فهرست

فصل هشتم/ سروها و تاکوها

سرورموتور یا موتور کنترل ۴

سرو موتورهای DC ۴

سرورموتورهای AC ۶

یک مثال از کاربرد سروموتور ۱۰

تحلیل، تابع تبدیل و بلوک دیاگرام ۱۲

تاکوژنراتور..... ۲۱

تاکوژنراتورهای DC ۲۳

تاکوژنراتورهای AC القایی ۲۳

تمرینهای فصل ۲۹

نام و نام خانوادگی دانشجوها :

حسین امیر مدحی

میلاد قانع

شهاب محمد خانلو

وحید یزدانی

علی خادم

استاد : سرکار خانم سپیده بهرآور

فصل ۸
سرورها و تاکوها

سرورموتور یا موتور کنترل

ماشینهای الکتریکی بزرگ اعم از *DC* و *AC* بطور عمده برای تبدیل مداوم انرژی مورد استفاده قرا می‌گیرند. اما در برخی از کاربردهای خاص به تبدیل مداوم انرژی نیازی نیست. مثل حرکت بازوی یک ربات که هدف تغییر مکان بازو از وضعیتی خاص به وضعیتی دیگر است. در کاربردهایی که تبدیل مداوم انرژی مدنظر نباشد از ماشینهای مخصوصی که در حالت موتوری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. اصول کار این دسته از ماشینهای الکتریکی عادی است اما نحوه ساخت، طراحی و بهره‌برداری از آنها متفاوت است. سروموتور به عنوان یکی از موتورهای مخصوص طوری طراحی و ساخته می‌شود که بتوان از آنها در سیستمهای کنترلی فیدبک‌دار استفاده نمود. توان اسمی این موتورها بین چند دهم تا چند صد وات می‌باشد. پاسخ دینامیکی این موتورها باید بسیار سریع باشد تا به سرعت از سیگنال فرمان پیروی کند. از این رو باید در مقایسه با موتورهای الکتریکی معمولی دارای لختی (اینرسی) کمتری باشد. در نتیجه قطر این ماشینها کم ولی طول آنها زیاد است. از این موتورها در سیستمهای رادار، ربات، کامپیوتر و ماشین افزار و ... استفاده می‌شود.

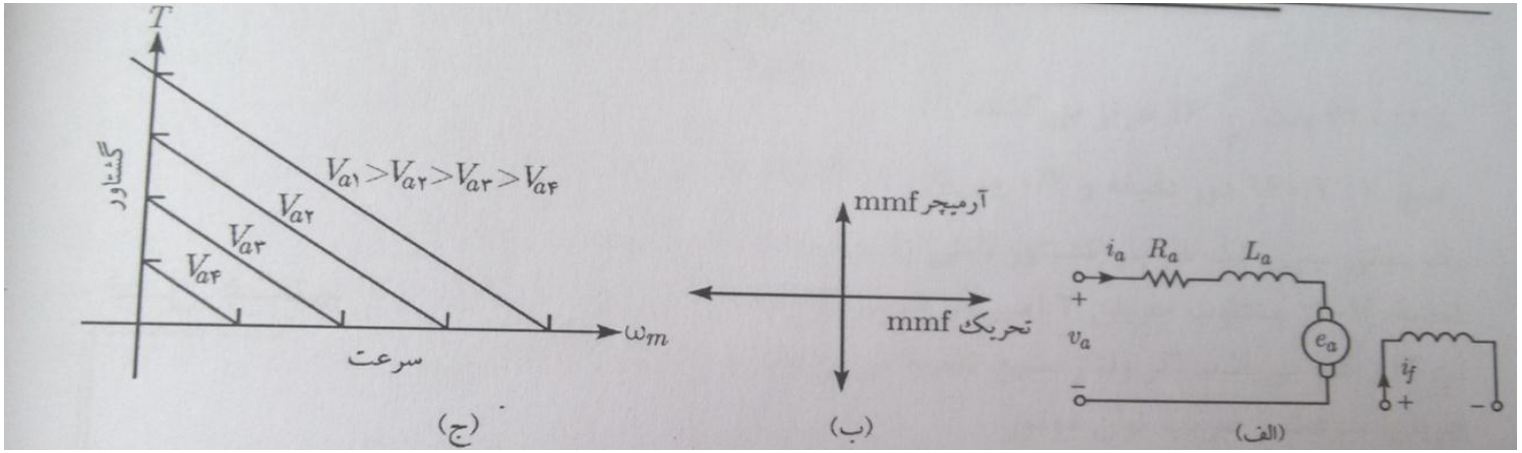
سروموتورها بر دو نوعند

- سروموتورهای *DC*
- سروموتورهای *AC*

سروموتورهای *DC*

سروموتورهای *DC* در حقیقت یک موتور *DC* تحریک جداگانه یا موتور *DC* مغناطیس دائم است. شکل (۸-۱) شمای یک سروموتور *DC*از نوع تحریک جداگانه را نشان می‌دهد. اصول کلی عملکرد این سروموتور شبیه موتورهای *DC* معمولی است.

شکل (۸-۱): سروموتور *DC*، الف) شمای مدار. ب) *mmf* های آرمیچر و استاتور ج) مشخصه‌های گشتاور سرعت



سروموتورهای *DC* عمدتاً توسط ولتاژ آرمیچر کنترل می‌شوند. آرمیچر در این موتورها طوری طراحی می‌شود که دارای مقاومت زیاد باشد. لذا مشخصه‌های گشتاور- سرعت این موتورها خطی بوده و مطابق شکل (۸-۱ ج) شیب منفی زیادی دارند. باید دانست در ماشینهای *DC*، نیروی محرکه مغناطیسی *(mmf)* آرمیچر و نیروی محرکه مغناطیسی مدار تحریک متعامدند. لذا تغییرات پله‌ای در ولتاژ آرمیچر (یا جریان) باعث می‌گردد که تغییر موقعیت یا سرعت رتور با شتاب زیاد حاصل شود.

سرورموتورهای AC

توان اسمی سروموتورهای AC 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 AC جان سخت بوده و اینرسی آنها نیز کم است اما باید متذکر شد که سروموتورهای AC غیر خطی هستند و مشخصه‌های گشتاور- سرعت آنها به خوبی و ایده آلی سروموتورهای DC نمی‌باشد. گفتنی است که گشتاور سروموتورهای AC از 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 با رتور قفس سنجابی می‌باشند. شکل (۸-۲) شمای سروموتورهای دو فاز را نشان می‌دهد. در این موتورها استاتور حاوی دو سیم پیچی است که در طول محیط استاتور درون شیارها توزیع شده‌اند. این دو سیم پیچی به قرار زیر توصیف می‌شوند:

تداخلی می شود و زاویه بین محورهای میدان های مغناطیسی استاتور و رتور زاویه گشتاور نامیده میشود.

۱- سیم پیچی اول که به سیم پیچی مرجع یا سیم پیچی فاز ثابت معروف است و به یک منبع ولتاژ AC با دامنه و فرکانس ثابت $\mathbf{V}_m \angle 0^\circ$ متصل می‌باشد. فرکانس این منبع معمولاً ۵۰، ۴۰۰ یا ۱۰۰۰ هرتز است.

۲- سیم پیچی دوم که به سیم پیچی کنترل فاز موسوم است به یک منبع ولتاژ متغیر $\overline{V}_a$ با همان فرکانس متصل می‌شود. در این موتورها داریم:

الف: محورهای مغناطیسی دو سیم پیچی بر هم عمودند.

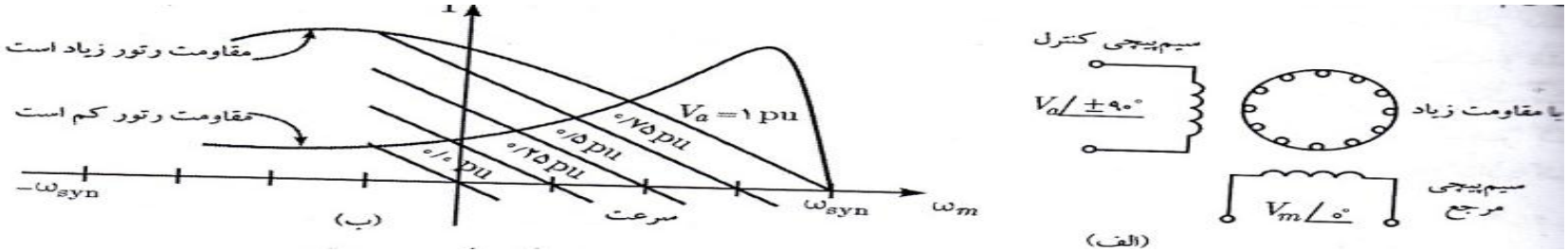
ب: زاویه ولتاژ متغیر $\overline{V}_a$ همواره $\pm 90^\circ$ است.

ج: ولتاژ سیم پیچ کنترل فاز $\mathbf{V}_a$ توسط خروجی یک تقویت کننده AC به نام تقویت کننده AC سرو تولید شده و به موتور اعمال می‌گردد.

د: جهت چرخش موتور به اختلاف فاز $\overline{V}_m$ و $\overline{V}_a$ بستگی دارد و پس فاز و پیش فاز بودن $\overline{V}_a$ نسبت به $\overline{V}_m$ جهت چرخش موتور را عوض می‌کند. در شرایطی دو فاز متقارن داریم که:

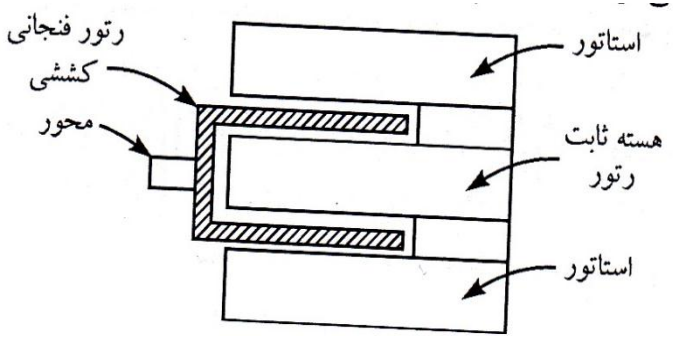
$$\left|\overline{V}_m\right| = \left|\overline{V}_a\right|$$

در شرایط فوق مشخصه گشتاور – سرعت موتور شبیه موتور القایی سه فاز متعارف بوده و در مواقعی که مقاومت رتور کم است این مشخصه غیر خطی شده و همانند شکل ۸-۲- ب) 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 موضوع در شکل (۸-۲- ب) نشان داده شده است. شکل (۸-۲- ب) مشخصه‌های خطی را برای ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد و می‌بینیم که با تغییر به مشخصه‌های خطی مختلفی جهت کنترل موتور دست می‌یابیم.



شکل ۸-۲: سروموتور *AC* دو فاز؛ الف) شمای موتور، ب) مشخصه‌های گشتاور- سرعت

اگر توان مورد نیاز پایین باشد رتور را طوری می‌سازند که اینرسی آن کم شود. این نوع سروموتورهای *AC* در شکل (۸-۳) نشان داده شده است. در این موتورها برای ساخت قسمت دوار رتور از یک هادی غیر مغناطیسی فنجانی شکل نازک استفاده می‌شود (قسمت هاشور خورده در شکل (۸-۳)). از آنجا که این هادی نازک است مقاومت رتور به شدت 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 رتورهای، رتور فنجانی کششی یا «*Drag- Cup – Rotor*» می‌گویند.



شکل (۸-۳): ساختمان رتور فنجانی شکل کششی

از آنجا که دامنه سیگنال ورودی به تقویت کننده سرو معمولاً با زمان تغییر می‌کند دامنه ولتاژ خروجی آن $\hat{V}_a$نیز به تبعیت از آن متغیر با زمان می‌شود؛ با وجود این فرکانس اصلی آن برابر فرکانس $\overline{V}_m$باقی می‌ماند. یادآوری می‌شود که ولتاژهای $\overline{V}_a$ و $\overline{V}_m$بایستی هم فرکانس باشند در غیر این صورت مقدار متوسط گشتاور تولیدی صفر خواهد بود.

شکل (۸-۴) شکل موج $v_{in}(t)$را برای یک نمونه سیگنال کنترل (خطا) به همراه شکل موج $v_a(t)$ نشان می‌دهد. چنانچه معادله ولتاژ منبع تغذیه اصلی $v_{in} = \hat{V}_{in}\sin\omega t$، فرض شود، مقدار ولتاژ لحظه‌ای اعمال شده به سیم پیچ کنترل فاز به صورت زیر خواهد بود:

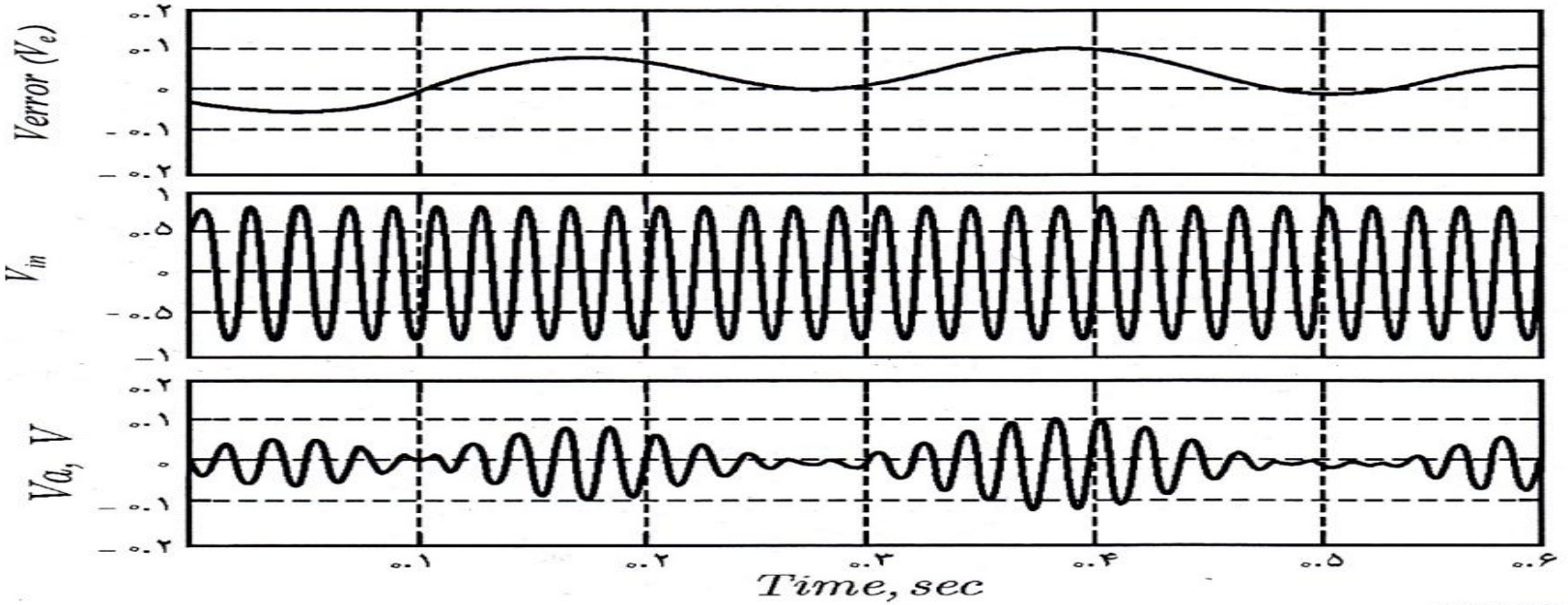
$$v_a(t) = Kv_e(t)\hat{V}_{in}\sin\omega t$$

که در آن K بهره تقویت کننده، تقریباً ثابت است. لذا بر حسب مثبت یا منفی بودن مقدار ولتاژ خطا $v_e(t)$ ، عملاً ولتاژ v_a با ولتاژ تغذیه همفاز و یا در فاز مقابل است. به عبارت بهتر:

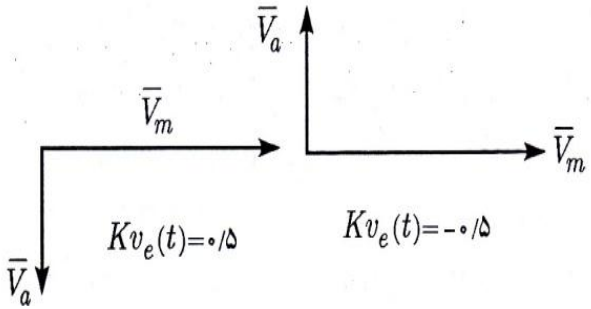
$$v_a(t) = |Kv_e(t)|V_{in}\sin\omega t; v_e(t) > 0$$
$$v_a(t) = |Kv_e(t)|V_{in}\sin(\omega t + \pi); v_e(t) < 0$$

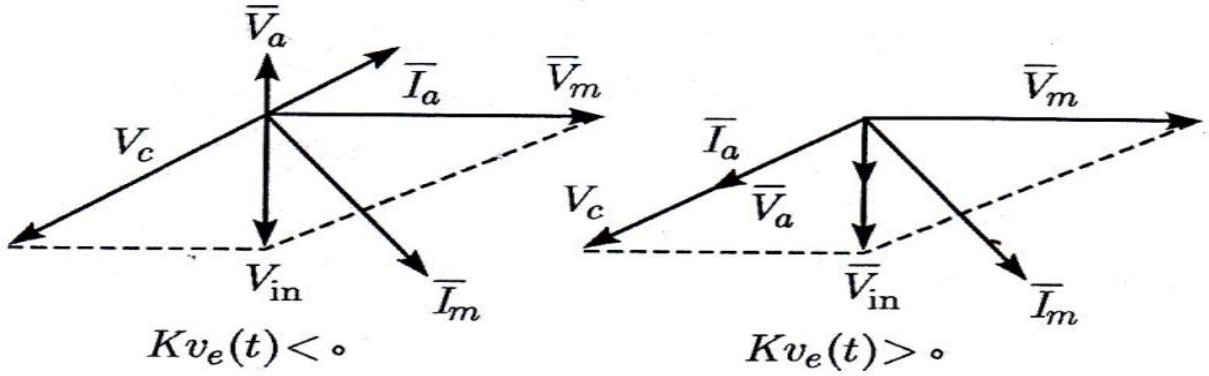
با فرض دامنه غیر صفر برای $v_a(t)$ ، فازور $v_a(t)$می‌تواند نسبت به $v_m(t)$تقدم یا تأخیر داشته باشد. نمودار فازوری شکل (۸-۵) وضعیت ولتاژهای فازهای m و a را برای مقدار مثبت و منفی $\overline{V}_a$نشان می‌دهد. در این شکل، شرایط ایده آل فرض شده و تقویت کننده و سیم پیچی m از یک منبع دو فاز تغذیه می‌شوند. چنانچه ملاحظه می‌شود تقدم و تأخر $\overline{V}_m$و $\overline{V}_a$ در دو حالت فوق تغییر کرده است و پیرو آن جهت چرخش موتور تغییر می‌کند. دلیل این موضوع قبلاً توضیح داده شده است.

شکل (۸-۴): شکل موج ولتاژهای مختلف در موتور کنترل فاز



شکل (۸-4): نمودار فازوری ولتاژهای اعمال شده به سروموتور در دو حالت مختلف





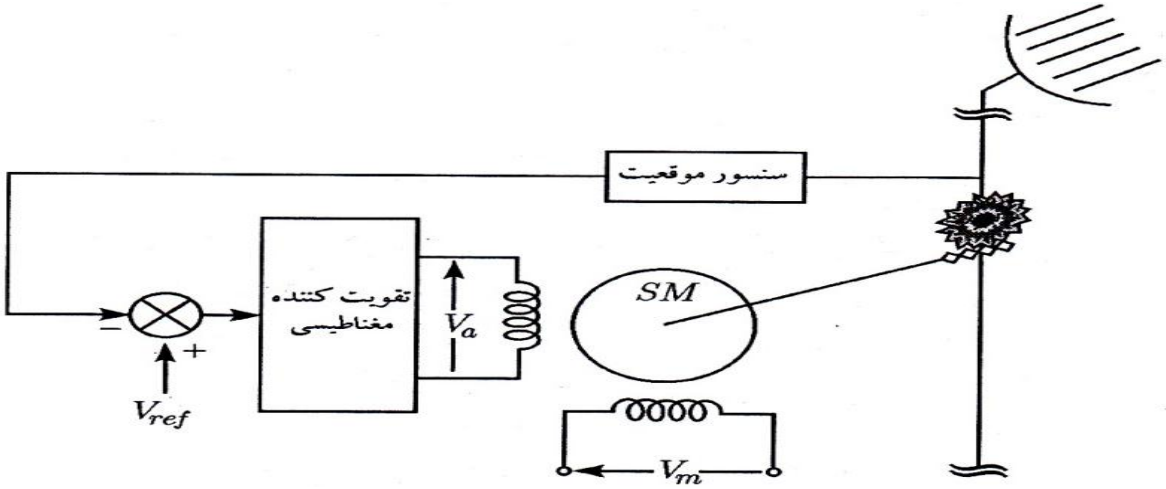
شکل (۸-۶): نمودار فازوری کاملتر یک سروموتور

شکل (۸-۶): حالتهای واقعی‌تر نمودار فازوری را برای حالتی نشان می‌دهد که سیستم از منبع یک فاز تغذیه می‌گردد. اختلاف فاز لازم توسط یک خازن مناسب که با سیم پیچ m سری شده است تولید می‌شود. در چنین حالتی با آنکه ایجاد شرایط ایده آل مقدور نیست ولی می‌توان مقدار خازن را طوری انتخاب کرد که اختلاف فاز جریانهای دو سیم پیچ تقریباً ۹۰ درجه شود.

یک مثال از کاربرد سروموتور

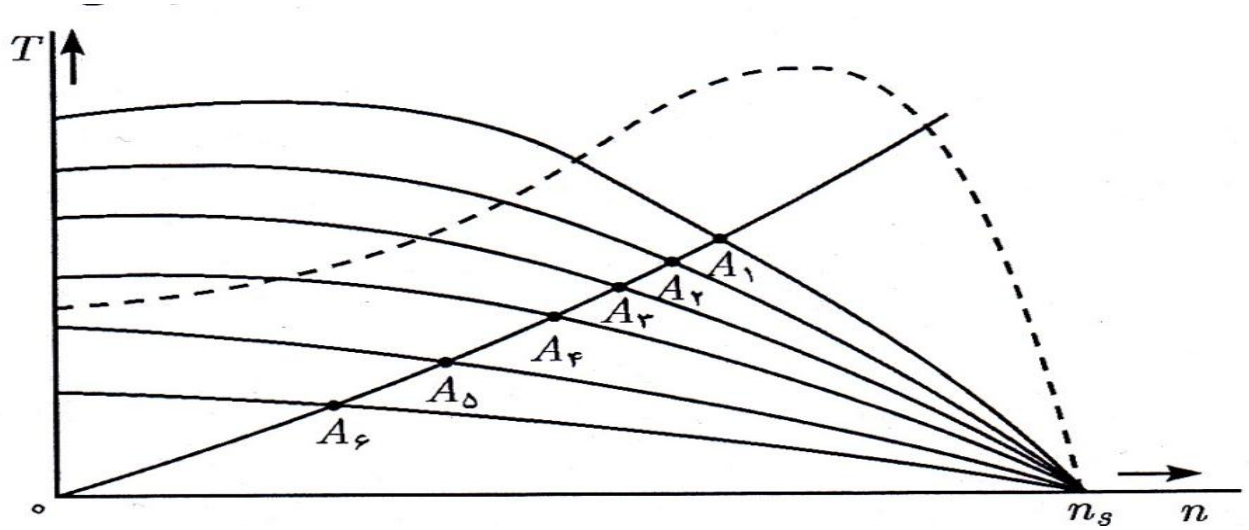
در سیستمهای کنترل اتوماتیک از سروموتور دو فاز به همراه یک حسگر موقعیت مانند سینکرو به منظور تنظیم موقعیت یک محور استفاده می‌شود. در ادامه به شرح یک مثال کاربردی می‌پردازیم.

در شکل (۸-۷) قسمتی از یک سیستم کنترل اتوماتیک که زاویه یک آنتن رادار یا ماهواره را در موقعیت از پیش تعیین شده‌ای ثابت نگه می‌دارد نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود چرخش محور نگهدارنده آنتن توسط موتور کنترل انجام می‌گیرد و در عین حال موقعیت زاویه‌ای محور هموار کننده اعمال می‌شود. مقایسه این ولتاژ با ولتاژ مرجع ولتاژهای خطای $v_e(t)$ را تولید می‌کند و پس از طی مراحل لازم موتور را در جهتی که اندازه خطا را به صفر ببرد می‌چرخاند.



شکل (۸-۷): قسمتی از یک سیستم کنترل موقعیت با استفاده از سروموتور دو فاز

اگر موتور کنترل به کار رفته در مثال فوق، در اثر خطایی با ولتاژ $V_a = ۰/۴V_m$ شروع به کار کند نقطه کار آن در لحظه راه افتادن نقطه $A_۱$ در شکل (۸-۸) خواهد بود ولی همزمان با چرخش موتور خطا (یعنی v_a) کاهش می‌یابد و موتور قبل از متوقف شدن تمامی نقاط کار موجود بین نقطه $A_۱$ تا لحظه سکون را تجربه خواهد نمود. بازده سروموتورهای دو فاز معمولاً بسیار پایین است زیرا این گونه موتورها اغلب در لغزش بالا کار می‌کنند. نامتقارن بودن ولتاژ تغذیه نیز موجب کاهش بیشتر راندمان این موتورها می‌شود؛ ولی کوتاه بودن مدت کار و نیز پایین بودن توان مصرفی این موتورها از اهمیت این موارد می‌کاهد.



شکل (۸-۸): مشخصه‌های گشتاور- سرعت یک سروموتور *ac* دو فاز به ازای مقادیر مختلف ولتاژ سیم پیچی کنترل

تحلیل، تابع تبدیل و بلوک دیاگرام

در یک سروموتور *AC* دو فاز مطابق شکل (۸-۲- الف) می‌توان ولتاژ متغیر V_a را به عنوان متغیر ورودی و وضعیت رتور (θ) یا سرعت آن (ω_m) را به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفت. با فرض خطی بود مشخصه‌های گشتاور- سرعت مطابق شکل (۸-۲- ب) و این که فاصله این خطوط به ازای نمو جزیی یکسان برای V_a ، برابر باشد می‌توان گفت گشتاور موتور برابر است با:

$$T = K_m V_a - F_m \omega_m$$

که در آن K_m ضریب ثابت گشتاور موتور بر حسب $\frac{N.m}{volt}$ ، F_m ضریب اصطکاک موتور بر حسب $N.m/rad/sec$ می‌باشد. F_m در حقیقت شیب منحنی گشتاور- سرعت تحت ولتاژ ثابت V_a است و در واقع تغییر V_a گشتاور به ازای تغیر تحت سرعت ثابت می‌باشد.

با توجه به مثال فوق، اول می‌توان گفت که برخلاف ماشین تراش یا پمپ آب که موتور القایی ممکن است ساعتها بدون وقفه در حال کار باشد مدت کار مداوم یک موتور کنترل نمی‌تواند چندان طولانی باشد؛ مثلاً در مثال فوق، اگر آنتن در محل مورد نظر قرار گرفته باشد خطا صفر و سرموتور متوقف است. اگر در اثر عاملی مثل وزیدن باد، آنتن از محل مورد نظر دور شود خطایی به وجود می‌آید و متعاقب آن موتور راه می‌افتد. ولی از آنجا که جهت چرخش در جهت رفع خطاست (فیدبک منفی) می‌توان انتظار داشت که موتور به زودی متوقف شود. ظهور خطا در نتیجه نیاز به اصلاح آن ممکن است به صورت مداوم در سیستم وجود داشته باشد. ولی آنچه مسلم است اینکه مدت چرخش موتور در یک جهت به طور مداوم چندان طولانی نخواهد بود و نیز چرخش مجدد آن پس از توقف ممکن است در جهت قبلی یا در جهت مخالف آن باشد. لذا چنین موتوری بطور مکرر راه اندازی می‌شود. همزمان با چرخش موتور در هر جهت از مقدار خطا کاسته می‌شود و انتظار می‌رود به محض رسیدن خطا به صفر، موتور نیز متوقف شود. اگر به علت اینرسی سیستم، محور در محل مورد نظر متوقف نشود جهت خطا تغییر می‌کند و فرمان چرخش موتور را در جهت عکس صادر می‌کند و در نتیجه سیستم ممکن است در حوالی مقدار نهایی مدتی نوسان کند. این مثال چند واقعیت مهم را به شرح زیر در مورد سروموتور روشن می‌سازد.

۱- سروموتور دو فاز در معرض راه اندازیهای مکرر است.

۲- ولتاژ تغذیه سروموتور ممکن است در حین چرخش در حال تغییر باشد؛ مثلاً در مثال فوق ولتاژ سیم پیچی $\overline{V}_a$ ضمن چرخش موتور در حال کاهش بوده و به محض صفر شدن خطا به صفر می‌رسد. به علاوه برای آن که موتور بتواند به خطاهای کوچک نیز پاسخ دهد لازم است که گشتاور راه اندازی موتور تا حد امکان بالا باشد.

۳- از موتور القایی معمولاً انتظار می‌رود تحت هر باری در حوالی سرعت سنکرون کار کند و در نتیجه داشتن مشخصه پایدار در همین حوالی معمولاً رضایت بخش است. اما سرو موتور بیشتر عمر خود را در سکون و یا چرخش در سرعتهای پایین سپری می‌کند. به علاوه، چنین موتوری باید در هر سرعتی که توسط مقدار خطا تعیین می‌شود به صورت پایدار کار کند و این مسأله مشخصه‌های سروموتور و موتور القایی معمولی را بسیار با هم متفاوت ساخته است.

شکل (۸-۸) دسته‌ای از مشخصه‌های گشتاور – سرعت یک موتور سروکنترل را به ازای مقادیر مختلف V_a نشان می‌دهد. در همین شکل نمونه‌ای از مشخصه موتور القایی معمولی نیز به صورت نقطه چین برای مقایسه رسم شده است. برای دستیابی به چنین مشخصه‌هایی اندازه مقاومت رتور در سروموتور طوری طراحی می‌شود که گشتاور ماکزیمم آن در سرعت صفر تولید شود.

این گشتاور موتوری باید گشتاور بار را تأمین نماید. معادله حرکت سروموتور متصل به بار مکانیکی به قرار زیر است:

$$T = k_m V_a - F_m \omega_m = (J_m + J_L)\frac{d\omega_m}{dt} + F_L \omega_m$$

J_L و J_m به ترتیب لختی (اینرسی) بار مکانیکی و موتور می‌باشد F_L نیز ضریب اصطکاک بار مکانیکی متصل به محور موتور است. اگر θ وضعیت زاویه‌ای بار باشد داریم:

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

رابطه (۸-۵) را این چنین می‌نویسیم:

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

روابط (۸-۴) و (۸-۵) را به فرم زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$K_m V_a = (J_m + J_L)\frac{d\omega_m}{dt} + (F_L + F_m)\frac{d\theta}{dt}$$

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

روابط (۸-۶) را در حوزه لاپلاس می‌نویسیم. نتیجه می‌گیریم که:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m/F}{1+s\tau_m};\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m/F}{s(1+s\tau_m)}$$

که در آن $F = F_L + F_m$ و $J = J_L + J_m$ و $\tau_m = \frac{J}{4}$ (ثابت زمانی مکانیکی سیستم) می‌باشند. بلوک دیاگرام رابطه ((۸-۷) در شکل (۸-۹) رسم شده است.

$$V_a(s) \rightarrow \boxed{\frac{K_m/F}{1+s\tau_m}} \rightarrow \omega_m(s) \qquad V_a(s) \rightarrow \boxed{\frac{K_m/F}{s(1+s\tau_m)}} \rightarrow \theta(s)$$

شکل (۸-۹): بلوک دیاگرام توابع تبدیل رابطه (۸-۷)

برای یافتن پاسخ زمانی تغییرات پله ولتاژ V_a در یک سیستم کنترل حلقه باز فرض کنید ولتاژ V_a مطابق شکل (۸- ۱۰- الف) به صورت پله‌ای افزایش یابد پس:

$$V_a(s) = \frac{V}{s}$$

از رابطه (۸-۸) داریم:

$$\omega_m(s) = \frac{K_m/F}{1+s\tau_m}.\frac{V}{s} = \frac{K_m V}{F}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+1/\tau_m}\right)$$

اگر از حوزه لاپلاس به حوزه زمان برویم داریم:

$$\omega_m(t) = \frac{K_m V}{F}\left(1 - e^{-t/\tau_m}\right)$$

سرعت در حالت ماندگار به قرار زیر است:

$$\omega_m(\infty) = k_m V / F$$

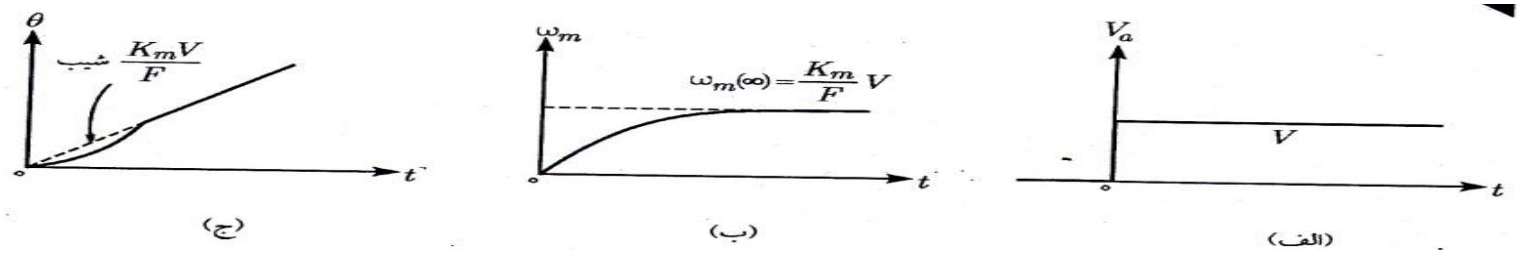
از رابطه (۸-۷) داریم:

$$\theta(s) = \frac{K_m / F}{s(1 + s\tau_m)} \cdot \frac{V}{s} = \frac{k_m V}{F s^2} - \frac{k_m V \tau_m}{F_s} + \frac{K_m V \tau_m}{F(s + 1/\tau)}$$

در حوزه زمان داریم:

$$\theta(t) = \frac{K_m V}{F} t - \frac{K_m V \tau_m}{F}\left(1 - e^{-t/\tau_m}\right)$$

پاسخ سرعت و پاسخ وضعیت در شکل (۸-۱۰ ب و ج) نشان داده شده‌اند.



شکل (۸-۱۰): پاسخ یک سروموتور AC دو فاز؛ الف) تغییرات پله‌ای در ب) پاسخ سرعت، ج) پاسخ وضعیت

مثال ۱:

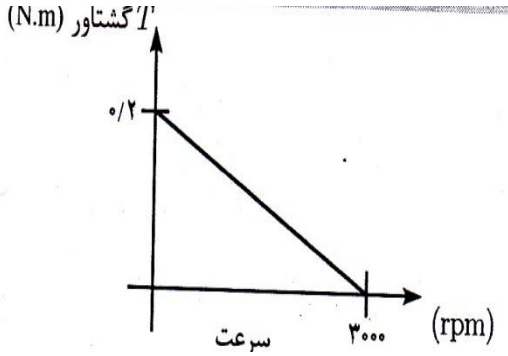
یک سروموتور دو فاز AC مفروض است. شکل (۸-۲۱) مشخصه گشتاور- سرعت موتور را تحت $V_a = ۱۱۵V$ و $f = ۶۰Hz$ نشان می‌دهد. در این موتور داریم:

$$J = J_L + J_m = ۰/۰۰۰۰۱ kg.m^۲ ; F_L \cong ۰$$

الف) تابع تبدیل $\frac{\theta(s)}{V_a(s)}$ را به دست آورید. θ وضعیت مکانی رتور یا محور را نشان می‌دهد.

ب) اگر ولتاژ V_a بصورت پله‌ای معادل ۱۱۵ ولت گردد رابطه‌ای برای θ به دست آورید.

حل :



شکل (۸-۱۱): مربوط به مثال ۱

الف) به سهولت داریم:

$$K_m = \frac{T}{V_a}\bigg|_{\omega_m = cte} = \frac{۰/۲}{۱۱۵}\bigg|_{\omega_m = ۰} = ۰/۰۰۱۷۴ \frac{N.m}{Volt}$$

$$F_\infty = \frac{T}{\omega_m}\bigg|_{V_a = cte} = \frac{۰/۲}{۳۰۰۰ \times ۲\pi/۶۰} = ۰/۰۰۰۶۳۶۶ \frac{N.m}{rad/s}$$

$$F = F_m + F_L + ۰ = F_m ; J = ۱۰^{-۵}\ kg.m^۲$$

$$\tau_m = \frac{J}{F} = \frac{۱۰^{-۵}}{۰/۰۰۰۶۳۶۶} = ۱۵/۷ \times ۱۰^{-۳}\ sec ; \frac{K_m}{F} = \frac{۰/۰۰۱۷۴}{۰/۰۰۰۶۳۶۶} = ۲/۷۳۳$$

لذا از رابطه (۸-۷) داریم:

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{۲/۷۳۳}{s\left(۱ + ۰/۰۱۵۷۱s\right)}$$

$$V_a(s) = \frac{۱۱۵}{s} ; \frac{k_m V}{F} = ۲/۷۳۳ \times ۱۱۵ = ۳۱۴/۳$$

$$\frac{K_m V}{F}\tau_m = ۳۱۴/۳ \times ۰/۰۱۵۷۱ = ۴/۹۴$$

ب) به راحتی داریم:

$$\theta(t) = ۳۱۴/۳t - ۴/۹۴\left(۱ - e^{-t/۰/۰۱۵۷۱}\right) \cong ۳۱۴/۳t$$

از رابطه (۸-۱۳) داریم:

این رابطه $\theta(t)$ بدین معنا است که با گذشت زمان موقعیت زاویه‌ای رتور بطور مداوم افزایش می‌یابد. اما معمولاً سرموتورهای *AC* دو فاز برای کاربردهایی همچون کنترل وضعیت یا موقعیت رادار ساخته می‌شوند که هدف رسیدن به یک θ معین است. چنین سیستمهایی، حلقه بسته می‌باشند.

شکل (۸-۱۲) یک سیستم کنترل حلقه بسته را نشان می‌دهد که در آن از یک سروموتور AC دو فاز برای کنترل موقعیت رادار استفاده شده است. در این سیستم کنترل، دو پتانسیومتر وجود دارد:

۱- پتانسیومتر مرجع، ولتاژ $\mathrm{E}_{\mathrm{ref}}$ را متناسب با سیگنال موقعیت مطلوب θ_{ref} تولید می‌نماید.

۲- پتانسیومتر دوم از محور سروموتور فرمان می‌گیرد و ولتاژ E را متناسب با وضعیت محور(θ) ایجاد می‌کند.

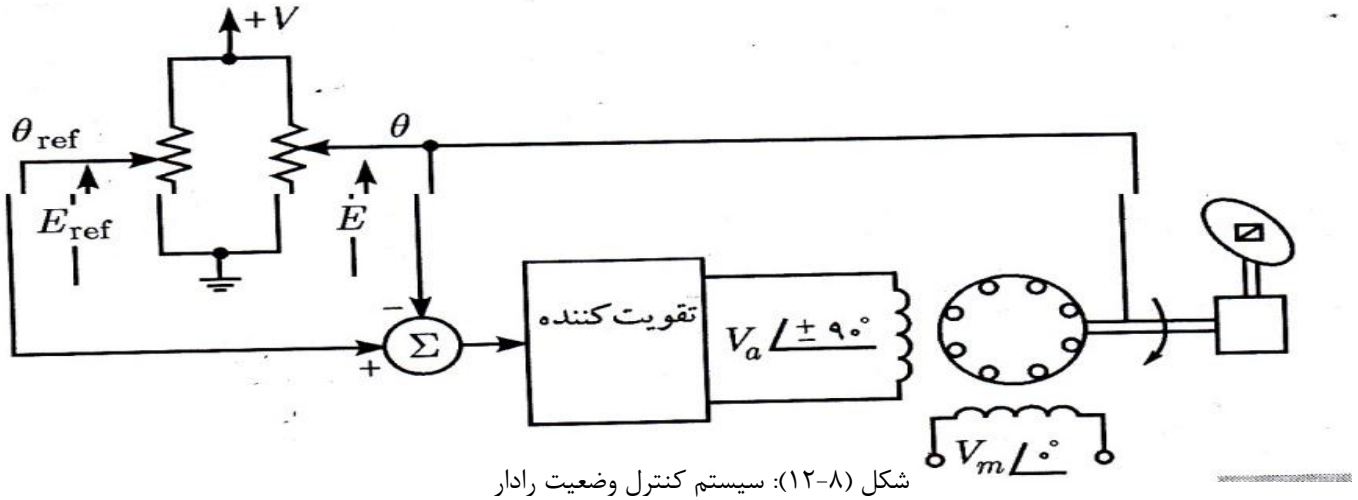
تفاوت دو ولتاژ فوق، سیگنال خطا را ایجاد می‌کند:

$$\mathrm{E}_{\mathrm{error}} = \mathrm{E}_{\mathrm{ref}} - \mathrm{E}$$

لازم به ذکر است که $\mathrm{E}_{\mathrm{error}}$ متناسب با θ_{error} است و داریم:

$$\theta_{\mathrm{error}} = \theta_{\mathrm{ref}} - \theta$$

سیگنال خطا به تقویت کننده اعمال می‌شود. این تقویت کننده ولتاژ مورد نیاز V_{a} را جهت صفر شدن خطا، مهیا می‌سازد.



شکل (۸-۱۲): سیستم کنترل وضعیت رادار

مثال ۲:

$$M(s)=\frac{\theta(s)}{V_a(s)}$$

بلوک دیاگرام مربوط به سیستم کنترل رادار در شکل (۸-۱۳- الف) نشان داده شده است. در این شکل، $G(s)$ تابع تبدیل تقویت کننده و می‌باشد. اگر سیگنال فرمان (θ_{ref}) به میزان ۱۸° به صورت پله‌ای افزایش یابد پاسخ زمانی موقعیت زاویه رادار $(\theta(t))$ را بیابید.

حل:

بلوک دیاگرام شکل (۸-۱۳ الف) را به صورت شکلهای (۸-۱۳ ب و ج) در می‌آوریم. به سهولت داریم:

$$\frac{\theta(s)}{\theta_{ref}(s)}=\frac{۲۷/۳۳/\big((s+۷)\big)}{۱+۲۷/۳۳/\big((s+۷)\big)}=\frac{۲۷/۳۳}{s^۲+۷s+۲۷/۳۳}$$

به راحتی داریم:

$$\theta(s)=\frac{۲۷/۳۳}{s^۲+۷S+۲۷/۳۳s}\frac{\pi}{s}\pi\frac{۲۷/۳۳}{s\left(s^۲+۷s+۲۷/۳۳\right)}=\pi\frac{\omega_n^۲}{s\left(s^۲+۲y\omega_n s+\omega_n^۲\right)}\theta_{ref}(s)=\pi/s$$

به طوری که:

$$\omega_n=\sqrt{۲۷/۳۳}=۵/۲۲۸\,rad/sec$$

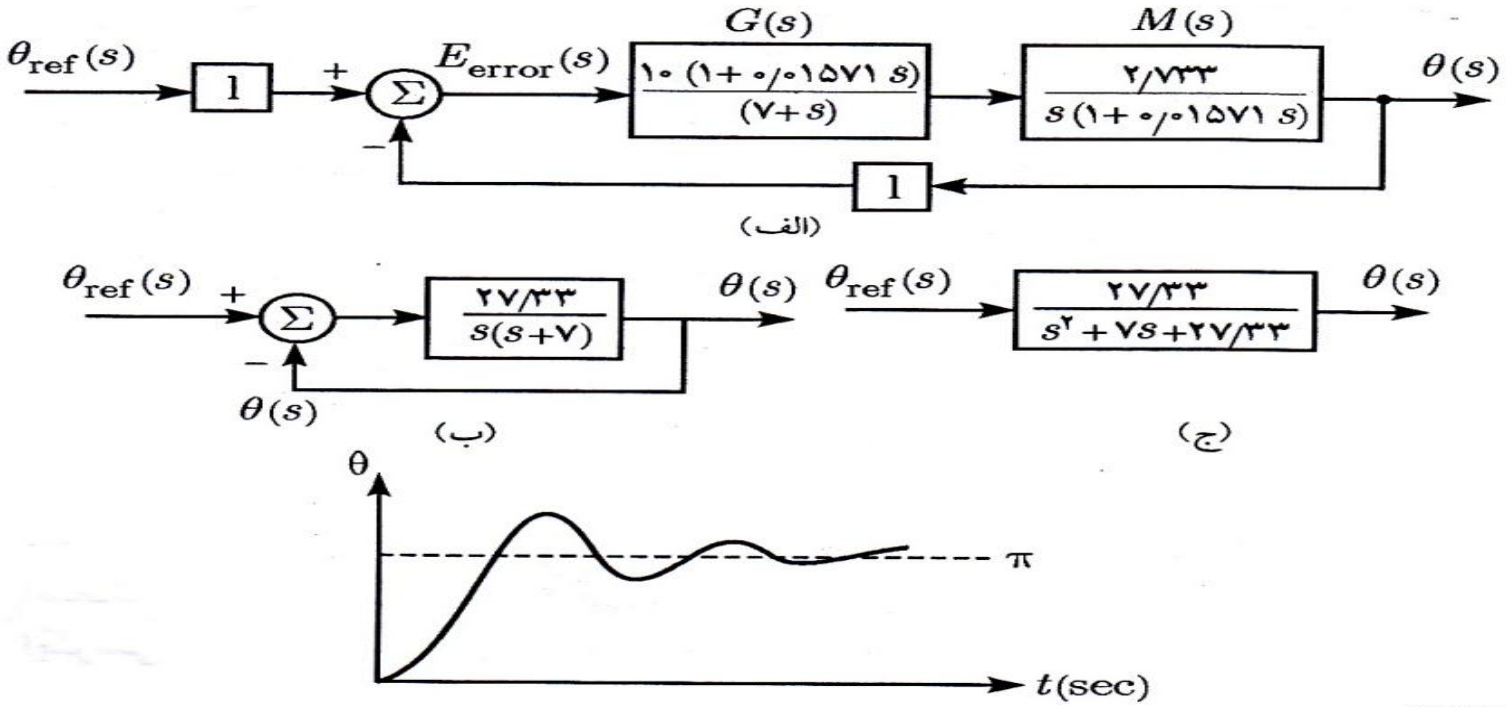
$$\zeta=\frac{۷}{r\omega_n}=\frac{۷}{۲\times a/۲۲۸}=۰/۶۷$$

لذا پاسخ زمانی به قرار زیر است:

$$\theta(t)=\pi\left[۱-\frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{۱-\zeta^۲}}\sin\left(\omega_n\sqrt{۱-\zeta^۲}\,t+\cos^{-۱}\zeta\right)\right]$$

$$=\pi\left[۱-۱/۳۴۷e^{-۳/۵t}\sin\left(۳/۸۸t+۴۸^\circ\right)\right](rad)$$

شکل (۸-۱۳ د) پاسخ زمانی $\theta(t)$ را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۱۳): مربوط به مثال ۲

تاکوژنراتور

تاکوژنراتورها، ماشینهای الکتریکی کسر- اسب بخار هستند که به صورت ژنراتور کار می‌کنند و برای تبدیل سرعت دورانی به سیگنال الکتریکی متناسب با آن به کار می‌روند. مشخصه خروجی یک تاکورژنراتور مبین منحنی تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات سرعت محور می‌باشد. معادله عمومی مشخصه خروجی یک تاکورژنراتور ایده آل به صورت زیر است:

$$V_{out} = K_g \omega = K_g d\theta / dt$$

که در آن θ زاویه چرخش رتور و k_g ضریب تقویت حالت دائم، معادل شیب مشخصه خروجی است.

مطابق معادله (۸-۱۴)) اگر θ متغیر مبنا باشد از تاکورژنراتور می‌توان به عنوان یک مشتق گیر الکترومکانیکی نیز استفاده کرد.

بر مبنای نوع طراحی و اصول کار و نیز شکل ولتاژ خروجی، تاکورژنراتورها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

الف) تاکوژنراتورهای *DC* شامل تاکوژنراتور با میدان تحریک و تاکوژنراتور با میدان مغناطیس دائم.

ب) تاکوژنراتورهای *AC* شامل تاکوژنراتورهای القایی (آسنکرون) و تاکوژنراتورهای سنکرون.

در شرایط ایده‌آل انتظار می‌رود که خروجی یک تاکوژنراتور *DC* ولتاژ صاف و بدون ریپل باشد. خروجی یک تاکوژنراتور القایی نیز تحت همان شرایط باید ولتاژ سینوسی با فرکانس و فاز ثابت باشد و تنها دامنه آن با سرعت تغییر کند. ولتاژ خروجی یک تاکوژنراتور سنکرون نیز *AC* است و فرکانس آن نیز به همراه دامنه ولتاژ خروجی متناسب با سرعت تغییر می‌کند.

تاکوژنراتورها معمولاً به صورت مستقیم و به ندرت از طریق واسطه‌هایی مانند چرخ دنده یا زنجیر به محوری که سنجش سرعت آن مورد نظر است کوپل می‌شوند. برای جلوگیری از بروز خطای بارگذاری، یک تاکوژنراتور ایده‌آل نباید هیچگونه گشتاوری اعم از استاتیکی و دینامیکی بر محور تحمیل کند. به اختصار یک تاکوژنراتور خوب باید دارای شرایط زیر باشد:

خطای دامنه کوچک :یعنی حداقل انحراف از مشخصه خروجی خطی مطابق رابطه (۸-۱۴). این خطا با ΔV نشان داده شده و به صورت اختلاف بین ولتاژ خروجی تاکو در هر سرعت و ولتاژ پیش بینی شده طبق مشخصه خروجی ایده آل در همان سرعت تعریف می‌شود.

خطای فاز کوچک (فقط برای تاکوژنراتور القایی): یک تاکو القایی از یک منبع سینوسی تحریک می‌شود و ولتاژ خروجی تاکوژنراتور در شرائط ایده آل نسبت به ولتاژ تحریک آن دارای فاز ثابتی است. میزان تغییر فاز ولتاژ خروجی نسبت به فاز ثابت مورد انتظار، $\Delta\beta$ خطای فاز تاکو نامیده می‌شود.

ضریب تقویت بالا (k_g بزرگ تا حد مورد نیاز): جهت بالا بردن حساسیت دستگاه

اصطکاک کم: جهت حداقل کردن اثر بارگذاری استاتیکی

اینرسی کم: جهت حداقل کردن اثر بارگذاری دینامیکی

ثابت زمانی الکترومغناطیسی کوچک: جت بالا بردن سرعت پاسخ دستگاه به تغییرات سرعت

در ادامه به طور مختصر به تاکوژنراتورهای *DC*اشاره می‌گردد و سپس تاکوژنراتورهای *AC* از نوع القایی مورد بحث قرار می‌گیرد.

فرکانس ولتاژ خروجی تاکوهای سنکرون متغیرند. لذا در بیشتر کاربردها لازم است که ولتاژ قبل از استفاده یکسو شود. کاربردهای ژنراتورهای سنکرون بسیار کمتر از دو نوع دیگر است و بنابراین از بحث پیرامون آنها صرفنظر می‌شود.

تاکوژنراتورهای DC

اساس تاکوهای DC از نظر اصول کار و نوع طراحی مکانیکی، مشابه ماشینهای کموتاتوردار DC (با تحریک جداگانه یا با تحریک مغناطیس دائم) است. به عبارت دیگر تاکوهای DC چیزی جز ژنراتورهای DCمعمول با قدرت بسیار پائین (کسر- اسب بخار) نسیستند، با این تفاوت که در طراحی و ساخت آنها نکات خاصی در جت بهبود مشخصه‌های مورد انتظار در نظر گرفته می‌شوند.

در این درس بنا نداریم به بررسی تاکوهای DC بپردازیم لذا به بعضی مزایا و معایب این نوع تاکوها اشاره می‌کنیم. خطی بودن، بالا بودن ضریب تقویت و نیز عدم وجود خطای فاز در تاکوژنراتورهای DC از مزایای عمده آنها به حساب می‌آید در حالی که این تاکوها معایب متعددی از جمله وجود اصطکاک و بالا بودن اینرسی قسمت رتور را دارا هستند.

علیرغم استفاده از بلبرینگ یا بوشهای با کیفیت بالا که اصطکاک را به حداقل می‌رساند وجود اتصال جاروبک کموتاتور، منبع اجتناب‌ناپذیر اصطکاک در این دستگاه است. استفاده از رتور دیسکی و نیز آرمیچر توخالی، اینرسی رتور را تا حد زیادی کاهش می‌دهد ولی در تاکوهای معمولی که آرمیچر روی هسته آهنی پیچیده شده است اینرسی بالا می‌تواند روی پاسخ دینامیکی اثر بگذارد. استفاده از رتورهای با قطر کم ولی درازتر این مشکل را تا حدی حل می‌کند. چنانکه اشاره خواهد شد تاکوهای AC از این نظر دارای شرایط خوبی هستند. استفاده از اتصال جاروبک- کموتاتور، موجب پارازیت رادیویی فرکانس بالای نامطلوبی می‌شود.

تاکوژنراتورهای AC القایی

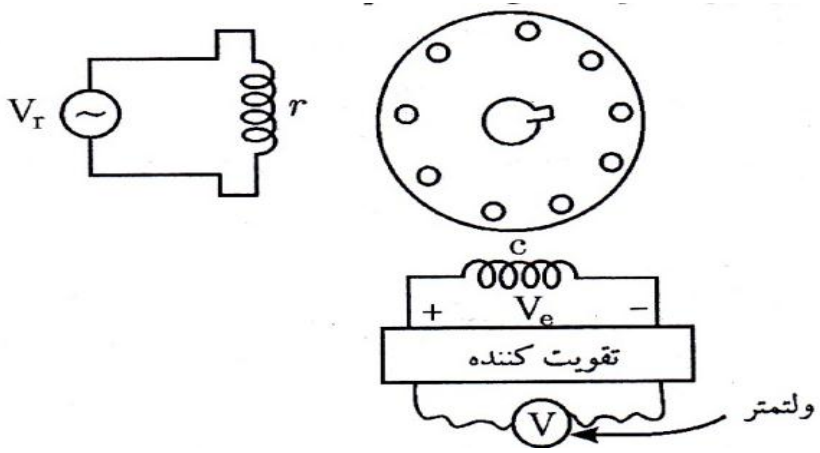
در سیستمهای کنترلی فیدبک‌دار، اغلب لازم می‌شود که سرعت زاویه‌ای یک محور به صورت یک ولتاژ AC با فرکانس ثابت اندازه‌گیری شود. یک موتور القایی دو فاز کوچک می‌تواند در نقش تاکوژنراتور AC به کار رود. البته به منظور بهبود مشخصه‌های تاکوژنراتور ممکن است تغییراتی در طراحی یک تاکو به عمل آید. برای کاهش ممان اینرسی و در نتیجه کاهش ثابت زمانی الکترومکانیکی، از رتور غیر مغناطیسی توخالی در تاکوژنراتور القایی استفاده می‌شود (رتور فنجانی شکل).

ضخامت جداره رتور در حدود ۲/۰ تا ۱ میلیمتر است. ممان اینرسی کم رتور، پاسخ دینامیکی سریع تاکو را به دنبال دارد به علاوه، اتصال مستقیم تاکو به محور سیستمی که سرعت آن اندازه‌گیری می‌شود تأثیر چندانی در اینرسی آن سیستم نخواهد داشت.

به منظور بررسی عملکرد تاکوژنراتور القایی، یک ماشین القایی دو فاز مطابق شکل (۸-۱۴) را در نظر بگیرید که شامل رتور قفس سنجابی و دو سیم پیچ روی استاتور است که به لحاظ مکانی محورهای مغناطیسی آنها بر هم عمودند. سیم پیچ *r*، به سیم پیچ میدان مرجع یا میدان ثابت مشهور است که به یک ولتاژ *AC* با دامنه و فرکانس ثابت (معمولاً ۴۰۰HZ) وصل می‌گردد. سیم پیچ دیگر استاتور، سیم پیچ مولد ولتاژ است که سیگنال خروجی از آن گرفته می‌شود و به سیم پیچ کنترل یا کمکی معروف است (سیم پیچ *C*).

هرگاه مطابق شکل (۸-۱۴) ولتاژ متناوب V_r با دامنه و فرکانس ثابت به فاز *m* اعمال گردد ولتاژی با فرکانس ثابت در فاز *c* القاء می‌گردد. سیم پیچ دیگر استاتور، سیم پیچ مولد ولتاژ است که سیگنال خروجی از آن گرفته می‌شود و به سیم پیچ کنترل یا کمکی معروف است (سیم پیچ *C*).

هرگاه مطابق شکل (۸-۱۴) ولتاژ متناوب V_r با دامنه و فرکانس ثابت به فاز *m* اعمال گردد ولتاژی با فرکانس ثابت در فاز *c* القاء می‌گردد که دامنه آن به سرعت محوری که رتور توسط آن گردانده می‌شود بستگی دارد. ولتاژ القایی V_c بعد از عبور از یک تقویت کننده می‌تواند توسط یک ولتمتر به عنوان مقیاسی از سرعت محور مورد نظر نمایش داده شود.



شکل (۸-۱۴): شمای یک تاکوژنراتور *DC* دو فاز

از آنجا که امپدانس تقویت کننده زیاد است فاز c به صورت مدار باز ظاهر خواهد شد. فاز مرجع بعد از تغذیه توسط V_r یک میدان نوسانی ایجاد می‌کند که قابل تجزیه به دو میدان گردان است. بنابراین از نظر فاز r، مدار معادل این سیستم همان مدار معادل موتور القایی تک فاز خواهد بود. این دو میدان گردان، فاز کنترل را قطع کرده و در آن ولتاژهای $\bar{E}_{cf}$ و $\bar{E}_{cb}$ القاء می‌کند. اگر جهت دوران میدان مستقیم طوری باشد که ابتدا محور فاز c و سپس محور فاز r را قطع کند خواهیم داشت:

$$\bar{E}_{cf} = ja\bar{E}_{rf} = ja\left(I_r.z_f/۲\right)$$

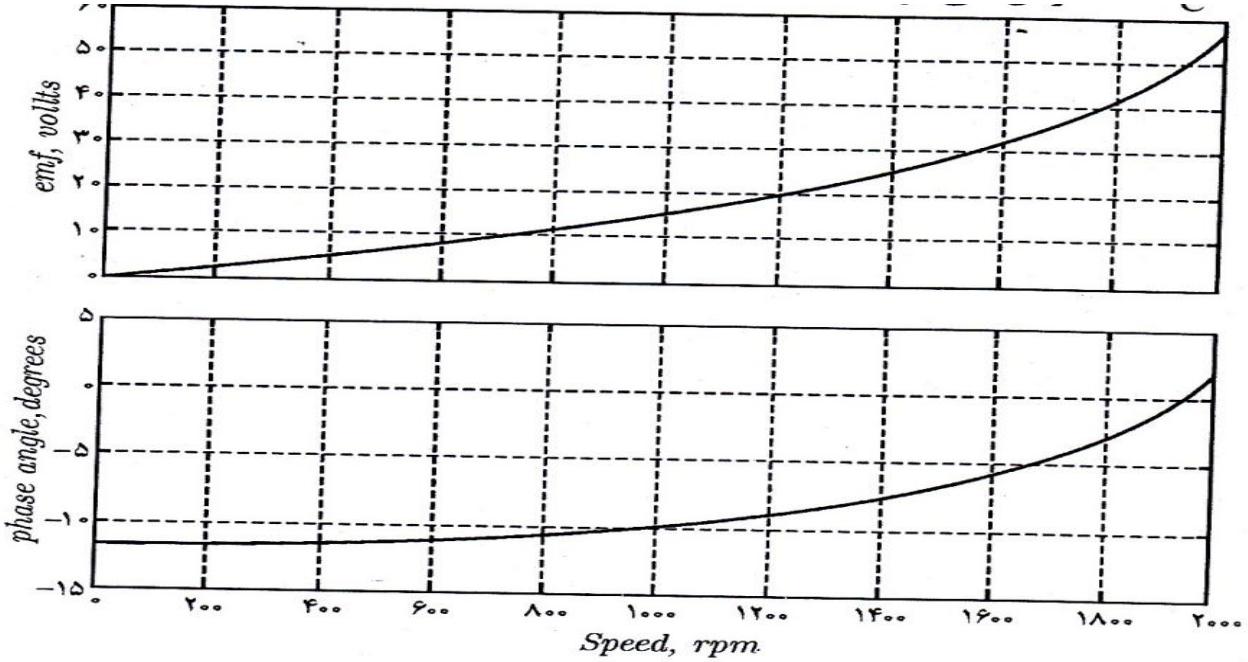
که در آن a نسبت دور حلقه‌های موثر سیم پیچ c به r می‌باشد. بنابراین میدان معکوس ابتدا محور فاز r و سپس محور فاز c را قطع می‌کند:

$$\bar{E}_c = \bar{E}_{cf} + \bar{E}_{cb} = ja \times I_{r} \times \frac{۱}{۲}\left(Z_f - Z_b\right)$$

لذا ولتاژ کل القایی در فاز C برابر است با:

$$\bar{E}_{cb} + \bar{E}_{cb} = -jE_{rb} = -ja\left(I_r z_b/۲\right)$$

در حالت سکون، مؤلفه‌های مستقیم و معکوس میدان برابرند و چنانکه انتظار می‌رود هیچ ولتاژی در سیم پیچی ژنراتورهای C استاتور تولید نمی‌شد. هنگامی که رتور می‌چرخد امپدانس مؤلفه مستقیم میدان افزایش می‌یابد، در حالی که امپدانس مؤلفه معکوس میدن کاسته می‌گردد و از آنجا که تفاوت آنها تابعی از سرعت رتور است نیروی محرکه $\bar{E}_c$ نیز تابعی از سرعت می‌شود. همچنین رابطه (۸-۱۷) نشان می‌دهد که معکوس کردن جهت چرخش رتور، تنها فاز ولتاژ سیم پیچی ژنراتوری c را معکوس می‌کند. به عبارت دیگر، اگر تنها جهت چرخش رتور عوض شود فرکانس ثابت می‌ماند و فقط فاز نیروی محرکه $\bar{E}_c$ معکوس می‌گردد زیرا فقط جای Z_f و Z_b در رابطه (۸-۱۷) تغییر یافته است.



شکل (۸-۱۵): تغییرات دامنه و فاز یک تاکوژنراتور *AC* القایی بر حسب سرعت

مثال ۳:

موتور القایی تک فاز *V*۲۳۰، ۴ قطب، ۵۰ هرتز داری مشخصات زیر است:

$$r_۱ = ۲/۳\Omega; x_۱ = ۳/۲\Omega$$

$$X_m = ۷۴\Omega; a = \frac{N_a}{N_m} = ۱/۵$$

$$r_۱ = ۴/۲\Omega; x_۱ = ۳/۲\Omega$$

چنانچه این موتور به عنوان یک تاکوژنراتور با سیم پیچهای اصلی و کمکی به ترتیب به عنوان سیم پیچ مرجع و سیم پیچ کنترل به کار رود مطلوب است محاسبه *emf* القاء شده در سیم پیچ کنترل هنگامی که رتور با سرعت ۱۴۲۵ *rpm* در حال چرخش است. سیم پیچ مرجع توسط یک ولتاژ ۲۰ ولت ۵۰ هرتز تغذیه شده است. از امپدانس نشتی استاتور صرفنظر کنید.

حل:

امپدانس مستقیم و معکوس در این سرعت رتور عبارتند از:

$$\begin{cases} Z_f = ۳۵/۳۲ + j۴۱/۵\Omega \\ Z_b = ۱/۹۸ + j۳/۱۲۴ \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_f + Z_b = ۵۸/۱۶\angle ۵۰/۱۱^\circ \\ Z_f - Z_b = ۵۰/۷۶\angle ۴۸/۹۴^\circ \end{cases} \Rightarrow$$

طبق معادله (۸-۱۷) دامنه *Emf* تولید شده در سیم پیچی *c* برابر است با:

$$E_c = a.\frac{I_r}{۲}\left(Z_f - Z_b\right) = ۱/۵ \times \frac{۲۰}{۲۹/۰۸} \times \frac{۱}{۲} \times \left(۵۰/۷۶\right) = ۲۶/۱۸۳V$$

هنگامی که سیم پیچ کنترل به امپدانس بار خارجی Z_L بسته شود جریانی معادل $\overline{I}_c$ از آن عبور می‌کند و موجب پدیار شدن دو مؤلفه جدید فلو، ϕ_{cb} و $\overline{I}_c$، در فاصله هوایی می‌گردد. چنانچه مقدار این فلوها در مقایسه با مؤلفه‌های فلوی تولید شده توسط سیم پیچی *r* به اندازه کافی کوچک باشد مدار معادل به کار رفته همچنان معتبر است و مقدار ولتاژ خروجی از رابطه:

$$\overline{V}_c = \overline{E}_c - \overline{Z}_c \overline{I}_c$$

به دست می‌آید. در رابطه فوق Z_L امپدانس سیم پیچی کنترل *C* است. در غیر این صورت می‌توان مقدار دقیق ولتاژ خروجی را با استفاده از مدار معادل موتور دو فاز نامتعادل با تغذیه نامتقارن به دست آورد.

شایان ذکر است که خطای دامنه و اختلاف فاز، از جمله خطاهای اجتناب‌پذیر در این نوع تاکوژنراتورها می‌باشد. این خطا حتی در حالتی که سیم پیچی مدار باز است وجود دارد. برای بررسی این خطاها در یک تاکو *AC* با سیم پیچی *c* می‌توان اندکی رابطه (۸-۱۸) را بسط داد. با استفاده از مدار معادل ماشین القایی تک فاز داریم:

$$\overline{I}_r = \frac{V_r}{Z_۱ + ۰/۵Z_f + ۰/۵Z_b}$$

با قرار دادن این رابطه در معادله (۸-۱۶) می‌توان نوشت:

$$\bar{I}_r = ja.\frac{V_r}{2}.\frac{Z_f - Z_b}{Z_1 + 15Z_f + 15Z_b}$$

بدیهی است که رابطه فوق بر حسب سرعت رتور خطی نیست. برای روشن‌تر شدن موضوع مقدار تقریبی $\bar{E}_C$ در حوالی سرعت صفر، به عنوان یک مثال بررسی می‌شود. در این صورت $s \approx 1$ و از آنجا $X_m >> |r_2 + jx_2|$ می‌گردد و می‌توان تقریبهای زیر را به کار برد:

$$Z_f \approx \frac{r_2}{s} + jx_2$$

$$Z_b \approx \frac{r_2}{2-s} + jx_2$$

همچنین $s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$. با جایگزینی مقادیر فوق در رابطه (۶۵) داریم:

$$\bar{E}_c \simeq \frac{j(ar_2/\omega_s)V_r}{r_2 + (jx_2 + z_1)(1 - \omega_m^2/\omega_s^2)} \Rightarrow$$

$$\bar{E}_c \simeq K_g \omega_m$$

در این رابطه، K_g معادل ضریب ω_m در رابطه (۸-۱۹) است و چنانکه ملاحظه می‌شود k_g یک عدد مختلط است که اندازه و آرگومان آن به صورت تابعی از سرعت تغییر می‌کند. این بدان معناست که نه تنها رابطه $|\bar{E}_c|$ با سرعت، خطی نیست. بلکه فاز $\bar{E}_g$ نیز با سرعت ثابت نمی‌ماند. شکلهای (۸-۱۵) تغییرات دامنه و فاز $\bar{E}_c = E_c \angle \theta$ را بر حسب سرعت برای یک تاکوژنراتور القایی نمونه با خروجی مدار باز نشان می‌دهد.

۱- اگر یک سرو به حالت دائمی رسیده باشد و در این حالت $\omega_m = 1 rad/sec$ باشد، برای رساندن سرعت دائم $\omega_m = ۱۵ rad/sec$ به ولتاژ کنترل (V_a) را باید چه مقدار انتخاب کنیم؟

۲- یک سیستم کنترل حاوی سروموتور AC دو فاز در شکل زیر نشان داده شده است. تابع تبدیل در این سیستم برقرار است:

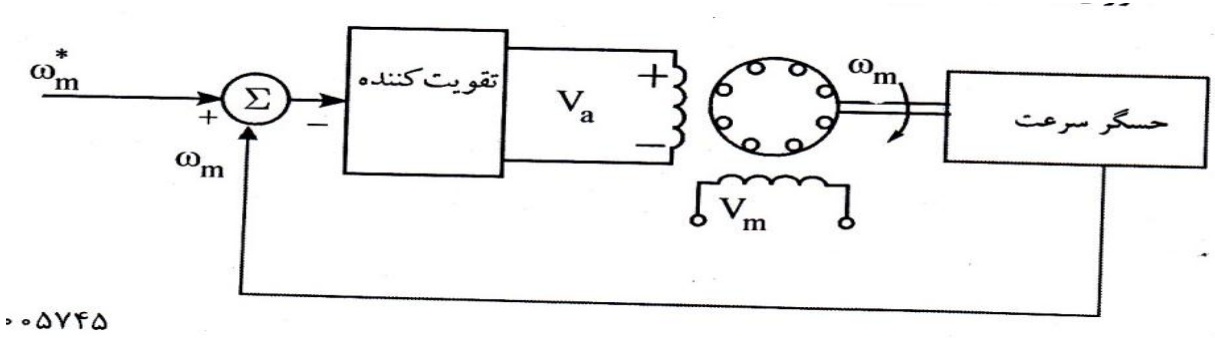
$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{۲/۷۳۳}{۱+۰/۰۱۵vs}$$

تابع تبدیل تقویت کننده به قرار زیر است:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + k_i}{s}$$

الف) تابع تبدیل $\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)}$ را به دست آورید. همچنین K_p و K_i را طوری به دست آورید که ثابت زمانی پاسخ سرعت یک ثانیه باشد.

ب) اگر $K_p / K_i = ۰/۰۱۵۷$ باشد تابع تبدیل



پاسخ فرض (ب):

$K_p = ۰/۰۰۵۷۴۵$

$K_i = ۰/۳۶۵۹$

۳- در سیستم کنترل شکل(۸-۱۲) تابع تبدیل تقویت کننده به قرار زیر است:

$$G(s)=\frac{۵(۱+۰/۰۲s)}{s+۵}$$

تابع تبدیل بین ولتاژ V_a و وضعیت محور θ به قرار زیر است:

$$M(s)=\frac{۲}{s(۱+۰/۰۲s)}$$

الف) تابع تبدیل سیستم کنترل را به دست آورید.

ب) اگر سیگنال فرمان تغییر پله‌ای به میزان ۱۸۰° داشته باشد پاسخ سرعت و وضعیت محور را بیابید و این پاسخها را رسم کنید.

۴- یک موتور القایی دو فاز با ولتاژهای استاتور V_c و V_r که نامتقارن هستند اما در فضا بر هم عمودند مقدار گشتاور راه اندازی تولید می‌نماید. نشان دهید که توسط ولتاژهای دو فاز متعادل به بزرگی $\sqrt{V_r V_c}$ همان مقدار گشتاور راه‌اندازی ایجاد می‌شود.

۵- الف) رتور با اینرسی پائین در سرو موتور دو فاز چه مزیتی دارد؟

ب) لزوم شیب منفی در منحنی گشتاور- سرعت سرو موتور *AC* را تشریح نمائید. چنانچه این شیب، مثبت گردد چه اتفاقی خواهد افتاد؟

ج) مزایا و معایب سرو موتورهای *AC* در مقایسه با سایر سرو موتورها چیست؟

د) چگونه می‌توان جهت چرخش یک سرو موتور دو فاز را معکوس نمود؟

ه) مزایای استفاده از سرو موتورهای *AC* فرکانس بالا چیست؟

۶- توضیح دهید که چرا برخلاف اهمیت راندمان و ضریب قدرت در درایوهای الکتریکی صنعتی، این شاخص‌ها در سرو موتورهای *AC* چندان مهم نیستند.

۷- یک موتور القایی دو قطب دو فاز کوچک دارای پارامترهای ثابت زیر در فرکانس *۵۰HZ* می‌باشد:

$$r_۱=۳۵۰\,\Omega, r_۲=۲۴۰\,\Omega, x_۱=x_۲=۴۰\,\Omega, X_m=۸۶۰\,\Omega$$

این دو موتور بعنوان یک موتور کنترل دو فاز با اعمال ولتاژ ۱۱۰ ولت به دو سر سیم پیچ مرجع و ولتاژ ۷۰ ولت که به میزان 90° از ولتاژی مرجع جلوتر است به دو سر سیم پیچی کنترل، هر دو در فرکانس۵۰HZ، به کار گرفته می‌شود. مطلوب است محاسبه توان مکانیکی داخلی در لغزش ۸/۰.

پاسخ : ۱/۹۹۶۵W