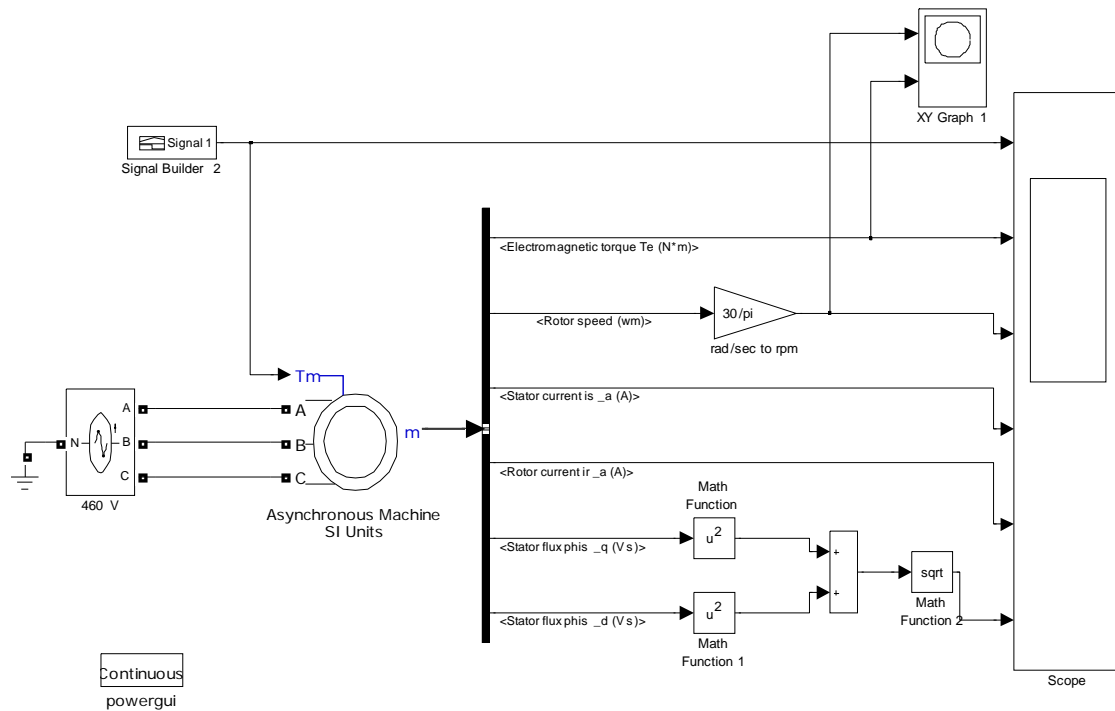
۳. تغییر فرکانس منبع تغذیه استاتور

۴. تغییر مقاومت رتور (در موتورهای با رتور سیم‌پیچی)

در این آزمایش ابتدا مشخصه گشتاور-سرعت یک موتور قفس سنجابی ۴۶۰ ولت، ۶۰ هرتز رسم می‌گردد. سپس تأثیر تغییر فرکانس و ولتاژ به صورت مستقل و همچنین به روش  $\frac{V}{f}$  ثابت بر مشخصه گشتاور-سرعت، گشتاور راه‌اندازی، شار کلی استاتور و جریان راه‌اندازی موتور بررسی می‌شود. موارد فوق در دو حالت بدون بار (مکانیکی) و با یک بار مکانیکی مطالعه می‌شود. در قسمت آخر نیز تأثیر مقاومت رتور بر مشخصه گشتاور-سرعت در یک موتور با رتور سیم‌پیچی شبیه‌سازی و چگونگی کنترل سرعت این موتورها به این روش بررسی می‌گردد.

## پ ۳-۲ انجام آزمایش

برای شروع آزمایش ابتدا باید مدار آزمایش را در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK ایجاد کنید. این مدار در شکل ۱ آورده شده است:



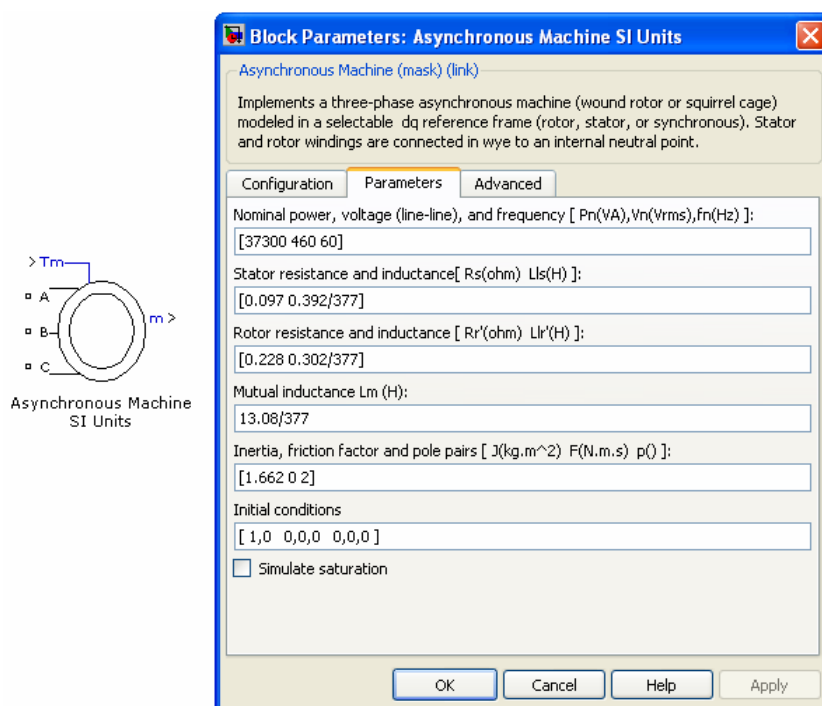
شکل ۱: مدار شبیه‌سازی موتور القایی

برای ایجاد این مدل باید مراحل زیر را انجام دهید:

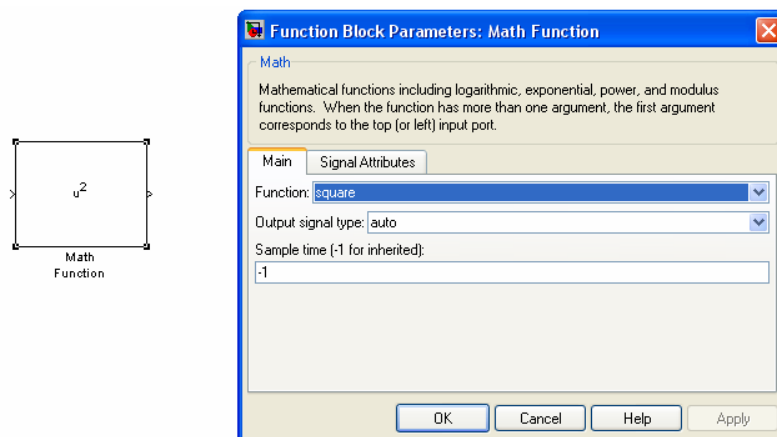
- یک صفحه خالی برای کشیدن مدل به نام ind-speed-T ایجاد کنید.
- یک منبع تغذیه سه فاز (Three-Phase Programmable Voltage Source) با دامنه ۴۶۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز انتخاب و پایه نول آن را Ground کنید.
- بلوک موتور القایی (Asynchronous machine SI Units) را به مدل اضافه کنید و پارامترهای آن را به صورت شکل ۲ تنظیم نمایید.
- به ورودی  $P_m$  توسط بلوک Signal Builder یک سیگنال صفر که معرف حالت بی‌باری موتور می‌باشد اعمال کنید.
- خروجی m موتور را به یک Bus Selector وصل کنید. مشخصه‌های جریان استاتور، جریان رتور، سرعت رتور (با استفاده از یک گین می‌توانید سرعت را بر حسب rpm مشاهده کنید)، گشتاور الکترومغناطیسی و شار محور d و q استاتور را انتخاب و برای مشاهده شکل موج آنها خروجی Bus Selector را به یک scope با تعداد ۶ محور وصل کنید. از آنجا که هدف مشاهده شار کلی استاتور می‌باشد به صورت زیر عمل کنید:

$$\phi = \sqrt{\phi_d^2 + \phi_q^2}$$

- ابتدا از خروجی Bus Selector شارهای محور d و q استاتور را انتخاب، سپس بلوک Math Function را انتخاب و در قسمت تنظیمات آن تابع square را انتخاب کنید (شکل ۳).



شکل ۲: پارامترهای ماشین سنکرون

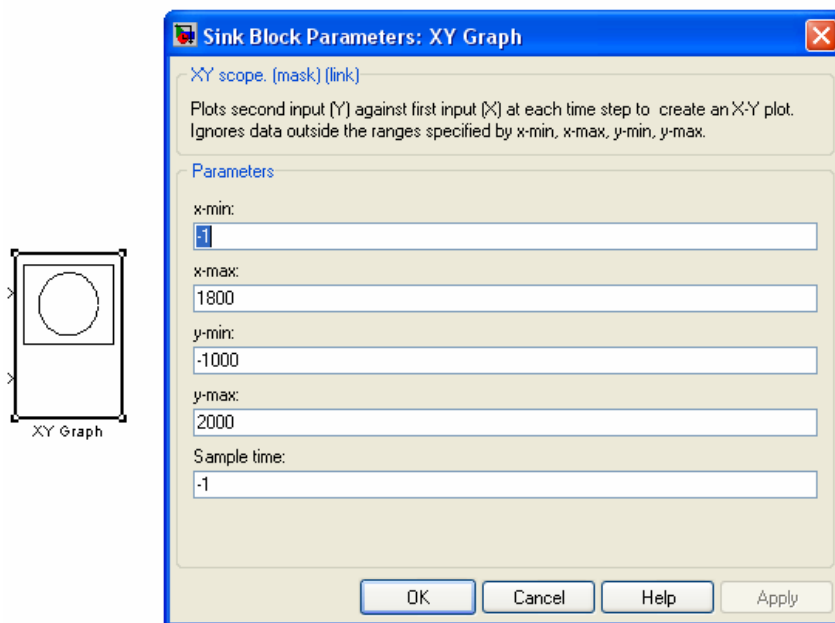


شکل ۳: تنظیم تابع ریاضی

سپس بلوک sum را انتخاب و تنظیمات آن را به صورت جمع‌کننده دو ورودی انجام دهید و در نهایت از خروجی آن جذر بگیرید. این کار را با انتخاب بلوک Math Function و قرار دادن تابع آن به صورت sqrt انجام دهید. در نهایت نیز خروجی را به scope دهید.

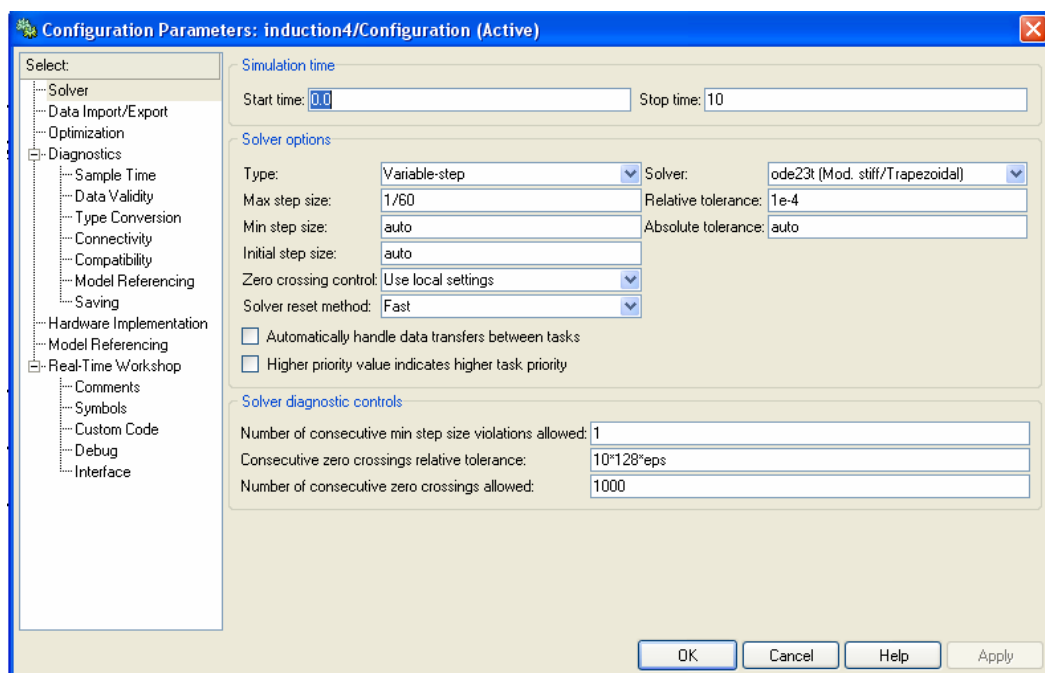
- برای رسم مشخصه گشتاور-سرعت از بلوک XY Graph استفاده کنید (شکل ۴). خروجی سرعت رتور Bus Selector را به ورودی بالایی (x) و خروجی گشتاور Bus Selector را به ورودی پایینی (y) وصل کنید. در زمان شبیه‌سازی باید مقادیر ماکزیمم و مینیمم گشتاور و سرعت را در تنظیمات این بلوک مشخص کنید. لازم به ذکر است که مشخصه حاصل از این اسکوپ مشخصه گذرای

گشتاور- سرعت می‌باشد در حالی که در درس مشخصه حالت دائمی موتور مورد بررسی قرار گرفته بود.



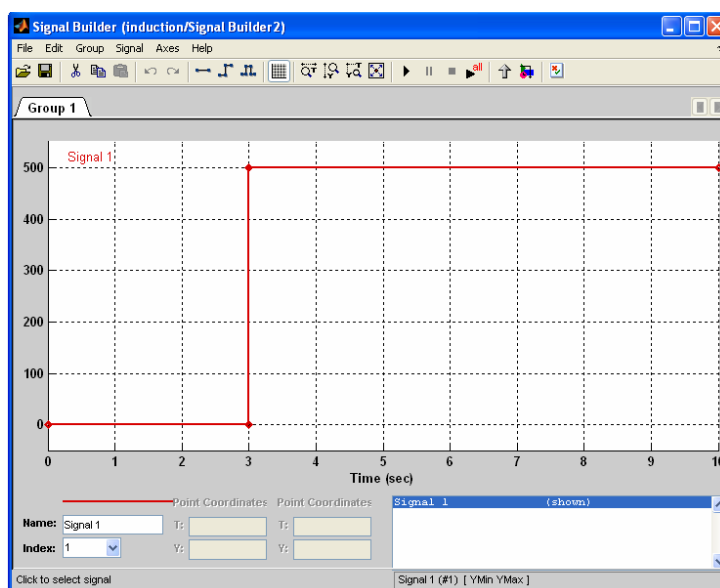
شکل ۴: بلوک XY Graph

- اکنون فایل شبیه‌سازی آماده است. قبل از اجرای شبیه‌سازی، پارامترهای لازم برای اجرای شبیه‌سازی را به صورت شکل ۵ تنظیم کنید. زمان شبیه‌سازی در این مرحله ۱۰ ثانیه است.



شکل ۵: تنظیمات شبیه‌سازی

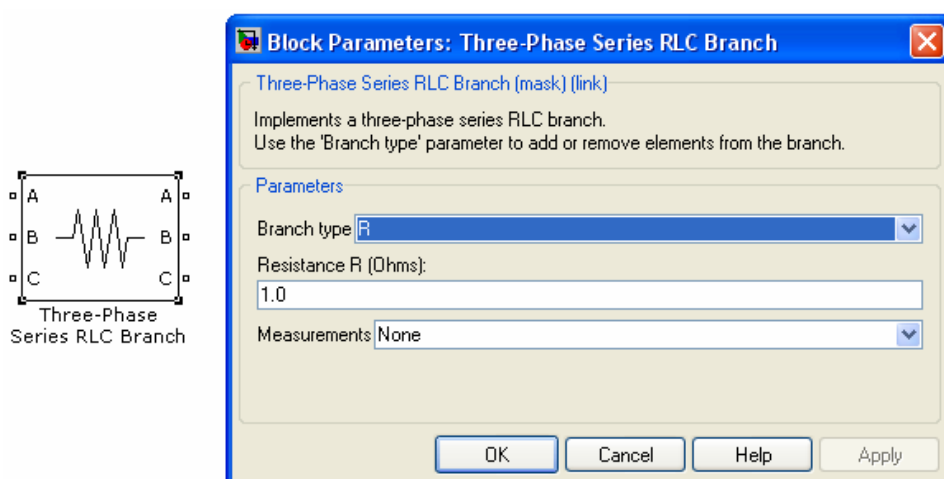
- بعد از تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی، فایل شبیه‌سازی را اجرا کنید خروجی‌های شبیه‌سازی را رسم کنید و در مورد آنها بحث نمایید. شکل جریان راه‌اندازی و گشتاور راه‌اندازی را با آنچه در تست عملی دیدید مقایسه کنید.
- فرکانس منبع تغذیه را نصف کرده و با ثابت نگه داشتن دامنه ولتاژ استاتور، خروجی‌ها را رسم کرده و در مورد نتایج بحث کنید (گشتاور راه‌اندازی، سرعت رتور، جریان و شار استاتور<sup>۱</sup>).
- در مرحله بعد فرکانس را روی ۶۰ هرتز تنظیم کنید و ولتاژ را نصف کنید. دوباره شبیه‌سازی را تکرار و خروجی‌ها را رسم کرده در مورد نتایج حاصل بحث کنید.
- سپس ولتاژ و فرکانس را هم‌زمان نصف کرده و مراحل فوق را تکرار کنید.
- حال به منظور تکمیل بررسی اثر تغییر هم‌زمان و متناسب ولتاژ و فرکانس، فرکانس را از ۶ هرتز تا ۶۰ هرتز در ۵ پله (۶، ۱۸، ۳۰، ۴۲ و ۶۰ هرتز) تغییر داده و اثر این روش را روی جریان راه‌اندازی، گشتاور راه‌اندازی و حداکثر گشتاور ذکر نمایید.
- اکنون سیگنال مربوط به بار موتور را به صورت شکل ۶ تغییر دهید و کلیه مراحل فوق را تکرار کنید. در واقع در این حالت می‌خواهید با داشتن بار مشخص سرعت موتور را با روش‌های فوق کنترل کنید.



شکل ۶: سیگنال بار

- حال موتور را به موتور با رتور سیم‌پیچی شده تبدیل کنید. یک مقاومت سه فاز (three-phase series RLC branch) را انتخاب و به خروجی‌های رتور وصل کنید (شکل ۷).

<sup>۱</sup> - توجه نمایید که با دو برابر شدن شار استاتور، در ماشین واقعی، ماشین اشباع می‌شود و جریان مغناطیس‌کنندگی و در نتیجه جریان ماشین به شدت افزایش می‌یابد و شکل موج آن از حالت سینوسی خارج می‌شود.



شکل ۷: مقاومت رتور

- مقاومت را به مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ تغییر دهید موتور را با ولتاژ و فرکانس نامی تغذیه و در هر بار خروجی‌ها را با وجود بار مکانیکی (بار پله‌ای) مشاهده و در مورد چگونگی تأثیر مقاومت رتور بر جریان راه‌اندازی و مشخصه گشتاور-سرعت بحث کنید.

## پ ۲-۴ پرسش و محاسبه

- (۱) مزیت روش کنترل سرعت به صورت  $\frac{V}{f}$  ثابت چیست؟
- (۲) چرا جریان راه‌اندازی موتور القایی زیاد است و تأثیر روش‌های کنترل سرعت فوق بر این جریان به چه صورت است؟
- (۳) گشتاور راه‌اندازی با تغییر ولتاژ استاتور و مقاومت رتور به چه صورت تغییر می‌کند؟



پیوست ۳:

**شبیه‌سازی عملکرد راه‌اندازی و ترمز موتور DC**



### پ ۳-۱ هدف آزمایش

با انجام و تکمیل این آزمایش، ضمن آشنایی بیشتر با نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK، با عملکرد راه‌اندازی و ترمزی ماشین‌های DC، آشنا می‌شوید.

### پ ۳-۲ تئوری آزمایش

در ماشین‌های DC، معکوس کردن جهت جریان آرمیچر باعث انتقال از حالت موتوری به حالت ترمزی می‌شود. معکوس کردن شار میدان نیز گشتاور الکترومغناطیسی را معکوس می‌نماید ولی به ندرت از آن استفاده می‌شود.

در این آزمایش، عملکرد راه‌اندازی و ترمزی موتور جریان مستقیم را بررسی خواهیم کرد. روش‌های ترمز کردن موتور dc عبارتند از:

۱- معکوس کردن تغذیه:  $V_a$  معکوس شده و همزمان برای محدود کردن  $I_a$ ، مقاومت خارجی به پایانه‌های آرمیچر متصل می‌گردد.

۲- ترمز دینامیکی: منبع ولتاژ  $V_a$  قطع شده و همزمان برای محدود کردن  $I_a$ ، مقاومت خارجی به پایانه‌های آرمیچر متصل می‌گردد.

۳- ترمز با بازبایی توان: وقتی  $V_a$  کوچکتر از  $E_a$  شود، جهت  $I_a$  معکوس می‌گردد. این شرایط را با استفاده از یک منبع  $V_a$  قابل تنظیم و یا با افزایش  $E_a$  ناشی از افزایش سرعت (برای مثال وقتی که گشتاور بار، موتور را می‌چرخاند)، می‌توان برقرار ساخت.

موتور مورد بررسی در این آزمایش یک موتور ۲ اسب بخار، ۱۲۵ ولت و ۱۶ آمپر است که سرعت نامی آن ۱۷۵۰ دور در دقیقه می‌باشد. با فرض اینکه جریان آرمیچر از ۲۵۰٪ مقدار نامی‌اش یا ۴۰ آمپر تجاوز نمی‌کند؛ ابتدا مقاومت‌های محدود کننده لازم برای حالت معکوس کردن تغذیه و ترمز دینامیکی را تعیین می‌کنیم.

### الف) مقدار مقاومت برای معکوس کردن تغذیه

با صرف نظر کردن از عکس‌العمل آرمیچر، می‌توان فرض کرد که شار موتور در ضمن ترمز برابر شار عملکرد موتوری خواهد بود و تغییر نخواهد کرد. شار در شرایط موتوری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_a \phi = \frac{V_a - R_a I_a}{\omega_m} = \frac{125 - 0.14 \times 16}{1750 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.6699 \text{ Nm/A} \quad (1)$$

بنابراین گشتاور توسعه یافته  $T_{em} = K_a \phi I_a = 10.72 \text{ N.m}$  و ولتاژ داخلی  $E_a = K_a \phi \omega_m = 122.76 \text{ V}$  خواهد بود. در این آزمایش ولتاژ و جریان تحریک نیز مقادیر ثابتی فرض شده‌اند.

انتقال از حالت موتوری به ترمزی با استفاده از روش معکوس کردن تغذیه با معکوس کردن پلاریته ولتاژ اعمالی به دو سر آرمیچر و همزمان اضافه کردن مقاومت خارجی  $R_{ext}$  به مدار آرمیچر



انجام می‌گیرد. با توجه به ثابت بودن شار و سرعت رتور بلافاصله بعد از ترمز کردن؛ مقدار  $R_{ext}$  که  $I_a$  را در ۲۵۰٪ مقدار نامی آن محدود می‌کند؛ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_a - (-V_a) = I_a^{\max}(R_{ext} + R_a) \quad (2)$$

با جاگذاری مقادیر معلوم؛ داریم:

$$R_{ext} = \frac{122/76 + 125}{2/5 \times 16} - 0/14 = 6/054 \Omega \quad (3)$$

### ب) مقدار مقاومت برای ترمز دینامیکی

رابطه (۲) را می‌توان برای محاسبه مقاومت محدود کننده در روش ترمز دینامیکی نیز بکار برد؛ بجز اینکه  $V_a$  در ترمز دینامیکی صفر خواهد بود. لذا در این حالت مقدار  $R_{ext}$  برابر ۲/۹۲۹ اهم خواهد بود.

### پ ۳-۳ انجام آزمایش

#### پ ۳-۳-۱ شبیه‌سازی حالت راه‌اندازی موتور DC

در این آزمایش، حالت گذرای راه‌اندازی یک موتور dc با تحریک جداگانه را بررسی می‌کنیم. برای این منظور گذراهای راه‌اندازی موتور را در هر یک از شرایط زیر بررسی می‌کنیم:

- وقتی موتور مستقیماً راه‌اندازی می‌شود
- وقتی موتور با یک راه‌انداز مقاومتی راه‌اندازی می‌شود.

در این آزمایش فرض می‌کنیم که تحریک میدان موتور dc، قبل از اتصال منبع ولتاژ برای راه‌اندازی موتور، به مقدار حالت ماندگار مطلوب آن رسیده باشد. با توجه به اینکه نیرو محرکه داخلی آرمیچر، متناسب با حاصلضرب شار میدان و سرعت موتور است؛ وقتی رتور ساکن است، سرعت و در نتیجه  $E_a$  صفر هستند. این موضوع سبب زیاد شدن جریان راه‌اندازی موتور جریان مستقیم می‌شود. برای حل این مشکل می‌توان از مقاومت‌های راه‌انداز برای محدود کردن جریان استفاده نمود. روش دیگر راه‌اندازی، استفاده از ولتاژ کنترل شده است. به این ترتیب که ولتاژ از مقدار کم، به تدریج افزایش یابد تا مقدار نامی.

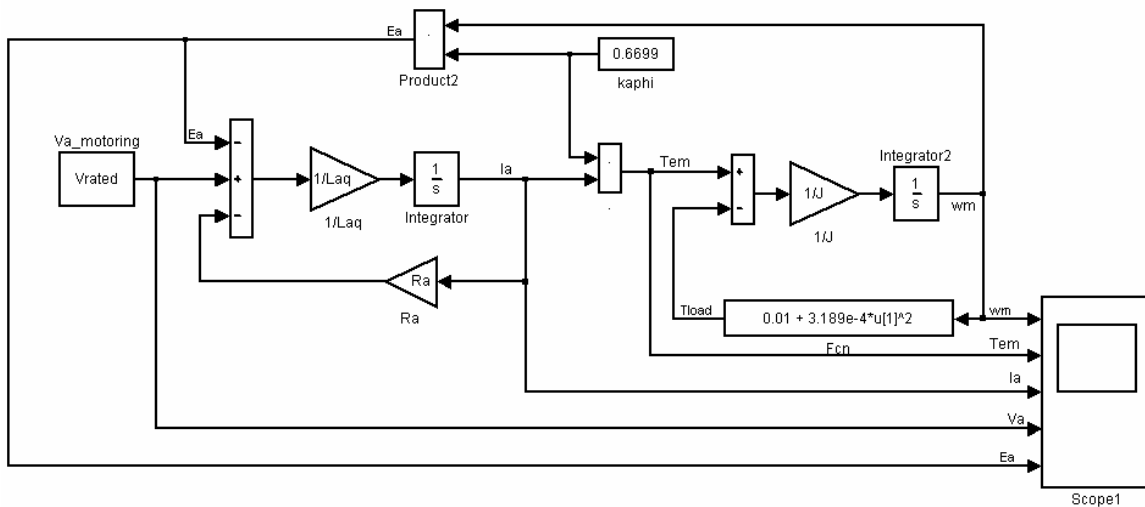
برای شبیه‌سازی راه‌اندازی مستقیم، m فایل به صورت زیر با نام Parameters ایجاد کنید و پارامترهای شبیه‌سازی را در آن وارد نمایید.

```
clc; clear all;
Prated = 2*746; % rated Power
Vrated = 125; % rated voltage
Iarated = 16; % rated armature current
wmrated = 1750*(2*pi)/60; % rated angular velocity
Trated = Prated/wmrated; % rated torque
Ra = 0.14; % Armature resistance
Rf = 111; % field resistance
Laq = 0.018; % Armature inductance
Lf = 10; % field inductance
D = 0; % damping
J = 0.5; % rotor inertia in kgm2
```

فرض کنید گشتاور بار به صورت زیر تابعی از سرعت باشد:

$$T_{load} = -T_{mech} = 0.01 + 3.189e^{-4} \omega_m^2 \quad \text{Nm} \quad (4)$$

فایل سیمولینکی مطابق شکل ۱، ایجاد کنید. مقادیر اولیه انتگرال‌گیرها را برابر صفر تنظیم نمایید. سپس، در قسمت Simulation\Configuration Parameters از این فایل؛ پارامترهای شبیه‌سازی را به صورت ode15s با تفرانس  $1e^{-6}$  و گام کمینه  $1e^{-4}$  تنظیم کنید. شبیه‌سازی را اجرا نمایید و منحنی‌های  $\omega_m$  و  $I_a$ ؛  $T_{em}$  را رسم کنید.

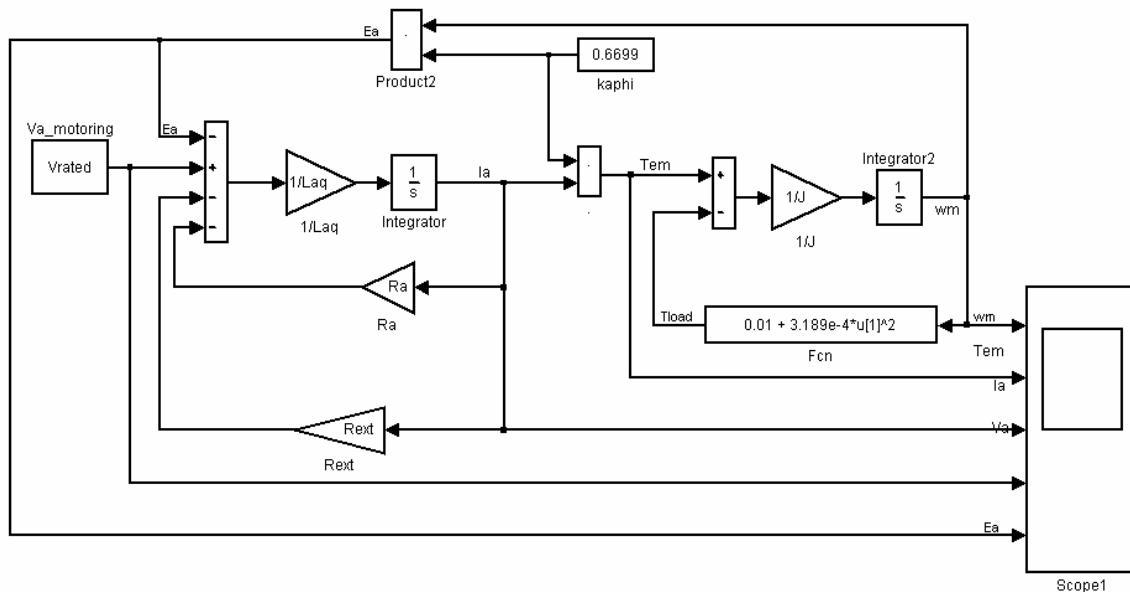


شکل ۱: شبیه‌سازی حالت راه‌اندازی مستقیم موتور جریان مستقیم

برای شبیه‌سازی راه‌اندازی مقاومتی، ابتدا مقدار مقاومت خارجی را به نحوی محاسبه کنید که جریان راه‌اندازی به ۲۵٪ مقدار نامی‌اش یا ۴۰ آمپر محدود شود. مقدار مقاومت را به صورت

مقدار محاسبه شده  $R_{ext}$ ؛

به فایل شبیه‌سازی اضافه کنید و آن را اجرا نمایید. سپس فایل سیمولینک را به صورت شکل ۲، اصلاح نموده و دوباره شبیه‌سازی را اجرا کنید. نتایج را با نتایج قسمت قبل مقایسه نمایید.



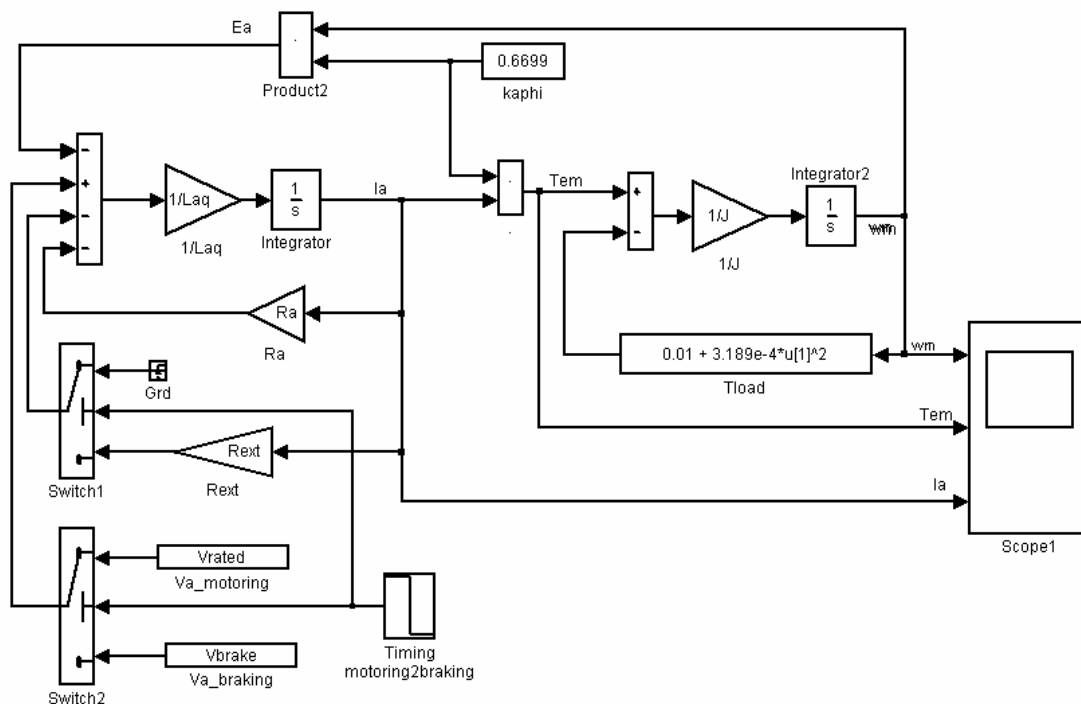
شکل ۲: شبیه‌سازی راه‌اندازی مقاومتی موتور جریان مستقیم

### پ ۳-۳-۲ شبیه‌سازی ترمز با معکوس کردن تغذیه

در این قسمت کارایی روش‌های ترمز با معکوس کردن تغذیه را بررسی خواهیم کرد. شکل ۳، شبیه‌سازی سیمولینک را برای این آزمایش نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی یک منبع پله (Timing motoring2braking) برای شروع عمل انتقال از حالت موتوری به ترمزی بکار می‌رود. به منظور کاهش گذراهای راه‌اندازی و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی؛ از مقادیر حالت ماندگار جریان آرمیچر و سرعت رتور به منزله مقادیر اولیه انتگرال‌گیری مربوطه در شبیه‌سازی استفاده می‌کنیم. در فایل Parameters مقادیر مقاومت محدود کننده جریان و ولتاژ ترمز را به صورت زیر وارد کنید و آن را اجرا نمایید:

```
Rext = 6.054;  
Vbrake = -Vrated;
```

در مدار شکل ۳؛ برای کلیدها (switch1 و switch2) مقدار threshold را ۰/۵ تنظیم کنید؛ مقادیر اولیه (Initial condition) انتگرال‌گیرهای جریان و سرعت را به ترتیب برابر Iarated و wmrated تنظیم کنید. سپس شبیه‌سازی را اجرا نمایید و منحنی‌های  $I_a$  و  $\omega_m$  را رسم کنید.



شکل ۳: مدار شبیه‌سازی عملکرد ترمز دینامیکی و ترمز با معکوس کردن تغذیه

### پ ۳-۳-۳ شبیه‌سازی ترمز دینامیکی

در m فایل Parameters مقادیر مقاومت خارجی و ولتاژ ترمز را به صورت زیر تغییر دهید:

$$R_{ext} = 2.929;$$

$$V_{brake} = 0;$$

و دوباره شبیه‌سازی را اجرا نمایید. توجه کنید که در این حالت هنگام ترمز کردن، مقاومت  $R_{ext}$  به صورت موازی دو سر آرمیچر قرار می‌گیرد.

### پ ۳-۳-۴ ترمز با باز یابی توان

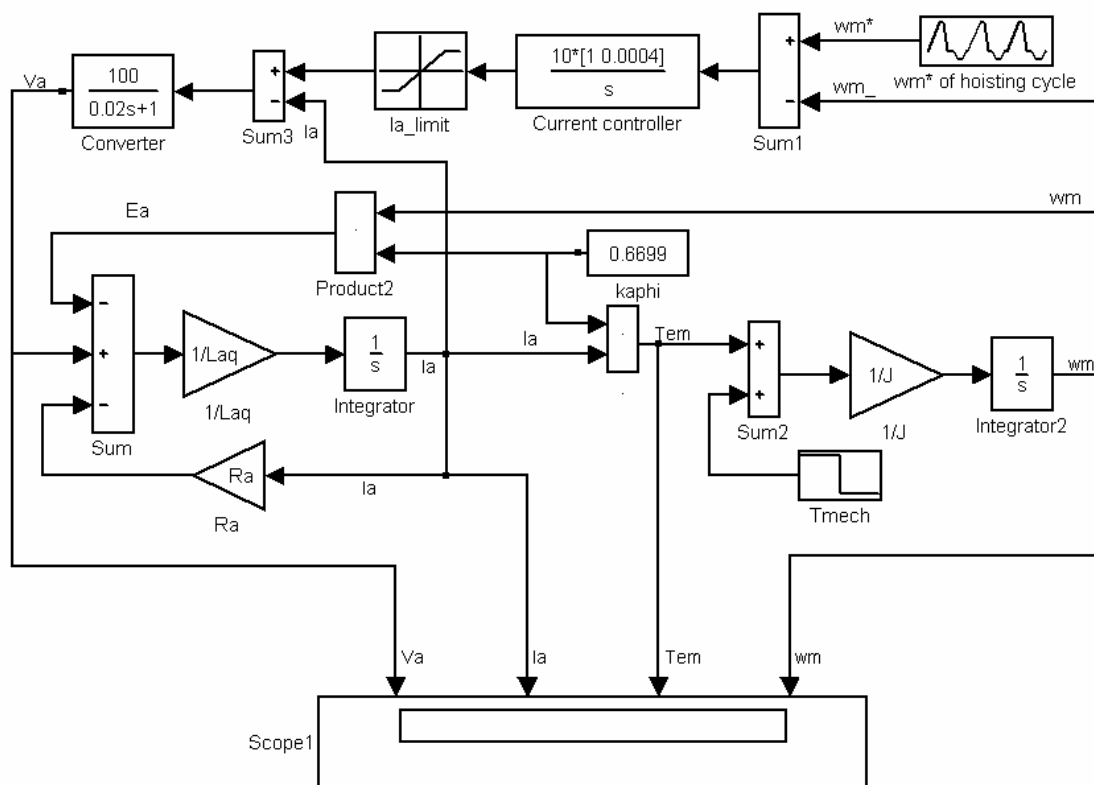
در این قسمت آزمایش عملکرد موتور DC تحریک جداگانه را که با یک منبع ولتاژ قابل تنظیم تغذیه می‌گردد؛ بررسی می‌کنیم. این منبع ولتاژ برای کنترل موتوری که باری مشابه آسانسور دارد به صورت الکترونیکی کنترل می‌گردد. برای بالا بردن بار؛ ماشین DC در ربع اول که گشتاور و سرعت هر دو مثبت هستند و در حالت موتوری کار می‌کند. در انتهای بالا رفتن؛ قبل از پایین آمدن با یک سرعت کنترل شده؛ باید بار بر خلاف نیروی جاذبه اعمالی ساکن نگه داشته شود. شکل ۴؛ شبیه‌سازی سیمولینک این حالت را با یک سیستم سرعت حلقه بسته نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی برای نمایش عملکرد بالا رفتن؛ نگه داشتن و پایین آمدن استفاده خواهد شد.

پیش از انجام این آزمایش، بهتر است اثر کاهش ولتاژ ورودی در سیستم حلقه باز مورد آزمایش قرار گیرد. برای این منظور در فایل شبیه‌سازی شکل ۳، زمان را در قسمت Timing motoring2braking بیشتر از زمان شبیه‌سازی قرار دهید تا در طول شبیه‌سازی؛ عمل تعویض ولتاژ صورت نگیرد. سپس

مقدار  $V_{rated}$  را به مقدار نصف و یک سوم مقدار نامی تغییر دهید و در هر مرحله شبیه‌سازی را اجرا کنید. شکل موج‌های گشتاور الکترومغناطیسی، سرعت و جریان آرمیچر را رسم کنید. اکنون برای بررسی حالت حلقه بسته، فایلی به صورت شکل ۴، ایجاد کنید. در این شکل؛ سرعت مرجع با یک منبع ترتیبی تکرار شونده مشخص شده است. گشتاور بار با یک منبع پله که گشتاور بار را در لحظه صفر از مقدار صفر به مقدار نامی تغییر می‌دهد؛ مشخص گردیده است. مقادیر زمانی ترتیب تکرار به صورت  $[0 \ 30 \ 40 \ 50 \ 65 \ 75 \ 85 \ 95 \ 100]$  بوده و مقادیر سرعت خروجی مربوط  $[0 \ 0 \ w_{lower} \ w_{raise} \ 0 \ 0]$  است. در این شبیه‌سازی؛ دینامیک پل یکسوساز قابل کنترل و کنترل کننده آن که  $V_a$  قابل کنترل را برای ماشین فراهم می‌سازد؛ توسط یک تابع تبدیل ساده با یک تاخیر مرتبه اول نشان داده شده است.

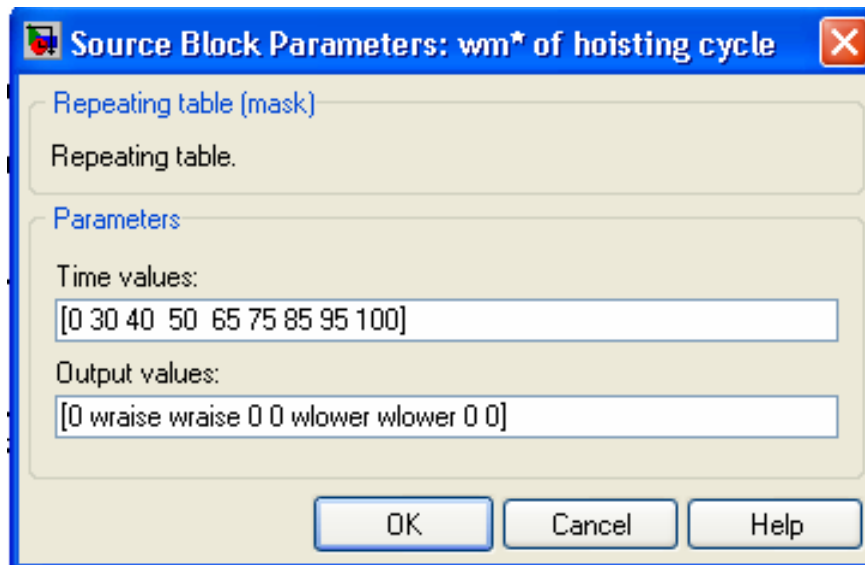
مقادیر  $w_{raise}$  و  $w_{lower}$  را به صورت زیر در فایل parameters اضافه کنید.

```
wraise=wrated;
wlower=-wmrated/3;
```



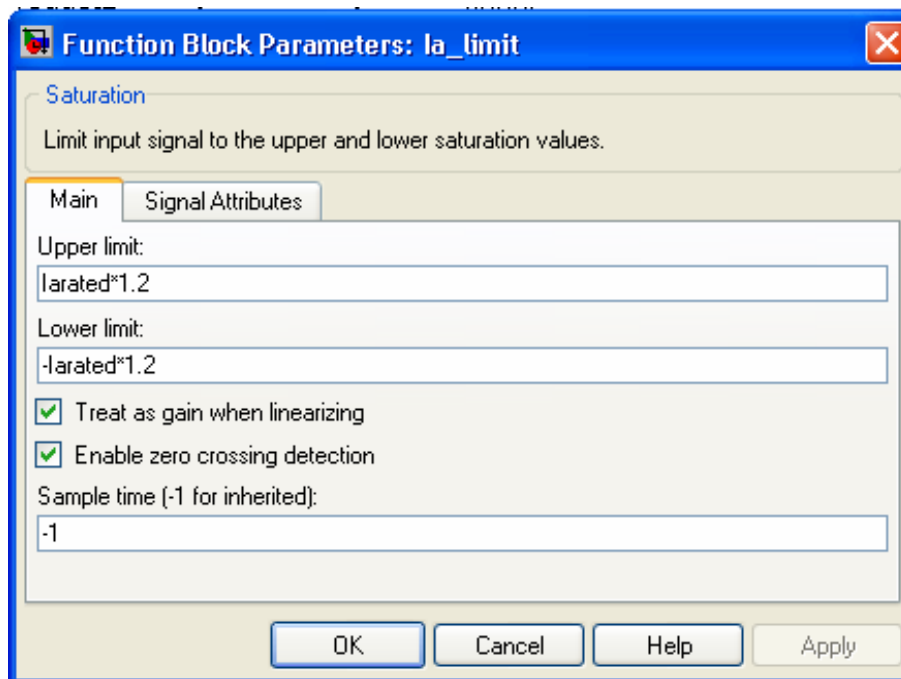
شکل ۴: مدار شبیه‌سازی عملکرد ترمز با بازایی توان

بلوک  $w_m^*$  of hoisting cycle را با استفاده از Repeating Sequence و با پارامترهای شکل ۵ ایجاد کنید:



شکل ۵: پارامترهای Repeating Sequence برای ایجاد بلوک wm\* of hoisting cycle

برای محدود کردن حد بالا و پایین جریان نیز از یک بلوک Saturation با محدوده  $\pm 120\%$  درصد جریان نامی آرمیچر به شرح زیر استفاده کنید:



شکل ۶: بلوک Saturation

گشتاور بار در این قسمت به صورت یک ورودی پله‌ای با مقدار اولیه صفر و مقدار نهایی  $-I_{rated}$  در زمان یک ثانیه شبیه‌سازی شده است. مقادیر اولیه انتگرال‌گیرهای سرعت و جریان نیز برابر صفر تنظیم شده‌اند.

کنترل کننده جریان و مبدل ac/dc با استفاده از transfer function به صورت زیر ایجاد شده‌اند:

**Function Block Parameters: Current controller**

**Transfer Fcn**

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

**Parameters**

Numerator coefficient:  
10\*[1 0.0004]

Denominator coefficient:  
[1 0]

Absolute tolerance:  
auto

State Name: (e.g., 'position')  
"

OK Cancel Help Apply

شکل ۷: پارامترهای بلوک transfer function برای کنترل کننده جریان

**Function Block Parameters: Converter**

**Transfer Fcn**

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

**Parameters**

Numerator coefficient:  
[100]

Denominator coefficient:  
[0.02 1]

Absolute tolerance:  
auto

State Name: (e.g., 'position')  
"

OK Cancel Help Apply

شکل ۸: پارامترهای بلوک transfer function برای مبدل ac/dc

این شبیه‌سازی را با گشتاور بار نصف مقدار نامی تکرار کنید و روی پروفایل جریان آرمیچر و ولتاژ بحث کنید.

پ ۳-۴ پرسش و محاسبه

- (۱) چرا با معکوس کردن جهت جریان آرمیچر، ماشین از حالت موتوری به حالت ترمزی منتقل می‌شود؟
- (۲) چرا معمولاً از روش معکوس کردن شار میدان، برای انتقال از حالت موتوری به حالت ژنراتوری استفاده نمی‌شود؟
- (۳) در عمل برای ترمز کردن قطارهای قدیمی، از کدامیک از روش‌های ارائه شده در این آزمایش استفاده می‌شود؟
- (۴) با استفاده از شکل ۱، معادلات الکتریکی و مکانیکی ماشین جریان مستقیم را استخراج کنید.
- (۵) راه‌انداز مقاومتی که در عمل استفاده می‌شود با آنچه در این آزمایش بررسی شده، چه تفاوتی دارد، چرا؟

مراجع

Ong C., "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, New Jersey, 1998.





پیوست ۴:

## خطرات انرژی الکتریکی و حفاظت در برابر آنها



#### پ ۴-۱ مقدمه

بدن انسان هادی جریان برق است. عبور جریان برق از بدن فرد که به آن برق‌گرفتگی گفته می‌شود، متناسب با دامنه و زمان عبور جریان می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در جریان برق‌گرفتگی علاوه بر سوختگی پوست محل ورود و خروج جریان برق، بافت‌ها هم دچار آسیب می‌شوند. اگر جریان برق از قلب عبور کند؛ منجر به اختلال در سیستم قلب و اگر از مغز عبور کند منجر به مهار مرکز تنفس و وقفه تنفسی خواهد شد. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این قسمت خطرات انرژی الکتریکی و حفاظت در برابر آنها بیان می‌شود.

#### پ ۴-۲ انواع برق‌گرفتگی

برق‌گرفتگی به دو دسته تقسیم می‌شود: با ولتاژهای بالا و با ولتاژهای پایین. در موارد با ولتاژ بالا، حتماً بدن لازم نیست مستقیم با سیم یا کابل برق تماس داشته باشد بلکه ممکن است در فاصله چند متری هم جریان برق از هوا عبور کند و به بدن فرد منتقل شود و باعث برق‌گرفتگی شود. در این موارد هر چقدر ولتاژ برق و رطوبت هوا بیشتر باشد میزان انتقال و آسیبی که به بدن وارد می‌شود بیشتر است. در موارد ولتاژ پایین برق‌گرفتگی بر اثر تماس مستقیم فرد با هادی حامل جریان پیش می‌آید. در برق‌گرفتگی با ولتاژ پایین بدن فرد دچار لرزش و گاهی گرفتگی عضلات می‌شود. گرفتگی عضلات گاهی منجر به حفظ اتصال دائم با هادی حامل جریان خواهد شد.

رعایت جوانب احتیاط در حین ارائه کمک‌های اولیه به فرد برق‌گرفته توصیه اول به فرد کمک‌کننده می‌باشد. بدین ترتیب که تا وقتی که جریان برق به مصدوم متصل است نباید به مصدوم دست بزنیم. ابتدا باید جریان برق قطع شود. این کار با قطع کردن فیوز یا کشیدن دو شاخه از پریز ممکن می‌شود. بعد از قطع جریان برق باید بدن مصدوم را از اتصال به لوازم برقی جدا کرد. فرد کمک‌کننده باید دمپایی لاستیکی به پا کند و یا اگر زمین خیس است از چند روزنامه برای خشک کردن استفاده کند و توسط یک چوب و یا هر چیزی که غیر رسانا است فرد مصدوم را از محل که برق در آن وجود دارد دور کند. بعد از قطع ارتباط برق در ابتدا باید تنفس مصدوم را کنترل کرد. اگر تنفس نداشت باید تنفس دهان به دهان انجام شود. بالافاصله باید ضربان قلب و نبض کنترل شود. در صورتی که نبض وجود نداشت ماساژ قلبی ضروری است. در هر نوع برق‌گرفتگی شخص باید به بیمارستان منتقل شود و باید تا ۲۴ ساعت تحت‌نظر باشد. البته تا رسیدن به پزشک تنفس مصنوعی و همچنین ماساژ قلبی لازم است.

#### پ ۴-۳ خطر حریق در اثر انرژی الکتریکی

گاهی در اثر اتصال سیم‌های برق، حریق به وجود می‌آید. اگر پوشش‌های عایق سیم‌های از بین برود و مستقیماً به هم متصل شوند، جرقه‌هایی در محل اتصال پدید می‌آید و بقیه روپوش سیم‌ها را می‌سوزاند. همچنین اگر جریان زیاد و بیش از حد مجاز از سیم‌ها و تجهیزات الکتریکی بگذرد؛ گرم

می‌شوند و ممکن درجه حرارت آنها بحدی برسد که برای سوزاندن آنها کافی باشد. در ضمن شل بودن اتصالات سیم‌ها باعث ایجاد جرقه‌های کوچک می‌شود. به تدریج این جرقه‌ها شدیدتر شده و سیم‌ها را می‌سوزانند. فیوزهایی که استاندارد نباشند هم وقتی که بسوزند، ممکن است فلز آنها ذوب شود و روی چوب یا هر ماده قابل اشتعال دیگری بریزد و موجب آتش‌سوزی شود [۱].

#### پ ۴-۴ اقدامات ایمنی در صورت بروز آتش‌سوزی با انرژی الکتریکی

به محض بروز آتش‌سوزی در اثر اتصالی برق یا آتش گرفتن سیم‌ها، فوراً جریان برق را توسط کلید اصلی قطع نمایید. اگر دسترسی به کلید اصلی ندارید و ناچارید سیم‌های برق را قطع کنید؛ به وسیله یک انبردست دسته عایق یا یک چوب بلند و خشک این کار را انجام دهید [۱]. هرگز روی سیم‌های برق آب نریزید. زیرا آب‌های معمولی هادی الکتریسته هستند و برای شما خطر جانی دارد. خاموش کردن شعله‌های آتش باید به وسیله ریختن شن و پاشیدن پودرهای مخصوص (کپسول‌های آتش‌نشانی نصب شده روی دیوارهای آزمایشگاه برای این منظور می‌باشند) صورت گیرد. در ضمن، در اولین فرصت باید اداره آتش‌نشانی را از وقوع حریق مستحضر سازید و علت آتش‌سوزی را نیز یادآوری نمایید.

#### پ ۴-۵ انرژی الکتریکی روی چه دستگاه‌های فیزیولوژیکی از بدن انسان تاثیر می‌گذارد؟

برق از سه طریق به انسان صدمه می‌زند:

(۱) به وسیله تاثیر روی قلب

در مورد قلب ابتدا ضربان‌های خارج از موقع پیدا می‌شود. بعد ریتم‌های مضاعف و یا چهار برابر تولید می‌گردد. تعداد ضربان‌ها گاهی به ۸ برابر ضربان‌های طبیعی می‌رسد و پس از آن قلب به رعشه می‌افتد.

(۲) تاثیر روی سلسله اعصاب

جریان متناوب با ولتاژ کم اختلال مهمی در اعصاب تولید نمی‌نماید. اما جریان‌های با ولتاژ زیاد مرکز تنفس واقع در پیاز نخاعی را از میان می‌برد. بدون اینکه قلب متوقف شود مرگ در اثر تورم ریوی روی می‌دهد.

(۳) عضلات

بر اثر جریان الکتریکی اعصاب محیطی قابلیت تحریک و هدایت خود را از دست می‌دهند و همچنین سیستم عضلانی که تحت تاثیر جریان برق قرار می‌گیرد دارای انقباضات کزازای شکل می‌شود و هنگامی که جریان قطع می‌شود انقباض عضلانی نیز از بین می‌رود و گاهی در اثر جریان برق استفراغ‌های متوالی پیدا می‌شود که ممکن است باعث خفگی شود [۱].

#### پ ۴-۶ عوامل موثر در شدت برق گرفتگی

شدت برق گرفتگی تابع عوامل زیر است [۱-۳]:

##### الف) مسیر جریان بدن

به عقیده اغلب محققین مسیر جریان مصدوم کننده بسیار مهم است، زیرا ممکن است این جریان از قلب و سیستم تنفسی و یا مغز عبور نماید و یا ممکن است بدون عبور از مغز و یا قلب، سبب اختلال در مراکز عصبی شود. مقاومت کف دست در رنج ۱۰۰ اهم تا ۱ مگا اهم است. اعصاب، شریان ها و ماهیچه ها، مقاومت کمتری دارند و استخوان، چربی و زردپی مقاومت نسبتا بالایی دارند. در جدول ۱، مقاومت مسیرهای مختلف جریان را در شرایط خشک و مرطوب، مشخص شده است. به طور کلی مسیر دو دست برای عبور جریان که در آن ریه و قلب در معرض برق گرفتگی قرار می گیرند و خطر خفگی هم وجود دارد، بسیار خطرناک است [۳].

جدول ۱: مقاومت اعضای بدن بر حسب اهم از استاندارد IEEE 1048 – 1990

Resistance	Hand - to- Hand		Hand - to-Feet
	Dry Condition	Wet Condition	Wet Condition
Maximum	13,500	1,260	1,950
Minimum	1,500	610	820
Average	4,838	865	1221

##### ب) مقدار جریان

اگر مقدار جریان DC که از بدن انسان عبور می کند بیش از ۰/۰۵ آمپر باشد، برای اغلب افراد خطرناک است. جریان ۱۰ میکرو آمپر که به صورت مستقیم از قلب عبور کند، می تواند سبب ایست قلبی شود. در این شرایط بافت ماهیچه قلب دچار تپش نامنظم می شود، به طوری که خون نمی تواند پمپ شود. در مورد جریان AC نیز، جریان ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی آمپر کافی است تا سبب ایست تنفسی و یا ایست قلبی شود [۳]. شایان ذکر است جریان بالا سبب صدمه گرمایی به بافت ها می شود و گرمای بافت ها با مربع جریان افزایش می یابد ( $RI^2$ ) [۳]. جدول ۲، تاثیر مقدار جریان روی بدن انسان را نشان می دهد.

##### ج) مدت تاثیر جریان

با افزایش مدت عبور جریان، گرما افزایش می یابد و می تواند سبب سوراخ شدن طبقه شاخی پوست شود. چارلز دلزیر<sup>۱</sup> تحقیقی را راجع به ارتباط زمان عبور جریان با میزان جریان عبوری که سبب بروز شوک می شود؛ انجام داده است [۳]:

$$I = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

1 - Charles Dalziel

که در آن :

I: جریان بر حسب (mA)

t: زمان عبور جریان بر حسب ثانیه

K: ثابت است و ۱۱۶ برای ۵٪ جمعیت (جمعیت حساس) و ۱۵۷ برای کارگران صنایع با وزن بیش از ۷۰ کیلوگرم

جدول ۲: تاثیر مقدار جریان روی بدن انسان [۴]

جریان (mA)						تاثیر
جریان متناوب				جریان مستقیم		
۱۰ هرتز		۶۰ هرتز				
زن	مرد	زن	مرد	زن	مرد	
۵	۷	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۱	احساس خفیفی روی دست
۱۱	۱۷	۱/۲	۱/۸	۶	۹	شو <sup>۱</sup> ک بدون درد، بدون از دست دادن کنترل ماهیچه‌ای
۳۷	۵۵	۶	۹	۴۱	۶۲	شو <sup>۱</sup> ک دردناک، آستانه از دست دادن کنترل ماهیچه‌ای
۶۳	۹۴	۱۵	۲۳	۶۰	۹۰	شو <sup>۱</sup> ک دردناک همراه با مشکلات تنفسی و از دست دادن کنترل ماهیچه‌ای

#### د) فرکانس جریان متناوب

به عقیده بیشتر محققین فرکانس‌های ۵۰ تا ۶۰ هرتز مهلک‌ترین فرکانس برای انسان می‌باشد و اگر این فرکانس را کم یا زیاده‌تر سازیم خطرات مرگ کمتر خواهد شد. فرکانس‌های زیاد ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ معمولاً باعث مرگ نمی‌شوند بلکه موجب سوختگی محلی می‌شوند [۱].

#### ه) ولتاژ مجاز

ولتاژ ۱۰۰ تا ۴۰۰ ولت متناوب کشنده‌ترین ولتاژ است و به اندازه کافی زیاد است تا جریان قابل توجهی را در بدن ایجاد نماید و سبب شود که ماهیچه‌ها به شدت منقبض شوند [۳]. در ولتاژهای بالاتر، انقباض شدید ماهیچه‌ای ممکن است مصدوم را پرتاب کند [۳]. نتایج آزمایشی که در مورد تاثیر ولتاژ روی خرگوش‌ها انجام شده، در جدول ۳، آمده است [۱].

۱- اختلال در سیستم گردش خون که سبب مختل شدن خون‌رسانی به مراکز حیاتی بدن و در نتیجه کاهش اکسیژن-رسانی به این مراکز شود؛ باعث شوک می‌شود [۵]

جدول ۳: نتایج آزمایش تاثیر ولتاژ روی خرگوش‌ها [۱]

۱۱۵۰	۴۷۰	۴۶۰	۲۱۶	۱۲۸	۹۰	۶۰	ولتاژ متناوب (v)
۲۷۳۰	۱۳۹۰	۸۵۴	۳۴۴	۱۵۹	۵۴/۸	۴۵/۵	شدت جریان (mA)
۴/۱	۶/۹	۶/۹	۶/۸	۶/۶	۱۴	۱۴	مدت تاثیر جریان (sec)
۵۰	۳۳	۳۳	۳۳	۲۶/۶	۱۶/۵	۵/۸	مرگ (%)

#### پ ۴-۷ روش های حفاظت از برق گرفتگی

- قبل از تمام شدن اتصالات مدار تغذیه را وصل نکنید.
- قبل از وصل کردن مدار به ولتاژ صحت اتصالات را چک کنید و مراقب باشید هیچ سیمی بدون اتصال نباشد.
- به قسمت های بدن حفاظ و پوشش ایمنی دست نزنید (مثلا قسمت فلزی سیم‌های چنگکی)
- اگر کسی را برق گرفت به او دست نزنید؛ بوسیله چوب یا ابزار عایق سیم‌های برق را از او جدا کنید و فوراً جریان برق را قطع کنید.
- خونسردی خود را هنگام کار و بروز حادثه حفظ کنید چون کوچک‌ترین اشتباه ممکن است جان شخصی را به خطر بیندازد.
- باید دانست شخص برق گرفته معمولاً در حالت خفگی است و مرگ او ظاهری است. بنابراین باید با تمام قوا کوشش کنید که تنفس مصنوعی مداوم و طولانی به او بدهید (همراه با اکسیژن). ضایعات سوختگی نیز باید مانند سوختگی معمولی پانسمان شده و تحت درمان قرار گیرند ولی باید همیشه بخاطر داشت که تنفس مصنوعی اولین اقدام برای افراد برق گرفته است.
- به مصدوم دست نزنید؛ ممکن است مصدوم «برق‌دار» باشد و شما هم در معرض برق گرفتگی قرار بگیرید. هرگز از وسایل فلزی برای قطع تماس الکتریکی استفاده نکنید. روی یک ماده خشک نارسانا ایستاده، از یک وسیله چوبی استفاده کنید. آماده باشید تا در صورت توقف تنفس مصدوم، احیای تنفسی یا ماساژ قلبی را تا رسیدن کمک‌های اورژانس آغاز کنید.
- کلید اضطراری قطع برق آزمایشگاه را فشار دهید، تماس بین مصدوم و منبع برق را از طریق فشار دادن این کلید، قطع کنید. اگر به هر دلیل به کلید اضطراری اصلی دسترسی ندارید، به موارد زیر عمل کنید:
- مطابق شکل ۱، برای محافظت از خود، روی یک ماده خشک نارسانا مثل یک جعبه چوبی، یک کفپوش پلاستیکی یا یک دفترچه بایستید. با استفاده از یک وسیله چوبی (مثل یک جارو)، اندام‌های مصدوم را از روی منبع الکتریکی کنار بزنید و یا منبع الکتریکی را از مصدوم دور کنید.
- اگر قطع تماس (مصدوم با منبع برق) با یک وسیله چوبی مقدور نیست، ضمن آنکه کاملاً مراقب هستید تا به مصدوم دست نزنید، طنابی را به دور مچ پای مصدوم یا بازوان وی حلقه کنید و وی را از منبع جریان الکتریکی دور کنید.

در صورتی که با استفاده از هیچ‌یک از روش‌های فوق نتوانستید مصدوم را بی‌برق کنید؛ وی را با کشیدن بخش‌هایی از لباسش که شل و خشک هستند، (از منبع برق) دور کنید. این کار را تنها به عنوان آخرین تلاش انجام دهید زیرا ممکن است مصدوم همچنان «برق‌دار» باشد [۴].



شکل ۱: برای محافظت از خود، روی یک ماده خشک نارسانا بایستید و با استفاده از یک وسیله چوبی، منبع الکتریکی را از مصدوم دور کنید.

## مراجع

- [۱] ابوالفضل اشعریون، «تکنولوژی برق»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
- [۲] استخراج شده در تاریخ ۱۳۸۴/۱۱/۲۶ از سایت <http://www.tbzmed.ac.ir>
- [3] Professor Mohamed A. El-Sharkawi, "Electric Safety", University of Washington.
- [۴] استخراج شده در تاریخ ۱۳۸۵/۱/۲۶ از سایت سلامتیران، پایگاه اطلاعات پزشکی، تغذیه، طب مکمل و متافیزیک به آدرس: <http://www.iranhealers.com/salamat/iranhealers>
- [۵] صغری مینا، رحیم عساکره، "کمک‌های اولیه و مهارت‌های امدادی"، موسسه فرهنگی نشر آیندگان، ۱۳۸۲.



پیوست ۵:

کمک‌های اولیه به فرد برق‌گرفته





### پ ۵-۱ مقدمه

در این قسمت ابتدا مفهوم ایست قلبی و تنفسی بیان می‌شود و سپس اقدامات اولیه شامل احیای قلبی و ریوی (CPR) توضیح داده می‌شود.

### پ ۵-۲ ایست قلبی و تنفسی

منظور از ایست قلبی حالتی است که ضربان قلب کاملاً از بین می‌رود و منظور از ایست تنفسی از کارافتادن تنفس خودبخودی در فرد است. این حالات می‌تواند به دنبال سکته قلبی، شوک، خونریزی‌های سیارشدید، گیرکردن اجسام خارجی در حلق، غرق‌شدگی، برق‌گرفتگی و ... رخ دهد. بیشترین شانس برای زنده ماندن ارگان‌های حیاتی بدن خصوصاً مغز در صورت ایست قلبی و تنفسی ۳ الی ۴ دقیقه است و در این فرصت باید سریعاً اقدامات اولیه (احیای قلبی و ریوی) برای مصدوم انجام شود [۱].

### پ ۵-۳ احیای قلبی ریوی (CPR) [۲-۳]

همانگونه که ذکر شده چنانچه پس از وقوع ایست قلبی یا تنفسی در کمتر از ۴ دقیقه به فرد مصدوم رسیدگی شود و عملیات احیاء وی شروع گردد؛ شانس زنده ماندن وی بالا خواهد رفت. قبل از شروع عملیات احیای قلبی - ریوی باید مطمئن شد آیا فرد واقعاً دچار ایست قلبی - ریوی شده است یا خیر، چرا که انجام عملیات اقدامات اولیه بر روی فردی که دچار ایست قلبی نشده باشد می‌تواند منجر به ایست قلبی و مرگ وی شود.



شکل ۱: گوش یا گونه خود را نزدیک دهان مصدوم قرار دهید تا صدای تنفس وی را بشنوید یا جریان آن را حس کنید.

جهت اطمینان از ایست تنفسی با مشاهده حرکات تنفسی قفسه سینه می‌توان به وجود تنفس در مصدوم پی برد و یا می‌توان مطابق شکل ۱، گوش یا گونه خود را نزدیک دهان وی قرارداد تا صدای تنفس وی را شنید یا جریان آن را حس کرد. سپس نبض بیمار بررسی می‌شود. بهترین محل لمس نبض دریاچه‌های کوچک نبض شریان رانی است در ناحیه کشاله ران لمس می‌شود و بهترین محل نبض دریاچه‌های نبض گردنی است که در ناحیه گردن و پشت نای قرارداد.

لمس نبض باید با دو انگشت نشانه و میانی صورت گیرد.

در صورتی که هیچ گونه نبضی احساس نشود و یا مصدوم تنفس خودبخودی نداشته باشد، عملیات احیاء باید مطابق دستور ذیل انجام شود:



شکل ۲: تنفس دهان به دهان

۱. بیمار را به پشت بخوابانید و به آرامی تکان دهید تا پاسخ به تحرک مشخص شود.
۲. اگر بیمار بدون پاسخ باشد راه های تنفسی او را کنترل کنید . چنانچه راه تنفسی بسته است با کمک انگشت راه تنفسی وی را باز کنید و چنانچه راه تنفسی باز است ولی بیمار نفس نمی کشد تنفس مصنوعی را شروع کنید.
۳. سر مصدوم را به عقب خم نمایید.
۴. مطابق شکل ۲، دو تنفس مناسب دهان به دهان به وی بدهید.

۵. نبض را لمس نمایید اگر ضربان نبض، لمس شود باید به تنفس مصنوعی ادامه داد و اگر لمس نشود، ماساژ قلبی باید شروع شود.



شکل ۳: ماساژ قلبی

۶. جهت انجام ماساژ قلبی، مطابق شکل ۳، دست چپ خود را به حالت ضربدر پشت دست دیگر گذاشته پاشنه دست راست را بر روی جناغ سینه به اندازه دو بند انگشت بالاتر از محل دو شاخه شدن جناغ قرار دهید. آرنج‌ها نباید خم شوند. به کمک وزن بدن فشار محکمی به قفسه سینه وارد کنید تا جناغ سینه به اندازه تقریبی ۴ تا ۵ سانتی‌متر به داخل برود.

تعداد ماساژ قلبی باید حدود ۸۰ بار در دقیقه باشد و به ازای هر ۱۵ ماساژ قلبی ۲ تنفس مصنوعی با روش دهان به دهان داده شود. در صورتی که فرد دیگری به شما کمک می‌کند باید به ازای هر ۵ ماساژ قلبی یک تنفس مصنوعی داده شود. امروزه براساس نظر متخصصین و بسیاری از مراجع علمی در عملیات احیای قلبی ریوی دو نفره، نیازی به قطع ماساژ قلبی برای انجام تنفس مصنوعی نیست و همزمان با انجام ماساژ قلب توسط یک فرد، فرد دیگر می‌تواند تنفس مصنوعی را انجام دهد.

۷. پس از گذشت یک دقیقه عملیات را به مدت ۴ تا ۵ ثانیه جهت لمس نبض گردنی متوقف نمایید. اگر نبض لمس شد، ماساژ قلبی را قطع نمایید و چنانچه تنفس هم برقرار شده باشد تنفس مصنوعی را نیز متوقف کنید. در صورت عدم برقراری تنفس خودبخودی، ماساژ قلبی و تنفس مصنوعی را مجدداً شروع کنید و هر ۳ دقیقه یک بار عملیات را جهت لمس نبض، به مدت ۴ تا ۵ ثانیه متوقف نمایید.

### پ ۵-۳ نکات مهم

۱. فرد را نباید روی سطح نرم مثل تشک و یا تخت‌خواب بخوابانید، بلکه سطح سختی مثل کف اتاق بهتر است [۱].
۲. در تنفس دهان به دهان باید بینی مصدوم را با دو انگشت خود ببندید تا هوایی که به ریه‌ها دمیده می‌شود، مستقیماً از بینی خارج نشود [۲-۳].
۳. موقعیت سر و گردن را درست تنظیم کنید.
۴. طی عملیات احیا، فردی را جهت تماس با اورژانس یا پزشک مامور نمایید.
۵. باید دهان شما با دهان مصدوم کاملاً تماس باشد تا هوایی که از بین آنها خارج نشود. برای پیشگیری از انتقال بیماری‌ها در حین انجام تنفس مصنوعی می‌توان از ماسک ویژه این کار یا پارچه توری مناسب استفاده نمود [۲-۳].
۶. عملیات احیا را تا زمانی که فرد با تجربه یا پزشک بر بالین بیمار برسد و یا تا زمانی که وی به درمانگاه منتقل شود، ادامه دهید [۴].
۷. چنانچه مصدوم مشکوک به ضایعه نخاعی است، سر را مختصری به عقب کشیده به آرامی کمی به عقب خم نمایید سپس تنفس مصنوعی و ماساژ قلبی را ادامه دهید [۴].
۸. حداکثر زمان انجام عملیات احیای قلبی ریوی در منابع علمی مختلف، گوناگون ذکر شده اما مدت زمان بین ۳۰ تا ۴۵ دقیقه، زمان مناسبی بنظر می‌رسد که پس از این مدت اگر عملیات احیاء موفق به نجات مصدوم یا بیمار نگردید، می‌توان از ادامه عملیات خودداری نمود [۲-۳].

### مراجع

- [۱] استخراج شده از سایت <http://www.tbzmed.ac.ir> در تاریخ ۱۳۸۴/۱۱/۲۶
- [۲] سایت اطلاع رسانی جمعیت هلال احمر ایران
- [۳] استخراج شده در تاریخ ۱۳۸۵/۱/۲۶ از سایت سلامتیران، پایگاه اطلاعات پزشکی، تغذیه، طب مکمل و متافیزیک به آدرس: <http://www.iranhealers.com/salamat/iranhealers>
- [۴] صغری مینا، رحیم عساکره، "کمک‌های اولیه و مهارت‌های امدادی"، موسسه فرهنگی نشر آیندگان، ۱۳۸۲.