آزمایش اول :

روشهای کنترل سرعت موتور القایی سه فاز

اگر موتور القایی سه فاز به شبکه ای با ولتاژ و فرکانس ثابت وصل شود، در این صورت پس از راه اندازی در سرعتی حوالی سرعت سنکرون خواهد چرخید. با افزایش گشتاور بار، سرعت به میزان کم کاهش می یابد. لذا این موتور ها تقریباً از نوع موتورهای سرعت ثابت فرض می شوند. اما در برخی از صنایع لازم است که سرعت موتور در یک محدوده و طیف نسبتاً وسیعی تغییر کند. موتور های DC به طور سنتی برای مواردی که کنترل سرعت مورد نیاز است مورد بهره برداری قرار می گیرند. اما موتور های DC گران بوده و به تعمیرات و نگهداری در زمینه ی کموتاتور و جاروبک نیاز دارند. ولی برعکس موتورهای القایی بویژه نوع روتور قفس سنجابی آن ارزان و با دوام بوده و کموتاتور نیز ندارد و لذا برای سرعت های زیاد بسیار مناسب اند. امروزه با پیشرفت علم الکترونیک قدرت و پیدایش کنترل کننده های حالت جامد، کنترل سرعت یا کنترل دور موتور های القایی رو به تکامل است. اما این کنترل کننده ها نسبتاً گران بوده و زمان می طلبد تا به صورت ارزان در دسترس عموم قرار بگیرند.

برای کنترل سرعت موتور القایی تنها دو روش وجود دارد. یک روش تغییر سرعت سنکرون یعنی سرعت میدان های مغناطیسی روتور و استاتور؛ زیرا سرعت روتور همیشه نزدیک n_{sync} می ماند. روش دیگر تغییر لغزش موتور برای یک بار معین است. سرعت سنکرون یک موتور القایی عبارت است از : $n_{sync} = \frac{120\, f_s}{P}$. پس تنها راه های تغییر سرعت سنکرون ماشین عبارتند از: (۱) تغییر تعداد قطبهای ماشین و (۲) تغییر فرکانس الکتریکی. کنترل لغزش را نیز می توان با تغییر مقاومت روتور یا ولتاژ ترمینالهای موتور انجام داد. در این آزمایش و آزمایش بعد، این روش ها را مورد بررسی قرار می دهیم.

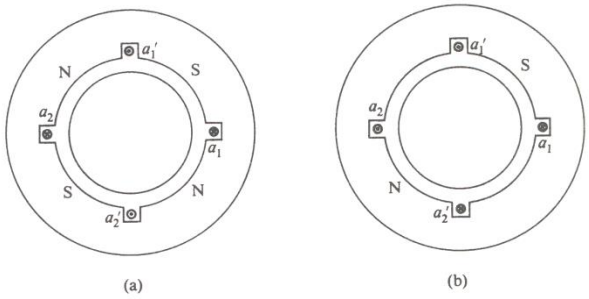
کنترل سرعت موتور القایی با تغییر قطب :

برای تغییر تعداد قطب های یک موتور القایی دو روش اصلی وجود دارد :

۱- تغییر آرایش سیم پیچ های استاتور (روش قطب های تالی)

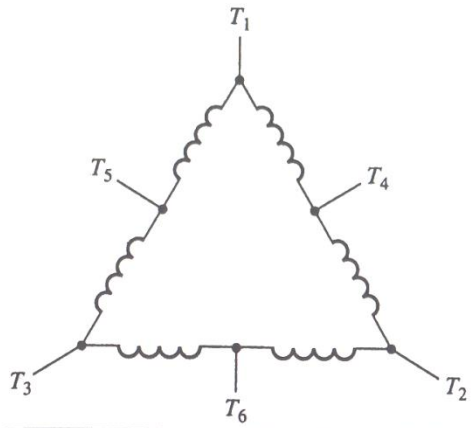
۲- سیم پیچ های استاتور چند گانه

سیم پیچی استاتور یک موتور القایی را می توان طوری طراحی کرد که با تغییر اتصالات پیچک های آن بتوان تعداد قطب های استاتور را به نسبت ۲ به ۱ تغییر داد. شکل ۱-۱ چنین حالتی را نشان می دهد. چون روتور قفس سنجابی تعداد بخصوصی قطب ندارد، بنابراین با هر تعداد قطب استاتور کار خواهد کرد اما در روتور های سیم پیچی شده، در هنگام تغییر تعداد قطب های استاتور، باید آرایش سیم پیچی روتور را نیز تغییر داد تا همواره تعداد قطب های روتور و استاتور یکسان باشند تا موتور بتواند کار کند. بنابراین روش کنترل سرعت از طریق تغییر قطب در موتورهای قفس سنجابی ساده تر و کم هزینه تر است.



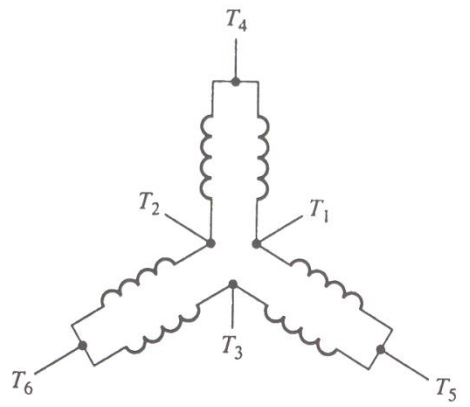
شکل ۱-۱-کنترل سرعت با تغییر قطب

در این روش وقتی موتور از حالت دو قطبی به چهار قطبی تبدیل می شود، گشتاور ماکزیمم حاصل در موتور القایی می تواند مثل قبل باشد(گشتاور ثابت)، نصف قبل باشد(گشتاور مربعی که در پنکه ها و وسایل دیگر به کار می رود)، یا دو برابر قبل باشد(توان خروجی ثابت). این مسئله به چگونگی آرایش مجدد سیم پیچ های استاتور بستگی دارد. شکل ۱-۲ اتصال های ممکن استاتور و اثر آنها بر منحنی گشتاور- سرعت را نشان می دهد.



سرعت	خطوط			
	L_1	L_2	L_3	
کم	T_4	T_5	T_6	T_1 - T_2 - T_3 متصل به هم
زیاد	T_1	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 باز

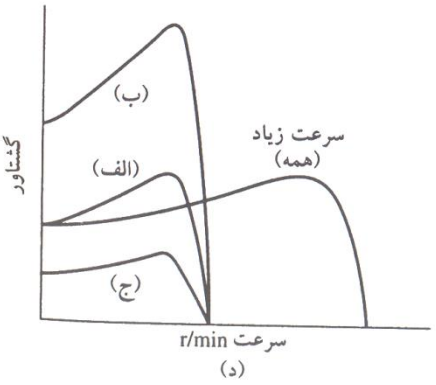
(ب)

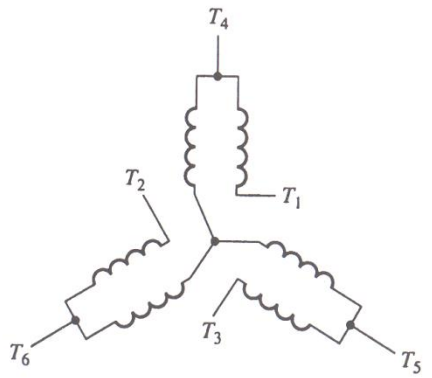


سرعت	خطوط			
	L_1	L_2	L_3	
کم	T_1	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 باز
زیاد	T_4	T_5	T_6	T_1 - T_2 - T_3 متصل به هم

(الف)

شکل ۱-۲- اتصال های ممکن پیچک های استاتور در یک موتور دارای قابلیت تغییر قطب، به همراه مشخصات گشتاور - سرعت حاصل : (الف) ***اتصال گشتاور ثابت*** - در هر دو اتصال سرعت زیاد و سرعت کم گشتاور موتور تقریباً ثابت می ماند. (ب) ***اتصال توان خروجی ثابت***- در هر دو اتصال سرعت زیاد و سرعت کم توان خروجی موتور تقریباً ثابت می ماند.





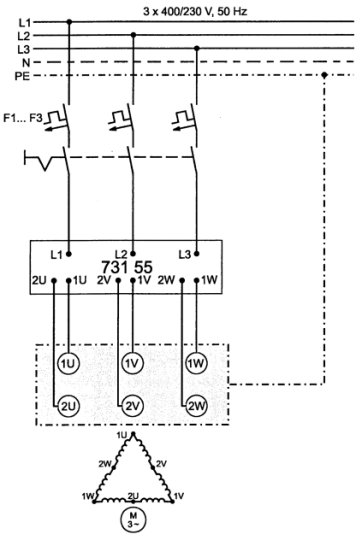
سرعت	خطوط			
	L_1	L_2	L_3	
کم	T_1	T_2	T_3	T_4, T_5, T_6 باز
زیاد	T_4	T_5	T_6	T_1 - T_2 - T_3 متصل به هم

(ج)

شکل ۱-۲- اتصال های ممکن پیچک های استاتور در یک موتور دارای قابلیت تغییر قطب، به همراه مشخصات گشتاور - سرعت حاصل : (ج) ***اتصال گشتاور پنکه ای*** - گشتاور موتور مانند بارهای پنکه ای با تغییر سرعت تغییر میکند.

عیب اصلی روش تغییر آرایش سیم پیچ های استاتور برای تغییر سرعت (روش قطب های تالی)، این است که تنها تغییر سرعت به نسبت ۲ به ۱ ممکن است. روش سنتی غلبه بر این محدودیت، به کار گرفتن سیم پیچ های استاتور چند گانه با تعداد قطب های مختلف و تحریک یکی از آنهاست. برای مثال یک موتور می تواند یک سیم پیچ استاتور چهار قطبی و یک سیم پیچ شش قطبی داشته باشد. به این ترتیب در یک سیستم ۵۰ Hz می توان سرعت سنکرون را با اتصال منبع تغذیه به دسته سیم پیچی دیگر، از ۱۵۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه رساند. متأسفانه استاتور با چند سیم پیچ هزینه ی موتور را زیاد می کند و به همین دلیل تنها وقتی که واقعاً لازم است به کار می رود. با ترکیب دو روش فوق می توان یک موتور القایی چهار سرعته ساخت. برای مثال با دو سیم پیچ چهار و شش قطبی می توان یک موتور ۵۰ Hz ساخت که با سرعت های ۵۰۰ ، ۷۵۰ ، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه کار کند.

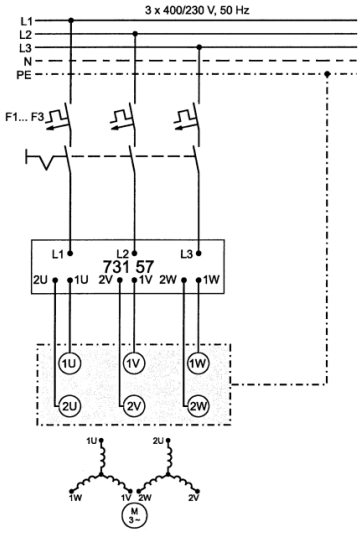
برای بررسی روش اول، موتور القایی سه فاز ماژول ۷۳۲۲۴ ("D" squirrel cage motor) را طبق مدار شکل ۱-۳ در آزمایشگاه ببندید. موتوری که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته از نوع روتور قفس سنجابی است. بنابراین برای تغییر تعداد قطب های موتور کافی است فقط تعداد قطب های سیم پیچی استاتور را تغییر دهید. ماژول ۷۳۱۵۵ نیز در واقع یک کلید تغییر دهنده ی سربندی سیم پیچ های استاتور است.



شکل ۱-۳- مدار آزمایش کنترل سرعت با استفاده از تغییر تعداد قطب های موتور

کلید ماژول ۷۳۱۵۵ را در وضعیت ۱ (سرعت پایین) قرار دهید. سپس با افزایش ولتاژ منبع تغذیه موتور تا مقدار نامی موتور، سرعت موتور را به مقدار نامی آن برسانید. حال سرعت نامی در این وضعیت را یادداشت نمایید. در ادامه ولتاژ منبع را به صفر برسانید تا موتور متوقف شود. **پس از توقف کامل موتور**،کلید ماژول ۷۳۱۵۵ را در وضعیت ۲ (سرعت بالا) قرار دهید و دوباره ولتاژ منبع تغذیه را تا مقدار ولتاژ نامی موتور افزایش دهید تا موتور به سرعت نامی خود در این حالت جدید برسد. مشاهده می شود که سرعت نامی موتور در این حالت حدود دو برابر سرعت نامی موتور در حالت قبل است.

برای بررسی روش دوم نیز از موتور القایی سه فاز ماژول ۷۳۲۲۶ ("SW" squirrel cage motor) استفاده می کنیم. برای انجام این آزمایش مدار شکل ۱-۴ را در آزمایشگاه ببندید. موتور استفاده شده در این آزمایش نیز از نوع روتور قفس سنجابی است. ماژول ۷۳۱۵۷ نیز درواقع یک کلید است که در وضعیت ۱ خود، سه فاز برق منبع تغذیه را به سرهای (1u و 1v و 1w) و در وضعیت ۲ خود، به سرهای (2u و 2v و 2w) وصل می نماید.



شکل ۱-۴- مدار آزمایش کنترل سرعت با استفاده از سیم پیچ های استاتور چند گانه

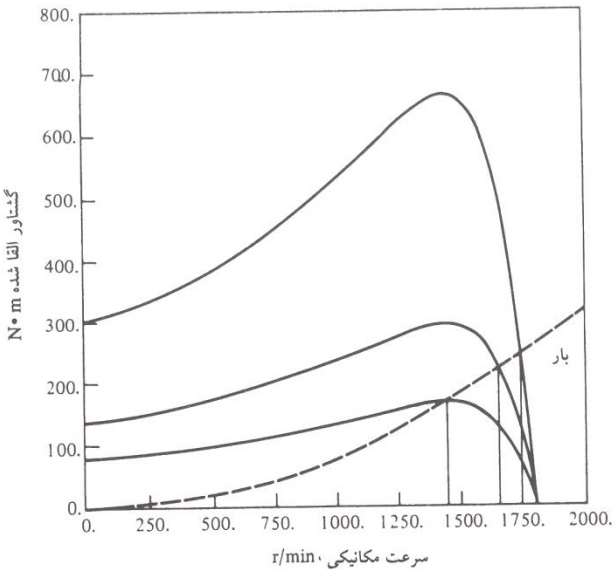
برای انجام آزمایش، ابتدا کلید ماژول ۷۳۱۵۷ را در وضعیت ۱ قرار دهید و سپس با افزایش ولتاژ ورودی تا مقدار ولتاژ نامی موتور، سرعت موتور را به مقدار نامی آن برسانید. سرعت نامی در این وضعیت را یادداشت نمایید. در ادامه ولتاژ منبع را به صفر برسانید و **پس از توقف کامل موتور**، کلید ماژول ۷۳۱۵۷ را در وضعیت ۲ قرار دهید. سپس بار دیگر ولتاژ منبع تغذیه را به مقدار ولتاژ نامی موتور برسانید تا موتور به سرعت نامی در این حالت برسد. مشاهده می شود که سرعت های نامی در دو حالت مختلف با هم متفاوت خواهند بود.

کنترل سرعت با تغییر فرکانس ولتاژ ورودی :

این روش در آزمایش دوم تحت عنوان **مبدل فرکانس** بررسی خواهد شد. فقط در اینجا به ذکر یک نکته در مورد این روش بسنده می کنیم که روش تغییر فرکانس را می توان برای تمام موتورهای القایی به کار برد، بر خلاف روش تغییر قطب که به سیم پیچ های استاتور ویژه ای نیاز داشت، که این در واقع یک مزیت برای این روش محسوب می شود.

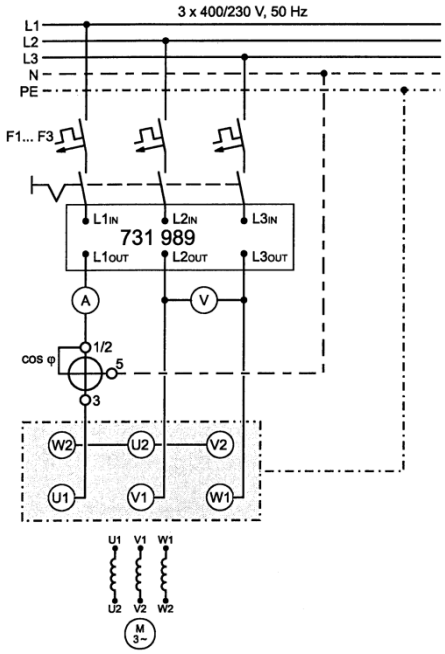
کنترل سرعت با تغییر ولتاژ اعمال شده به موتور :

گشتاوری که یک موتور القایی تولید می کند با مربع ولتاژ اعمال شده به آن متناسب است. اگر مشخصه ی گشتاور- سرعت یک بار مانند شکل۱-۵ باشد، با تغییر ولتاژ اعمال شده به موتور می توان سرعت موتور را در گستره ی محدودی کنترل کرد. این روش کنترل سرعت گاهی اوقات در موتورهای کوچک گرداننده ی پنکه ها به کار می رود.



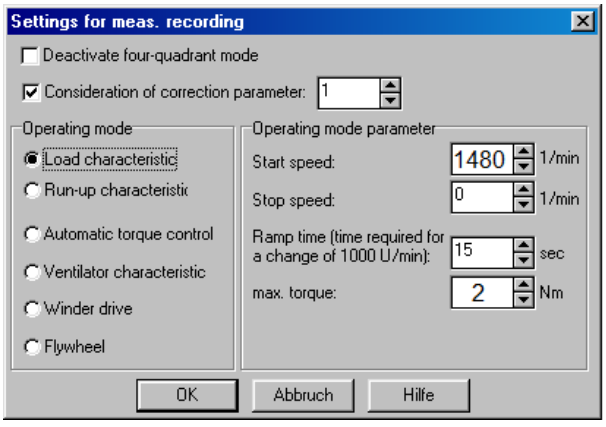
شکل ۱-۵- مشخصهٔ گشتاور- سرعت یک موتور القایی به ازای ولتاژ ترمینال های مختلف

برای بررسی این روش مدار شکل ۱-۶ را در آزمایشگاه ببندید. در این آزمایش از موتور القایی سه فاز قفس سنجابی ماژول ۷۳۲۱۱ استفاده میکنیم.



شکل ۱-۶- مدار راه اندازی موتور القایی سه فاز

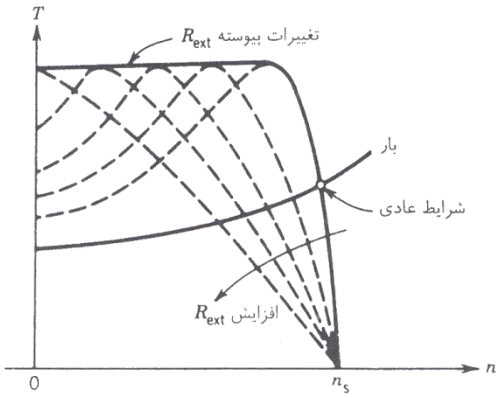
ماژول کنترلی ۷۳۱۹۸۹ را روشن کنید. در حالی که منبع تغذیه به آن وصل است ولتاژ منبع را تا مقدار نامی موتور افزایش دهید. حال نرم افزار CBM موجود در کامپیوتر متصل به سیستم کنترلی را اجرا نمایید. در این نرم افزار از منوی Machine نوع ماشین را Squirrel-cage motor 230/400V انتخاب کنید. سپس در سمت چپ نرم افزار روی دکمهٔ (on) کلیک نمایید. با کلیک بر روی دکمه ی (configuration)، تنظیمات موتور را به صورت شکل ۱-۷ انجام دهید، سپس نرم افزار را اجرا کنید. منحنی گشتاور- سرعت موتور در این حالت به نمایش در خواهد آمد. این آزمایش را برای حالت های ولتاژ ورودی معادل با ۷۰ درصد و همچنین ۴۰ درصد مقدار ولتاژ نامی موتور نیز انجام دهید و نتایج حاصل از این آزمایش ها را با هم مقایسه کنید.



شکل ۱-۷- اعمال تنظیمات موتور و بار مکانیکی براساس شرایط آزمایش

کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور :

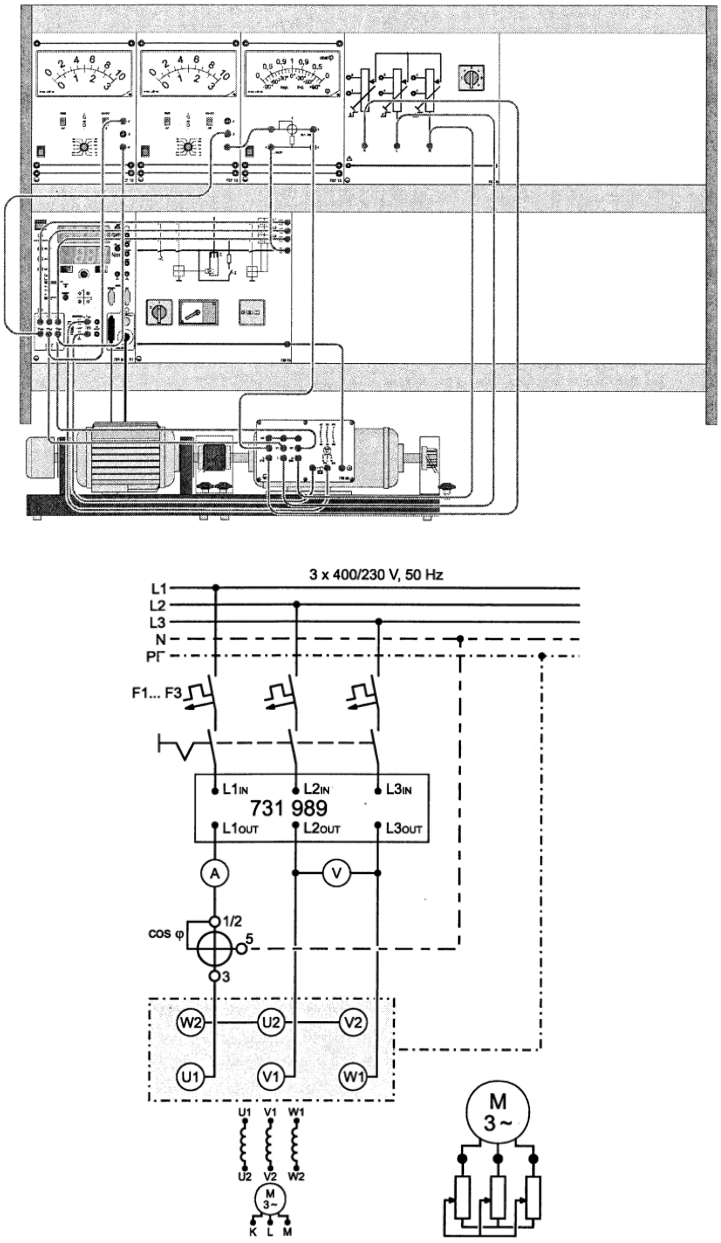
در موتورهای القایی با روتور سیم پیچی شده، می توان با قرار دادن یک مقاومت اضافی در مدار روتور این نوع ماشین ها، شکل منحنی گشتاور-سرعت آنها را تغییر داد. نمونه منحنی های مشخصه ی گشتاور- سرعت حاصل از این روش، در شکل۱-۸ نشان داده شده است. اگر منحنی گشتاور- سرعت بار به صورت نشان داده شده در این شکل باشد، تغییر مقاومت روتور باعث تغییر سرعت کار موتور می شود. ولی قرار دادن مقاومت اضافی در مدار روتور یک موتور القایی، بازده ی آن را به شدت کم می کند. به همین دلیل این روش کنترل سرعت تنها برای فواصل زمانی کوتاه به کار می رود.



شکل ۱-۸- اثر تغییر مقاومت روتور بر مشخصهٔ گشتاور- سرعت موتور القایی

در آزمایشگاه این روش را توسط مدار شکل ۱-۹ مورد بررسی قرار می دهیم. در این مدار از موتور القایی سه فاز ماژول ۷۳۲۲۸ (MultiFunction Machine) استفاده شده است . همچنین از ماژول ۷۳۲۲۹ به عنوان رئوستا در سیم پیچ های روتور استفاده شده است.

برای انجام آزمایش ابتدا کلید ماژول ۷۳۲۲۹را در وضعیت ۶ (کمترین مقدار مقاومت) قرار دهید. ولتاژ تغذیه ی موتور را به مقدار ولتاژ نامی موتور برسانید و بعد از آن سیستم کنترلی را روشن نمایید. نرم افزار CBM را اجرا کنید. سپس از سمت چپ نرم افزار روی دکمه ی (on) کلیک کنید. با کلیک بر روی دکمه ی (configuration)، تنظیمات موتور را به صورت شکل۱-۷ انجام دهید و در ادامه روی دکمه ی (run) کلیک نمایید. منحنی گشتاور - سرعت در این حالت به دست می آید. همین آزمایش را برای حالت هایی که کلید ماژول ۷۳۲۲۹ در وضعیت های ۴ ، ۲ و ۱ قرار گرفته است نیز تکرار کنید و نتایج حاصل از این آزمایش ها را با هم مقایسه کنید.



شکل ۱-۹- مدار راه اندازی موتور القایی به همراه مقاومت متغیر در مدار روتور آن

آزمایش دوم :

مبدل فرکانس

همانطور که در آزمایش قبل و در بحث کنترل سرعت موتور القایی ذکر شد، یکی از روش های کنترل سرعت این نوع موتور ها تغییر فرکانس ولتاژ اعمالی به آن ها است. اگر فرکانس الکتریکی ولتاژ اعمال شده به استاتور یک موتور القایی تغییر کند، آهنگ چرخش میدان های مغناطیسی آن، n_{sync} ، نیز متناسب با تغییر فرکانس تغییر می کند. بنابراین سرعت موتور که در حوالی سرعت سنکرون است هم تغییر می کند. سرعت سنکرون موتور در شرایط نامی را سرعت پایه می نامند. با استفاده از فرکانس متغیر می توان سرعت موتور را در بالاتر یا پایین تر از سرعت پایه کنترل کرد. وقتی موتور با سرعتی پایین تر از سرعت پایه کار می کند، باید ولتاژ پایانه ای اعمال شده به استاتور برای داشتن عملکرد مناسب کاهش یابد. ولتاژ پایانه ای اعمال شده به استاتور باید با کاهش فرکانس استاتور به طور خطی کم شود. اگر این کار انجام نشود فولاد هسته ی موتور القایی اشباع شده، جریان های مغناطش شدیدی در ماشین جریان می یابند.

برای درک لزوم کاهش ولتاژ، به یاد آورید که موتور القایی اساساً یک ترانسفورماتور گردان است. مثل هر ترانسفورماتوری، شار هسته ی یک موتور القایی را می توان با استفاده از قانون فارادی به دست آورد:

$$v(t) = -N\,\frac{d\varphi}{dt}$$

با اعمال ولتاژ $v(t) = V_m \sin \omega t$ به هسته ، شار حاصل φ بصورت زیر خواهد بود :

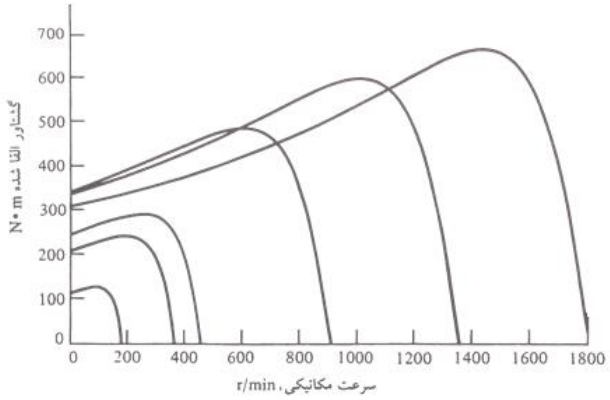
$$\varphi(\mathrm{t}) = \frac{1}{N_P}\int v(t)\,dt$$

$$= \frac{1}{N_P}\int V_m \sin \omega t\;\; dt$$

$$\varphi(\mathrm{t}) = -\frac{V_m}{\omega\, N_P}\cos \omega t$$

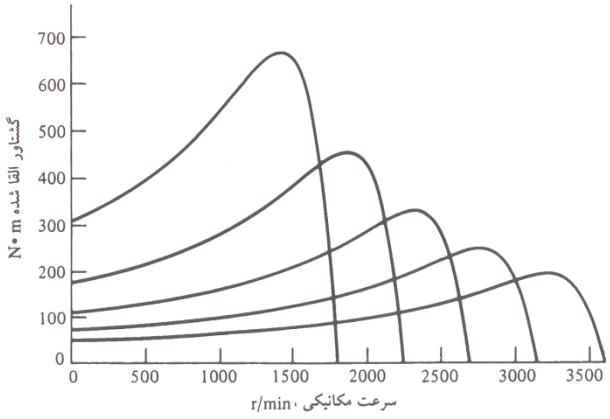
توجه کنید که فرکانس ω در **مخرج** این عبارت ظاهر شده است. بنابراین اگر فرکانس اعمال شده به استاتور ٪۱۰ کاهش یابد ولی دامنه ی ولتاژ اعمال شده به استاتور ثابت بماند، شار هسته ی موتور حدود ٪۱۰ اضافه می شود و جریان مغناطش موتور زیاد می شود. در ناحیه غیر اشباع منحنی مغناطش موتور، افزایش جریان مغناطش نیز حدود ٪۱۰ است. ولی در ناحیه ی اشباع منحنی مغناطش موتور، برای افزایش شار به میزان ٪۱۰ ، به افزایش بسیار زیادتر جریان مغناطش نیاز است. موتورهای القایی معمولاً طوری طراحی می شوند که در نزدیکی نقطه ی اشباع منحنی مغناطش کار کنند. بنابراین افزایش شار ناشی از کاهش فرکانس باعث می شود که در موتور جریان های مغناطش بزرگی ایجاد شود. برای این که این جریان های مغناطش شدید به وجود نیاید، در مواردی که فرکانس از فرکانس نامی موتور کمتر می شود، معمولاً ولتاژ استاتور را متناسب با فرکانس کم می کنند. چون ولتاژ اعمالی V در صورت عبارت شار ظاهر می شود و فرکانس ω در مخرج آن ، دو اثر یکدیگر را خنثی می کنند و جریان مغناطش بدون تغییر می ماند .

شکل ۲-۱ یک دسته منحنی مشخصه ی گشتاور - سرعت موتور القایی، برای سرعت های کمتر از سرعت پایه را با فرض اینکه ولتاژ استاتور به طور خطی با فرکانس تغییر کند، نشان می دهد.



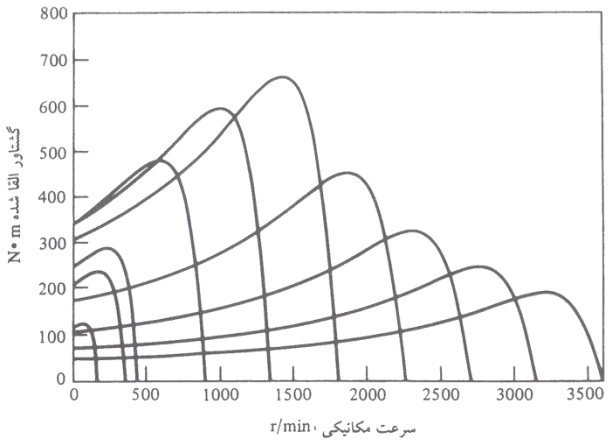
شکل ۲-۱- کنترل سرعت یک موتور القایی با تغییر فرکانس: یک دسته منحنی مشخصهٔ گشتاور- سرعت برای سرعت های زیر سرعت پایه. با این فرض که ولتاژ خط با فرکانس کاهش یابد.

وقتی فرکانس الکتریکی اعمال شده به موتور از فرکانس نامی موتور بیشتر می شود، ولتاژ استاتور در مقدار نامی خود ثابت نگه داشته می شود. گرچه ملاحظات اشباع اجازه می دهد تحت این شرایط ولتاژ از مقدار نامی اش بیشتر شود، ولی آن را به خاطر حفظ عایق بندی سیم پیچ موتور ثابت نگه می دارند. هرچه فرکانس الکتریکی از فرکانس نامی بیشتر شود، مخرج عبارت شار بزرگتر می شود و چون صورت این معادله ثابت نگه داشته شده است، شار ماشین کاهش می یابد و گشتاور ماکزیممی که می تواند تولید کند نیز به همراه آن کم می شود. شکل ۲-۲ یک دسته منحنی مشخصه ی گشتاور - سرعت را برای سرعت های بالاتر از سرعت پایه ، با فرض ثابت ماندن ولتاژ استاتور نشان می دهد.



شکل ۲-۲- کنترل سرعت یک موتور القایی با تغییر فرکانس: یک دسته منحنی مشخصهٔ گشتاور- سرعت برای سرعت های بالاتر از سرعت پایه با فرض اینکه ولتاژ خط ثابت نگه داشته شده است.

بنابراین اگر ولتاژ استاتور را در سرعت های پایین تر از سرعت پایه به طور خطی با فرکانس کاهش دهیم و آن را به ازای سرعت های بالاتر از سرعت پایه در مقدار نامی اش ثابت نگه داریم دسته منحنی های گشتاور - سرعت نشان داده شده در شکل ۲-۳ حاصل می شود. سرعت نامی موتور مورد استفاده در شکلهای اخیر، ۱۸۰۰ دور بر دقیقه فرض شده است .



شکل ۲-۳- مشخصه های حاصل از دو حالت تغییر فرکانس قبل

برای ساختن دستگاهی که ولتاژهای با فرکانس های مختلف تولید کند (مبدل فرکانس) چندین روش وجود دارد. یکی از این روش ها استفاده از کنترل کننده های حالت جامد و روش های سوئیچینگ تریستوری است که سابقه ی استفاده ی زیادی ندارد چرا که این المانها از چند سال قبل معمول گردیده اند. روش دیگر استفاده از یک موتور القایی به عنوان مبدل فرکانس است. ما در این آزمایشگاه، برای کنترل سرعت موتور القایی یک مبدل فرکانس با استفاده از روش دوم خواهیم ساخت. برای تشریح روش دوم در ابتدا نگاهی دوباره به طرز کار موتور القایی خواهیم انداخت.

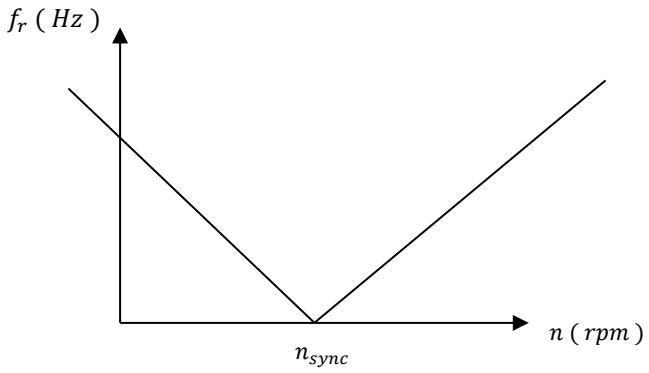
در موتورهای القایی با اعمال یک مجموعه ولتاژ سه فاز به سیم پیچ های استاتور یک میدان دوار در فاصله هوای ایجاد می گردد. این امر باعث القا شدن یک مجموعه ولتاژ سه فاز در سیم پیچ های روتور می گردد. در صورتی که این سیم پیچی ها اتصال کوتاه باشند، یک مجموعه جریان سه فاز در روتور ایجاد می گردد که باعث ایجاد یک میدان دوار دیگر در فاصله ی هوایی می شود. با کوپل شدن این میدان ها در فاصله هوایی، گشتاوری القا می شود که باعث چرخیدن روتور می شود.

وقتی روتور ساکن است، میدان گردان با سرعت n_{sync} سیم پیچ های روتور را قطع می کند اما اگر روتور با سرعت n_{mech} در جهت میدان مغناطیسی گردان بچرخد، میدان گردان با سرعت $n_{sync} - n_{mech}$ سیم پیچ های روتور را قطع می کند. بنابراین ولتاژ القا شده به سرعت نسبی بین میدان گردان و روتور بستگی دارد. از این رو کمیتی به نام لغزش را برای یک ماشین القایی تعریف می کنند: $s = \frac{n_{sync} - n_{mech}}{n_{sync}}$

در لحظه راه اندازی ($n_{mech} = 0$)، $s = 1$ و در سرعت سنکرون ($n_{mech} = n_{sync}$) ، $s = 0$ است. فرکانس ولتاژ القا شده در سیم پیچ های (یا میله های) روتور برابر است با : $f_r = sf_s$. بنابراین طبق تئوری بیان شده، در این نوع مبدل فرکانس ها از این حقیقت استفاده شده است که :

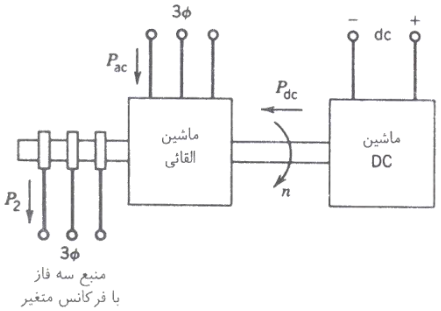
اگر به سیم پیچ های استاتور یک موتور القایی، یک مجموعه ولتاژ سه فاز وصل کنیم سپس روتور این موتور را توسط یک محرک خارجی (مثلاً یک موتور DC) به گردش در بیاوریم، بسته به این که سرعت چرخش روتور چه مقدار و در چه جهتی (در جهت میدان گردان استاتور موتور القایی یا در خلاف جهت آن) باشد، ولتاژ هایی با اندازه و فرکانس های مختلف می توان ایجاد کرد.

نمودار فرکانس برحسب دور در این نوع مبدل ها به صورت شکل ۲-۴ خواهد بود :



شکل ۲-۴- تغییرات فرکانس ولتاژ القا شده در روتور بر حسب سرعت روتور

برای پیاده سازی چنین مبدل فرکانسی مدار شکل ۲-۵ را در آزمایشگاه ببندید.



شکل ۲-۵- ساخت دستگاه مبدل فرکانس با استفاده از یک موتور القایی

طبق این مدار ولتاژ نامی موتور القایی را به استاتور آن اعمال نمایید و سرهای روتور را باز نگه دارید. ولتاژ سه فاز ایجاد شده در روتور را به یک ولت متر و هم چنین یک فرکانس متر وصل کنید. با رعایت تمامی شرایط راه اندازی، موتور DC تحریک مستقل را بسته و راه اندازی نمایید. حرکت یک بار در جهت میدان استاتور و بار دیگر در خلاف جهت آن باشد. نتایج حاصل از این آزمایش ها را در جدول های۲-۱ و۲-۲ ثبت نمایید.

جدول ۲-۱:

n (سرعت موتور DC) (rpm)	۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰۰
V (ولتاژ روتور) (V)								
f_r (Hz)								

جدول ۲-۲:

n (سرعت موتور DC) (rpm)	۰	-۵۰۰	-۱۰۰۰	-۱۵۰۰	-۲۰۰۰	-۲۵۰۰	-۳۰۰۰	-۳۵۰۰
V (ولتاژ روتور) (V)								
f_r (Hz)								

در ادامه توسط این مبدل فرکانس سرعت یک موتور القایی را کنترل می کنیم. برای انجام این کار، ولتاژ تولید شده توسط مبدل فرکانس فوق را به اتوترانسفورماتور میز آزمایش بدهید و زمانی که برق تولید شده ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ هرتز است، آن را به یک موتور القایی سه فاز اعمال کنید و مشاهدات خود را در جدول۲-۳ ثبت نمایید.

جدول ۲-۳:

f (Hz)	۴۵	۶۰	۹۰
ولتاژ خط استاتور موتور القایی			
سرعت موتور DC			
جریان استاتور موتور القایی سه فاز			
جریان آرمیچر موتور DC تحریک مستقل			

آزمایش سوم :

اصلاح ضریب توان موتور القایی سه فاز

بارهایی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند با توجه به نوع ساختارشان عموما بارهایی اهمی- سلفی هستند و هم توان اکتیو و هم توان راکتیو مصرف می کنند. چون ساختار شبکه های قدرت به شکلی است که نیروگاه ها از مراکز مصرف انرژی برق (عموماً شهر ها) فاصله دارند، از خطوط انتقال برق با مسافت های طولانی برای رساندن انرژی برق به مصرف کننده ها استفاده می شود. اما با توجه به ماهیت توان راکتیو اگر بخواهیم علاوه بر توان اکتیو (که فقط می تواند در نیروگاه تولید شود) توان راکتیو را نیز از نیروگاه و توسط خطوط انتقال جهت پاسخ به نیاز مصرف کننده ها منتقل کنیم، عملاً با مشکلات فراوان فنی و اقتصادی مواجه می شویم و این کار به صرفه نخواهد بود. نکته ای که باید به آن دقت شود این است که بر خلاف توان اکتیو ، توان راکتیو را می توان در محل بار نیز تولید کرد.

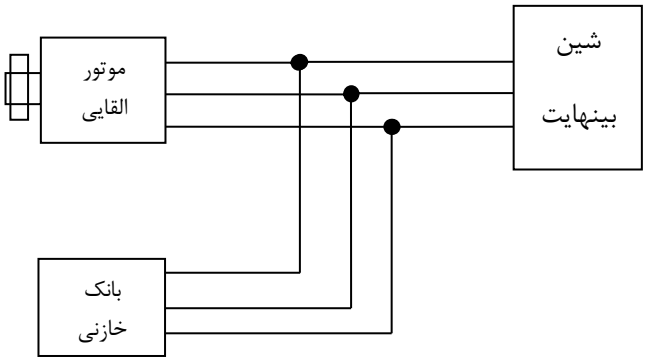
عموماً توان راکتیو مورد نیاز بار ها در همان محل بار ها و به صورت محلی (Local)، توسط بانک خازنی و یا کندانسور سنکرون، تولید می شود.

در اصطلاح فنی به این کار، اصلاح ضریب توان می گویند. یعنی اگر بار به طور عادی مورد بهره برداری قرار بگیرد توان راکتیو بیشتری نسبت به حالتی که یک بانک خازنی را با آن موازی کرده ایم، از شبکه دریافت می کند پس در اصطلاح می گوییم: « از دید شبکه ی قدرت، بر روی این بار اصلاح ضریب توان صورت گرفته است. »

در این آزمایش یک بانک خازنی با خازن های متغیر را با یک موتور القایی سه فاز موازی می کنیم و به ازای مقدار خازن گذاری های مختلف، تغییرات ضریب توان موتور القایی در دو حالت بی باری و بارداری این موتور را مورد بررسی قرار می دهیم.

اصلاح ضریب توان در حالت بی باری موتور القایی :

برای انجام این آزمایش مدار شکل ۳-۱ را در آزمایشگاه ببندید.



شکل ۳-۱- مدار آزمایش اصلاح ضریب توان در حالت بی باری موتور القایی

در این آزمایش به سه آمپر متر جهت خواندن جریان استاتور، جریان خط و جریان بانک خازنی نیاز داریم. جریان خط را توسط آمپر متر میز آزمایش می خوانیم و جریان های بانک خازنی و استاتور را نیز بوسیله ی آمپر متر هایی که در مدار آن ها قرار می دهیم، می خوانیم. در این مدار، بانک خازنی را به صورت **ستاره** به استاتور موتور القایی وصل کنید.

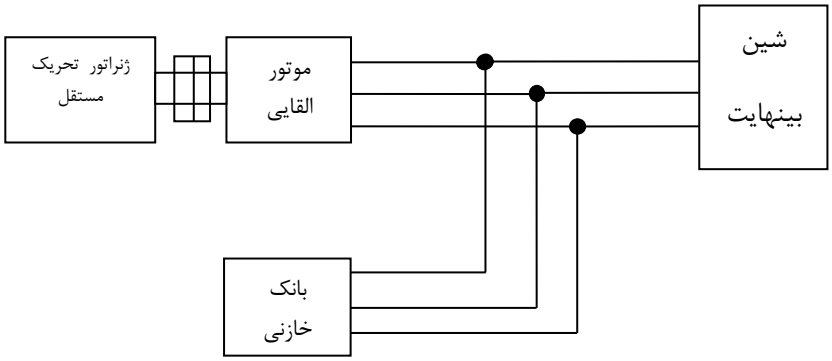
بانک خازنی موجود در آزمایشگاه یک کلید ۷ وضعیته دارد که اگر کلید در وضعیت ۰ باشد، بانک خازنی کم ترین مقدار خازن و اگر کلید در وضعیت ۶ باشد، بانک خازنی بیشترین مقدار خازن را خواهد داشت. در ابتدا این کلید را در وضعیت ۰ قرار دهید. سپس با اعمال ولتاژ نامی موتور القایی به آن، موتور را به سرعت نامی آن برسانید. دقت داشته باشید که موتور در این حالت بدون بار است (با صرفنظر کردن از اصطکاک بین محور موتور و بدنهٔ آن). سپس در طی چند مرحله، کلید بانک خازنی را در وضعیت های ۱ ، ۲ ، ... و ۶ قرار دهید و مشاهدات خود را درجدول۳-۱ ثبت نمایید.

جدول ۳-۱:

پله های بانک خازنی		۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
جریان استاتور موتور القایی	I_S (A)							
جریان خط	I_L (A)							
جریان بانک خازنی	I_C (A)							
توان اکتیو مصرفی مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	P (W)							
توان راکتیو مصرفی مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	Q (VAR)							
ضریب توان مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	$cos\ \varphi$							

اصلاح ضریب توان در حالت بارداری موتور القایی :

برای انجام این آزمایش، مقدار آزمایش قبل را به صورت مدار شکل ۳-۲ تغییر دهید. در این آزمایش برای بارداری موتور القایی از یک ژنراتور DC تحریک مستقل که به پایانه های آن بار مقاومتی وصل شده است استفاده می شود.



شکل ۳-۲- مدار آزمایش اصلاح ضریب توان در حالت بارداری موتور القایی

ابتدا کلید بانک خازنی را در وضعیت ۰ قرار دهید. سپس با اعمال ولتاژ نامی موتور به آن، سرعت موتور را به مقدار نامی آن برسانید. بعد از آن با وصل کردن مقاومت به عنوان بار به ژنراتور DC، گشتاوری معادل با گشتاور نامی موتور القایی به این

موتور اعمال نمایید. در طی چند مرحله، کلید بانک خازنی را در وضعیت های ۱ ، ۲ ، ... و ۶ قرار داده، نتایج حاصل شده را در جدول ۳-۲ ثبت نمایید.

جدول ۳-۲:

پله های بانک خازنی		۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
جریان استاتور موتور القایی	I_s (A)							
جریان خط	I_L (A)							
جریان بانک خازنی	I_C (A)							
توان اکتیو مصرفی مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	P (W)							
توان راکتیو مصرفی مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	Q (VAR)							
ضریب توان مجموعهٔ موتور و بانک خازنی	$cos\ \varphi$							

پرسش ها :

۱- اصلاح ضریب توان در حالت بی باری بهتر دیده می شود یا در حالت بارداری؟ با ذکر دلیل توضیح دهید.

۲- در حالتی که توان اکتیو ثابت باشد، برای اینکه ضریب توان از مقدار $\cos\varphi_1$ به مقدار $\cos\varphi_2$ برسد به چه مقدار خازن در هر فاز که به صورت: الف) ستاره ب) مثلث بسته شده باشند، نیاز است؟

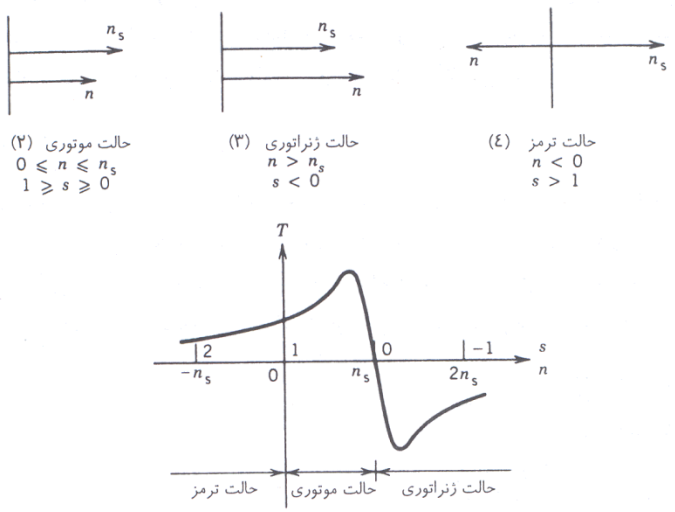
۳- اگر بخواهیم در بخش اول آزمایش(آزمایش اصلاح ضریب توان در حالت بی باری موتور القایی) مقدار توان راکتیو تولید شده توسط بانک خازنی بیشتر شود تا اینکه ضریب توان بهبود بیشتری پیدا کند، چه تغییری در اتصالات مدار شکل ۱-۳ می توان انجام داد؟

آزمایش چهارم :

ژنراتور القایی

ژنراتور های القایی از اوایل قرن بیستم به کار می رفته اند، ولی در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ تقریباً کنار گذاشته شدند. ولی پس از شروع افزایش ناگهانی قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ شروع به بازگشت کردند. به خاطر هزینه ی بالای انرژی ، بازیابی انرژی بخش مهمی از اقتصاد اکثر فرایند های صنعتی شده است. ژنراتور های القایی برای این کاربرد ها بسیار ایده آل هستند، زیرا از لحاظ کنترل و نگه داری چیز زیادی لازم ندارند.

در آزمایش های قبل با ماشین های القایی آشنا شدید. همانطور که از مشخصه ی این نوع ماشین ها- شکل ۴- ۱ - پیداست، اگر یک موتور القایی توسط یک گرداننده ی خارجی با سرعتی بیش از سرعت سنکرون (n_{sync}) به حرکت در آید جهت گشتاور القایی آن معکوس شده، به عنوان ژنراتور عمل می کند. با افزایش گشتاوری که گرداننده ی خارجی به محور ماشین اعمال می کند، توان تولید شده توسط آن بیشتر می شود.

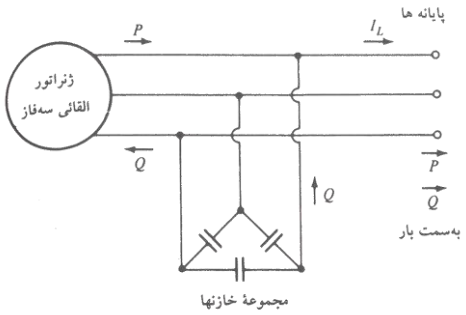


شکل ۴-۱- مشخصهٔ گشتاور- سرعت ماشین های القایی

همانطور که در شکل ۴-۱ ملاحظه می شود، در حالت ژنراتوری گشتاور القا شده یک مقدار ماکزیمم دارد. این گشتاور را گشتاور شکست ژنراتور می نامند. اگر گرداننده گشتاوری بزرگتر از این گشتاور به ژنراتور القایی وارد کند، ژنراتور وارد ناحیه ی کاری ناپایدار می شود. ماشین القایی به عنوان ژنراتور محدودیت های زیادی دارد. چون این ماشین مدار میدان مجزا ندارد نمیتواند توان راکتیو تولید کند. در واقع خود ژنراتور توان راکتیو مصرف می کند و همواره باید یک منبع توان راکتیو خارجی به آن وصل باشد تا میدان مغناطیسی استاتور را حفظ کند. این منبع خارجی توان راکتیو باید ولتاژ پایانه ای ژنراتور را نیز کنترل کند. چون جریان میدان وجود ندارد، ژنراتور القایی نمیتواند ولتاژ خروجی خودش را کنترل کند، معمولاً ولتاژ ژنراتور

توسط سیستم قدرت خارجی متصل به آن حفظ می شود. مزیت بزرگ ژنراتور القایی سادگی آن است. ژنراتور القایی مدار میدان مجزا نمی خواهد و نباید همواره با سرعتی ثابت گردانده شود. تا وقتی سرعت ماشین از n_{sync} سیستم قدرت متصل به آن بزرگتر است به صورت ژنراتور عمل می کند. هر چه گشتاوری که به محور آن وارد می شود بزرگتر باشد (البته تا یک حد خاص) توان خروجی حاصل بزرگتر است. این حقیقت که هیچ نوع تنظیمی لازم نیست، این ژنراتور را به انتخاب مناسبی برای نیروگاه های بادی، سیستم های بازیابی گرما و منابع توان مشابهی که به یک سیستم قدرت موجود متصل اند، تبدیل کرده است. در چنین کاربرد هایی تصحیح ضریب توان را می توان با استفاده از خازن صورت داد و ولتاژ پایانه ای ژنراتور توسط قدرت خارجی متصل به آن کنترل می شود.

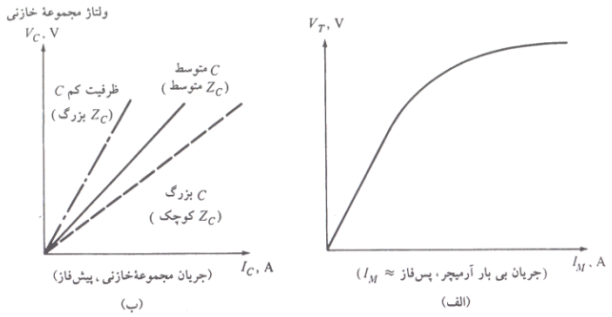
یک ژنراتور القایی هم می تواند متصل به یک شبکه ی قدرت، توان تولید کند و هم این که به صورت یک ژنراتور مجزا، مستقل از هر گونه سیستم قدرتی عمل کند. البته به شرطی که خازن هایی توان راکتیو لازم برای ژنراتور و بارهای متصل به آن را فراهم کند. شکل ۴-۲ یک سیستم ژنراتور القایی مجزا را نشان می دهد.



شکل ۴-۲- ژنراتور القایی مستقل، که توان راکتیو مورد نیاز آن توسط یک مجموعه خازن تأمین می شود.

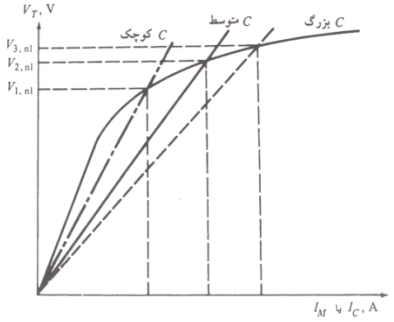
جریان مغناطیس کننده I_m لازم برای یک ماشین القایی برحسب ولتاژ پایانه ای را می توان به این ترتیب پیدا کرد :

ماشین را به صورت یک موتور بی بار به حرکت در می آوریم و جریان آرمیچر آن را بر حسب ولتاژ پایانه ای اش اندازه می گیریم. این منحنی مغناطش در شکل۴-۳ الف نشان داده شده است. برای دستیابی به یک سطح ولتاژ مشخص با یک ژنراتور القایی، باید خازن ها بتوانند جریان مغناطیس کننده ی متناظر با آن سطح ولتاژ را تأمین کنند. چون جریان واکنشی که یک خازن می تواند بدهد با ولتاژ اعمال شده به آن تناسب خطی دارد، مکان هندسی تمام ترکیب های ولتاژ - جریان ممکن برای یک خازن یک خط راست است. چنین خطی به ازای یک فرکانس معلوم در شکل ۴-۳ ب نشان داده شده است. اگر یک مجموعه خازنی سه فاز به پایانه های یک ژنراتور القایی وصل شود، ولتاژ بی بار ژنراتور القایی توسط محل برخورد منحنی مغناطش ژنراتور و خط بار خازن تعیین می شود.



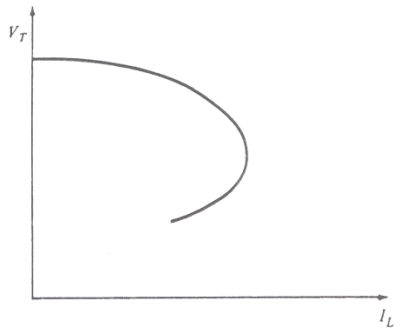
شکل ۴-۳: الف- منحنی مغناطش یک ماشین القایی. این منحنی ولتاژ پایانه ای ماشین را بر حسب جریان مغناطیس کنندهٔ آن نشان می دهد. ب- مشخصهٔ ولتاژ- جریان یک بانک خازنی توجه کنید که هر چه ظرفیت بزرگتر باشد، به ازای یک ولتاژ خاص، جریان بزرگتری خواهیم داشت.

شکل ۴-۴ ولتاژ پایانه ای ژنراتور القایی را به ازای سه مجموعه خازن متفاوت نشان می دهد.



شکل ۴-۴- ولتاژ پایانه ای ژنراتور القایی به ازای سه مجموعه خازن متفاوت

وقتی یک ژنراتور القایی شروع به کار می کند، مغناطش باقیمانده در مدار میدان آن یک ولتاژ کوچک ایجاد می کند. این ولتاژ کوچک باعث می شود که یک جریان خازنی عبور کند و این جریان ولتاژ را افزایش می دهد. افزایش ولتاژ افزایش جریان خازنی را به همراه دارد و این عمل تا ایجاد ولتاژ کامل پایانه ای ادامه می یابد. درست مانند ماشین های DC که اگر شار باقیمانده نداشته باشیم ولتاژ سازی صورت نمی گیرد و مدار میدان باید توسط وسیله ای خارجی روشن شود، در این جا نیز اگر شار باقی مانده در ژنراتور القایی صفر باشد، ولتاژ سازی در آن صورت نمی گیرد و باید آن را به طور لحظه ای به صورت موتور القایی به کار انداخت تا شار باقی مانده ای در آن به وجود آید. مهم ترین مشکل ژنراتور القایی این است که ولتاژ آن با تغییر بار، مخصوصاً بار خازنی، به شدت تغییر می کند. مشخصات پایانه ای نوعی یک ژنراتور القایی که به تنهایی کار می کند و خازن ثابتی با آن موازی است، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

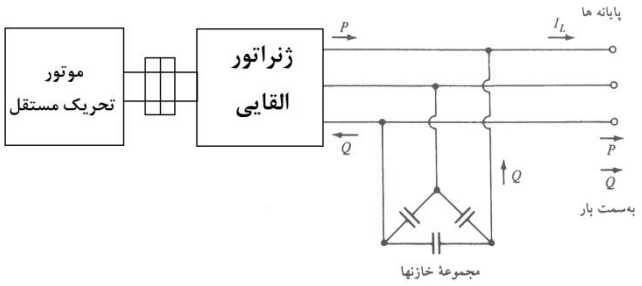


شکل ۴-۵-مشخصهٔ ولتاژ- جریان خروجی یک ژنراتور القایی به ازای باری با ضریب توان پس فاز ثابت

توجه کنید که به ازای بار القایی ولتاژ به شدت افت می کند. علت این است که خازن های ثابت باید تمام توان راکتیو مورد نیاز بار و ژنراتور را تأمین می کنند و هر مقدار توان راکتیوی که به سمت بار سوق داده شود ژنراتور را روی منحنی مغناطش به عقب می راند و باعث افت ولتاژ شدید می شود. بنابراین راه اندازی یک موتور القایی در سیستم قدرتی که ژنراتور آن القایی است بسیار مشکل است. برای افزایش خازن مؤثر در هنگام راه اندازی و کاهش آن در هنگام کار عادی باید روش های ویژه ای مورد استفاده قرار بگیرد. به خاطر طبیعت مشخصه ی گشتاور - سرعت ماشین القایی، فرکانس ژنراتور القایی با تغییر بار تغییر می کند ولی چون مشخصه ی گشتاور - سرعت در گستره ی عادی کار بسیار شیبدار است کل تغییر فرکانس معمولاً به مقداری کم تر از ٪۵ محدود می شود. این مقدار تغییر در بسیاری از کاربرد های ژنراتورهای اضطراری یا مجزا قابل قبول است.

ژنراتور های القایی به خاطر سادگی و اندازهٔ کوچکشان نسبت به توان خروجی تولیدی شان برای نیروگاه های بادی کوچک بسیار مناسب اند. بسیاری از نیروگاه های بادی طوری طراحی شده اند که بتوانند به طور موازی با سیستم های بزرگ کار کرده، بخش کوچکی از برق مصرفی مشترکان را تأمین کنند. در چنین کاربردی می توان وظیفه ی کنترل ولتاژ و فرکانس را به عهده ی سیستم قدرت گذاشت و برای تصحیح توان از خازن های استاتیک استفاده کرد.

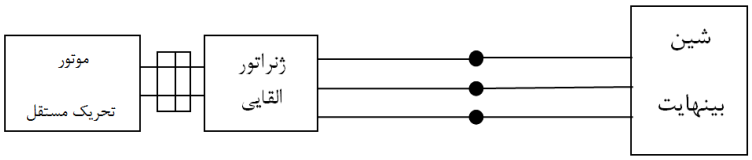
در این آزمایش سعی داریم ژنراتور القایی را هم به صورت متصل به شبکه قدرت و هم به صورت مستقل و مجزا راه اندازی کنیم و ولتاژ سازی این ماشین در هر دو حالت را بررسی نماییم. ابتدا حالت راه اندازی به صورت مجزا را در نظر می گیریم. برای انجام این آزمایش مدار شکل ۴-۶ را در آزمایشگاه ببندید.



شکل ۴-۶- مدار آزمایش راه اندازی ژنراتور القایی به صورت مستقل

همانطور که در شکل ۴-۶ مشاهده می نمایید، در این آزمایش از یک موتور DC تحریک مستقل به عنوان محرک ژنراتور القایی استفاده شده است. چون ماشین القایی موجود در سِت آزمایشگاه از نوع روتور سیم پیچی شده است و به سربندی این سیم پیچ ها نیز دسترسی داریم، آنها را توسط سیم های رابط به هم اتصال کوتاه کنید تا مدار سیم پیچ های روتور بسته شود. مجموعه خازنهای سه فاز متغیر را به پایانه های استاتور ماشین القایی وصل نمایید. در ابتدا کلید تنظیم مقدار این خازن ها را در وضعیت صفر (= کمترین مقدار خازنها = قطع خازن ها) قرار دهید. حال موتور DC تحریک مستقل را راه اندازی کرده، سرعت آن را به rpm ۳۰۰۰ برسانید. تا اینجا مقدار ولتاژ پایانه های استاتور ماشین القایی که اکنون به صورت ژنراتور کار می کند حدوداً صفر است. برای ایجاد ولتاژ سازی در ژنراتور، کلید مجموعه ی خازن ها را طی چند مرحله در وضعیت های ۱،۲، ...و۶ قرار دهید. خواهید دید در یک مقدار خازن گذاری خاص، عمل ولتاژ سازی انجام خواهد شد. اکنون ژنراتور القایی قادر خواهد بود که به بار هایی الکتریکی ای که به آن وصل می شوند توان تحویل دهد.

در ادامه ژنراتور القایی متصل به شبکهٔ قدرت را مورد بررسی قرار می دهیم. برای این منظور مدار شکل ۴-۷ را در آزمایشگاه ببندید.



شکل ۴-۷- مدار آزمایش راه اندازی ژنراتور القایی به صورت متصل به شبکهٔ قدرت

در این آزمایش ابتدا ماشین القایی را (در حالی که موتور DC بی برق است) به صورت موتور القایی راه اندازی کرده، جهت حرکت محور آن را مشاهده نمایید. سپس آن را خاموش کنید. پس از آن موتور DC را راه اندازی کنید و جهت چرخش محور آن را نیز مشاهده نمایید. اگر جهت چرخش محور هر دو موتور یکسان بود، ادامه ی آزمایش را انجام دهید. در غیر این صورت پلاریته ی سیم پیچ میدان موتور DC را عوض کنید تا چرخش محور آن عکس حالت قبل شود و سپس به ادامه ی آزمایش بپردازید.

حال که از هم جهت بودن چرخش هر دو موتور اطمینان حاصل شده است، بار دیگر موتور القایی را در حالی که موتور DC بی‌برق است، به شبکه وصل کنید تا راه اندازی شود. (بخش *) وقتی موتور القایی به سرعت نامی اش رسید، مقدار توان اکتیو مصرفی موتور القایی را از روی سِت آزمایشگاهی قرائت و در جدول۱ ثبت نمایید. حال تحریک سیم پیچ میدان موتور DC را وصل کنید. آیا مقدار توان اکتیو مصرفی موتور القایی تغییر می کند ؟ چرا؟ در ادامه با افزایش ولتاژ ترمینال موتور DC ، سرعت آن، که همان سرعت روتور موتور القایی است را به مقدار ۳۰۰۰ rpm برسانید. مشاهده خواهید نمود که توان مصرفی موتور القایی در این حالت صفر خواهد شد. سپس باز هم ولتاژ ترمینال موتور DC را افزایش دهید تا سرعت آن به مقدار ۳۱۵۰ دور بر دقیقه برسد. بار دیگر مقدار توان اکتیو مصرفی ماشین القایی را قرائت و در جدول ۴-۱ یادداشت نمایید.

جدول ۴-۱:

سرعت موتور DC تحریک مستقل (rpm)		۲۹۰۰	۳۰۰۰	۳۱۵۰
جریان آرمیچر موتور DC	$I_{a\,m}$ (A)			
توان اکتیو ماشین القایی (علامت رعایت شود)	P (W)			
توان راکتیو ماشین القایی (علامت رعایت شود)	Q (VAR)			

پرسش ها :

۱- در حالت ژنراتور القایی مستقل، مقدار سرعت چرخش محور ژنراتور را چه چیزی تعیین می کند؟ اگر در این حالت محور ژنراتور را با مثلاً سرعت ۳۲۰۰ دور بر دقیقه می چرخاندیم چه اتفاقی می افتاد؟

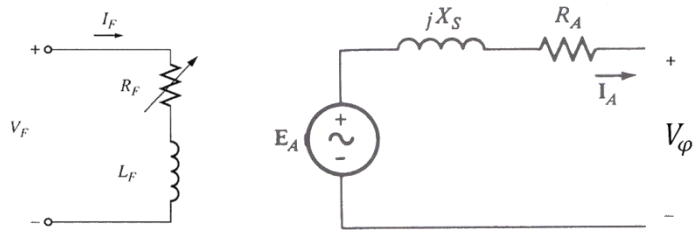
۲- چرا در بخش دوم آزمایش زمانی که موتور القایی را به شبکه وصل و آن را راه اندازی می کنیم. (بخش * در متن آزمایش) در ابتدا موتور DC را بی برق می کنیم و پس از رسیدن موتور به حالت نامی برق موتور DC را وصل می نماییم؟

۳- در حالت ژنراتور القایی متصل به شبکه قدرت، تغییر سرعت چرخش روتور ژنراتور القایی از مقدار rpm ۳۱۵۰ به مقادیر بیشتر سرعت، چه تأثیری بر روی فرکانس برق تولیدی و همچنین توان اکتیو تولیدی ژنراتور دارد؟

آزمایش پنجم :

بدست آوردن پارامترهای ژنراتور سنکرون

از درس ماشین های الکتریکی به یاد داریم که مدار معادل یک ژنراتور سنکرون روتور قطب صاف، در حالت دائمی به صورت شکل ۵-۱ است:



شکل ۵-۱- مدار معادل ژنراتور سنکرون با روتور قطب صاف

این مدار سه کمیت دارد که برای توصیف دقیق رفتار یک ژنراتور سنکرون واقعی باید آنها را تعیین کرد:

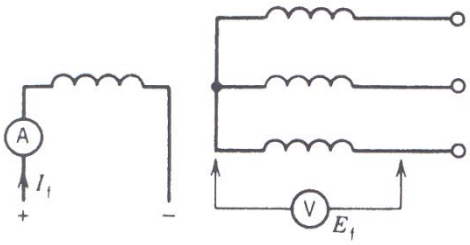
۱- رابطهٔ بین جریان و شار میدان (و بنابراین بین جریان میدان و E_A)

۲- راکتانس سنکرون (X_S)

۳- مقاومت آرمیچر (R_A)

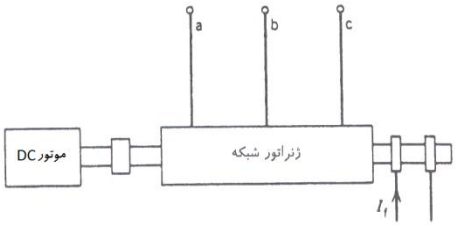
در این آزمایش روشی ساده جهت تعیین این کمیات به کار خواهیم گرفت.

اولین گام در این راه انجام آزمایش مدار- باز بر روی ژنراتور است. برای انجام این آزمایش، ژنراتور درسرعت نامی چرخانده می شود، پایانه ها به بار اتصال ندارند و جریان میدان برابر صفر قرار داده می شود. شکل ۵-۲ . سپس جریان میدان را با گام های تدریجی افزایش می دهند و ولتاژ پایانه ای را در هر گام اندازه می گیرند. چون پایانه ها بازند، $I_A = 0$ و E_A برابر V_φ است. به این ترتیب می توان منحنی E_A یا V_T را بر حسب I_F رسم کرد. این منحنی مشخصه مدار- باز (OCC) ژنراتور نام دارد. با استفاده از این مشخصه، می توان ولتاژ تولید شده ی داخلی را به ازای هر مقدار جریان میدان یافت. این منحنی ابتدا خطی است، ولی به ازای جریان های بزرگ، پدیده ی اشباع تا حدی مشاهده می شود. آهن اشباع نشده در ماشین سنکرون رلوکتانسی چندین هزار بار کوچک تر از رلوکتانس فاصله ی هوایی دارد، پس در ابتدا تقریباً همه نیروی محرکه ی مغناطیسی روی فاصله هوایی قرار دارد و افزایش شار ناشی از آن خطی است. هنگامی که آهن به اشباع می رسد، رلوکتانس آن به سرعت افزایش می یابد و آهنگ افزایش شار در اثر افزایش نیروی محرکه مغناطیسی کند تر می شود. ناحیه ی خطی مشخصه ی مدار باز، خط فاصله هوایی نامیده می شود.



شکل۵-۲- آزمایش مدار باز

برای انجام این آزمایش، مدار شکل ۵-۳ را در آزمایشگاه ببندید.



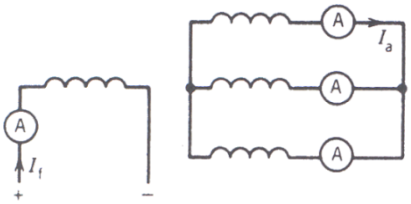
شکل ۵-۳- مدار انجام آزمایش مدار باز در آزمایشگاه

در این مدار از ماشین سنکرون ماژول ۷۳۲۳۷ به عنوان ژنراتور سنکرون استفاده شده است. اتصالات سیم پیچ های استاتور ژنراتور را مطابق شکل ۵-۲ به صورت ستاره انجام دهید. سپس آزمایش مدار- باز را به ازای سه سرعت مختلف ژنراتور، بر روی آن انجام دهید و نتایج حاصل شده را در جدول۵-۱ ثبت نمایید.

جدول۵-۱:

	I_F (A)	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
n_{s1} = 750 (rpm)	V_{T1}									
n_{s2} = 1000 (rpm)	V_{T2}									
n_{s3} = 1500 (rpm)	V_{T3}									

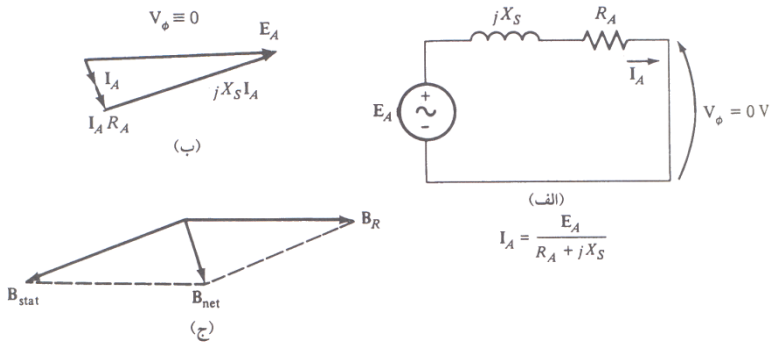
گام دوم انجام آزمایش اتصال-کوتاه است. برای انجام این آزمایش پایانه های ژنراتور توسط مجموعه ای از آمپرمترها اتصال کوتاه می شوند و ژنراتور تحت سرعت سنکرون چرخانده می شود. شکل۵-۴ . سپس جریان میدان را تغییر می دهند و تغییرات I_A بر حسب I_F را رسم می کنند. این منحنی مشخصه ی اتصال-کوتاه (SCC) نام دارد.



شکل ۵-۴- آزمایش اتصال کوتاه

$$I_A = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

مشخصه ی اتصال-کوتاه اساساً یک خط راست است. برای درک علت راست بودن این خط پایانه های مدار معادل شکل ۵-۱ را اتصال-کوتاه میکنیم. چنین مداری در شکل ۵-۵ الف نشان داده شده است. وقتی که پایانه ها اتصال-کوتاه می شوند، جریان آرمیچر I_A از رابطهٔ ذکر شده روی این شکل بدست می آید:



شکل ۵-۵: الف- مدار معادل ژنراتور سنکرون در آزمایش اتصال کوتاه ب- نمودار فازوری حاصل ج- میدانهای مغناطیسی در آزمایش اتصال کوتاه

نمودار فازوری حاصل مطابق شکل ۵-۵ ب و میدان های مغناطیسی متناظر با آن مطابق شکل ۵-۵ ج است. چون B_S تقریباً B_R را خنثی می کند. میدان مغناطیسی برآیند B_{net} بسیار کوچک است (زیرا با افت ولتاژهای مقاومتی و القایی داخلی متناظر است). چون میدان مغناطیسی برآیند در ماشین بسیار کوچک است، ماشین اشباع نمی شود و مشخصه‌ی اتصال-کوتاه(SCC) خطی است.

در ادمه ی آزمایش قبل، اتصالات سیم پیچ های استاتور ژنراتور را به صورت شکل ۵-۴ تغییر دهید. سپس آزمایش اتصال-کوتاه را نیز به ازای سه سرعت مختلف ژنراتور انجام دهید و مشاهدات خود را در جدول۵-۲ ثبت نمایید. **دقت شود که این آزمایش باید سریع انجام گیرد چرا که جریان استاتور می تواند از مقدار نامی آن بیشتر شود که این می تواند به ماشین آسیب وارد کند.**

جدول ۵-۲:

	I_F (A)	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
n_{s1} = 750 (rpm)	I_{A1}									
n_{s2} = 1000 (rpm)	I_{A2}									
n_{s3} = 1500 (rpm)	I_{A3}									

برای فهم اطلاعاتی که از این دو مشخصه به دست می آید، توجه کنید که با صفر بودن V_φ در شکل ۵-۵ ، **امپدانس داخلی ماشین** از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$Z_s = \sqrt{{R_A}^2 + {X_S}^2} = \frac{E_A}{I_A}$$

چون $X_S >> R_A$ ، این رابطه به شکل زیر در می آید:

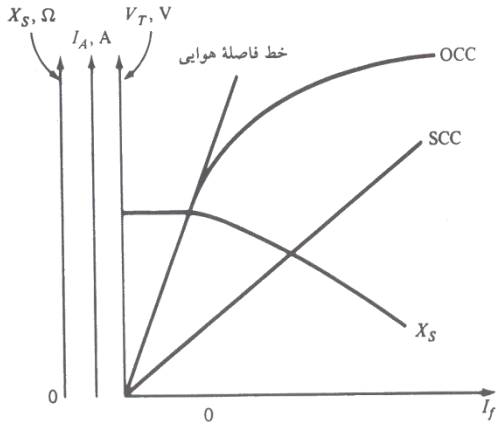
$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\varphi,OC}}{I_A} \qquad (1)$$

بنابراین با به دست آوردن E_A و I_A به ازای یک مقدار جریان (I_F) و جایگذاری آن ها در رابطهٔ ۱ ، مقدار X_Sژنراتور به صورت تقریبی بدست می آید.

اما این روش یک مشکل دارد. ولتاژ داخلی E_A از آزمایش OCC به دست می آید و در این آزمایش به ازای جریان های بزرگ میدان، ماشین تا حدی در اشباع قرار دارد، در حالی که I_A از SCC به دست می آید و در این آزمایش به ازای تمام جریان های میدان ماشین حالت اشباع نشده دارد. بنابراین در جریان های بزرگ میدان، E_A بدست آمده از OCC به ازای یک جریان معین میدان، همان E_A شرایط اتصال-کوتاه نیست و این تفاوت موجب می شود که مقدار X_S تنها تقریبی از مقدار واقعی باشد.

با این وجود جواب به دست آمده از این روش تا نقطه ی اشباع دقیق است، پس راکتانس سنکرون اشباع نشده X_{su} ماشین را می توان با استفاده از رابطهٔ ۱، به ازای هر جریان میدان واقع در ناحیه خطی (خط فاصله هوایی) منحنی OCC به آسانی به دست آورد.

مقدار تقریبی راکتانس سنکرون با درجه ی اشباع OCC تغییر می کند، بنابراین مقدار راکتانس سنکرونی که بناست در یک مسئله ی معین به کار رود، باید مقداری باشد که به ازای بار تقریبی ماشین محاسبه شده است. در شکل ۶-۵، منحنی راکتانس سنکرون تقریبی به صورت تابعی از جریان میدان نشان داده شده است.



شکل ۵-۶- راکتانس سنکرون تقریبی ژنراتور سنکرون به صورت تابعی از جریان میدان ماشین. مقدار ثابت راکتانس که به ازای جریانهای کم میدان بدست آمده *راکتانس اشباع نشدهٔ* ماشین است.

اگر علاوه بر راکتانس سنکرون، دانستن مقاومت سیم پیچی نیز اهمیت داشته باشد، می توان این مقاومت را به طور تقریبی با اعمال یک ولتاژ DC به سیم پیچی و سنجش جریان حاصل از آن، هنگام ساکن بودن ماشین به دست آورد. استفاده از ولتاژ DC به این خاطر است که راکتانس سیم پیچی در آزمایش صفر باشد.

این روش کاملاً دقیق نیست، چون مقاومت AC (به علت اثر پوستی در فرکانس های بالا) کمی بزرگتر از مقاومت DC است. معمولاً برای به دست آوردن مقدار دقیق تر مقاومت R_A، مقدار اندازه گیری شده در آزمایش گفته شده را در مقدار ۱/۴ ضرب می کنند تا بدین شکل تأثیر « اثر پوستی » در نظر گرفته شده باشد.

حال طبق آنچه که گفته شد، با استفاده از نتایج آزمایش های فوق در سه سرعت مختلف، مقدار راکتانس سنکرون ژنراتور موجود در آزمایشگاه را به دست آورید و در جدول۵-۳ درج نمایید.

جدول ۵-۳:

	V_T (V)	I_{An} * (A)	$X_{su} = \frac{V_T / \sqrt{3}}{I_A}$ (Ω)
n_{s1} = 750 (rpm)			
n_{s2} = 1000 (rpm)			
n_{s3} = 1500 (rpm)			

* : جریان نامی اتصال کوتاه

پرسش ها :

۱- در آزمایش اتصال کوتاه در حالتی که جریان استاتور برابر مقدار نامی آن است، با تغییر سرعت چه تغییری در مقدار جریان اتصال کوتاه رخ می دهد؟چرا؟

۲- به نظر شما علت اینکه در اینجا دو آزمایش مدار- باز و اتصال-کوتاه را در سه سرعت مختلف انجام دادیم، چیست؟

۳- معمولاً مقدار مقاومت آرمیچر و راکتانس سنکرون یک ژنراتور سنکرون قطب صاف حدوداً چند پریونیت است؟ این مقدار را برای ژنراتور سنکرون موجود در آزمایشگاه نیز تحقیق کنید.

آزمایش ششم :

موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه ی قدرت

رفتار ژنراتور سنکرون زیر بار، به شدت تابع ضریب توان بار و همچنین کار کردن آن به تنهایی یا موازی با دیگر ژنراتورهای سنکرون است. امروزه به ندرت می توان ژنراتور سنکرونی یافت که مستقل از دیگر ژنراتورها کار کند و به تنهایی بار خودش را تغذیه کند. چنین حالتی را تنها در کاربردهای اندکی، مثلاً به عنوان ژنراتورهای اضطراری می توان یافت. در کاربردهای معمولی همیشه تعدادی ژنراتور به طور موازی توان مورد نیاز بارها را تأمین میکنند. یک نمونه ی بزرگ از این نوع، شبکه قدرت ایران است که در آن حدود ۵۲۰ ژنراتور سنکرون بار سیستم را بین خود تقسیم می کنند.

عملکرد ژنراتورهای سنکرون به صورت موازی چندین فایده ی مهم دارد :

۱- باری که چند ژنراتور می توانند تأمین کنند بیشتر از باری است که یک ماشین به تنهایی تأمین می کند.

۲- داشتن ژنراتورهای زیاد، قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش می دهد چون خرابی یکی از آنها موجب نمی شود که تمام توان تأمین شده برای بار قطع شود.

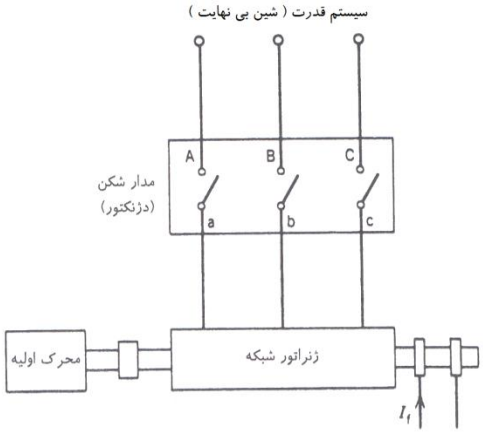
۳- اگر تعداد ژنراتورها زیاد باشد امکان خارج کردن یک یا چند ژنراتور از مدار برای سرویس و نگهداری وجود دارد.

۴- اگر تنها یک ژنراتور به کار رفته باشد و بار آن بسیار کمتر از بار کامل باشد، بازده چندان خوبی ندارد. اما اگر به جای آن از تعدادی ماشین کوچکتر استفاده شود، می توان تنها کسری از آنها را وارد مدار کرد. ژنراتورهایی که در مدار قرار می گیرند نزدیک بار کامل کار کرده، بازده بیشتری خواهند داشت.

در صورتی که ژنراتور سنکرونی به شبکه ی قدرت وصل شود و بخشی از بار سیستم قدرت را تأمین کند، اصطلاحاً می گویند این ژنراتور به شین بی نهایت وصل شده است. از آنجایی که ژنراتورهای متصل به شبکه زیاد بوده و اندازه ی این ژنراتور ها نسبتاً بزرگ و حجیم است، لذا ولتاژ و فرکانس شین بی نهایت به سختی قابل تغییر است و ثابت می باشد. در نیروگاه ژنراتورهای سنکرون بسته به شرایط خاص بهره برداری به شین بی نهایت وصل و یا از آن جدا می شوند. وصل ژنراتور به شین بی نهایت مقوله ی موازی کردن ژنراتور با شین بی نهایت را مطرح می سازد.

شرایط لازم برای موازی کردن :

شکل ۶-۱ یک ژنراتور سنکرون را نشان می دهد که جهت تأمین بار سیستم قدرت (شین بی نهایت) می تواند توسط یک دژنکتور به این سیستم وصل شود.



شکل ۶-۱- اتصال ژنراتور سنکرون به شین بی نهایت

اگر دژنکتور را در یک لحظه ی دلخواه ببندیم، احتمال آن هست که هم شبکه و هم ژنراتور به طور جدی صدمه ببینند و توان مورد نیاز بار از دست برود. اگر ولتاژ دو هادی که با بسته شدن کلید به هم متصل می شوند، دقیقاً یکسان نباشد، هنگام بستن دژنکتور، جریان بسیار بزرگی ایجاد می شود. برای اجتناب از این مسئله، ولتاژ هر یک از سه فاز باید دقیقاً همان دامنه و فاز را داشته باشد که هادی متناظر آن داراست. یعنی ولتاژ فاز a باید دقیقاً همان ولتاژ فاز A باشد و این همانندی برای فازهایb-B و c-C نیز صادق باشد. برای دستیابی به این تطابق، شرایط موازی کردن زیر باید برآورده شوند:

۱- مقدار rms ولتاژ های خط ژنراتور سنکرون و شین بی نهایت باید برابر باشند.

۲- ژنراتور سنکرون و شین بی نهایت باید توالی فاز یکسانی داشته باشند.

۳- زاویه فاز دو فاز متناظر (مثلاً فاز های a و A) باید برابر باشند.

۴- فرکانس ژنراتور سنکرونی که می خواهد به شین بی نهایت وصل شود باید اندکی بیشتر از فرکانس کاری شین بی نهایت باشد .

این شرایط کمی توضیح لازم دارند . شرط ۱ بدیهی است. برای این که دو دسته ولتاژ یکسان باشند، باید اندازه ولتاژهای مؤثرشان یکی باشد. ولتاژ فاز ها ی a و A هنگامی در همه ی زمان ها کاملاً یکسان اند که هم اندازه ی آن ها یکی باشد و هم زاویهٔ آنها، که شرط ۳ آن را بیان می کند.

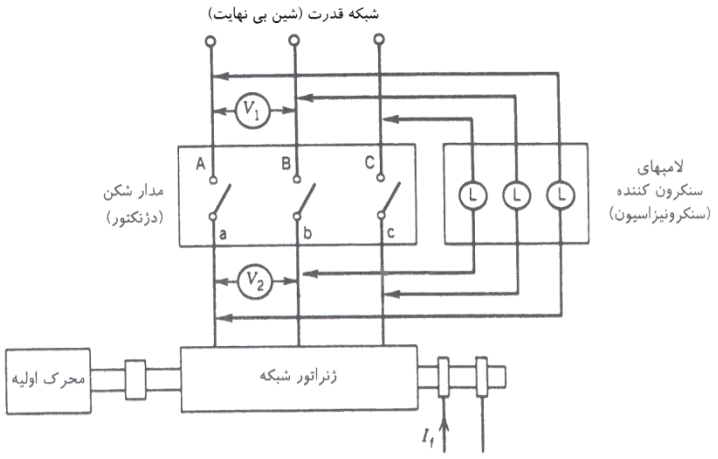
شرط ۲ تضمین می کند که ترتیب ماکزیمم شدن ولتاژ فازها در ژنراتور و شین بی نهایت یکسان است. اگر ترتیب فازها متفاوت باشند حتی اگر یک جفت از ولتاژها (مثلاً فازهای a و A) هم فاز باشند، دو جفت ولتاژ دیگر ۱۲۰ درجه اختلاف دارند. اگر ژنراتور به این شکل به شین بی نهایت متصل شود، فاز a مشکلی نخواهد داشت اما جریان های بزرگی در فازهای b و c جاری می شود که می تواند باعث صدمه دیدن ژنراتور و همچنین اجزای شین بی نهایت شود. برای تصحیح مشکل ترتیب فازها، تنها کافی است که در ژنراتور سنکرونی که قرار است با شبکه موازی شود، اتصالات دو فاز جابجا شود.

اگر فرکانس ژنراتور و شین بی نهایت هنگام اتصال، خیلی نزدیک هم نباشد تا پایدار شدن ژنراتور و رسیدن به فرکانس مشترک با شین بی نهایت جریان های حالت گذرای بزرگی به وجود می آید. فرکانس ژنراتور باید خیلی نزدیک به فرکانس شین بی

نهایت باشد اما نمی تواند دقیقاً با آن برابر باشد. این دو فرکانس باید اندکی تفاوت داشته باشند تا زاویه فاز ژنراتور جدید نسبت به زاویه فاز شین بی نهایت در حال کار به کندی تغییر کند.

در واقع این کار به این دلیل انجام می شود تا که در هنگام اتصال ماشین سنکرون به شین بی نهایت، این ماشین به عنوان ژنراتور به شبکه توان تحویل دهد، نه اینکه مانند موتور توان مصرف کند.

در نیروگاه ها چک کردن صحت شرایط فوق توسط دستگاهی به نام سنکروسکوپ انجام می پذیرد. در آزمایشگاه به جای استفاده از سنکروسکوپ می توان از سه لامپ طبق شکل ۶-۲ استفاده نمود.



شکل ۶-۲- مدار موازی کردن ژنراتور سنکرون با شین بی نهایت

در این آزمایش محرک اولیه ی ژنراتور یک موتور DC تحریک مستقل است که در واقع نقش توربین نیروگاه را ایفا می کند. چون فرکانس شین بی نهایت ۵۰ هرتز است، فرکانس برق تولیدی ژنراتور باید کمی بیشتر از این مقدار باشد. چون ژنراتور سنکرون موجود در آزمایشگاه از نوع دو قطب است بنابراین اگر سرعت چرخش روتور آن بیشتر از ۳۰۰۰ rpm باشد (مثلاً ۳۰۵۰ rpm)، فرکانس ولتاژ تولیدی توسط این ژنراتور بیشتر از ۵۰ هرتز (در این مورد ۵۰/۸۳ هرتز) خواهد بود. برای انجام آزمایش مدار شکل ۶-۲ را در آزمایشگاه ببندید (سیم پیچ های استاتور ژنراتور را به صورت ستاره ببندید). ابتدا در حالی که تحریک ژنراتور سنکرون قطع است توسط موتور DC کوپل شده به محور ژنراتور، سرعت محور ژنراتور را به مقدار ۳۰۵۰ rpm (کمی بیشتر از ۳۰۰۰ rpm، به دلیلی که قبلاً گفته شد) برسانید. سپس تحریک ژنراتور سنکرون را وصل کنید. مقدار ولتاژ تحریک ژنراتور را تا حدی افزایش می دهیم که ولتاژ نشان داده شده توسط ولت متر V_2 (ولتاژ خط به خط تولیدی ژنراتور) با مقدار ولتاژی که ولت متر V_1 نشان می دهد (ولتاژ خط به خط شین بی نهایت) برابر شود. حال به ماژول لامپ ها نگاه کنید. در این ماژول طبق شکل ۶-۲، یک لامپ بین دو فاز هم نام و دو لامپ دیگر بین فازهای ناهمنام قرار دارند. اگر هر سه لامپ این ماژول با هم روشن و خاموش می شوند، توالی فازهای دو سر ماژول لامپ ها یکسان نیست و باید توالی فاز یکی از این دو مجموعه فازها را تغییر داد. اما اگر توالی فازها یکسان باشد لامپ ها به ترتیب شروع به روشن و خاموش شدن می کنند. هرچه روشن و خاموش شدن لامپ ها با سرعت بیشتری صورت بگیرد، اختلاف فرکانس فازهای دو سر ماژول لامپ ها بیشتر خواهد بود و طبق توضیحاتی که قبل از این داده شد شرایط برای موازی کردن ژنراتور با شبکه بدتر است.

همان طور که گفته شد برای تغییر مقدار فرکانس ولتاژ تولیدی ژنراتور آزمایشگاه می توان دور موتور DC را تغییر داد. بدیهی است که بهترین لحظه برای موازی کردن ژنراتور به شبکه موقعی است که لامپ بین دو فاز هم نام خاموش شود و لامپ های

بین فازهای ناهمنام به دلیل نهایت اختلاف فاز، پر نور ترین حالت را داشته باشند. با بررسی شرایط مناسب، در لحظه ی مناسب ژنراتور را به شبکه وصل کنید. بعد از وصل کردن ژنراتور به شبکه به مقدار توان اکتیو و راکتیوی که ژنراتور تولید یا مصرف می کند دقت نمایید. حال با تغییر ولتاژ تحریک ژنراتور، تغییرات رخ داده در تولید یا مصرف توان این ژنراتور را بررسی کرده و در جدول۶-۱ ثبت نمایید.

جدول ۶-۱:

جریان تحریک ژنراتور I_F (A)		۰/۷۵	۰/۷	۰/۶۵
جریان استاتور ژنراتور	I_S (A)			
توان اکتیو تولیدی ژنراتور	P (W)			
توان راکتیو ژنراتور	Q (VAR)			

همانطور که می دانید موتورهای سنکرون به دلیل ساختار خاص شان، مشکل راه اندازی دارند. یک روش برای راه اندازی آنها این است که ابتدا ماشین سنکرون را به صورت ژنراتور سنکرون به شبکه وصل کنیم (با طی مراحلی که در آزمایش اخیر گفته شد). سپس محرک اولیه ژنراتور را قطع کنیم تا ژنراتور به موتور سنکرون تبدیل شود.

در ادامه ی آزمایش اخیر، برق موتور DC را قطع کنید تا این موتور خاموش شود و ژنراتور سنکرون تبدیل به موتور سنکرون شود. مقدار توان اکتیو و راکتیو تولیدی یا مصرفی موتور سنکرون در این حالت را نیز بررسی نمایید.

پرسش ها :

۱- آیا با تغییر مقدار ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون، توان اکتیو تولیدی این ژنراتور تغییر می کند؟ با ذکر دلیل توضیح دهید .

۲- چرا وقتی که ژنراتور با شبکه موازی شده است با تغییر ولتاژ ترمینال موتور DC، سرعت محور آن تغییر نخواهد کرد؟ افزایش ولتاژ ترمینال موتور DC چه تأثیری در عملکرد ژنراتور خواهد داشت؟

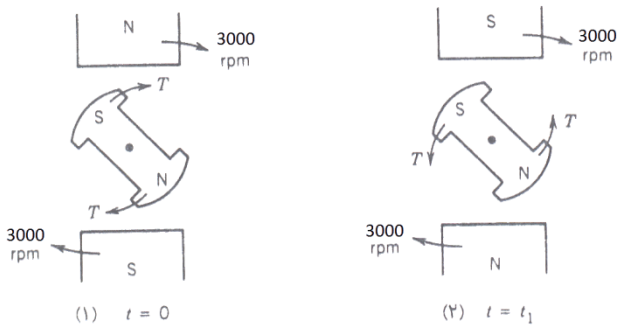
۳- آیا ژنراتور سنکرون می تواند هر مقدار توان اکتیو به شبکه تحویل دهد یا یک حد ماکزیمم وجود دارد؟ در صورت وجود حد ماکزیمم، اگر بخواهیم توان تحویلی را از آن بیشتر کنیم چه اتفاقی روی می دهد؟

آزمایش هفتم :

موتور سنکرون سه فاز

همانطور که در بحث موتورهای DC و موتورهای القایی دیدیم با وصل این گونه موتورها به شبکه، آنها شروع به چرخش می کنند. به عبارت دیگر این موتورها خود راه انداز (*self starting*) هستند. اما موتورهای سنکرون سه فاز خود راه انداز نیستند. به عبارت دیگر اگر استاتور موتور که شبیه استاتور ژنراتور سنکرون می باشد به شبکه برق سه فاز AC وصل شود و جریان تحریک I_f نیز وارد مدار روتور گردد، باز موتور راه اندازی نمی شود، بلکه ارتعاش پیدا می کند. این امر را می توان چنین توجیه کرد :

فرض کنید استاتور یک موتور سنکرون سه فاز دو قطبی به شبکه سه فاز ۵۰ هرتزی وصل شود. در این صورت استاتور یک میدان گردان ایجاد میکند که با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه می چرخد. میدان گردان استاتور را با یک آهنربای دو قطبی چرخان مدل سازی می کنیم. شکل ۷-۱. همچنین فرض کنید در ابتدای امر(موقعیت راه اندازی یا $t = 0$) وضعیت رتور مطابق شکل ۷-۱- (۱) باشد. در این صورت به رتور گشتاور T اعمال شده و جهت این گشتاور همان جهت عقربه های ساعت است. این گشتاور به خاطر این امر پدید می آید که قطب های غیر همنام استاتور و رتور یکدیگر را جذب می نمایند. بنابراین رتور در جهت میدان گردان به چرخش در می آید. حال شرایطی را در $t = t_1$ مورد بررسی قرار میدهیم. در این صورت، میدان استاتور نیم دور چرخیده است، در این شرایط میدان گشتاوری در جهت خلاف عقربه های ساعت به رتور اعمال می کند (چرا؟). این حالت در شکل۷-۱- (۲) نشان داده شده است.



شکل ۷-۱- گشتاور اعمال شده به روتور موتور سنکرون در زمان راه اندازی

با توجه به آنچه که گفته شد گشتاور خالص اعمال شده به رتور در طی یک دور کامل از چرخش میدان گردان استاتور، صفر خواهد بود. در نتیجه در موتورهای سنکرون گشتاور راه اندازی حاصل نخواهد شد. گفتنی است که سرعت چرخش میدان گردان استاتور آنقدر سریع است که رتور نمیتواند خود را با آن هماهنگ سازد و بنابراین رتور ارتعاش پیدا می کند.

برای راه اندازی موتورهای سنکرون سه فاز از سه روش استفاده می شود:

۱- راه اندازی توسط محرک اولیه

۲- استفاده از مبدل فرکانس یا منبع تغذیه با فرکانس متغیر

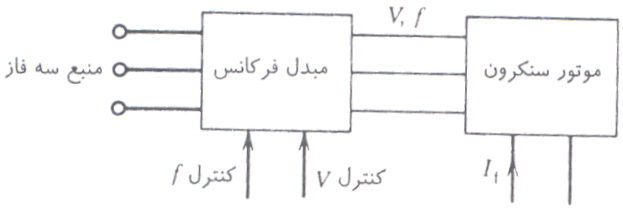
۳- راه اندازی موتور سنکرون به صورت موتور آسنکرون (القایی)

راه اندازی توسط محرک اولیه :

در این روش توسط یک محرک اولیه ابتدا ماشین سنکرون را به صورت ژنراتور راه اندازی می کنیم. پس از آن که ژنراتور به سرعت سنکرون رسید با بررسی شرایط موازی کردن، آن را با شبکه ی قدرت موازی می کنیم. بعد از آن که ژنراتور به شبکه وصل شد، محرک اولیه آن را از آن جدا می کنیم. در این حالت ژنراتور سنکرون به موتور سنکرون تبدیل می شود و می تواند به عنوان یک موتور الکتریکی، بارهای مکانیکی را با سرعتی همواره ثابت و برابر سرعت سنکرون (n_{sync}) بچرخاند. این روش را در آزمایش ششم (موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه ی قدرت) مورد بررسی قرار دادیم پس در این جا از انجام دوباره ی آن صرفنظر می کنیم.

راه اندازی به کمک منبع تغذیه با فرکانس متغیر (مبدل فرکانس) :

مبدل فرکانس قادر است موتور سنکرون سه فاز را از حالت سکون خارج کرده و به سرعت مطلوب برساند. شکل ۷-۲ بلوک دیاگرام چنین سیستمی را نشان می دهد که در سر راه موتور قرار گرفته است.



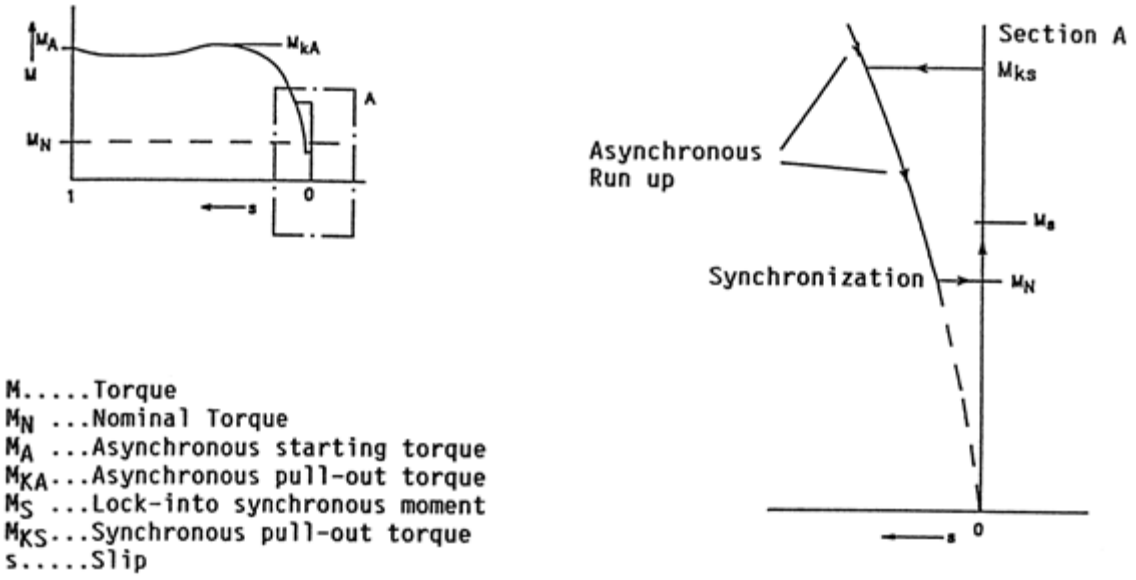
شکل ۷-۲- راه اندازی موتور سنکرون سه فاز به کمک مبدل فرکانس

در مرحله راه اندازی فرکانس منبع تغذیه کم است و لذا میدان گردان استاتور با سرعت کمی می چرخد. در نتیجه قطب های رتور قادر به تعقیب قطب های استاتور هستند. سپس با افزایش تدریجی فرکانس، سرعت موتور به حد مطلوب رسانده می شود. این سیستم گران است اما اگر بخواهیم سرعت موتور را کنترل کرده و به عبارت دیگر به سرعت های سنکرون گوناگون دست یابیم، استفاده از آن الزامی است. متاسفانه به دلیل نداشتن دستگاه مبدل فرکانس در آزمایشگاه، نمی توانیم این آزمایش را انجام دهیم.

راه اندازی به صورت موتور القایی سه فاز :

اگر مبدل فرکانس در دسترس نباشد یا نخواهیم به سرعت های سنکرون گوناگون دست یابیم (مسئله کنترل سرعت) از روش ذکر شده در این قسمت استفاده می کنیم. در این روش سیم پیچی اضافی شبیه روتور قفس سنجابی موتور القایی بر روی رتور موتور سنکرون نصب می شود. این سیم پیچ ها به نام سیم پیچ های میرا کننده معروف اند. برای راه اندازی موتورهای سنکرون مجهز به چنین سیم پیچ هایی، ابتدا جریان سیم پیچی تحریک رتور را قطع می کنیم ($I_f = 0$). حال سیم پیچی سه فاز

استاتور را به برق AC سه فاز وصل می کنیم. موتور به صورت موتور القایی راه اندازی می شود. علت این امر آن است که سیم پیچ های میرا کننده به مثابه رتور قفس سنجابی عمل می کنند. لذا با وجود سیم پیچ های میرا کننده، گشتاور راه انداز حاصل می گردد. پس از سرعت گیری موتور بالاخره به شرایطی می رسیم که سرعت رتور نزدیک سرعت سنکرون میدان گردان استاتور می شود و جهت چرخش هر دو مشابه یکدیگر است. حال اگر جریان DC مدار تحریک (I_f) برقرار شود در این صورت قطب های رتور و استاتور که یکدیگر را از نزدیک تعقیب می کنند، به یکدیگر قفل شده و رتور نیز با سرعت سنکرون به دوران خود ادامه می دهد. در این شرایط چون سرعت میدان گردان استاتور و سرعت دوران رتور یکی می شود (سرعت سنکرون)، لذا دیگر جریان القایی در سیم پیچ های میرا-کننده وجود نخواهد داشت. بنابراین این سیم پیچی فقط برای مرحله راه اندازی نقش خود را ایفا می کند. این وضعیت روی منحنی گشتاور- سرعت شکل ۷-۳ نشان داده شده است.

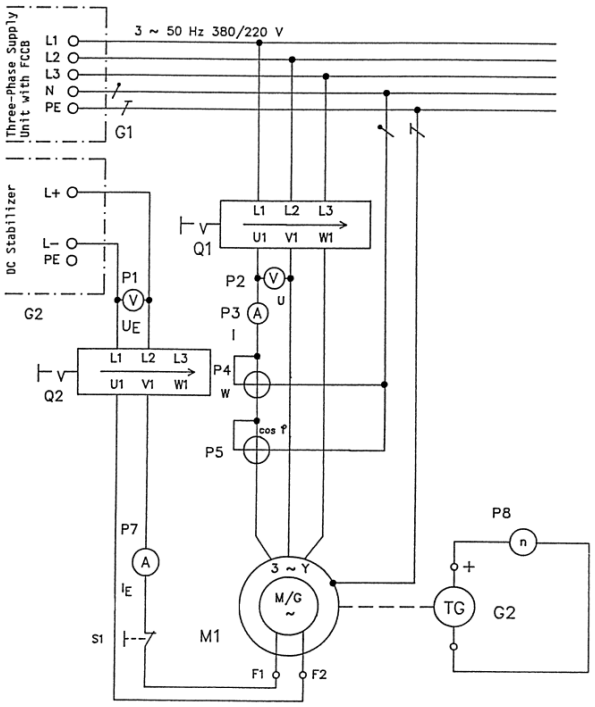


شکل ۷-۳: مشخصهٔ گشتاور- سرعت موتور سنکرون دارای سیم پیچ های میرا کننده در حالت راه اندازی و لحظهٔ به سرعت سنکرون رسیدن موتور

گفتنی است که اگر به خاطر تغییرات ناگهان بار بر روی محور موتور یا شرایط دیگر گذرا، سرعت سنکرون روتور تغییر کند در این صورت در سیم پیچ میرا کننده جریان القاء شده و این جریان گشتاوری حاصل می سازد تا سرعت سنکرون را مجدداً برقرار نماید. علت اینکه نام این سیم پیچ را میرا کننده گذاشته اند نیز به همین خاطر است که نوسانات حالت گذرا را میرا می نماید. باید دانست امروزه هم ژنراتورهای سنکرون سه فاز و هم موتورهای سنکرون سه فاز به این نوع سیم پیچ ها مجهز می باشند تا نوسانات گذرا زودتر مستهلک و میرا شوند.

برای آزمایش این روش از مدار ۷-۴ استفاده می کنیم. در این مدار موتور سنکرون ماژول ۷۳۲۳۷ به ماژول کنترلی ۷۳۱۹۸۹ وصل شده است. اتصالات سیم پیچ های استاتور را به صورت ستاره وصل نمایید. سپس ولتاژ DC سیم پیچ تحریک را توسط منبع تغذیه ی DC خارجی در مقدار صفر قرار داده، با افزایش مقدار ولتاژ منبع تغذیه سه فاز متصل به استاتور، موتور سنکرون را راه اندازی نمایید. مقدار ولتاژ استاتور را تا مقدار نامی آن افزایش دهید تا موتور سنکرون که تا اینجا به صورت موتور القایی راه اندازی شده به سرعت نامی حالت آسنکرون خود برسد (در اینجا این سرعت حدود ۱۴۷۰ rpm است). در این

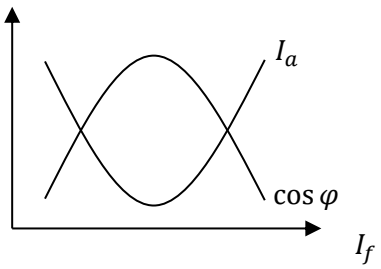
حالت ولتاژ DC سیم پیچ تحریک ژنراتور را تا مقدار نامی آن افزایش دهید. خواهید دید که سرعت موتور به مقدار سرعت سنکرون ۱۵۰۰ rpm می رسد.



شکل ۷-۴- مدار راه اندازی موتور سنکرون به صورت موتور القایی قفس سنجابی

کنترل ضریب توان با استفاده از موتور سنکرون :

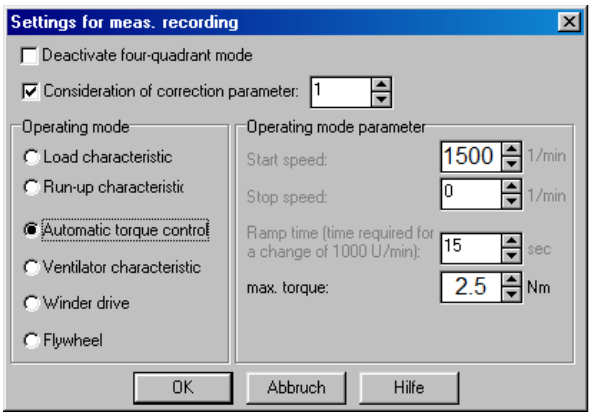
یکی از مزایای عمدهٔ موتورهای سنکرون سه فاز آن است که ضریب توان موتور را می توان با تغییر جریان تحریک (I_f) کنترل نمود. به عبارت دیگر تغییر جریان تحریک باعث می شود که جریان موتور از حالت پس فاز به حالت پیش فاز برود و بلعکس. یعنی رفتار موتور می تواند در برخی شرایط سلفی و در برخی دیگر خازنی و یا مقاومتی خالص باشد. منحنی تغییرات جریان استاتور (I_a) بر حسب جریان تحریک (I_f) موتور سنکرون به منحنی V شکل و همچنین منحنی تغییرات ضریب توان ($cos\ \varphi$) برحسب جریان تحریک (I_f) موتور سنکرون به منحنی V وارونه معروف است. این منحنی ها در شکل ۷-۵ به نمایش گذاشته شده اند.



شکل ۷-۵- منحنی تغییرات I_a و ضریب توان موتور سنکرون بر حسب I_f

در ادامه‌ی آزمایش سعی داریم این منحنی ها را بدست بیاوریم. برای انجام آزمایش، بار دیگر از مدار شکل ۷-۴ استفاده میکنیم.

موتور را راه اندازی کنید و با اعمال ولتاژ تحریک به آن، سرعت آن را به سرعت سنکرون برسانید. سیستم کنترلی را روشن کنید. سپس نرم افزار *CBM* را در کامپیوتر متصل به سیستم کنترلی اجرا نمایید. از سمت چپ محیط نرم افزار روی دکمه ی (on) کلیک کنید. در ادامه روی دکمه ی (configuration)، کلیک نمایید و در پنجره ی ظاهر شده تنظیمات را به صورت شکل ۷-۶ انجام دهید. حال در سمت چپ نرم افزار روی دکمه ی (محاسبات دستی) و بعد از آن روی دکمه ی (run) کلیک کنید. در این صورت گشتاور بار اعمالی به موتور توسط سیستم کامپیوتری قابل کنترل است و می توان هر مقدار گشتاور باری را بر موتور اعمال کرده، رفتار موتور را نسبت به آن مقدار گشتاور بار مکانیکی مورد بررسی قرار داد.



شکل ۷-۶- اعمال تنظیمات موتور و بار مکانیکی براساس شرایط آزمایش

پس از انجام مراحل فوق، در پنجرهٔ ظاهر شده مقدار گشتاور بار اعمالی را ۰/۴ Nm وارد کنید. سپس با تغییر جریان تحریک موتور سنکرون، جدول۷-۱ را کامل کنید. در ادامه ی آزمایش مقدار گشتاور اعمالی را به مقادیر ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶، ۲ تغییر دهید و جداول ۷-۲ ، ۷-۳، ۷-۴، ۷-۵ که مربوط به این شرایط هستند را تکمیل نمایید.

جدول ۷-۱:

T = ۰/۴ Nm

I_f (mA)	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰
$\cos\varphi$									
I_a (A)									

جدول ۷-۲:

T = ۰/۸ Nm

I_f (mA)	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰
$\cos\varphi$								
I_a (A)								

جدول ۷-۳:

T = ۱/۲ Nm

I_f (mA)	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰
$cos\ \varphi$							
I_a (A)							

جدول ۷-۴:

T = ۱/۶ Nm

I_f (mA)	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰
$cos\ \varphi$					
I_a (A)					

جدول ۷-۵:

T = ۲ Nm

I_f (mA)	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۶۷۵	۷۰۰	۷۲۵	۷۵۰
$cos\ \varphi$							
I_a (A)							

پرسش ها :

۱- نتایج حاصل از آزمایش های فوق را در یک مختصات رسم کرده و تحلیل نمایید.

۲- به ازای جریان تحریک ثابت، ضریب توان موتور سنکرون با افزایش گشتاور بار اعمالی بر محور آن چگونه تغییر می کند؟

آزمایش هشتم :

مقدمه ای بر

نیروگاههای بادی

معرفی انرژی باد و چگونگی بوجود آمدن آن :

انرژی باد یکی از صورت های مختلف انرژی حرارتی خورشید است که در اثر گرم شدن زمین بوسیله تابش خورشید بوجود می آید بدین صورت که تابش خورشید به سطح ناهموار زمین به صورت یکسان و یکنواخت نمی باشد که باعث ایجاد تغییرات فشار و دما می شود و در اثر این تغییرات باد ایجاد می شود و همچنین اتمسفر کره زمین بدلیل حرکت وضعی زمین ، گرما را از مناطق گرمسیری به مناطق قطبی انتقال می دهد که این امر نیز باعث بوجود آمدن باد می شود، دوران کره زمین و جریانات اقیانوسی هم به صورت مشابه عمل کرده و عامل ۳۰ درصد از انتقال حرارت در جهان می باشد.

انرژی باد مانند دیگر منابع انرژی تجدید پذیر ، بطور گسترده ، ولی پراکنده در دسترس می باشد ، این انرژی از ۳۰۰۰ سال پیش تاکنون مورد استفاده بشر بوده است ، در ابتدا برای آسیاب کردن غلات توسط آسیاب های بادی ، پمپاژ آب ، چرخاندن چرخ های مکانیکی و به حرکت در آوردن کشتی های بزرگ در چین باستان استفاده می شد . اولین توربین بادی جهت تولید الکتریسته تقریباً در اوایل قرن بیستم توسعه پیدا کرد و تکنولوژی بهره برداری از انرژی باد تا اواخر سال ۱۹۹۰ به صورت تدریجی توسعه یافت . هم اکنون این تکنولوژی به سرعت در حال پیشرفت می باشد و قیمت انرژی تولیدی الکتریسته توسط باد به حدود ۲۰ درصد قیمت آن در سال ۱۹۸۰ رسیده است و پیش بینی می شود که قیمت آن تا سال ۲۰۱۰ بین ۲۰ تا ۴۰ درصد پایین تر خواهد آمد.

بیشترین منابع انرژی بادی در مناطق ساحلی و کوهستانی موجود است و منابع قابل توجهی هم در دشت ها وجود دارد. تغییرات باد ساعتی ، روزانه و فصلی می باشد و به طور قابل ملاحظه ای متاثر از هوا و توپوگرافی سطح زمین است.

وضعیت پتانسیل انرژی بادی در ایران و جهان :

مجموع انرژی خورشید که به صورتهای مختلف به زمین می رسد حدود ۱۷۳۰۰۰ تراوات در سال می باشد که حدود ۰/۷ درصد از این مقدار یعنی حدود ۱۲۰۰ تراوات به صورت انرژی جنبشی توسط زمین جذب شده و تبدیل به باد می گردد و از ان جا که حداقل سرعت مورد نیاز باد برای تولید اقتصادی انرژی الکتریکی حدود ۵ متر بر ثانیه می باشد و با توجه به کل مساحت خشکی های زمین که در معرض وزش باد با سرعت های بیش از ۵ متر بر ثانیه هستند می توان در صورت بهره برداری از کل این مساحت به ظرفیت تولید انرژی الکتریکی معادل ۲۴۰۰۰ گیگاوات رسید. استفاده از تمام زمین های مستعد انرژی باد برای نصب توربین بادی غیرممکن است و مطابق نظرکارشناسان تنها ۴ درصد از مساحت زمین هایی که در معرض وزش باد با سرعت های بالای ۵ متر بر ثانیه هستند ،قابل استفاده جهت نصب توربین های بادی می باشند که این بدان معنی است که مجموع انرژی الکتریکی قابل تولید در نیروگاه بادی(با در نظر گرفتن نرخ استفاده ۴ درصد از سطوح مستعد نصب توربین بادی) در حدود ۲/۳ تراوات می باشد که برای روشن شدن مطلب می توان به این موضوع اشاره کرد که کل مصرف انرژی الکتریکی جهان در سال ۱۹۸۷ حدود یک تراوات ساعت بوده است و البته پتانسیل ذکر شده جهت تولید انرژی الکتریکی توسط توربین های بادی متصل به شبکه محاسبه گردیده است.

مطالعات و بررسی های انجام شده جهت شناسایی انرژی بالقوه باد در ایران و تهیه اطلس باد ایران ، کارشناسان انرژی را به این نتیجه رسانده که کشور ایران در بین مناطق مختلف زمین ، در میان کشورهای با پتانسیل بادی متوسط قرارداد و مناطق حاشیه کویر و سواحل جنوبی و شمالی ایران و شهرهایی مثل بندرعباس ، کیش ، اصفهان ، یزد از لحاظ پتانسیل انرژی بادی در وضع مطلوبی به سر می برند.

در حال حاضر حدود ۸۰ درصد از ظرفیت تولید انرژی الکتریکی توسط توربین های بادی در پنج کشور آلمان ، اسپانیا ، دانمارک ، هند و آمریکا به بهره برداری رسیده و بیشترین حجم تحقیقات و تولید علم در زمینه انرژی های بادی را نیز همین

کشورها در اختیار دارند حال اینکه اولین آسیاب بادی با محور افقی در حدود ۲۶۰۰ سال پیش در ایران مورد ساخت و بهره برداری قرار گرفته بوده که بقایای این آسیاب هم اکنون در روستایی در حوالی شهرستان خواف استان خراسان موجود است.

مزایا و معایب انرژی بادی :

انرژی باد یکی از صورت های منابع انرژی تجدید پذیر است که با توجه به ویژگی مشترک انرژی های تجدید پذیر به صورت گسترده با تمرکز کم (چگالی کم) در اختیار بشر قرار گرفته است و استفاده از انرژی بادی دارای مزایای بسیاری است که برخی از آن عبارتست از :

۱- انرژی باد از منابع انرژی تجدید پذیر است که باعث می شود این انرژی به صورت پایان ناپذیر در اختیار بشر قرار داشته باشد.

۲- استفاده از انرژی های نو باعث کاهش مصرف سوختهای فسیلی و ذخیره ماندن آن ها برای نسلهای آینده می شود.

۳- انرژی باد یک انرژی پاک می باشد که هیچ خطری برای محیط زیست ایجاد نمی کند و به صورت رایگان در اختیار بشر قرار دارد.

۴- توربین های بادی دارای قابلیت قدرت مانور بالا جهت بهره برداری در ظرفیت های مختلف تولید(از چند وات تا چندین مگاوات)با تغییر قطر روتورتوربین آنها را دارند.

۵- پایین بودن هزینه برق تولیدی توسط توربین های بادی

۶- عدم نیاز به آب و یا دیگر سیالات در پروسه تولید برق

۷- عدم نیاز به زمین های بزرگ وساختمان های مخصوص بخش های کنترل و بهره برداری و ...

۸- ایجاد اشتغال و کارآفرینی

با توجه به مزایای ذکر شده در مورد استفاده از انرژی باد ، وابستگی انرژی باد به شرایط جوی و محیطی وتغییرات انرژی باد در طول روز را می توان به عنوان معایب استفاده از انرژی باد بیان کرد.

مؤلفه های مختلف وزش انرژی بادی :

جریان های باد بر روی کره زمین را می توان به طور کلی به دو گروه بادهای ناشی از جریان جهانی باد و بادهای ناشی از جریان های محلی باد تقسیم نمود، تابش خورشید به سطح ناهموار زمین باعث گرم شدن غیر یکنواخت جو زمین و در نتیجه موجب ایجاد تفاوت از نظر دما و فشار در نقاط مختلف می گردد که این اختلاف فشار و دما موجب حرکت توده های هوا از نواحی پر فشار به طرف کم فشار می شود و بدین ترتیب باد تولید می شود این چرخه تولید مولفه جریان های جهانی باد را تشکیل می دهد.

عواملی نظیر مشخصات تپوگرافی منطقه وتغییرات فصلی دما ، موجب تغییر توزیع انرژی باد و ایجاد جریان های محلی باد می گردند . برای مثال اختلاف ظرفیت گرمایی بین زمین و آب در خطوط ساحلی ، ایجاد نسیم دریایی می نماید به طوری که در

طول روز یک جریان هوا از سمت دریا به سمت خشکی و در طول شب یک جریان هوا از سمت خشکی به سمت دریا بوجود می آید و مشابه همین فرآیند در دره ها و کوهستان ها باعث ایجاد جریان های محلی باد می شود.

ایران در زمستان و تابستان در معرض وزش بادهایی است که در زمستان از اقیانوس اطلس و از شمال شرقی یعنی آسیای مرکزی می وزند و در تابستان از شمال غربی یعنی ایسلند و اسکاتلند و از جنوب یعنی اقیانوس هند می وزند و به طور کلی ایران در مسیر ۴ جریان مهم هوایی قرار دارد که عبارتست از:

۱- جریان مرکز فشار آسیای مرکزی در زمستان

۲- جریان مرکز فشار اقیانوس هند در تابستان

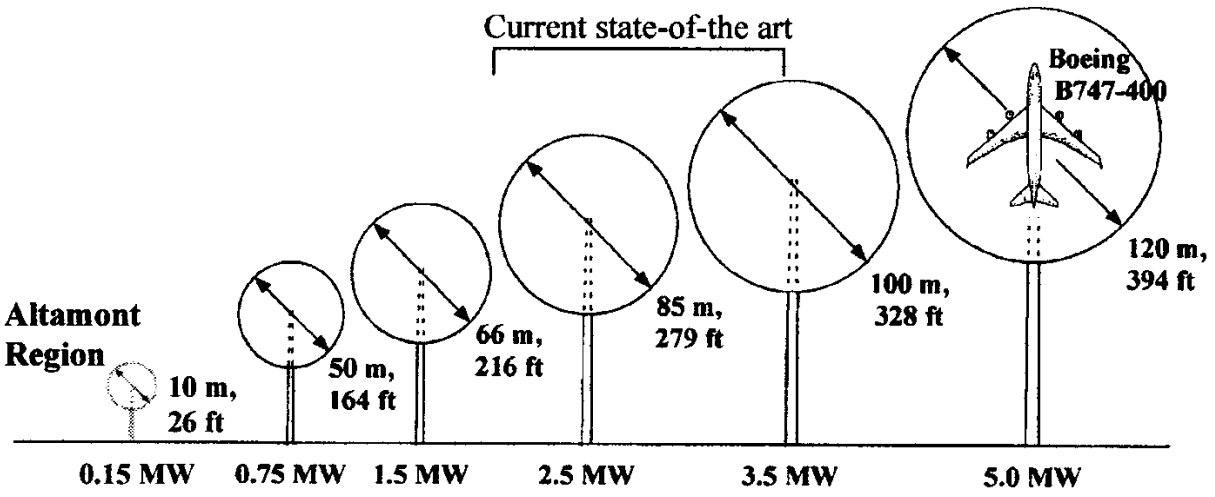
۳- جریان غربی از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه در زمستان

۴- جریان شمال غربی در تابستان

که این جریان ها باعث بوجود امدن توان بالقوه انرژی باد به میزان ۶۵۰۰ مگاوات در ایران خواهند شد . وسیله انتقال انرژی بادی به انرژی الکتریکی توربین بادی نام دارد که در قسمت های بعدی با طرز کار و انواع طبقه بندی آن ها آشنا می شویم.

توربین های بادی :

تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی و سپس انرژی الکتریکی در توربین های بادی انجام می شود . توربین های بادی در اندازه های مختلف با اجزای مختلف و ویژگی های متفاوت با توجه به شرایط محیط و میزان نیاز تولید توان الکتریکی ساخته می شوند ،این توربین ها از پره های با قطر روتور چندین متر تا حدود ۱۲۰ متر برای تولید توان های چندین کیلووات تا ۵۰۰۰ کیلووات مورد استفاده قرار می گیرند. شکل ۸-۱. علاوه بر تولید توان الکتریکی از توربین های بادی برای پمپاژ آب نیز استفاده می شود. این توربین ها با توجه به سیستم محور آن ها در برابر راستای باد و ظرفیت تولید توان الکتریکی آنها و نیز نوع اتصال ژنراتور توربین با شبکه قابل طبقه بندی می باشند که در قسمت های بعد به بررسی انواع طبقه بندی توربین های بادی و اجزای تشکیل دهنده یک توربین بادی می پردازیم.



شکل ۸-۱- توربین های بادی با اندازه ها و ظرفیت های مختلف

طبقه بندی توربین های بادی بر مبنای راستای محور توربین در برابر باد :

توربین های بادی با توجه به راستای محور اصلی خود و شرایط و نحوه استفاده از انرژی باد به دو گروه توربین های بادی با محور افقی و توربین های بادی با محور عمودی تقسیم می شوند که توربین های عمودی و افقی هر کدام دارای ساختار مکانیکی و اجزای متفاوتی هستند که در قسمت بعد به آن اشاره خواهد شد.

الف – توربین های بادی با محور چرخش افقی :

محور اصلی این توربین ها در راستای وزش باد و موازی با سطح زمین می باشد و از لحاظ تعداد پره ها این توربین ها می توانند دو پره ای و سه پره ای و یا چند پره ای باشند که از هر کدام در شرایط خاص با توجه به میزان وزش باد استفاده می شود ولی قاعده کلی استفاده از آنها بدین صورت است که هر چه سرعت وزش باد در منطقه کمتر باشد تعدادپره های بیشتری مورد نیاز می باشد و هر چه سرعت باد بیشتر باشد تعداد پره های کمتری مورد نیاز می باشد . افزایش تعداد پره ها باعث سنگین شدن توربین می شود و بدین علت بیشتر از توربین های دوپره ای و سه پره ای استفاده می شود. توربین های با محور افقی با استفاده ازسیستم گرداننده تعبیه شده درآنها میتوانند زاویه محور توربین نسبت به راستای وزش باد را طوری تغییر دهند که همیشه راستای وزش باد بر محور توربین عمود باشد و انرژی بیشتری را بتوان از باد دریافت و به الکتریسته تبدیل کرد.

از دیگر مزایای توربین های بادی با محور چرخش افقی می توان به راندمان بالای آنها و قابلیت تولید انرژی الکتریکی در سرعت های پایین اشاره کرد و از معایب آنها می توان به هزینه بالا و پیچیدگی ساخت این توربین ها ونیز ضرورت نصب ژنراتور در ارتفاع اشاره کرد که باعث ایجاد مشکلات در تعمیرات ژنراتور می شود.

توربین های بادی با محور افقی از نظر جهت برخورد با باد به دو نوع توربین های با محور افقی رو به باد و توربین با محور افقی پشت به باد تقسیم می شوند که در توربین های رو به باد سطح دایره ای شکل حاصل از چرخش پره ها اولین قسمتی از توربین است که باد به آن برخورد می کند و برای بدست آوردن بیشترین میزان انرژی بادی همواره باید محور توربین بر راستای وزش باد عمود باشد و این امر با کمک نصب بادنما و سیستم گرداننده انجام می شود و تقریباً اغلب توربین های با محور افقی از نوع رو به باد با قابلیت حرکت در راستای وزش باد هستند . در توربین های با محور افقی از نوع پشت به باد ، ابتدا برج توربین با باد برخورد می کند و در نتیجه قسمتی از انرژی باد به موجب سایه اندازی بر روی دایره چرخش پره ها تلف خواهد شد و در این نوع سیستم ها نیاز به وجود بادنما و سیستم انحراف نمی باشد.

ب – توربین های بادی با محور چرخش عمودی :

محور اصلی توربین های با محور چرخش عمودی به صورت عمود بر راستای وزش باد می باشد و بنابراین نیازی به سیستم انحراف محور توربین وجود ندارد . این توربین ها دارای ساختمان ساده تری نسبت به توربین های با محور افقی هستند و شامل قطعاتی با شکل های گوناگون مانند میله های عمودی که عمود بر راستای باد قرار می گیرند و میله های دیگر که در راستای باد قرار می گیرند ، می شوند که شکل خاص این نوع توربین ها باعث جمع شدن باد در توربین ها وچرخش محور توربین می شود. توربین های با محور عمودی اغلب دو پره می باشند و در انواع مختلف ساخته می شوند که متداول ترین آنها توربین های نوع داریوس ، اوانس و ساونیوس می باشند.

توربین های با محور عمودی با هزینه پایین تر از توربین های با محور افقی ساخته می شوند و دارای ساختار فیزیکی و آیرودینامیکی ساده تری هستند و از دیگر مزایای این توربین ها این است که ژنراتور این توربین ها بر روی زمین نصب می

شود که باعث سادگی در تعمیرات و سرویس توربین می شود و نیز وزن این توربین های سبک و قیمت برج آن ارزانتر از توربین های با محور افقی است ولی عیب این توربین ها پایین بودن راندمان کاری آنها است.

طبقه بندی توربین های بادی بر مبنای نحوه ارتباط آن ها با شبکه سراسری :

توربین های بادی با توجه به نوع ارتباط آنها با مصرف کننده وشبکه سراسری به دو دسته توربین های جدا از شبکه و توربین های متصل به شبکه تقسیم می شوند که هر کدام در شرایط خاص و کاربردهای خاص استفاده می شوند.

الف - توربین های بادی جدا از شبکه :

در سیستم توربین های بادی جدا از شبکه همان طور که از نام آنها مشخص است برق تولید شده در توربین به صورت جدا از شبکه برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز یک یا چند مصرف کننده استفاده می شود و در این نوع سیستم نیاز به احداث خطوط انتقال نیرو یا احداث پست های فشار قوی و فشار ضعیف نمی باشد و توان تولید شده در توربین در محل نیروگاه یا در همان حوالی مصرف می شود . کاربرد نیروگاههای بادی با توربین های مستقل از شبکه شارژ باتری ، گرمایش آب ، تولید توان الکتریکی در نواحی دور افتاده ، تامین انرژی دستگاههای ناوبری دریائی و شیرین سازی آب می باشد.

سیستم های شارژ باتری پر مصرف ترین کاربرد سیستم نیروگاههای بادی با توربین جدا از شبکه می باشد و توربین این سیستم ها اغلب با قطر حدود ۳ تا ۵ متر ساخته شده و توان نامی آنها اغلب بین ۴۰ تا ۱۰۰۰ وات می باشد. سیستم های گرمایش آب اغلب در منازل مسکونی استفاده میشوند و نحوه کار انها بدین صورت است که برق تولید شده در توربین بادی می تواند به طور مستقیم به یک رادیاتور یا آب گرم کن و یا بخاری الکتریکی متصل شود و جهت کاربردهای گرمایشی استفاده شود. همچنین می توان از این فرآیند به صورت مشابه برای سرمایش در منازل مسکونی هم استفاده کرد.

سیستم های تامین برق مناطق دور افتاده به کمک نیروگاههای بادی با توربین جدا از شبکه بسیار مقرون به صرفه و با قابلیت اطمینان بالا می باشند و غالبا این سیستم ها دارای یک سیستم ذخیره کننده انرژی (باتری) می باشند و مزیت این سیستم ها این است که می توان از توربین های بادی با سایر منابع تولید انرژی مانند سلولهای فتوولتائیک و یا دیزل ژنراتورها برای تامین توان های بیشتر به صورت ترکیبی استفاده کرد.

ب - توربین های بادی متصل به شبکه :

نیروگاههای بادی با توربین های بادی متصل به شبکه به دو دسته تقسیم بندی می شوند:

۱- توربین های بادی متصل به شبکه منفرد

۲- توربین های بادی متصل به شبکه گروهی(مزارع بادی)

ب – ۱- توربین های بادی متصل به شبکه منفرد :

توربین های بادی منفرد معمولاً برای تامین بارهای الکتریکی از نوع مسکونی ، تجاری ، صنعتی و یا کشاورزی استفاده می شوند. ظرفیت تولید انرژی الکتریکی این توربین ها در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات می باشد و بار مصرفی معمولاً در نزدیکی

محل توربین نیروگاه قرار دارد و بارهای مصرفی می توانند به شبکه برق سراسری و توربین ژنراتور متصل شوند و تولید بیش از حد نیاز مصرف کننده ها را می توان به شرکت های توزیع برق منطقه ای فروخت و در شرایطی که توربین ها قادر به تولید برق نمی باشند می توان انرژی مورد نیاز مصرف کننده ها را از شبکه سراسری دریافت کرد و نرخ قبوض ماهیانه برق مشترکین از تفاوت نرخ بهای برق تولیدی و مصرفی آنهامحاسبه خواهد شد . کشورهای آمریکا ، آلمان ، دانمارک ، هلند و اسپانیا با فراهم کردن شرایط مناسب به مشترکین برق خود اجازه داده اند تا در صورت علاقه ، توربین های بادی را در تملک خود خریداری کرده و با بهره گیری از آنها برای تامین برق مصرف کننده های خود وفروش مازاد آن به شرکت های توزیع نقشی را در کمک به کاهش نرخ افزایش تقاضای مشترکین برق ایفا کنند.

ب – ۲ - توربین های بادی متصل به شبکه گروهی (مزارع بادی) :

در یک مزرعه بادی به دلیل نیاز به تولید توان الکتریکی با مقادیر بالا گروهی از توربین های بادی را به طور متمرکز در یک منطقه نصب می کنند. امروزه مزارع بادی با ظرفیت های تولید بیش از ۱۰۰ مگاوات احداث می شوند و ظرفیت متداول هر یک از توربین های موجود در یک مزرعه بادی بین ۵۰ تا ۵۰۰ کیلووات است و مقدار انرژی قابل تولید در هر مزرعه بادی به تعداد توربین ها و مشخصات توان نامی توربین ها و سرعت و تداوم وزش باد بستگی دارد. توان تولیدی در مزارع بادی معمولا توسط ترانسفورماتورها تبدیل به ولتاژهای بالاتر شده و به سیستم های قدرت فشار متوسط تزریق می شود.

طبقه بندی توربین های بادی بر مبنای ظرفیت تولید انرژی الکتریکی آنها :

توربین های بادی که برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می شوند بر مبنای ظرفیت تولید انرژی به سه دسته تقسیم می شوند که عبارتست از:

الف- توربین های کوچک بادی مستقل از شبکه

ب- توربین های متوسط بادی مستقل از شبکه

ج- توربین های بزرگ بادی متصل به شبکه

که در قسمت های بعد این سیستم ها را به اختصار توضیح می دهیم.

الف- توربین های کوچک بادی مستقل از شبکه :

این توربین ها برای تامین انرژی الکتریکی مصرف کننده هایی مانند پمپ آب ، شارژ باتری و یا سیستم های گرمایش و سرمایش استفاده می شود واغلب در توان های کمتر از ۲۵ کیلووات مورد بهره برداری قرار می گیرند و همیشه به صورت مستقل از شبکه کار می کنند . روتور این توربین ها دارای قطر کمی بوده و از تعداد ۲ تا ۶ پره از جنس کربن و آلیاژهای آلومینیم ساخته می شود . این توربین ها اغلب فاقد جعبه دنده هستند و توربین مستقیماً به ژنراتور متصل است و در صورتی که کیفیت ولتاژ و فرکانس برق تولیدی برای مصرف کننده های مهم نباشد (مانند المنت های مقاومتی در سیستم های گرمایش) می توان برق تولید شده در ژنراتور را مستقیماً به بار مورد نظرمتصل کرد ولی در زمانی که مصرف کننده نیاز به

ولتاژ و فرکانس ثابت و مشخصی دارد ، ابتدا ولتاژ خروجی ژنراتور توسط سیستم یکسوساز به ولتاژ DC تبدیل شده و سپس برای رسیدن به ولتاژ و فرکانس مورد نظر از مبدل DC به AC کنترل شده استفاده می کنیم.

ب- توربین های متوسط بادی مستقل از شبکه :

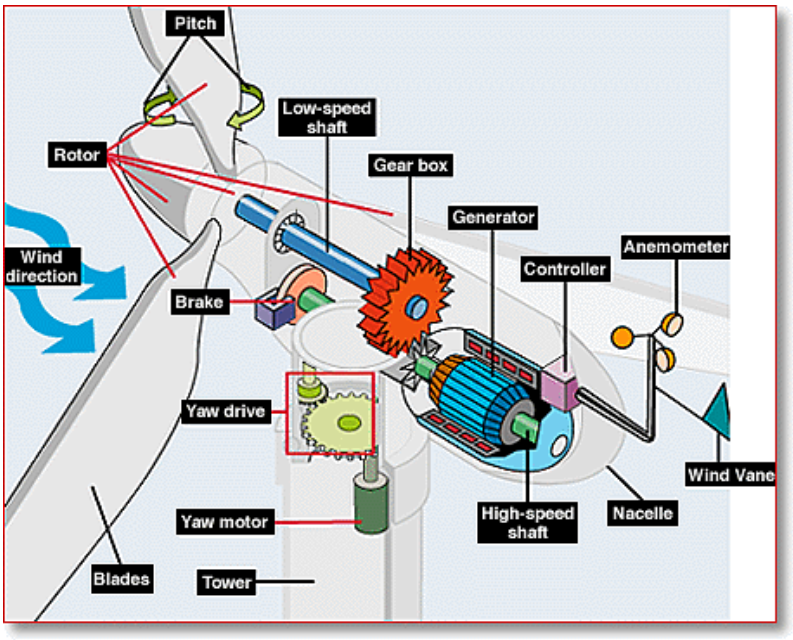
از نیروگاههای بادی با سیستم توربین های متوسط بادی مستقل از شبکه معمولاً در شبکه های کوچک در مناطق دور افتاده مانند روستاهای مرزی استفاده می شود و برای مناطق دور از شبکه سراسری یا مناطقی کوهستانی که امکان احداث شبکه انتقال در آن وجود ندارد و یا در مناطقی که به دلیل مشکلات زیست محیطی نمی توان نیروگاههای فسیلی را در آن جا احداث کرد استفاده می شود . ظرفیت تولید توان الکتریکی این نیروگاهها بین ۲۵ تا ۱۵۰ کیلووات می باشد و می توان در کنار توربین های بادی از دیگر سیستم های تولید انرژی مانند سیستم های فتوولتائیک و یا دیزل ژنراتور برای تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد و مصرف کننده هایی که نیاز به برق با کیفیت پایین دارند از توربین های بادی و مصرف کننده هایی که نیاز به انرژی الکتریکی با کیفیت ولتاژ و جریان بالا دارند را از دیزل ژنراتور یا سلول خورشیدی تغذیه کرد.

ج- توربین های بزرگ بادی متصل به شبکه :

توربین های بزرگ متصل به شبکه ، در ظرفیت های ۱۵۰ تا ۲۰۰۰ کیلووات در سطح جهان مورد ساخت و بهره برداری قرار گرفته و مشخصات نامی برای یک توربین ۵۰۰ کیلووات معمول در حدود ۳۷ متر قطر روتور با وزن توربین در حدود ۴۸ تن ، ارتفاع برج ۳۵ متر ، و سرعت روتور ۳۰ دور در دقیقه می باشد. در این نوع توربین با توجه به سرعت پایین چرخش محور توربین ، نیاز به سیستم چرخ دنده برای تغییر میزان گشتاور و سرعت محور توربین ضروری است و در این توربین ها به دلیل سنکرون شدن ژنراتور توربین با شبکه سراسری ، امکان تغییر مقادیر ولتاژ و فرکانس وجود ندارد و نیاز به سیستم های مبدل DCبه AC نمی باشد ولی برای شرایط بحرانی افزایش دور توربین باید مکانیزمی تعبیه شود تا بتوان سرعت توربین را کم و آن را ترمز کرد.

قسمتهای اصلی توربین بادی :

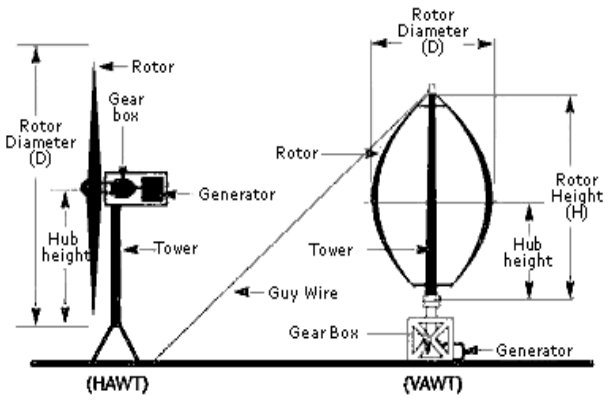
یک توربین بادی به طور کلی از قسمتهایی مانند روتور ، جعبه دنده ، محور سرعت پایین ، محور سرعت بالا ، ژنراتور ، برج نگهداری سیستم روتور ، مکانیزم های ترمز و مکانیزم های انحراف توربین ، بادنما ، بادسنج و بدنه توربین تشکیل شده است که هر یک از این اجزاء ، نقش خاصی را در توربین ایفا می کنند. در شکل ۸-۲ این اجزا نمایش داده شده اند.



شکل ۸-۲- اجزای مختلف یک توربین بادی

روتور :

روتور یک توربین از پره ها ، توپی و اجزای داخل آن تشکیل شده است . روتور از طریق توپی خود به محور سرعت پایین متصل است و انرژی دورانی خود را به محور سرعت پایین منتقل می کند. روتورها بر دو نوع با محور افقی (HAWT) و با محور عمودی (VAWT) ساخته می شوند، شکل ۸-۳، و پره های آنها را می توان از فایبرگلاس تقویت شده با پلی استر و یا چوب چند لایه و یا فولاد ساخت که پره های ساخته شده با فایبرگلاس تقویت شده سبک می باشند و تنش کمتری بر یاتاقانها و توپی وارد می کنند. پره های ساخته شده با چوب چند لایه دارای مقاومت بسیار مطلوب در برابر خستگی می باشند و پره های فولادی به خاطر تکنولوژی ساده ساخت ، استحکام بالا و هزینه ساخت کم مورد استفاده قرار می گیرند. قطر پره های توربین ها می توانند از چند متر تا حدود چند ده متر ساخته شود و توان قابل تولید در یک توربین بادی متناسب با سطح دایره ای شکلی است که از چرخش پره های روتور به حول محور روتور حاصل می شود و به این دلیل با توجه به شرایط محیط و باد در هر منطقه و میزان توان مورد نیاز ، پره های توربین روتور در اندازه های مختلف ساخته می شوند و پره های تا قطر روتور ۸۵ متر برای تولید توان ۲۵۰۰ کیلووات به صورت عملی طراحی و تولید شده است.



شکل ۸-۳- توربین بادی در دو نوع محور عمودی و محور افقی ساخته می شود.

محورهای سرعت بالا و پایین :

محور سرعت پایین از یک طرف به پره های روتور و از طرف دیگر به جعبه دنده متصل می باشند و سرعت چرخش آن برابر سرعت پره های روتور می باشد و وظیفه این محور انتقال انرژی دورانی تولید شده در اثر وزش باد به جعبه دنده می باشد.

محور سرعت بالا از یک طرف به جعبه دنده و از طرف دیگر به محور ژنراتور متصل است و وظیفه آن انتقال انرژی تغییر یافته چرخشی در جعبه دنده به محور ژنراتور می باشد.

جعبه دنده :

سرعت چرخش روتور در توربین های بادی پایین می باشد و با توجه به شرایط و نوع توربین در حدود ۳۰ تا ۴۰ دور در دقیقه خواهد بود در حالی که برای تولید انرژی در محدوده فرکانس ۶۰ هرتز با توجه به تعداد قطب های ژنراتور نیاز به سرعتی بین ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه می باشد که جهت ایجاد چنین سرعتی نیاز به یک مکانیزم انتقال قدرت داریم که سرعت پایین و گشتاور بالای محور سرعت پایین را به سرعت بالا و گشتاور پایین در محور سرعت بالا تبدیل کند. این مکانیزم جعبه دنده نام دارد و در جعبه دنده توربین های بادی نرخ افزایش سرعت ثابت است و چرخ دنده های موجود در آن فقط سرعت چرخش محور سرعت پایین را به یک نسبت مشخص بالا خواهند برد که معمولاً این نسبت در حدود یک به پنجاه خواهد بود که باعث می شود سرعت چرخش محور سرعت بالا پنجاه برابر سرعت چرخش محور سرعت پائین باشد.

استفاده از جعبه دنده به دلیل اصطکاک بالای قطعات مکانیکی آن و وزن بسیار سنگین و هزینه بسیار بالا مطلوب نمی باشد و بدین دلیل تحقیقات بسیاری برای حذف مکانیزم جعبه دنده از سیستم توربین ها انجام شده است که یکی از راهکارهای آن افزایش تعداد قطب های ژنراتور به حدی است که با همان سرعت چرخش پایین روتور ، بتوان به فرکانس حوالی ۶۰ هرتز رسید که این راهکار از لحاظ عملی به دلیل بزرگ شدن حجم ژنراتور و نیاز به نصب ژنراتور در بالای سطح زمین منتفی است و روش دیگر افزایش سرعت چرخش روتور به مقدار مطلوب برای ژنراتور (در حدود ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور در دقیقه) است که این راهکار هم به علت افزایش تلفات مکانیکی سیستم و محدودیت های مکانیکی موجود غیر قابل استفاده است و راهکارهای دیگر هم مانند این دو راهکار به نتیجه مطلوبی نرسیده و تلاش طراحان برای طراحی یک توربین بدون مکانیزم جعبه دنده همچنان ادامه دارد.

ژنراتور :

ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی معمولاً از نوع ژنراتور های القائی (آسنکرون) می باشد که اغلب دارای ۴ یا ۶ قطب می باشند ولی در برخی موارد از ژنراتورهای سنکرون نیز استفاده میشود. ژنراتور های القایی در حوزه کاری خود می توانند به صورت موتور القایی به شبکه متصل شوند و توربین را به چرخش در آورند و به حوالی سرعت سنکرون برسانند.

ساختمان ساده و ارزان بودن و رنج وسیع آن ها از چند وات تا چندین مگاوات باعث شده این ژنراتورها در بیشتر توربین های بادی مورد استفاده قرار گیرند ولی نقص عمده این ژنراتورها اخذ توان را کتیو از شبکه می باشد که باعث پایین آمدن ظرفیت موجود در خطوط انتقال نیرو می شود و برای حل این مشکل باید از واحدهای جبران ساز راکتیو در محل نیروگاه برای تامین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القائی استفاده کرد که باعث افزایش هزینه احداث نیروگاه می شود ولی این هزینه در مقایسه با استفاده از ژنراتورهای سنکرون گران قیمت که نیازبه نصب خازن ندارند ، بسیار کمتر می باشد.

بدنهٔ توربین :

بدنه توربین به محفظه ای گویند که پوشش مستحکمی را برای اجزای مختلف سیستم شامل محورهای سرعت بالا و پایین ، ژنراتور ، جعبه دنده و مکانیزم های کنترل و ترمز فراهم می کند و بدین صورت این تجهیزات در برابر آسیب های جوی محافظت می شوند.

بادنما و بادسنج :

بادنما و باد سنج وظیفه اندازه گیری و تشخیص سرعت و جهت باد را دارند و سیگنال خروجی الکتریکی از باد سنج به سیستم کنترل برای شروع به حرکت ، متوقف کردن یا ثابت نگه داشتن دورتوربین داده می شود و نیز سیگنال خروجی به سیستم انحراف توربین برای فرمان حرکت به سمت چپ یا راست محور توربین ارسال می شود.

سیستم گرداننده راستای محور توربین (انحراف به سمت چپ و راست) :

این سیستم در توربین های بادی با محور افقی استفاده می شود و وظیفه آن این است که راستای محور توربین را به صورتی تغییر دهد که همواره بر راستای محور ورزش باد عمود باشد و کار کرد این سیستم تحت فرمان سیگنال ارسال شده از بادنما و باد سنج می باشد و استفاده از این سیستم باعث افزایش سطح انرژی دریافت شده از باد و در نتیجه افزایش راندمان کاری توربین می شود.

سیستم کنترل و ایمنی :

سیستم کنترل به صورت پیوسته اطلاعات مورد نیاز مانند شرایط مختلف توربین ، وضعیت سرعت و جهت باد و غیره را توسط سنسورهای نصب شده در مکان های مختلف توربین و نیز توسط تجهیزاتی مانند باد نما و بادسنج دریافت کرده و با توجه به اطلاعات و شرایط مطلوب کار سیستم وظایف کنترلی و حفاظتی خود را از قبیل روشن و خاموش کردن توربین را انجام می دهد.

سیستم ترمز :

در شرایطی که سرعت چرخش محور روتور به علت افزایش بیش از حد انرژی باد ، از حد مجاز بیشتر شود با توجه به احتمال آسیب دیدن قسمت های قسمت مکانیکی در سرعت ها بالا و نیز خطر افزایش دور ژنراتور در سیستم های متصل به شبکه ، باید مکانیزمی برای ترمز محور روتور در شرایط بحرانی در نظر گرفته شود. جهت ایجاد یک مکانیزم ترمز معمولاً قسمتی از نوک پره روتور به صورت متحرک ساخته می شود که این قسمت متحرک در شرایط لازم برای ترمز ، قابلیت چرخش ۹۰ درجه ای را دارند و باعث متوقف شدن محور روتور می شوند به این مکانیزم ترمز ، ترمز هوایی گویند و مکانیزم های دیگری نیز برای ترمز محور روتور قابل طراحی و اجرا می باشد.

برج توربین بادی :

قسمتهای مختلف روتورتوربین بر روی برج قرار می گیرد و جنس برج نیروگاه معمولاً از فولاد می باشد و این برج ها در دو نوع برج های خرپائی و برج های لوله ای ساخته می شوند. برای توربین های با توان بالاتر با توجه به قطر روتور بیشتر آنها نیاز به برج های با ارتفاع بالاترمی باشد و هرچه ارتفاع برج بیشتر باشد می توان از سرعت های بیشتر باد در ارتفاع های بالاتر بهره برد ، طراحی سازه برج بسیار مهم و حساس می باشد زیرا تمام نیروها و گشتاورهای ایجاد شده توسط پره های متحرک توربین باید توسط برج نیروگاه و فونداسیون آن مهار گردد،بنابراین طراحی صحیح این قسمت برای عملکرد مطلوب توربین روتور بسیار حائز اهمیت می باشد.

کاربرد توربین های بادی جهت پمپاژ آب :

یکی از پر مصرف ترین کاربردهای انرژی بادی ، استفاده ازتوربین های بادی جهت پمپاژ آب می باشد و تا سال ۱۹۹۰ بیش از یک میلیون دستگاه پمپ بادی در نقاط مختلف جهان در حال استفاده بوده است. توربین های بادی جهت پمپاژ آب برای مصارفی مانند تامین آب آشامیدنی چهار پایان ، تامین آب آشامیدنی مناطق دور افتاده ، آبیاری مزارع و کشیدن آب از عمق کم چاه ها استفاده می گردد و استفاده از پمپ های بادی برای استخراج آب یک روش مقرون به صرفه و اقتصادی می باشدو در طول قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ از این پمپ ها به صورت وسیع استفاده شده است.

بررسی ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه های بادی :

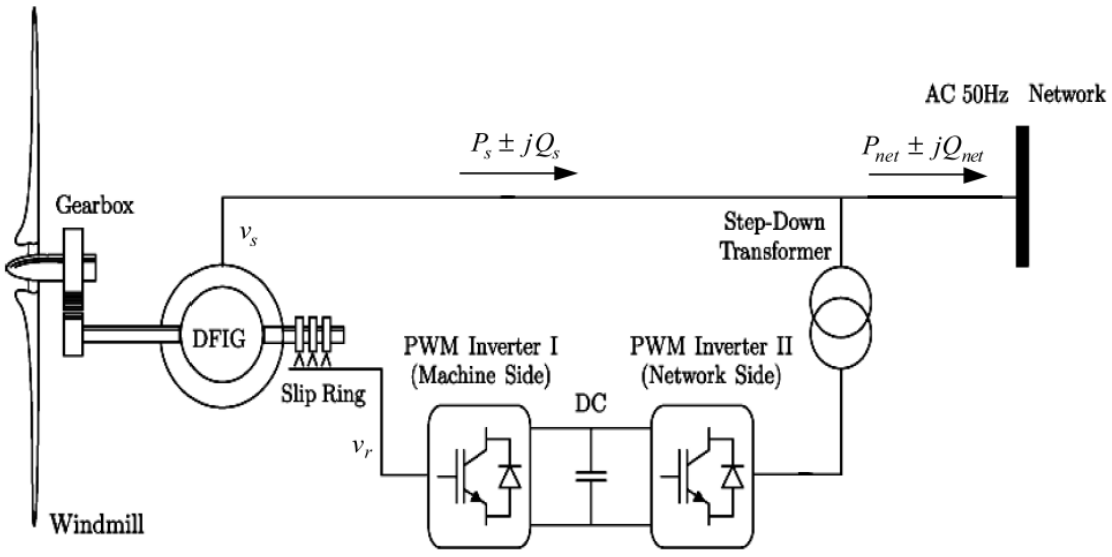
همانطور که گفته شد، در نیروگاه های بادی عموماً از ژنراتورهای القایی برای تبدیل انرژی بادی به انرژی الکتریکی استفاده می شود. ژنراتورهای القایی به دو نوع مختلف تقسیم می شوند :

الف- ژنراتور القایی عادی (Induction Generator)

ب- ژنراتور القایی با تغذیهٔ دوگانه (Doubly Fed Induction Generator)

الف- ژنراتور القایی عادی (IG): در آزمایش چهارم با این نوع ژنراتورها آشنا شدید. بنابراین در اینجا از بررسی مجدد این نوع ژنراتورها صرفنظر می شود.

ب- ژنراتور القایی با تغذیهٔ دو گانه (DFIG): در این نوع ژنراتورها، هر دو بخش استاتور و رتور سیم پیچی شده اند و توان الکتریکی تبدیلی ژنراتور می تواند هم از طریق استاتور و هم از طریق روتور به شبکه تزریق شود. شکل۴-۸.



شکل۸-۴

استفاده از ژنراتورهای القایی با تغذیهٔ دوگانه به جای ژنراتورهای القایی عادی به عنوان ژنراتور نیروگاه های بادی، چندین مزیت دارد: یکی اینکه با توجه به این که مدار روتور DFIG ها توسط مبدل های الکترونیک قدرتی کنترل می شود بنابراین این ژنراتورها می توانند توان راکتیو از شبکه قدرت جذب و یا به آن تزریق نمایند. بنابراین این ژنراتورها می توانند باعث پایداری بیشتر شبکه ی قدرت در مقابل افت ولتاژهای شدید شوند. دیگر اینکه کنترل ولتاژ و جریان روتور این نوع ژنراتورها، باعث می شود که در صورت وقوع تغییرات شدید در سرعت محور آنها، ژنراتور القایی حالت همزمانی (synchronization) خود با شبکه قدرت را حفظ نماید. استفاده از توربین های بادی ای که به ازای سرعت های مختلف می توانند تولید انرژی کنند نسبت به توربین هایی که فقط به ازای یک سرعت خاص این کار را انجام می دهند، می تواند باعث صرفه جویی اقتصادی شود. همچنین به دلیل اینکه تنها کسری از انرژی تبدیلی، حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، می تواند از طریق روتور این نوع ژنراتورها به شبکه تزریق شود (و بقیه ی این انرژی مستقیماً از طریق استاتور وارد شبکه شود) استفاده از مبدل های الکترونیک قدرتی در مقایسه با روش های دیگر تبدیل انرژی به ازای سرعت های کاری مختلف، هزینه های کمتری را در پی خواهد داشت.

طبق آنچه که گفته شد، DFIG ها نسبت به IG ها در توان های یکسان از بازده بهتری برخوردارند. به همین دلیل در نیروگاه های بادی معمولاً از DFIG ها استفاده می کنند.

در اینجا سعی داریم با مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی DFIG ، رفتار این ژنراتور را به شکلی دقیق تر بررسی نماییم.

معادلات دیفرانسیل حاکم بر این نوع ژنراتورها به صورت زیر خواهند بود :

A. Stator Voltage Equations

$$\begin{aligned} V_{qs} &= p\lambda_{qs}+\omega\lambda_{ds}+r_s i_{qs} \\ V_{ds} &= p\lambda_{ds}-\omega\lambda_{qs}+r_s i_{ds} \end{aligned} \qquad (1)$$

B. Rotor Voltage Equations

$$\begin{aligned} V_{qr} &= p\lambda_{qr}+(\omega-\omega_r)\lambda_{dr}+r_r i_{qr} \\ V_{dr} &= p\lambda_{dr}-(\omega-\omega_r)\lambda_{qr}+r_r i_{dr} \end{aligned} \qquad (2)$$

C. Power Equations

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{3}{2}\left(V_{ds}i_{ds}+V_{qs}i_{qs}\right) \\ Q_s &= \frac{3}{2}\left(V_{qs}i_{ds}-V_{ds}i_{qs}\right) \end{aligned} \qquad (3)$$

D. Torque Equation

$$T_e = -\frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_{ds}i_{qs}-\lambda_{qs}i_{ds}\right) \qquad (4)$$

E. Stator Flux Linkage Equations

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= \left(L_{ls}+L_m\right)i_{qs}+L_m i_{qr} \\ \lambda_{ds} &= \left(L_{ls}+L_m\right)i_{ds}+L_m i_{dr} \end{aligned} \qquad (5)$$

F. Rotor Flux Linkage Equations

$$\lambda_{qr} = (L_{lr} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}$$
$$\lambda_{dr} = (L_{ls} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \qquad (6)$$

Where:

P is the Number of poles

p is the derivative symbol

V_{qs}, V_{ds} are the three-Phase supply voltages in d-q reference frame, respectively

i_{qs}, i_{ds} are the three-Phase stator currents in d-q reference frame, respectively

$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$ are the three-Phase stator flux linkages in d-q reference frame, respectively

V_{qr}, V_{dr} are the three-Phase rotor voltages in d-q reference frame, respectively

i_{qr}, i_{dr} are the three-Phase rotor voltages in d-q reference frame, respectively

$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$ are the three-Phase rotor voltages in d-q reference frame, respectively

r_s, r_r are the stator and rotor resistances of machine per phase, respectively

L_{ls}, L_{lr} are the leakage inductances of stator and rotor windings, respectively

ω_e, ω_r are the supply and rotor angular frequency (electrical speed), respectively

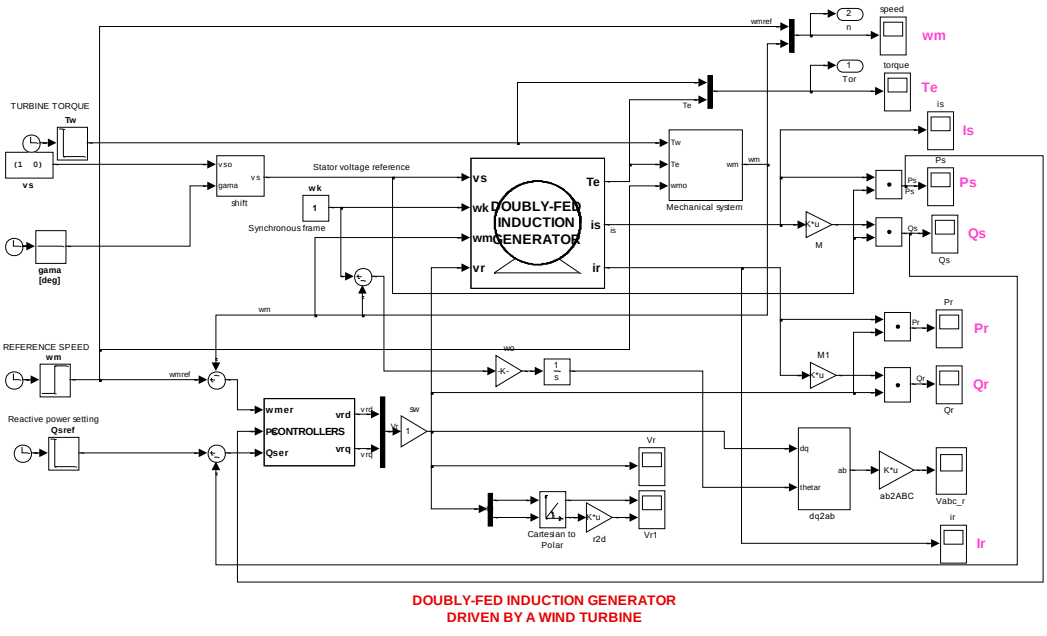
θ_s, θ_r are the stator and rotor flux angle, respectively

T_e, T_m are the electromagnetic and mechanical torques, respectively

P_s, Q_s are the stator-side active and reactive powers, respectively

P_r, Q_r are the rotor-side active and reactive powers, respectively

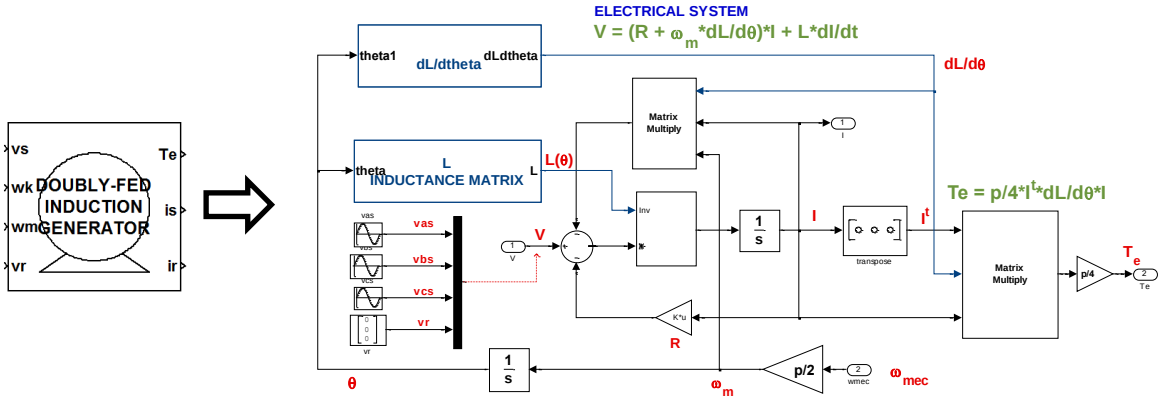
برای انجام این شبیه سازی از بخش Simulink نرم افزار MATLAB استفاده شده است. بلوک دیاگرام این شبیه سازی در شکل۸-۵ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۸-۵

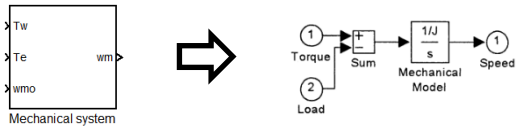
این مدلسازی از بخش های مختلف زیر تشکیل شده است :

مدلسازی مدارات روتور و استاتور :



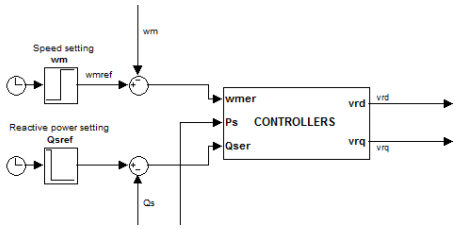
شکل ۸-۶

مدلسازی بخش مکانیکی روتور :



شکل ۸-۷

مدلسازی سیستم کنترلی موجود در مدار روتور :

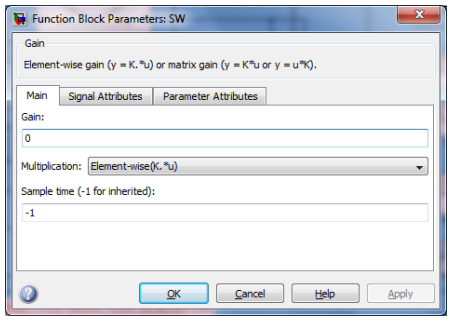


شکل ۸-۸

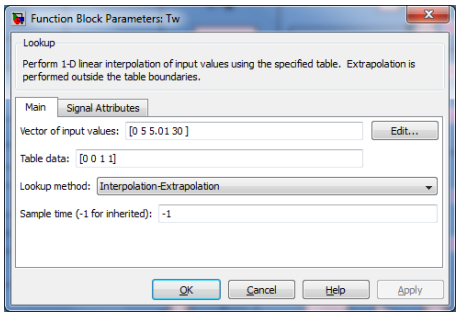
در ادامه، حالت های مختلف عملکرد DFIG را مورد بررسی قرار می دهیم.

ماشین القایی با تغذیهٔ دوگانه را در نظر بگیرید. برای اینکه این ماشین به شکل ژنراتور عمل کند، باید محور آن توسط محرک خارجی به چرخش در بیاید. در این شبیه سازی، گشتاوری که می تواند به عنوان بار مکانیکی بر محور این ماشین اعمال شود با علامت مثبت و گشتاور وارده به ماشین از طرف محرک خارجی با علامت منفی در نظر گرفته شده اند. نخست حالت موتوری را در نظر می گیریم .

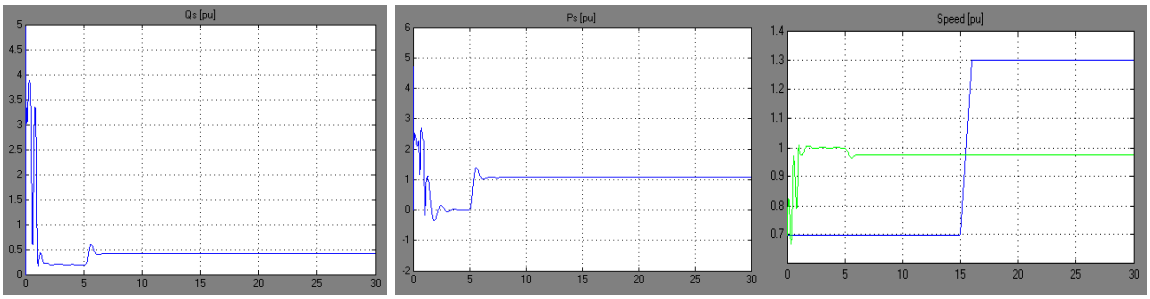
فرض کنید در ابتدا هیچ گونه سیستم کنترلی ای در مدار روتور نباشد و سیم پیچ های روتور اتصال کوتاه باشند. این کار را با صفر کردن مقدار گین بلوک SW انجام می دهیم. شکل ۸-۹. همچنین گشتاور باری معادل با ۱ پریونیت را نیز به ماشین اعمال میکنیم. شکل۸-۱۰. طبق نتایج شبیه سازی که در شکل ۸-۱۱ آورده شده اند، این ماشین به صورت یک موتور القایی عادی عمل خواهد کرد و سرعت محور آن به حدود ۰/۹۷۵ . پریونیت می رسد.



شکل ۸-۹

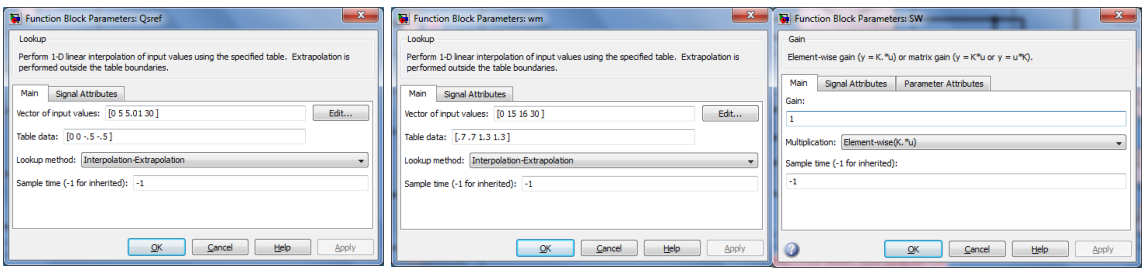


شکل ۸-۱۰

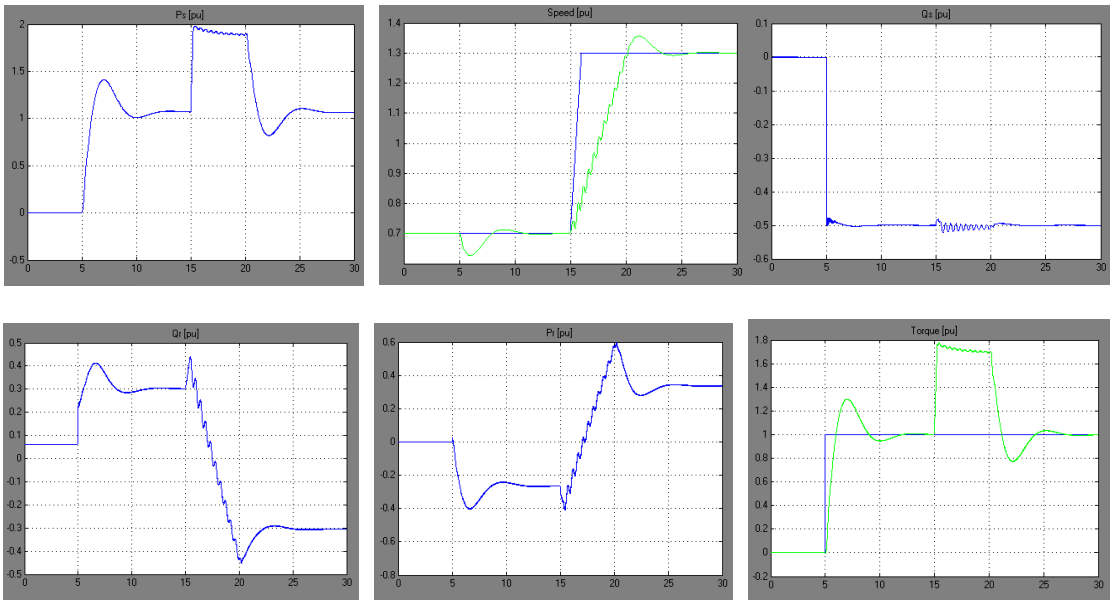


شکل ۸-۱۱

حال مقدار گین SW را از صفر به یک تغییر دهید. به این ترتیب سیستم کنترلی موجود در مدار روتور فعال می شود. توسط این سیستم کنترلی می توانیم هم بر روی مقدار سرعت محور ماشین و نیز توان راکتیو تولیدی یا مصرفی ماشین کنترل داشته باشیم. فرض کنید بخواهیم در ۱۵ ثانیهٔ اول شبیه سازی، سرعت ماشین که در این حالت به صورت موتور عمل می کند، ۰/۷ پریونیت و بعد از آن ۱/۳ پریونیت باشد و همچنین مقدار توان راکتیو **تولیدی** توسط موتور نیز پس از ثانیهٔ پنجم، ۰/۵ پریونیت باشد. این تنظیمات را طبق شکل ۸-۱۲ بر سیستم کنترلی اعمال می کنیم. بار دیگر گشتاور باری معادل با ۱ پریونیت را به ماشین اعمال می کنیم. نتایج این شبیه سازی در شکل ۸-۱۳ آمده اند. همانطور که مشاهده می شود در این حالت ماشین به صورت یک موتور القایی با قابلیت کنترل سرعت و همچنین کنترل توان راکتیو تولیدی عمل خواهد کرد.

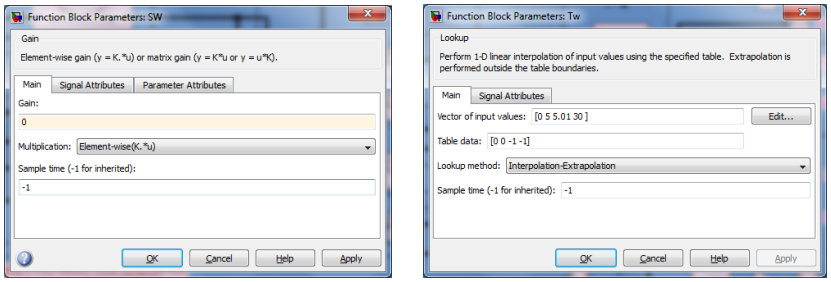


شکل ۸-۱۲

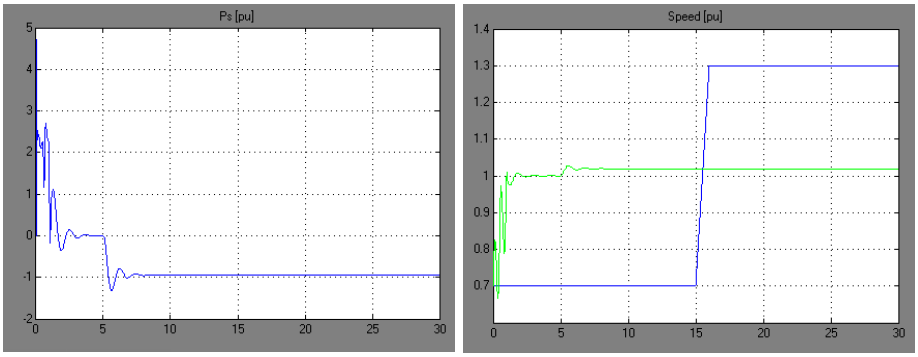


شکل ۸-۱۳

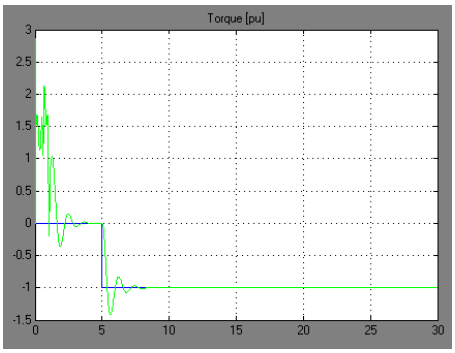
حال فرض کنید محور این ماشین را توسط یک محرک خارجی (مثلاً نیروی باد) به گردش در بیاوریم. برای شبیه سازی این حالت، گشتاور اعمالی بر ماشین را طبق شکل ۸-۱۴، ۱- پریونیت در نظر می گیریم. در حالت اول، با صفر کردن مقدار گین SW، فرض می کنیم سیم پیچ های روتور اتصال کوتاه و سیستم کنترلی در مدار روتور وجود نداشته باشد. طبق نتایج این شبیه سازی که در شکل ۸-۱۵ آورده شده اند، ماشین در این حالت به شکل یک ژنراتور القایی عادی عمل کرده و به ازای چرخش محور معادل با ۱/۰۲۵ پریونیت، توان اکتیوی به مقدار ۱/۱ پریونیت **تولید** می نماید.

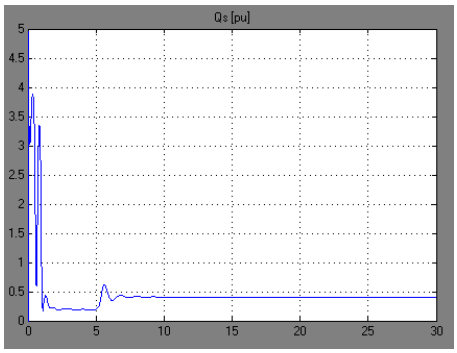


شکل ۸-۱۴



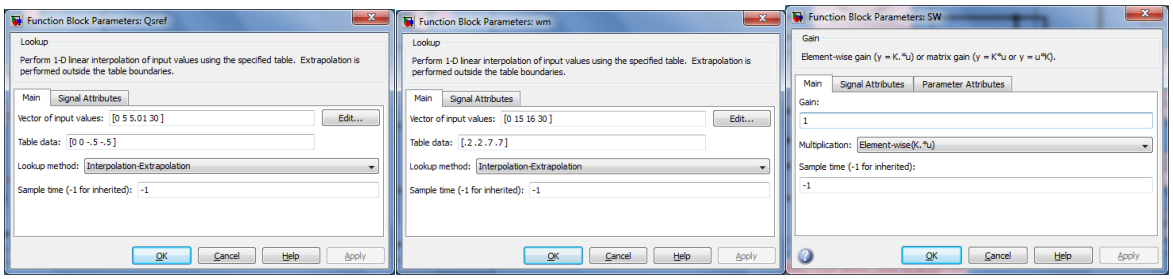
شکل ۸-۱۵ - قسمت اول



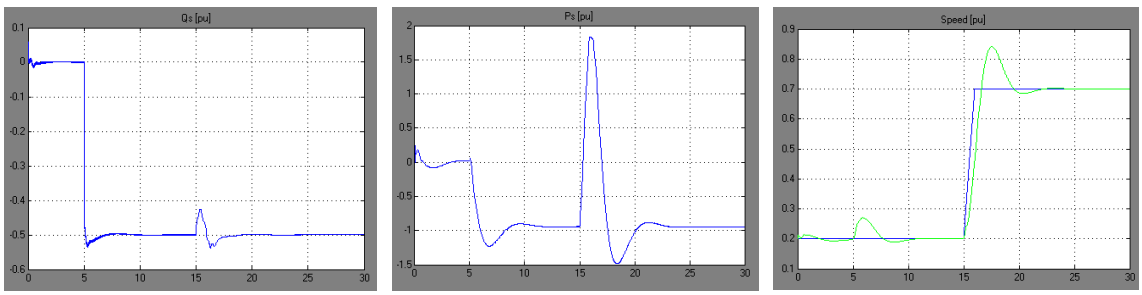


شکل ۸-۱۵ - قسمت دوم

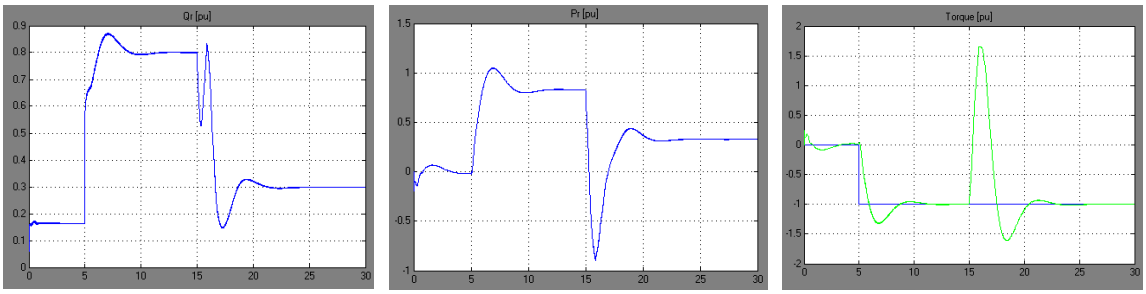
در ادامه مقدار گین SW را از صفر به یک تغییر می دهیم تا سیستم کنترلی فعال شود. فرض کنید در ۱۵ ثانیهٔ نخست شبیه سازی، سرعت محور۰/۲پریونیت و بعد از آن سرعت ۰/۷پریونیت مد نظر باشد و همچنین بخواهیم بعد از ثانیهٔ پنجم، توان راکتیوی به مقدار ۰/۵ پریونیت توسط ماشین **تولید** شود. این تنظیمات را طبق شکل ۸-۱۶ بر ماشین اعمال می کنیم. بار دیگر گشتاور اعمالی بر ماشین را طبق شکل ۸-۱۴، ۱- پریونیت در نظر می گیریم و شبیه‌سازی را انجام می دهیم.شکل۸-۱۷، نتایج حاصل از این شبیه سازی را نشان می دهد. مطابق با این نتایج، ماشین به صورت ژنراتور القایی با تغذیهٔ دوگانه عمل کرده و قادر خواهد بود که نه تنها در سرعت های کم (در اینجا۰/۲پریونیت) بلکه به ازای چندین سرعت مختلف (در اینجا ۰/۲ و ۰/۷ پریونیت)، توان اکتیو **تولید** کند، ضمن اینکه توان راکتیو تولیدی آن نیز تحت کنترل ما باشد.



شکل ۸-۱۶

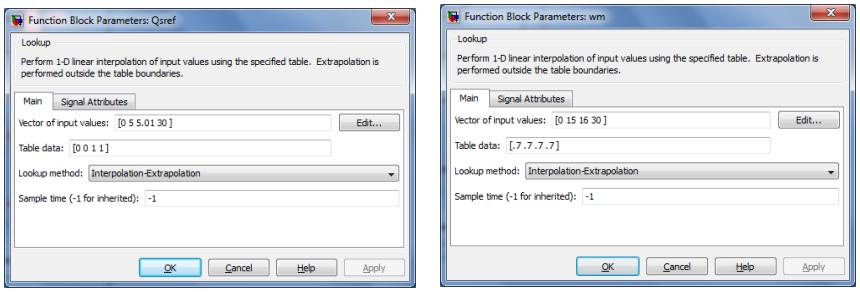


شکل ۸-۱۷ - قسمت اول

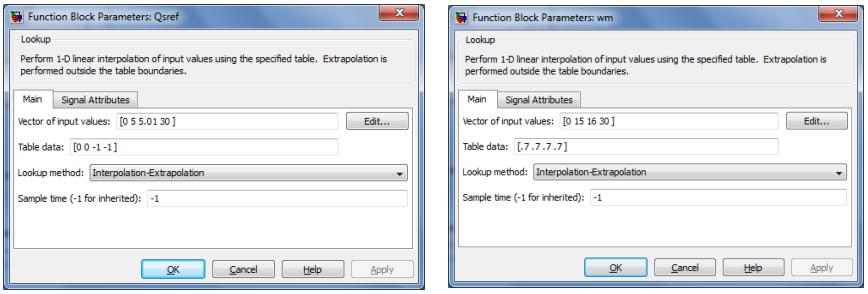


شکل ۸-۱۷ - قسمت دوم

همچنین در شبیه سازی هایی که براساس تنظیمات اعمالی طبق شکل های ۸-۱۸ و ۸-۱۹ به ماشین صورت گرفته و نتایج آنها در شکل های ۸-۲۰ و ۸-۲۱ به نمایش گذاشته شده است، بر این تاکید شده است که ژنراتور القایی با تغذیهٔ دوگانه قادر خواهد بود در هر ضریب توان دلخواهی، توان اکتیو تولید نماید.

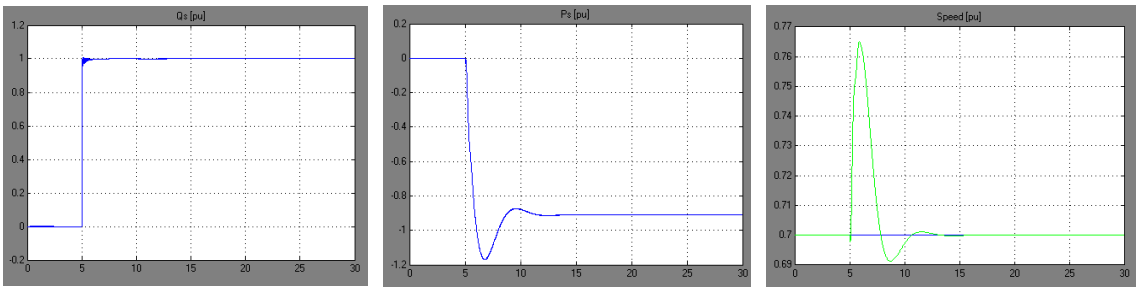


شکل ۸-۱۸

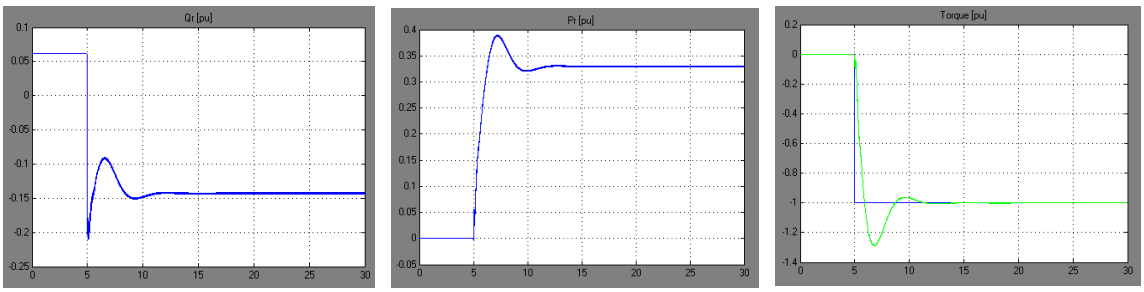


شکل ۸-۱۹

نتایج شبیه سازی انجام شده با اعمال تنظیمات موجود در شکل ۸-۱۸ :

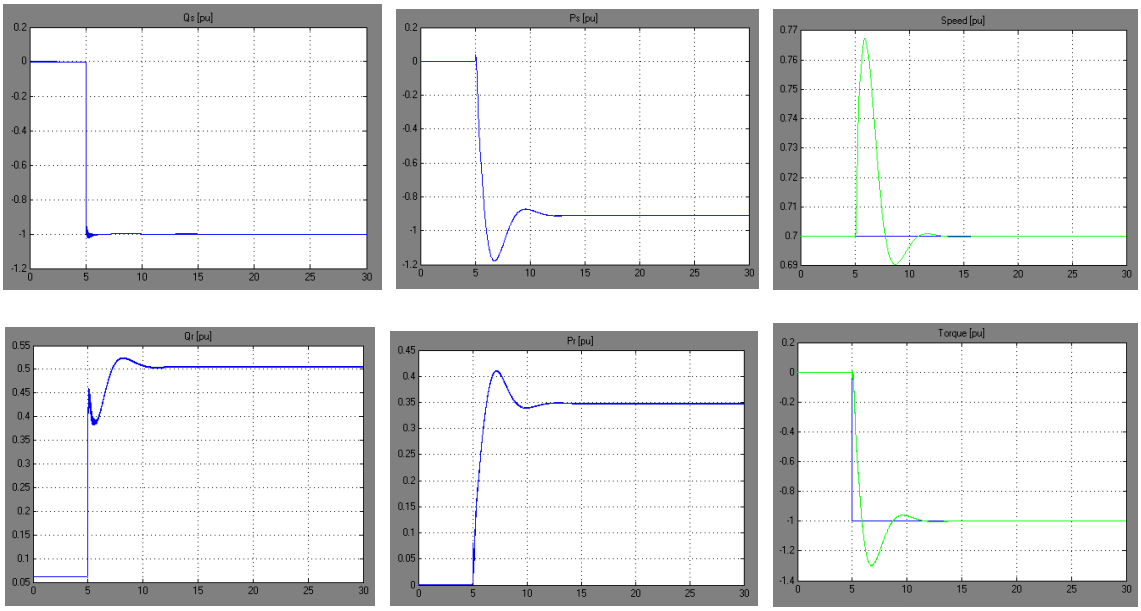


شکل ۸-۲۰- قسمت اول



شکل ۸-۲۰- قسمت دوم

نتایج شبیه سازی انجام شده با اعمال تنظیمات موجود در شکل ۸-۱۹ :



شکل ۸-۲۱