ماشینهای الکتریکی

تحلیل - بهره‌برداری - کنترل

■ همراه با جواب مسائل

ویرایش دوم

P . C . Sen

تألیف : دکتر پ . س . سن

ترجمه :
دکتر مهرداد عابدی
مهندس محمد تقی نبوی

۸ ماشین‌های مخصوص

Special Machines

مقدمه

ماشین‌های الکتریکی بزرگ اعم از DC و AC عمدتاً برای تبدیل انرژی پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. امادر برخی از کاربردهای خاص به تبدیل انرژی پیوسته نیازی نیست. فی‌المثل می‌توان از حرکت بازوهای[1] آدم آهنی[2] نام برد. در این کاربرد هدف تغییر مکان بازو از وضعیتی خاص به وضعیتی دیگر است. در کاربردهایی که تبدیل انرژی پیوسته مد نظر نباشد از ماشین‌های مخصوص که عمدتاً در حالت موتوری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. اصول مربوط به این ماشین‌ها شبیه ماشین‌های الکتریکی عادی است. اما نحوه ساخت، طراحی و بهره‌برداری از آنها با ماشین‌های عادی فرق دارد. در این فصل با برخی از این موتورهای مخصوص آشنا می‌شویم.

۸-۱- سروموتور

سرو موتور[3] که گاهی به نام موتور کنترل[4] از آن یاد می‌شود، طوری طراحی و ساخته می‌شود که بتوان از آنها در سیستم‌های کنترل فیدبک[5] استفاده نمود. توان اسمی این موتورها بین چند دهم وات تا چند صد وات می‌باشد. پاسخ سرعت[6] این موتورها بسیار زیاد است و لذا باید اینرسی (لختی) آنهاکم باشد. در نتیجه قطر این ماشین‌ها کم ولی طول آنها نسبتاً زیاد است. از این موتورها در سیستم‌های رادار، آدم آهنی، کامپیوتر و ماشین‌های افزار استفاده می‌شود.

سروموتورها بر دونوع‌اند:

۱- سروموتورهای DC

۲- سروموتورهای AC

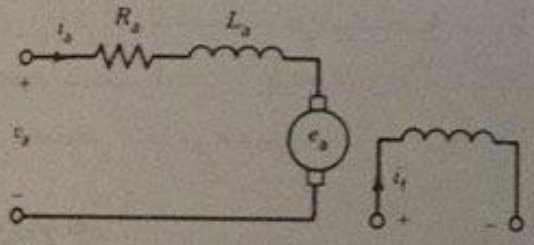
1- Arms
2- Robot
3 - Servomotor
4- Control motor
5- Feed back
6- Speed Response.

۸-۱-۱- سروموتورهای DC

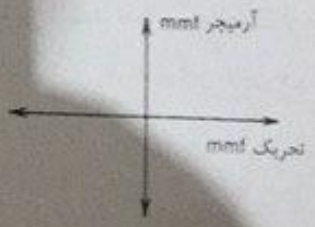
سروموتورهای DC در حقیقت یک موتور DC با تحریک جداگانه یا موتور DC با قطب‌هایی از آهن‌ربای دائم[1] است. شکل (۱ و ۸-۱) شمای یک سروموتور DC از نوع تحریک جداگانه را نشان می‌دهد. اصول اصلی عملکرد این سروموتور شبیه موتورهای DC معمولی است که در فصل ۴ راجع به آن صحبت کردیم. سروموتورهای DC عمدتاً توسط ولتاژ ارمیچر کنترل می‌شوند. ارمیچر در این موتورها طوری طراحی می‌شود که دارای مقاومت زیاد باشد. لذا مشخصه‌های گشتاور سرعت این موتورها خطی بوده و شیب منفی نسبتاً زیادی دارند (شکل ۳ و ۸-۱). باید دانست در ماشین‌های DC نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ارمیچر و mmf مدار تحریک متعامداند (شکل ۲ و ۸-۱). لذا تغییرات پله‌ای در ولتاژ ارمیچر (یا جریان) باعث می‌گردد که در موقعیت یا سرعت رتور تغییر سریع حاصل شود.

۸-۱-۲- سروموتورهای AC

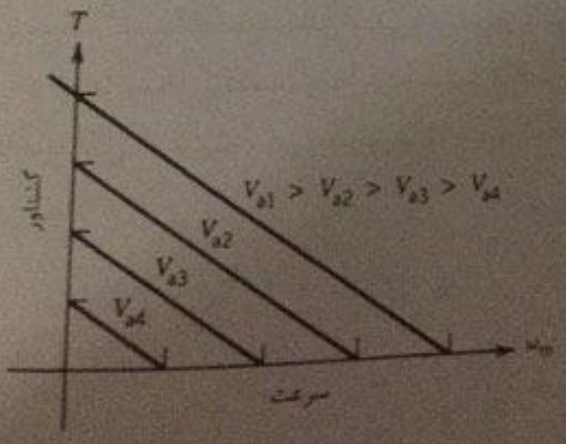
توان اسمی سروموتورهای DC از چند وات تا چند صد وات می‌باشد. در حقیقت سروموتورهای با توان اسمی بالا از نوع DC هستند. امروزه در توان‌های کم از سروموتورهای AC استفاده می‌شود. سروموتورهای



(۱)

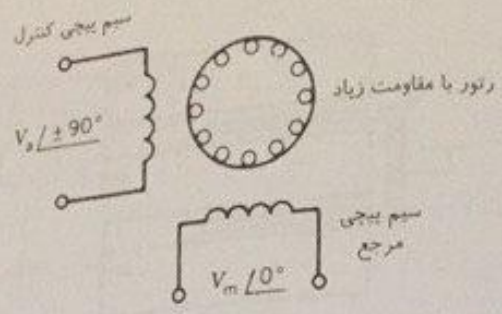


(۲)

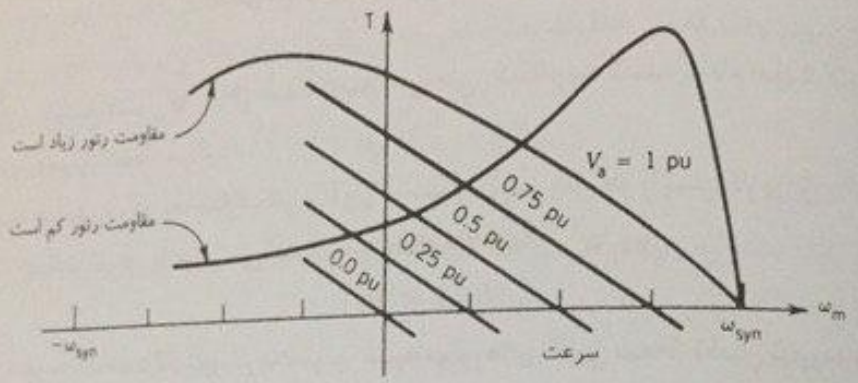


(۳)

شکل ۸-۱ سروموتور DC ۱- شمای مدار یا مدار معادل ۲- mmf ارمیچر و mmf مدار تحریک ۳- مشخصه‌های گشتاور - سرعت



(۱)



(۲)

شکل ۸-۲ سرو موتور AC دو فاز ۱ - شمای موتور ۲ - مشخصه‌های گشتاور سرعت

AC جون سخت بوده و اینرسی (لختی) آنها نیز کم است اما باید متذکر شد که سروموتورهای AC غیرخطی هستند و مشخصه‌های گشتاور سرعت آنها بخوبی و ایده‌الی سروموتورهای DC نمی‌باشند. گفتنی است که گشتاور سروموتورهای AC از گشتاور سروموتورهای DC با توان اسمی یکسان کمتر است. اکثر سروموتورهای AC که در سیستم‌های کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند از نوع موتورهای القایی دو فاز[1] با رتور قفس سنجابی می‌باشند. شکل (۱ و ۸-۲) شمای سروموتورهای AC دو فاز را نشان می‌دهد. در این موتورها استاتور حاوی دو سیم‌پیچی است که در طول محیط استاتور درون شیارها توزیع و گسترده شده‌اند. این دو سیم‌پیچی به قرار زیر تشریح می‌شوند.

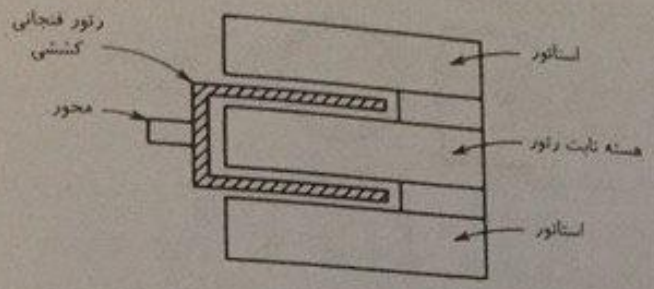
۱- سیم‌پیچی اول که به سیم‌پیچی مرجع[2] یا سیم‌پیچی فاز[3] ثابت معروف است و به منبع ولتاژ ثابت $V_m \angle 0°$ متصل می‌باشد (شکل ۱ و ۸-۲).

۲- سیم‌پیچی دوم که به سیم‌پیچی کنترل فاز[4] موسوم می‌باشد به منبع ولتاژ متغیر V_a متصل می‌شود. در این موتورها داریم:

الف: محورهای مغناطیسی دو سیم‌پیچ فوق الذکر بر هم عمودند

ب: زاویه ولتاژ متغیر V_a همواره $\pm 90°$ درجه است.

1- Two phase induction motors
2- Reference winding
3- Fixed phase winding
4- Control phase winding



شکل ۸-۳ ساختمان رتور فنجانی شکل کششی

ج : ولتاژ سیم‌پیچ کنترل فاز (V_a) عمدتاً توسط خروجی یک تقویت کننده به نام تقویت کننده سرو[1] مهیا شده و به موتور اعمال می‌گردد.

د : جهت چرخش موتور به اختلاف فاز V_m و V_a بستگی دارد و پس فاز یا پیش فاز بودن V_a نسبت به V_m جهت چرخش موتور را عوض می‌کند. در شرایط دو فاز متعادل[2] داریم:

$$|V_m| = |V_a|$$

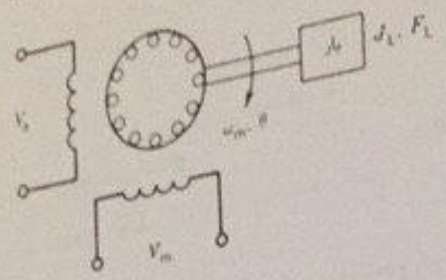
در این صورت مشخصه گشتاور سرعت موتور شبیه موتورهای القایی سه فاز (فصل ۵) بوده و در مواقعی که مقاومت رتور کم است. این مشخصه غیرخطی شده و همانند شکل (۲ و ۸-۲) می‌باشد. چنین مشخصه‌ای جایگاهی در سیستم‌های کنترل ندارد. اما اگر مقاومت رتور زیاد باشد، مشخصه گشتاور سرعت در محدوده وسیعی از تغییرات سرعت، تقریباً خطی می‌شود. این امر در شکل (۲ و ۸-۲) نشان داده شده است. شکل (۲ و ۸-۲) مشخصه‌های خطی را برای ولتاژهای گوناگونی نشان می‌دهد و می‌بینیم با تغییر V_a به مشخصه‌های خطی مختلفی جهت کنترل موتور دست می‌یابیم.

اگر توان مورد نیاز پائین باشد رتور را طوری می‌سازند که اینرسی (لختی) آن کم شود. این نوع سرو موتورهای AC در شکل (۸-۳) نشان داده شده است. در این موتورها برای ساخت قسمت دوار رتور از یک هادی غیرمغناطیسی فنجانی شکل نازک استفاده می‌شود (قسمت هاشورزده شکل ۸-۳). از آنجایی که این هادی نازک است، مقاومت رتور بشدت افزایش می‌یابد و لذا گشتاور راه‌انداز مناسبی حادث می‌شود. در این موتورها رتور حاوی یک هسته آهنی ثابت در وسط قسمت فنجانی شکل می‌باشد و در نتیجه مدار مغناطیسی کامل می‌شود. به این نوع رتورها، لفظ رتور فنجانی کششی[3] نیز اطلاق می‌گردد.

۸-۱-۳- تحلیل، تابع تبدیل[4] و نمودار جعبه‌ای[5]

شکل (۸-۴) یک سروموتور AC دو فاز را نشان می‌دهد. در این سیستم متغیر ورودی ولتاژ متغیر V_a بوده و متغیرهای خروجی وضعیت رتور (θ) یا سرعت رتور (ω_m) می‌باشند. اینرسی (لختی) بار مکانیکی با J_L و ضریب اصطکاک بار مکانیکی متصل به محور موتور با F_L نشان داده شده است.

1- Servo Amplifier
2- Balanced two phase condition
3- Drag-Cup Rotor
4- Transfer function
5- Block diagram



شکل ۸-۴ سروموتور AC دو فاز که به محور آن بار مکانیکی متصل است.

مشخصه‌های گشتاور سرعت یک موتور دو فاز نامتعادل در شکل (۲ و ۸-۲) نشان داده شده‌اند. فرض می‌کنیم مشخصه‌ها خطی بوده و فاصله این خطوط به ازاء نمو جزیی یکسان برای V_a، برابر باشد. گشتاور موتور را این چنین می‌نویسیم:

$$T = K_m V_a - F_m \omega_m \qquad (۱-۸)$$

باید دانست

۱- K_m ضریب ثابت گشتاور موتور بر حسب $N.m/Volt$

۲- F_m ضریب اصطکاک موتور بر حسب $N.m/rad/sec$

۳- F_m با F_L فرق دارد.

۴- F_m در حقیقت شیب منحنی گشتاور سرعت تحت ولتاژ V_a ثابت است.

۵- K_m در حقیقت تغییر گشتاور به ازاء تغییر V_a تحت سرعت ثابت می‌باشد.

معادله حرکت[1] سروموتور متصل به بار مکانیکی به قرار زیر است:

$$T = K_m V_a - F_m \omega_m = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m}{dt} + F_L \omega_m \qquad (۲-۸)$$

J_L و J_m به ترتیب اینرسی (لختی) بار مکانیکی و موتور می‌باشد. اگر θ وضعیت زاویه‌ای[2] بار باشد، داریم:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad \text{(سرعت سیستم)}$$

رابطهٔ (۸-۲) را این چنین می‌نویسیم:

$$K_m V_a - F_m \frac{d\theta}{dt} = (J_m + J_L) \frac{d^2\theta}{dt^2} + F_l \frac{d\theta}{dt} \qquad (۳-۸)$$

روابط (۸-۲) و (۸-۳) را این چنین می‌نویسیم:

$$K_m V_a = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m}{dt} + (F_m + F_L)\omega_m \qquad (۴-۸)$$

$$K_m V_a = (J_m + J_L) \frac{d^2\theta}{dt} + (F_m + F_L) \frac{d\theta}{dt} \qquad (۵-۸)$$

1- Equation of motion

2- Angular position

$$= \pi \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$

باید دانست:

$$\omega_n = \sqrt{27/33} = 5/228 \; rad/sec$$

$$\xi = \frac{7}{2\omega_n} = \frac{7}{2 \times 5/288} = 0/67$$

پاسخ زمان به قرار زیر است.

$$\theta(t) = \pi \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2}\, t + Cos^{-1}\xi) \right]$$

$$= \pi[1 - 1/347e^{-3/5t} \sin(3/88t + 48^\circ)] \; radian$$

شکل (ت و ۴ و ۸-۲) پاسخ زمان θ را نشان می‌دهد.

۸-۱-۴- سروموتورهای AC سه فاز

در مواقعی که به توان زیاد نیاز داریم از سروموتورهای DC استفاده می‌شود. اما امروزه تحقیقات دامنه‌داری در حال اجرا است تا بتوان از موتورهای القایی قفس سنجابی سه فاز با توان بالا به عنوان سروموتور در سیستم‌های کنترل استفاده نمود. اما این تحقیقات از حیطه این کتاب خارج است و درباره آنها بحث نمی‌کنیم. فقط اشاره می‌کنیم که روش‌های کنترلی چون کنترل بردار [1] یا کنترل جهت‌دار میدان [2] برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۸-۲- سنکرون [3]

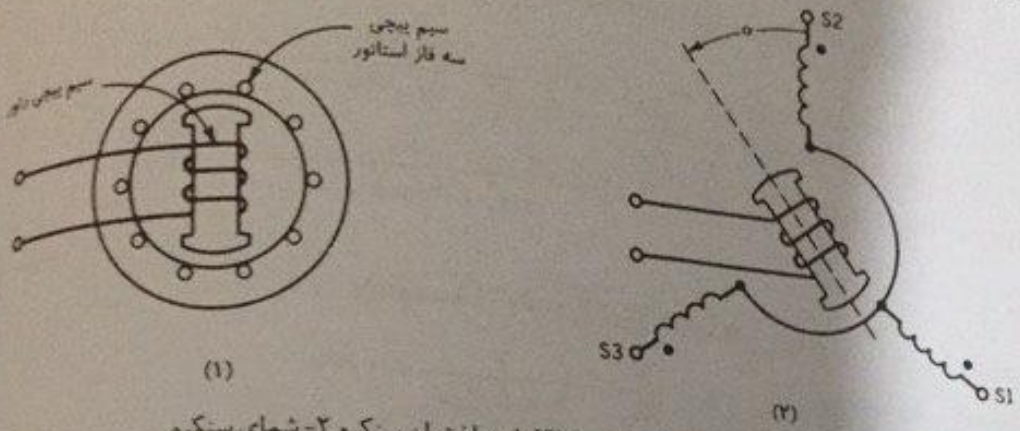
سنکرویک وسیله الکترومغناطیسی AC بوده و قادر است جابجایی مکانیکی را به زیگنال الکتریکی مبدل سازد. سنکرو در سیستم‌های کنترل برای انتقال موقعیت و وضعیت محور و همچنین برای تثبیت سنکرونیزم (همزمانی) بین دو یا چند محور به کار می‌رود. انواع مختلفی از سنکرو و کاربردهای گوناگونی از آنها وجود دارد ولی در این کتاب فقط به سه نوع آن اشاره می‌شود.

۱- سنکرو فرستنده [4] که با علامت اختصاری CX آنرا مشخص می‌سازیم.

۲- سنکروگیرنده که با علامت اختصاری CR آنرا نشان میدهیم.

۳- سنکرو تبدیل کننده یا سنکروترانسفورماتوری که با علامت اختصاری CT از آن یاد می‌کنیم.

1- Vector control
2- Field oriented control
3- Synchro
4- Synchro control transmitter

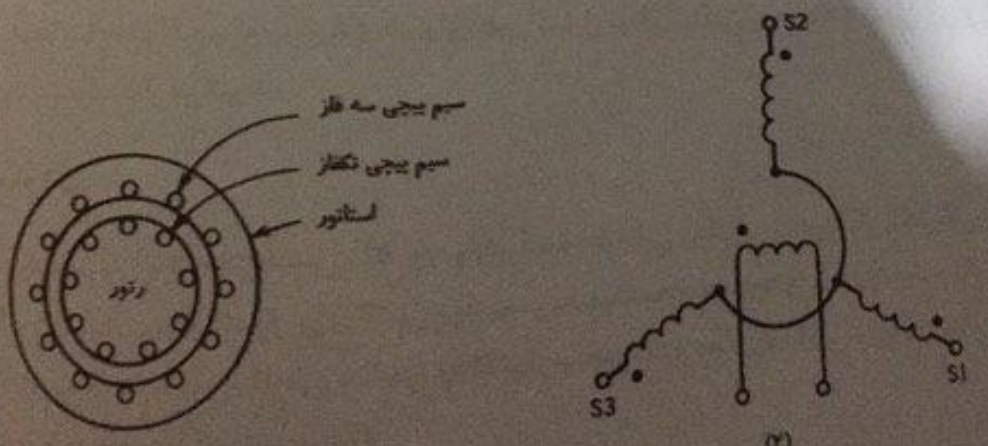


شکل ۸-۸ سنکرو فرستنده، (CX) ۱- ساختمان سنکرو ۲- شمای سنکرو

سنکرو فرستنده (CX) حاوی استاتور سه فازی شبیه ماشین‌های سنکرون است. رتور این سنکروها از نوع قطب برجسته بوده که حاوی یک سیم‌پیچ است (شکل ۱ و ۸-۸). اگر از طریق حلقه‌های لغزان به سیم‌پیچ رتور ولتاژ AC اعمال گردد، در امتداد محور رتور شار متناوبی شکل می‌گیرد. این شار متناوب بخاطر عمل ترانسفورماتوری، در سیم‌پیچ‌های استاتور ولتاژ القاء می‌کند.

اگر رتور در راستای محور مغناطیسی سیم‌پیچی S_2 قرار گیرد (شکل ۳ و ۸-۸) در این صورت شار دور این سیم‌پیچی استاتور ماکزیمم (بیشینه) بوده و این وضعیت را وضعیت الکتریکی صفر[2] می‌نامند. در شکل (۲ و ۸-۸) رتور در وضعیتی است که نسبت به وضعیت صفر به میزان زاویه α جابجایی دارد.

سنکرو تبدیل کننده یا سنکروترانسفورماتوری (CT) در شکل (۱ و ۸-۹) نشان داده شده و رتور آن استوانه ایست و لذا با شکاف هوایی یکنواخت روبرو هستیم. علت یکنواختی شکاف هوایی آن است که پایانه‌های رتور



شکل ۸-۹ سنکرو تبدیل کننده یا سنکرو ترانسفورماتوری ۱- ساختمان سنکرو ۲- شمای سنکرو رتور در وضعیت الکتریکی صفر قرار دارد.

1. Flux linkage 2. Electrical zero position

عمدتاً به یک تقویت کننده وصل است و برای خروجی این تقویت کننده یک امپدانس ثابت صرف نظر از موقعیت رتور حادث می‌شود. موقعیت الکتریکی صفر برای این سنکروها در شکل (۲ و ۸-۹) نشان داده شده است (وضعیت رتور و سیم‌پیچ S_2 در استاتور). در سنکروهای CT استاتور نیز سه فاز است، اما امپدانس هر فاز استاتور در سنکروهای CT از امپدانس هر فاز استاتور در سنکروهای CX بیشتر است. این امر باعث می‌گردد که چندین سنکرو CT از یک سنکرو CX تغذیه گردند.

سنکروهای گیرنده (CR) شبیه سنکروهای فرستنده (CX) هستند. به عبارت دیگر سنکروهای CR نیز حاوی استاتور سه فاز و رتور با قطب برجسته می‌باشند و رتور حاوی یک سیم‌پیچ تک‌فاز است.

۸-۲-۱- روابط ولتاژ

برای درک بهتر کاربردهای سنکرو، باید دریافت که چگونه ولتاژهای استاتور با تغییر مکان رتور عوض می‌شوند. شکل (۸-۱۰) شمای یک سنکرو فرستنده (CX) را نشان می‌دهد. به سیم‌پیچ رتور ولتاژ AC تک‌فاز اعمال می‌کنیم و وضعیت مکانی رتور را از وضعیت الکتریکی صفر به موقعیت شکل (۸-۱۰) تغییر مکان می‌دهیم (زاویه α). ولتاژ رتور به قرار زیر است:

$$e_r = \sqrt{2}\, E_r \sin \omega t \qquad (۸-۱۱)$$

ولتاژهای القایی در سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور به کوپلاژبین سیم‌پیچ‌های استاتور و رتور بستگی دارند که

$$a = \frac{\text{تعداد حلقه‌ها یا دوره‌های مؤثر استاتور}}{\text{تعداد حلقه‌ها یا دوره‌های مؤثر رتور}} \qquad (۸-۱۲)$$

ولتاژهای القاء شده در هر فاز استاتور بخاطر عمل ترانسفورماتوری به قرار زیر است:

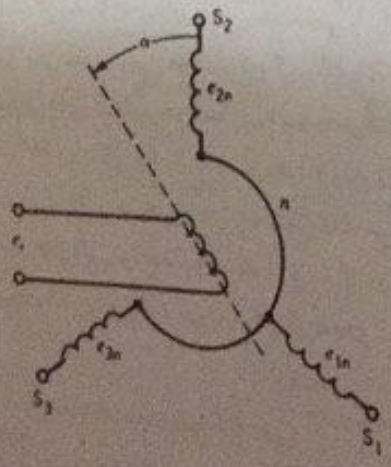
$$e_{1n} = \sqrt{2}\, aE_r \sin \omega t \cos(\alpha + 120^\circ) \qquad (۸-۱۳)$$

$$e_{2n} = \sqrt{2}\, aE_r \sin \omega t \cos \alpha \qquad (۸-۱۴)$$

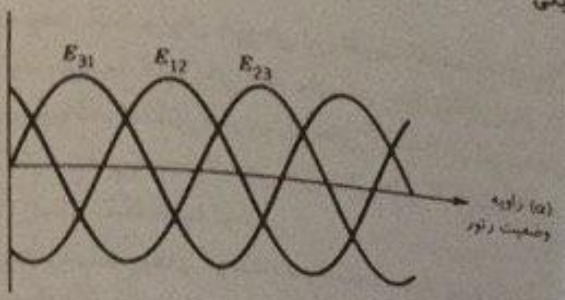
$$e_{3n} = \sqrt{2}\, aE_r \sin \omega t \cos(\alpha - 120^\circ) \qquad (۸-۱۵)$$

مقدار مؤثر (rms) این ولتاژها به قرار زیر است:

$$E_{1n} = aE_r \cos(\alpha + 120^\circ) \qquad (۸-۱۶)$$



شکل ۸-۱۰ ولتاژهای رتور و استاتور در یک سنکرو فرستنده (CX)



شکل ۸-۱۱ تغییرات ولتاژهای پایانه‌های سنکرو فرستنده بر حسب موقعیت رتور (زاویه α)

$$E_{2n} = aE_2 \cos\alpha \quad (۱۷-۸)$$

$$E_{3n} = aE_r \cos(\alpha - ۱۲۰^\circ) \quad (۱۸-۸)$$

ولتاژهای مؤثر 'خط - خط'[10] به قرار زیراند:

$$E_{12} = E_{1n} - E_{2n} = \sqrt{3}\, aE_r \sin(\alpha - ۱۲۰^\circ) \quad (۱۹-۸)$$

$$E_{23} = E_{2n} - E_{3n} = \sqrt{3}\, aE_r \sin(\alpha + ۱۲۰^\circ) \quad (۲۰-۸)$$

$$E_{31} = E_{3n} - E_{1n} = \sqrt{3}\, aE_r \sin\alpha \quad (۲۱-۸)$$

ولتاژهای پایانه سنکرو بر حسب موقعیت رتور یا محور (زاویه α) در شکل (۸-۱۱) نشان داده شده‌اند. باید دانست در هر موقعیتی (زاویه α) برای هر فاز استاتور ولتاژ معینی حادث می‌شود.

۸-۲-۲-کاربردها

سنکروها به‌وفور در سیستم‌های کنترل و سرومکانیسم[2] به‌کار می‌روند. دو کاربرد متداول آنها را در ذیل تشریح می‌کنیم.

انتقال گشتاور[3]

از سنکروها می‌توان استفاده نمود تا گشتاور را در مسافتی طولانی بدون وجود اتصال مکانیکی منتقل نمود. شکل (۸-۱۲) شمای چنین سیستمی را برای هم سوسازی دو محور نشان می‌دهد.

در این سیستم از دو سنکرو گیرنده (CX) و فرستنده (CR) استفاده می‌شود. در این سیستم سیم‌پیچی‌های استاتور دو سنکرو به هم وصل‌اند و رتور آنها از یک منبع AC تک‌فاز تغذیه می‌شوند. گیرنده کلید SW_1 در شکل (۸-۱۲) بسته باشد و رتور سنکرو فرستنده به میزان زاویه α جابجایی پیدا کند. در این صورت در استاتور سنکرو فرستنده ولتاژ القاء می‌شود و بالمال در سیم‌پیچ‌های سنکرو گیرنده جریان برقرار می‌شود. حال اگر رتور سنکرو گیرنده برق دار گردد (کلید SW_2 بسته شود) در این صورت میدان در جهت محور رتور سنکرو گیرنده برقرار می‌شود. در اثر تداخل میدان رتور و میدان استاتور در سنکرو گیرنده، گشتاور به

1. Line-to-line
2. Srvomechanism
3. Torque transmission

موقعیت الکتریکی صفر دو رتور در این دو سنکرو ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر جابجایی دارد لذا تا مادامیکه این اختلاف ۹۰ درجه‌ای وجود دارد، ولتاژ خطا[1] (e) صفر بوده و لذا ولتاژ ورودی سروموتور (V_a) نیز صفر است و سروموتور نمی‌چرخد. اگر محور و رودی چرخانده شود تا این اختلاف ۹۰ درجه‌ای بین محورها به هم بخورد در این صورت ولتاژ خطا(e) حاصل شده و پس از تقویت به صورت V_a به سروموتور اعمال می‌شود. در این حال موتور به حرکت درآمده و به نحوی می چرخد که ولتاژ خطا صفر شود و به عبارت دیگر جابجایی نسبی ۹۰ درجه‌ای بین محورها حادث گردد.

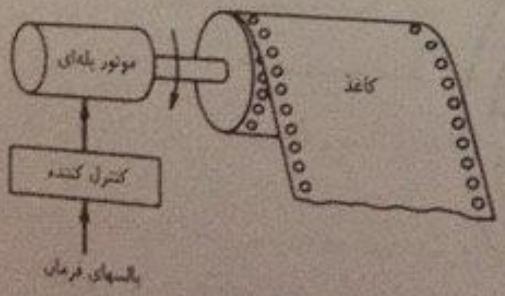
۸-۲- موتورهای پله‌ای[2]

موتورهای پله‌ای می‌توانند تحت پالس‌های الکتریکی ورودی چند درجه بچرخند. معمولاً اندازه یاگام پله‌ها[3] ۲، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۵ درجه به ازاء هر پالس الکتریکی می‌باشد. موتورهای پله‌ای مبدل‌های الکترومغناطیسی هستند و قادراند پالس‌های دیجیتالی ورودی را به حرکتی برروی محور مبدل سازند. از این موتورها در سیستم‌های کنترل دیجیتالی استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها، قطاری از پالس‌ها[4] ایجاد می‌شود تا به صورت پله‌ای یا گام به گام محور موتور بچرخش درآید. معمولاً در این موتورها به حس کننده وضعیت[5] و سیستم‌های فیدبک جهت هم‌آهنگی حرکت محور و پالس ورودی فرمان، نیازی نیست. در چاپگرهای[6] کامپیوتر و محرکهای دیسک[7] کامپیوتر و ادمهای آهنی از این موتورها استفاده می‌شود. شکل (۸-۱۵) کاربرد موتورهای پله‌ای را در یک چاپگر نشان می‌دهد. هرگاه به موتور پالس اعمال شود محور قدری می‌چرخد و چاپگر به سهولت عمل می‌نماید. امروزه موتورهایی ساخته شده‌اند.

که در یک دور کامل چندین حتی تا ۴۰۰ پله یاگام را طی می‌نمایند. طرحهای جدیدی از این موتورها قادراست ۱۲۰۰ پالس در ثانیه را دریافت کند و توان اسمی این گونه موتورها تا چندین اسب بخار می‌باشد موتورهای پله‌ای بر دو نوع‌اند:

۱- موتورهای پله‌ای با مقاوت مغناطیسی (رلوکتانس) متغیر[8]

۲- موتورهای پله‌ای از نوع مغناطیس دائم[9]



شکل ۸-۱۵ چرخاندن کاغذ برای چاپگر توسط یک موتور پله‌ای

1- Error Voltage
2- Stepper motors
3- Step size
4- Trainof pulses
5- Position sensor
7- Disk drives

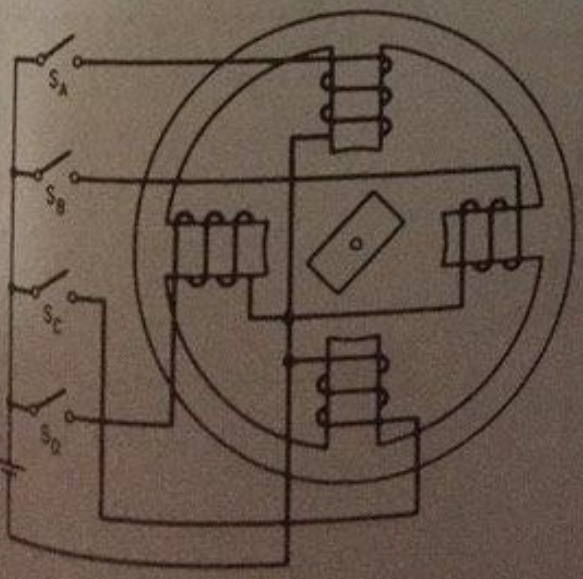
۸-۳-۱- موتورهای پله‌ای با رلوکتانس متغیر

این موتورها یک تکه یا چند تکه هستند.

موتورهای پله‌ای یک تکه (تک پارچه)[۱]

شکل (۸-۱۶) شمای یک موتور تک‌تکه‌ای (تک پارچه)، دو قطبی و چهارفاز از نوع رلوکتانس متغیر را نشان می‌دهد. هرگاه فازهای استاتور به نوبت توسط جریان DC تحریک شوند، شار منتجه در شکاف هوایی تغییر وضعیت داده و رتور، محور مغناطیسی شار شکاف هوایی را بخاطر ماهیت گشتاور رلوکتانسی تعقیب می‌کند. گشتاور رلوکتانسی بخاطر اینکه رتور فرومغناطیسی مایل به همسوشدن با محور میدان مغناطیسی شکاف هوایی می‌باشد، پدید می‌آید. شکل (۸-۱۷) عملکرد این گونه موتورها را با پله‌ها یا گامهای ۴۵ درجه‌ای نشان می‌دهد و جهت چرخش رتور (محور) در جهت عقربه ساعت می‌باشد. نحوه توالی و ترتیب برق‌دار کردن سیم‌پیچ‌ها بکرات A, $A+B$, B, $C+B$ و ... می‌باشد. این نحوه توالی و ترتیب برق‌دار کردن سیم‌پیچی‌ها بکرات صورت میپذیرد. هرگاه سیم‌پیچ A تحریک گردید، رتور با محور سیم‌پیچی A همسو می‌شود. آنگاه که دو سیم‌پیچی A, B تحریک شوند در این صورت میدان منتجه ۴۵ درجه در جهت عقربه ساعت می‌چرخد و رتور نیز همسو با این میدان می‌شود. حال اگر B به تنهایی برق‌دار شود، رتور ۴۵ درجه دیگر می‌چرخد و می‌توان این عملیات را تکرار کرد و به نحوه چرخش ۴۵ درجه‌ای رتور (محور) بهتر پی‌برد. جهت چرخش را می‌توان عوض نمود (خلاف عقربه ساعت). برای این کار باید توالی و ترتیب برق‌دار کردن سیم‌پیچ‌ها به صورت D, $D+C$, A, $A+D$ و ... باشد. اگر بخواهیم پله‌ها یا گامهای چرخش محور کوچکتر شود باید از رتورهایی با تعداد قطب‌های بیشتر استفاده نمود شکل (۸-۱۸) یک موتور پله‌ای ۶ قطبی و چهار فاز را نشان می‌دهد.

در شکل (۸-۱۸) اگر سیم‌پیچی A برق‌دار گردد، قطب P_1 در رتور خود را با محور فاز A همسو می‌کند. حال



شکل ۸-۱۶ موتور پله‌ای دو قطبی چهارفاز