فصل پنجم : سینکرو ها

جاوید سید رنجبر

میلاد سیفی

علی آسگون

مقدمه

دراغلب شاخه های صنایع حالتی پدید می آید که دو نقطه دور از هم بایستی دارای سرعت یکسانی باشند . پل های متحرک ، دهانه سد ها ، تسمه ی نقاله ها ، جرثقیل ها و ... مواردی از این دسته هستند . در چنین حالاتی که (عموما اتصال دو محور به صورت مکانیکی مقدورنیست)هر قسمت را توسط یک موتور به حرکت در می آورند به طوری که دور هر دوموتور یکسان نگه داشته می شوند . جهت یکسان نگه داشتن دور موتورهایی که از هم فاصله ی زیادی دارند از سیستم سلسین استفاده میشود . در این سیستم ها ، موتورها توسط چند رشته سیم به هم مرتبط هستند و چون توسط این کابل ها، کوپل از یک ماشین به ماشین دیگر منتقل میشود به این اتصالات ، محور الکتریکی گویند . عبارت سلسین مخفف شده ای اتوسنکرون میباشد

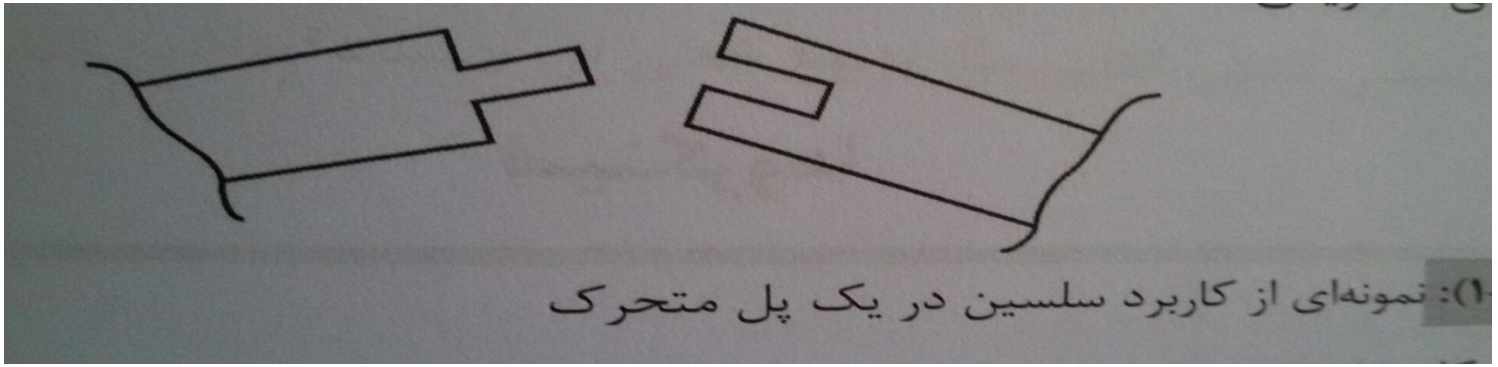
در سیستمهایی که قدرت انتقالی بین دو محور برای سنکرون ماندن زیاد باشد از سلسین سه فاز استفاده می شود . سلسین های با قدرت کم ، تکفاز هستند و سینکرو نامیده میشوند. سینکروها در سیستم های کنترل برای انتقال موقعیت و وضعیت محور و همچنین برای تثبیت همزمانی بین دویا چند محور به کار می روند .

سلسین سه فاز (قدرت)

شکل (۵-۱) نمونه ای از کاربرد یک نوع سیستم سلسین را نشان می دهد . در این شکل یک پل متحرک بر روی رودخانه ای قرار می گیرد و در مواقع لازم ، مثلا به هنگام عبور کشتی ، پل ازوسط باز می شود و هر نیمه از آن توسط یک موتور مستقل حول محور خود

واقع در طرفین رودخانه چرخانده می شود . موقع بست پل هر دو موتور به صورت هم زمان روشن می شوند و به طور هم زمان میچرخند و دو سر جدا شده ی پل به صورت

شکل (۵-۱)



سلسین ها در صنایع کاغذ سازی ، کارخانجات نورد و مواردی دیگر که در آن ها دو محور باید به صورت سنکرون کار کنند ، به کار می روند . سلسین های قدرت را میتوان به سه دسته تقسیم بندی کرد :

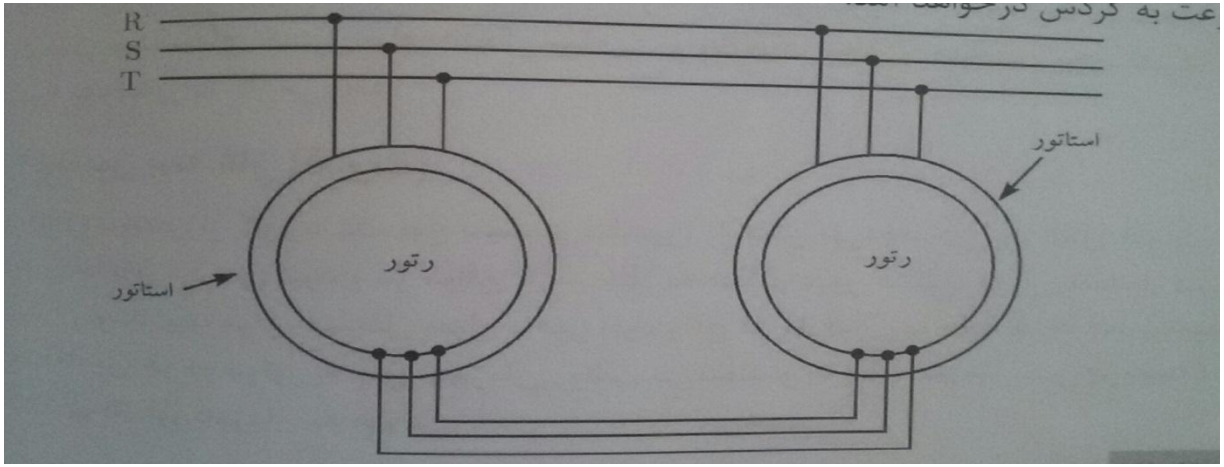
۱-محورهای الکتریکی متعادل

۲-محورهای الکتریکی کار (محرک)

۳-محورهای الکتریکی هدایت کننده

محور الکتریکی از دو ماشین آسنکرون سه فاز مشابه از نوع رتور سیم پیچی شده تشکیل می شود که استاتورهای آن به یک شبکه ی سه فاز و رتورهای آن به یکدیگر متصل هستند.
ابتدا فرض کنید که رتورها به هم وصل نشده اند . در فاصله ی هوایی ماشین ها ، میدان گردان ایجاد می شود ، ودر حالت سکون در رتورها ولتاژ مساوی با فرکانس یکسان القا می گردد . اگر محورهای مغناطیسی رتورها با استاتورها وضعیت مشخصی داشته باشند ولتاژهای القایی هر دو رتور علاوه بر هم دامنه بودن و هم فرکانس بودن هم فا نیز خواهند بود.
پس در حالت سکون می توان محورها را طوری تنظیم که ولتاژها هم فاز باشند و رتورها را به هم وصل کرد بدون اینکه از رتوری جریانی عبور کند . حال اگر یکی از رتورها را به حرکت در آوریم ولتاژ آن با ولتاژ رتور دیگر اختلاف فازپیدا می کند و رتوها با هم اختلاف ولتاژ پیدا می کند و در رتور جریان جاری می شود این باعث ایجاد گشتاور می شود .این گشتاور با توجه به قانون لنز با عامل به وجود آورنده ی خود مخالفت می کند در نتیجه رتور دوم را طوری به حرکت در می آورد که اختلاف فاز موجود صفر می شود . پس می توان گفت که رتور ماشین اول را هر طور حرکت دهیم رتور ماشین دیگری به همان میزان و با همان سرعت به حرکت در خواهد آمد .

تصویری و شکلی برای درک بیشتر توضیح اسلاید قبل را در زیر می بینیم

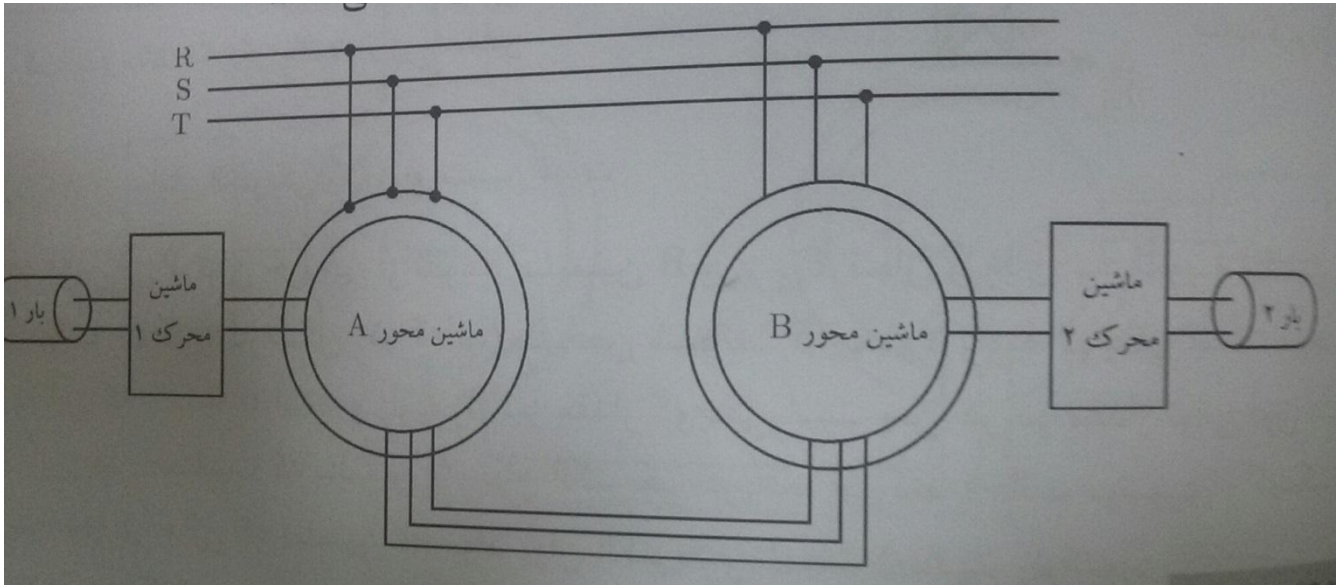


تصویر بالا اساس سلسین قدرت است .

محور الکتریکی متعادل

شکل بعدی که به شما نمایش داده خواهد شد اساس کار سلسین قدرت از نوع محور اکتریکی متعادل است . در این شکل دو موتور محرک جهت چرخاندن دو بار مجزا به کارگرفته شده است . برای آنکه سرعت دو محور بدون اتصال مکانیکی یکسان بماند از دو ماشین القایی سه فاز مشابه با ساختار سلسین سه فاز استفاده میشود . چنان چه هر دو موتور با سرعت مساوی چرخانده شود ، نیروی محرکه القا شده در فاز متناظر هر دو رتور ، مساوی و هم هم فازند و همدیگر را خنثی می کنند . لذا جریان هر دو رتور صفر است و سلسین ها

هیچ گونه گشتاور گشتاور مثبت و منفی تولید نمی کند .



اینک حالتی را در نظر بگیرید که بار موتور محرک ۲ اندکی کاهش یابد در حالی که بار موتور محرک ۱ هم چنان در حالت قبلی خود باقی مانده است ، این عمل در شریط عادی به افزایش سرعت موتور ۲ منجر میشود . در سیستم فعلی گرایش به افزایش سرعت موجب جلو افتادن موتور ۲ نسبت به موتور محرک ۱ می شود و نیرو محرکه القا شده ، نسبت به نیرو محرکه متناظر در سلسین محور B درفازهای رتور سلسین محور A پیش فاز است . در نهایت ، نیرو محرکه E_r در حلقه ، موجب جاری شدن جریان رتور

در رتورهای هر دو سلسین می گردد . جهت جریان در رتورها طوری است که B را به حالت ژنراتوری و سلسین Aسلسین را به حالت موتوری می برد .

در نتیجه مقداری گشتاور مکانیکی بر محور B (به صورت بار تحمل می گردد) .

و به همان مقدار از بار A برداشته می شود و به این ترتیب تعادل لازم برای هردو سیستم محور

محور تامین می شود . توان مبادله شده بین و محور ، توان سینکرونیزاسیون و جریان به وجود آمده در مدار رتورها ، جریان سینکروزاسیون نامیده می شود.

بنابراین یک چنین سستمی همانند یک محور مکانیکی عمل نموده و برابری گشتاوری ، و دور بین دو ماشین محرک ۱و۲ است ، لذا آن را محور الکتریکی متعادل می نامند .

لازم به ذکر است گشتاور لازم جهت ایجاد تعادل توسط دو ماشین محور تولید می گردد.

به عبارت دیگر ، ماشین های محور ، اختلاف گشتاور را جبران می کنند . قدرت ماشین سلسین حدود ۱۰% قدرت موتورهای اصلی انتخاب می شوند .

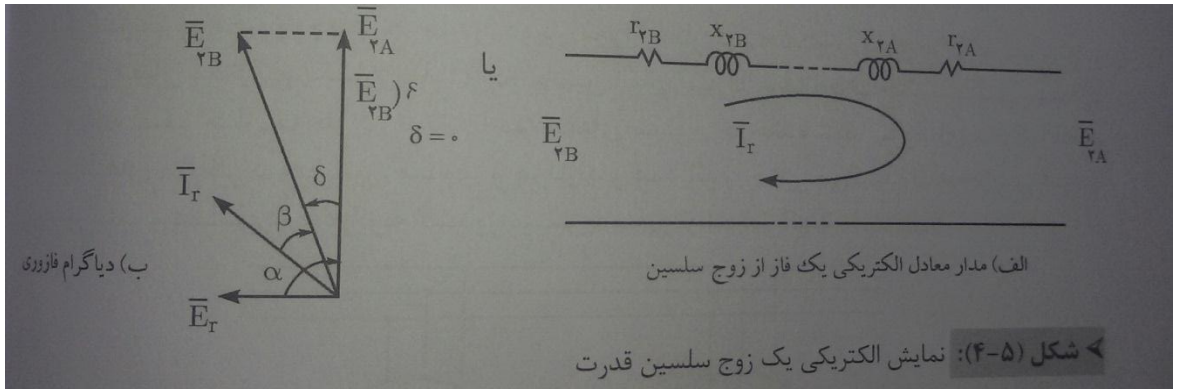
به مظور بررسی کمی مطلب فوق ، توان مبادله شده بین دو سلسین مورد بررسی قرار می گیرد . در این مدار جهت مثبت جریان طوری انتخاب شده است که ثانویه سلسین B به صورت منبع الکتریکی و ثانویه سلسین A به صورت مصرف کننده الکتریکی باشد.

با توجه به دیاگرام فازوری میتوان نوشت :

$$P_{out\ B} = E_{2B} I_r \cos\beta \qquad {}^{W}/_{phase}$$

$$P_{in\ A} = E_{2A} I_r \cos(\beta + \delta) \qquad {}^{W}/_{phase}$$

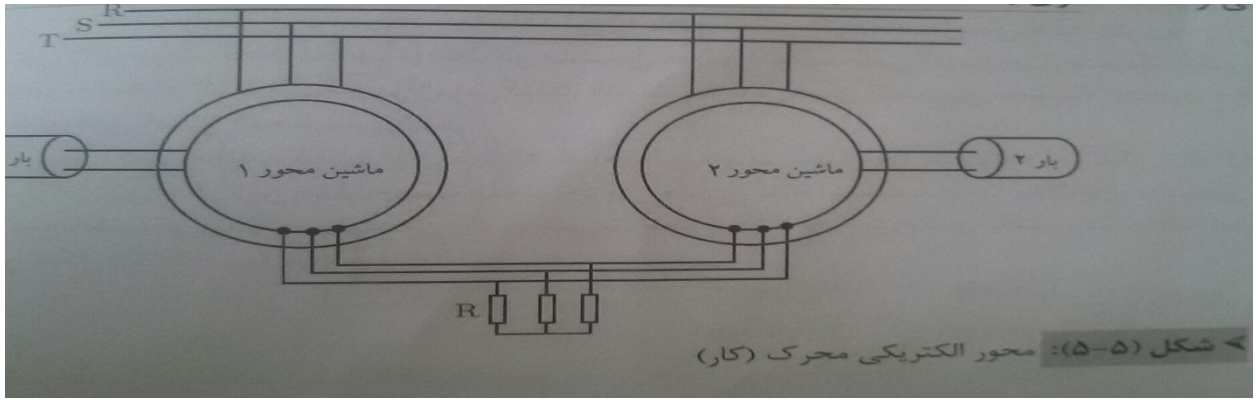
نمایش الکتریکی یک زوج سلسین قدرت :



شکل (۵-۴): نمایش الکتریکی یک زوج سلسین قدرت

محور الکتریکی محرک (کار)

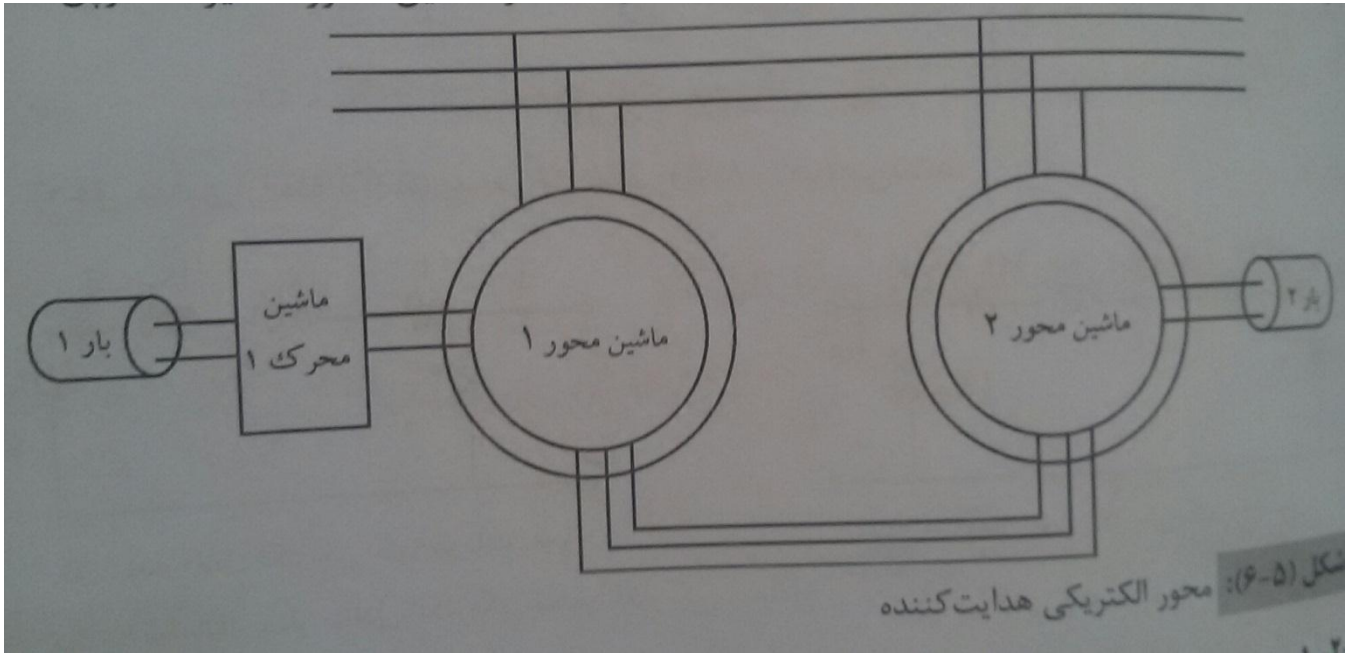
معمولا موتورهای محرک ۱و۲ از نوع آسنکرون هستند . بنابراین در صورت امکان منطقی خواهد بود که از این ماشین ها در عین حال به عنوان ماشین محور نیز استفاده کرده و بدین ترتیب دو موتور را از سیستم خذف نماییم ، به این نوع سلسین قدرت ، محور الکتریکی محرک گویند. در این حالت هنگامی که اختلاف دو رتوربا استاتورشان برابرشود ،ولتاژهای القایی در رتورها برابر بوده ، بنابراین جریانی جاری نخواهد شد و گشتاوری نیز نخواهیم داشت ، پس به منظور تولید گشتاور باید ما بین سیم پیچ رتورها از یک R (مقاومت) استفاده شود ، این مقاومت ها به صورت ستاره یا مثلث بسته می شوند و کوپل طرفین نامساوی می شوند ، بعلاوه باید توان تلفات مقاومت ها نیز باید لحاظ شود .



شکل (۵-۵): محور الکتریکی محرک (کار)

محور الکتریکی هدایت کننده

نوع سوم سلسین قدرت یعنی محور الکتریکی هدایت کننده به صورتی است که در این نوع محور ، ماشین محرک ۱ ، کوپل هردو طرف را تولید می کنند و محور الکتریکی ، کوپل مورد نیاز بار ۲ را به آن منتقل می کنند . در این حالت ، ماشین محور ۱ فرستنده و ماشین محور ۲ گیرنده کوپل است .



شکل (۵-۶): محور الکتریکی هدایت‌کننده

سینکرو ها

سینکروها وسایل الکترومغناطیسی AC هستند که به وفور در سیستم های سرو* به کار می روند ، بعلاوه در بسیاری از تاسیسات لازم است که موقعیت یک محور در اتاق فرمان نشان داده میشوند یا اینکه موقعیت آن از اتاق فرمان تنظیم شود در حالی که خود محور ممکن است در دوست ها قرار داشته باشد . سینکروسیله ای است که می تواند جابجایی مکانیکی را به سیگنال الکتریکی مبدل سازد .

بر همین اساس ، سینکرو در سیستم کنترل برای انتقال موقعیت و وضعیت محور و هم چنین برای تثبیت سنکرونیزم (هم زمانی) بین دو یا چند محور به کار رود .

در این بخش به توصیف خوصوصیات ساختاری و تئوری عملکرد سینکروها پرداخته میشود:

خصوصیات ساختاری

انواع مختلفی از سینکروها و کاربردهای گوناگون از آن ها وجود دارد ولی چهار نوع عمده ی آن ها عبارتند از :

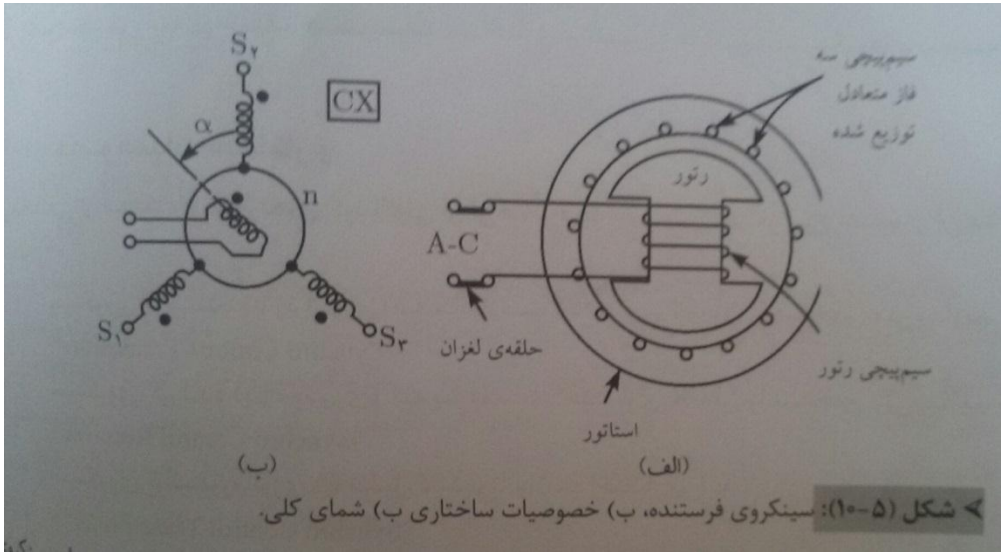
۱. سینکرو فرستنده یا ژنراتوری که با علامت اختصاری CX آن را مشخص میکنند .
۲. سینکرو گیرنده یا موتوری که با علامت اختصاری CR آن را مشخص می کنند .
۳. سینکرو ترانسفورماتوری یا تبدیل کننده با علامت اختصاری CT
۴. سینکرو تفاضلی که علامت اختصاری آن CD است .

1.Synchro control transmitter
2. Synchro control receiver
3. Synchro control transformer
4. Synchro control differential

در شکل (۵-۱۰)
سینکروی فرستنده (CX) دارای استاتوری سه فاز است مانند ماشین های سنکرون .
رتور این سینکروها از نوع قطب برجسته است ، که حاوی یک سیم پیچ است . اگر از طریق حلقه های لغزان به سیم پیچ رتور ، ولتاژ AC اعمال می گردد و جریان تحریک جاری می شود و شار متناوبی در امتداد رتور شکل میگیرد . بر اساس تعریف ، وضعیت صفر الکتریکی رتور متناظر با ماکزیمم کوپلاژ با سیم پیچی S_2 استاتور انتخاب میگردند.

به عنوان دیگر هنگامی که رتور در راستای محور مغناطیسی سیم پیچ S_2 می گیرد این وضعیت را وضعیت صفر الکتریکی می نامند .اما از انجا که رتور در وضعیت دارای ماکزیمم کوپلاژ می گردد ،درشکل (۵-۱۰-ب) به کمک قرار داد نقطه ، یک صفر الکتریکی یکتا (که در بالا توضیحات لازم ارائه گردیده است)
تعریف می شود ، بعلاوه دلیل اصلی دو قطبی بودن این ماشین ، لزوم منحصربودن زاویه الکتریکی با زاویه مکانیکی متناظر با آن است ، زیرا اطلاعات مکانیکی در این ماشین به صورت زاویه الکتریکی با ماشین دور دست مبادله میشود و تنها در صورت دو قطبی بودن ماشین ، ۳۶۰ درجه الکتریکی نماینده ی ۳۶۰ درجه مکانیکی خواهد بود.
شکل (۵-۱۰-ب) رتور در وضعیتی نشان داده می شود که نسبت به وضعیت صفر به میزان زاویهα جابه جایی دارد . به واسطه مشابهت ساختاری با ژنراتور سنکرون سه فاز میتوان سینکرو فرستنده را یک ژنراتور مینیاتوری قلمداد کرد . اما درک تفاوت های عملکردی این دو ماشین بسیار حائز اهمیت است . ژنراتور سنکرون با ولتاژ مستقیم تحریک می شود و در سرعت ثابت چرخانده می شود و در ترمینال استاتور آن یک ولتاژ سه فاز تولید می شود .در مقابل ، سینکرو با ولتاژ متناوب تک فاز ، و تحریک ساکن است. ولذا ولتاژ القایی تک فاز به خاطر عمل ترانسفورماتوری در سیم پیچ استاتور ایجاد می شود.

شکل های (۵-۱۰)



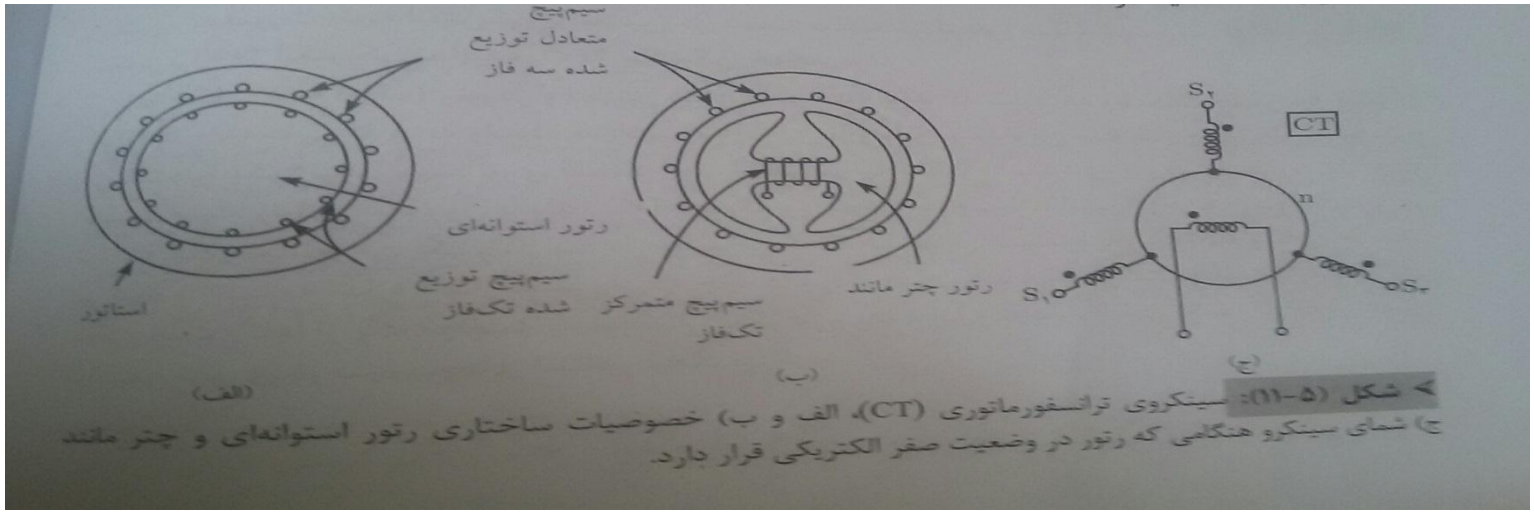
شکل (۵-۱۰): سینکروی فرستنده، ب) خصوصیات ساختاری ب) شمای کلی.

جزئیات ساختاری سینکروی ترانسفورماتوری ،مطابق شکل (۵-۱۱) تا حدودی با سینکروی فرستنده فرق دارد . یک تفاوت مهم ، فاصله ی هوایی یکنواخت با به کارگیری رتور استوانه ای یا رتور چرخ مانند می باشد . علت یکنواختی فاصله ی هوایی آن است که جریان مغناطیس کنندگی کشیده شده سینکروی ترانسفورماتوری مینمم گردد .

بعلاوه پایانه های رتورCT عمدتا به یک تقویت کننده وصل است و برای خروجی این این تقویت کننده یک امپدانس ثابت صرفه نظر از موقعیت رتور ایجاد می شود .تفاوت دیگر در نحوه ی تعیین صفر الکتریکی در CT ها است .

در سینکروهای ترانسفورماتوری ، وضعیت صفر الکتریکی رتور متناظربا کوپلاژ صفر با سیم پیچ S_2 استاتور می باشد . این وضعیت متعامد رتور و سیم پیچ S_2 استاتوردر شکل (۵-۱۱-ج) نشان داده شده است . گرچه در سینکروهای ترانس فورماتوری سه فاز است اما امپدانس هر فاز استاتور در سینکروهایCT از امپدانس هر فاز استاتور در سینکروهای CX بیشتر است . این امر باعث می شود که چندین سینکروی CT از یک سینکروی CX تغذیه گردند .

(سینکروی ترانسفورماتوری الف ، خصوصیات ساختاری رتور استوانه ای و چتر مانند ب ، شمای سینکروی هنگامی که رتور در وضعیت صفرالکتریکی قرار دارد ج)

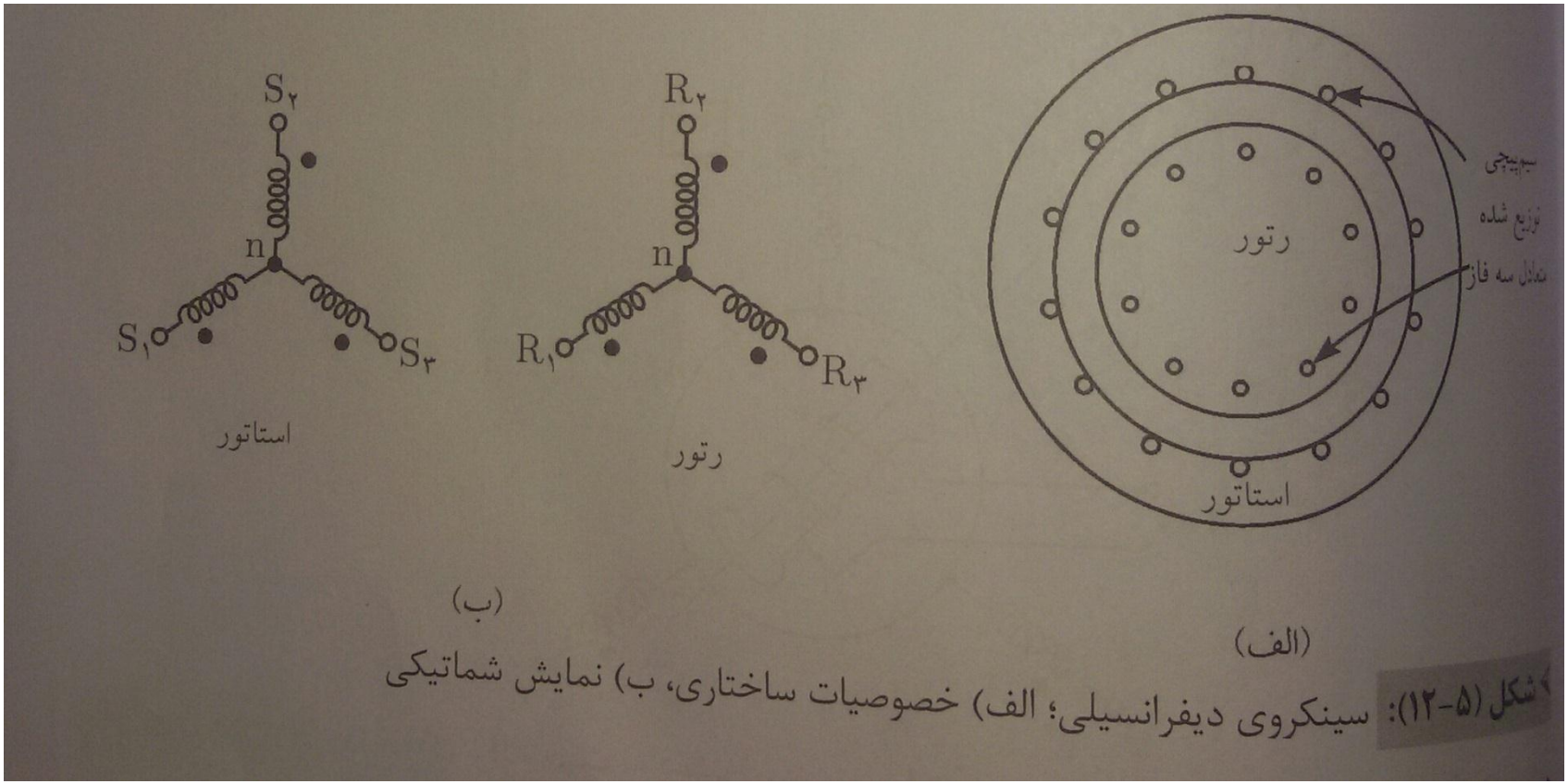


شکل (۵-۱۱): سینکروی ترانسفورماتوری (CT)، الف و ب) خصوصیات ساختاری رتور استوانه‌ای و چتر مانند ج) شمای سینکرو هنگامی که رتور در وضعیت صفر الکتریکی قرار دارد.

درسینکروی دیفرانسیلی سیم پیچی رتور نیز به صورت سه فاز توضیع شده است و مطابق شکل زیر استوانه ای است . اگر چه سیم پیچی ها سه فازند اما یادآوری شود که این مجموعه ها منحصرا با ولتاژهای تک فاز مرتبطند .

ساختار اصلی سینکروهای گیرنده شبیه سینکروهای فرستنده می باشد . به عبارت دیگر سینکروهای CR نیز دارای استاتور سه فاز و رتور با قطب برجسته می باشد و رتور حاوی یک سیم پیچ تک فاز است . یک تفاوت سینکروهای گیرنده و فرستنده در وجود یک دمپر مکانیکی بر روی شافت آن می باشد . در شرایط نرمال ، هر دو سیم پیچ رتور و استاتور با جریان تک فاز تحریک می شوند . در نتیجه ، از تقابل توزیع دور رتور و استاتور گشتاور ایجاد می گردد . هدف دمپر آن است که به رتور گیرنده اجازه دهد که به تغییر توزیع آمپر دور استاتور پاسخ دهد بدون آنکه جهش قابل توجهی اتفاق افتد . چنان چه جهت بزرگ باشد ممکن است گشتاور متوسط تولید گردد به گونه ای که گیرنده همانند یک موتور تک فاز شروع به چرخش کند .

سینکروی دیفرانسیلی الف ، خصوصیات ساختاری ب ، نمایش شماتیکی ج



شکل (۵-۱۲): سینکروی دیفرانسیلی؛ الف) خصوصیات ساختاری، ب) نمایش شماتیکی

روابط ولتاژی

برای درک بهتر کاربرد سینکروها ، باید دریافت که چگونه ولتاژهای استاتور با تغییر مکان رتور عوض می شوند .

روابط ولتاژی به صورت زیر میباشد :

ولتاژ رتور را با فرم زیر در نظر می گیریم :

$$e_r = \sqrt{2}E_r \sin \omega t$$

که مقدار موثر ولتاژ القایی در سیم پیچ رتور E_r است

ولتاژالقا شده در هر فاز استاتور به خاطر عمل ترانسفورماتوری به قرار زیر است:

$$e_{1n}(\mathrm{t}) = \sqrt{2}\mathrm{a}E_r \sin \omega t \cos(\alpha - 120)$$

$$e_{2n}(\mathrm{t}) = \sqrt{2}aE_r \sin \omega t \cos \alpha$$

$$e_{3n}(\mathrm{t}) = \sqrt{2}E_r \sin \omega t \cos(\alpha + 120)$$

مقدار موثر نیز به قرار زیر است :

$$E_{1n} = \mathrm{a}E_r \cos(\alpha - 120)$$

$$E_{2n} = \mathrm{a}E_r \cos \alpha$$

$$E_{3n} = \mathrm{a}E_r \cos(\alpha + 120)$$

واضح است که مقدار ولتاژهای موثر خط به خط عبارتند از :

$$E_{12} = E_{1n} - E_{2n} = \sqrt{3} a E_r \cos(\alpha - 150)$$
$$E_{23} = E_{2n} - E_{3n} = \sqrt{3} a\ E_r \cos(\alpha - 30)$$
$$E_{31} = E_{3n} - E_{1n} = \sqrt{3} a E_r \cos(\alpha + 90)$$

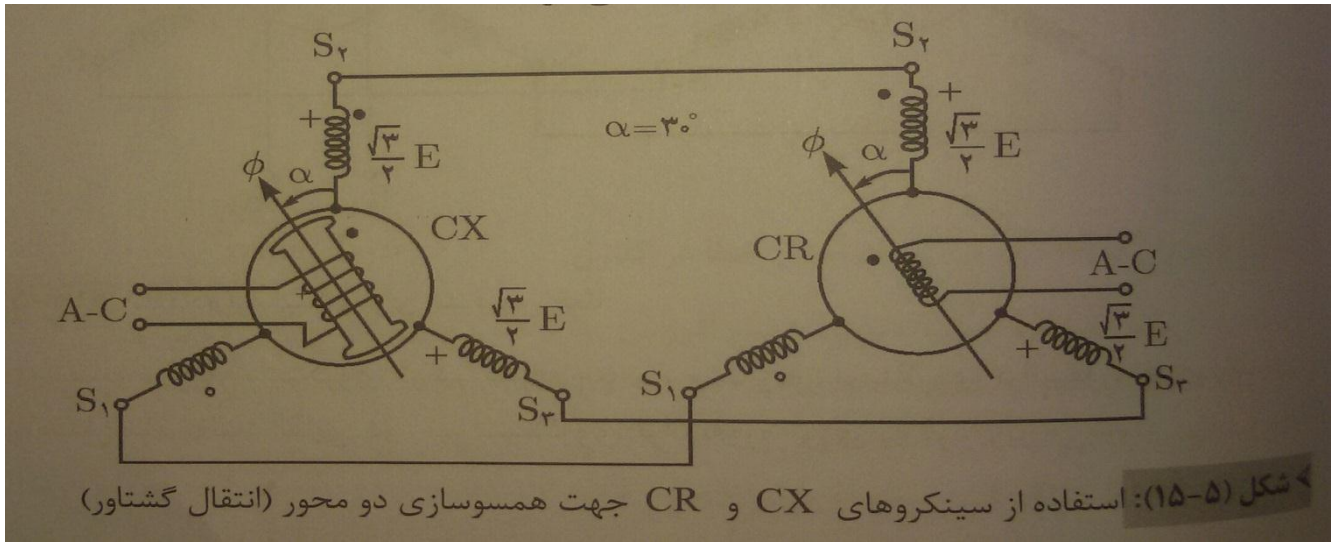
کاربردها

سینکروها به وفور در سیستم های کنترل و سرومکانیزم به کار می روند . در ادامه به بعضی از کاربردهای متداول آن ها اشاره می گردد .

- انتقال گشتاور

از سینکروها میتوانیم برای انتقال گشتاور در مسافتی طولانی بدون وجود اتصال مکانیکی استفاده نمود . شکل زیر شمای سیستمی را برای همسوسازی دو محور نشان می دهد .
در این سیستم از دو سینکرو گیرنده و فرستنده استفاده می شود . در این سیستم ،
سیم پیچی های استاتور دو سینکرو به هم وصلند و رتور آنها از یک منبعAC تغذیه میشود.

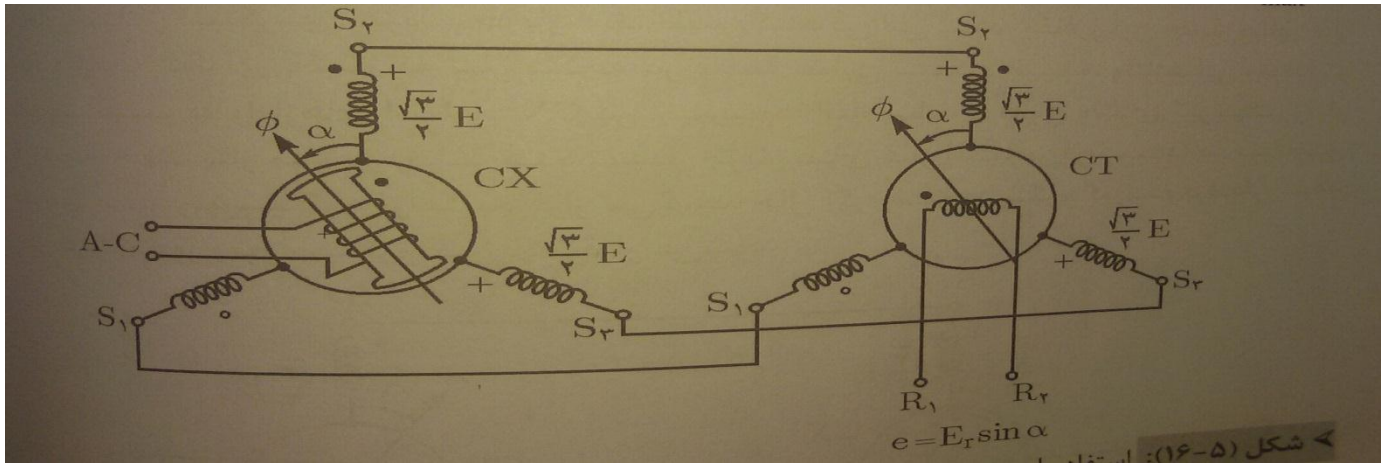
ابتدا فرض کنید رتور سینکرو فرستنده تغذیه گردد و به میزانα(که در اینجا ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است) جابه جا شود ، در این صورت در استاتور سینکرو فرستنده ولتاژ القا می شود و بالطبع سیم پیچ های استاتور سینکروی گیرنده جریان مغناطیس کنندگی می کشند ؛ مقادیر این این ولتاژ القا شونده به گونه ای باید باشد که شار منتجه در فاصله هوایی گیرنده ولتاژ را در خود القا کند تا قانون ولتاژی کیرشهف برقرار شود و حال اگر رتور سینکرو گیرنده برقدار گردد میدانی در جهت محور رتور سینکرو گیرنده برقرار می شود .



شکل (۵-۱۵): استفاده از سینکروهای CX و CR جهت همسوسازی دو محور (انتقال گشتاور)

تشخیص خطا

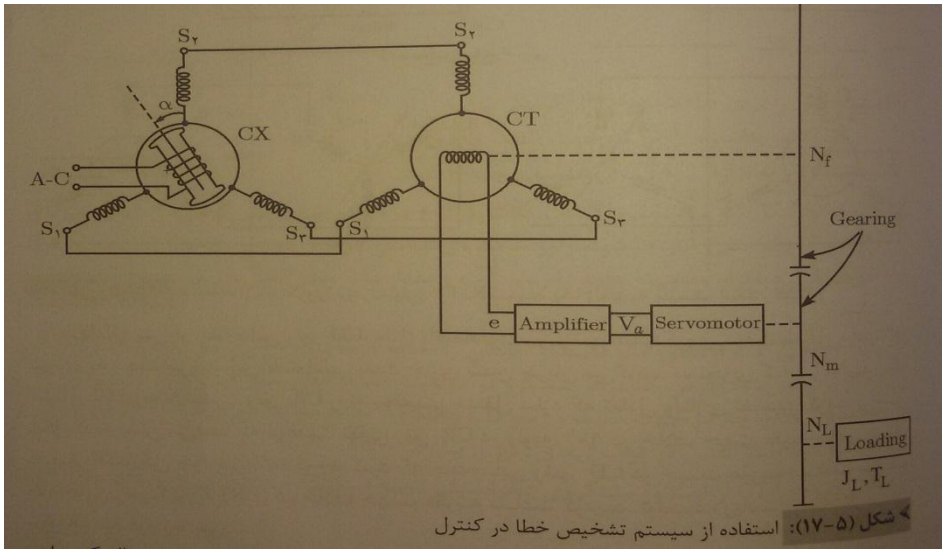
از سینکرو می توان برای تشخیص خطا در سیستم کنترلی استفاده نمود . شکل زیر چنین سیستمی را نشان می دهد . در این نوع سیستم ها از یک سینکرو گیرنده و یک سینکرو ترانسفرماتوری استفاده می شود .فرض کنید رتور در سینکرو فرستنده به میزان زاویه α جا به جا شود ؛ در این این صورت در استاتور سینکرو فرستنده ولتاژ القا می شود و چون دو استاتور سینکرو به هم وصلند جریان برقرار می شود جریان استاتورCT میدانی در امتداد زاویه α ایجاد می گردد .حال اگر رتور سینکرو ترانسفورماتوری در وضعیت صفر الکتریکی نگه داشته شود ، مقدار موثر ولتاژ القا شده در آن برابر است با



$E=E_{max} \sin \alpha$

سیستم تشخیص خطا در کنترل :

موقعیت صفر الکتریکی دو رتور در این سینکروها ، ۹۰ درجه نسبت به هم جا به جایی دارد . لذا مادامی که این اختلاف ۹۰درجه ای وجود دارد ولتاژ خطا صفر و ولتاژ ورودی سروموتر نیز صفر است و نمی تواند بچرخد اگر محور ورودی چرخانده شود تا این اختلاف ۹۰ درجه ای در محورها به هم بخورد و در این صورت ولتاژ خطا حاصل شده و ولتاژ به سروموتور اعمال شود ، در این حالت موتور به حرکت در آمده و به نحوه ای می چرخد که ولتاژ خطا صفر شود و به عبارت دیگر جا به جایی نسبی ۹۰ درجه ای بین محورها حادث می شود.



شکل (۵-۱۷): استفاده از سیستم تشخیص خطا در کنترل

با تشکر از صبر و توجه شما
موفق باشید