Archive of SID

«یادداشت فنی»

تحلیل عملکرد سلسین دو موتوره و ارائه راه حلهایی برای بر طرف ساختن مشکلات آن

محمد ابراهیمی[1*]، اسماعیل رضایی[2]، محمدباقر بیات[3]، حسین نیلی[4]

۱- استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- کارشناس ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

٤- کارشناس ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

*اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱- ۸٤۱٥٦

mebrahim@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۳)

چکیده - در بسیاری از کاربردهای صنعتی به دو موتور با سرعت چرخش برابر نیاز است. برای این منظور روشهای مختلف سنتی و مدرن قابل استفاده است. در روشهای مدرن، دقت کار مطلوب است اما هزینهها بسیار افزایش می‌یابند، همچنین حفظ و نگهداری تجهیزات نیاز به پرسنل متخصص دارد. از میان روشهای سنتی، روش سلسین دو موتوره به لحاظ کاهش چشمگیر هزینهها موردتوجه است، اما این روش در حالت راه اندازی با مقادیر مقاومت بزرگ، عملکرد در سرعت نامی و ترمز، مشکلاتی دارد. در این مقاله پس از تحلیل عملکرد روش سلسین، شرایط پایداری ونقاط ضعف این روش بررسی و برای بر طرف ساختن هریک از این مشکلات، راه حلهایی ارائه شده است. در ادامه قابلیت عملکرد مطلوب سیستم با استفاده از نتایج شبیه سازی و آزمون عملی اثبات شده است.

کلید واژگان: سلسین دوموتوره، سلسین چهار موتوره، سرعت سنکرون، سیستم اصلاح شده.

۱- مقدمه

در صنایعی مانند نساجی، کاغذسازی، ماشین‌های چاپ و جرثقیل‌های سقفی، به حرکت سنکرون دو موتورالکتریکی نیاز است [۲،۱] . چنانچه این دو موتور در فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر قرار گرفته باشند، استفاده از محور مکانیکی مقدور نبوده و از روش‌های مختلف مبتنی بر کنترل درایوهای الکتریکی استفاده می‌شود [۳-۸]. به عنوان مثال می‌توان از موتورهای DC کنترل شده توسط کنورتور، موتورهای سنکرون تغذیه شده توسط منابع فرکانس متغیر یا موتورهای القایی استفاده کرد. در صورت استفاده از موتورهای القایی، هزینه‌ها به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد اما به دلیل مشخصه گشتاور سرعت این نوع موتور، چنانچه گشتاورهای بار دو موتور متفاوت باشند، سرعت چرخش دو ماشین نیز متفاوت خواهد بود. برای حل این مشکل از موتورهای القایی با رتور سیم‌پیچی شده درحالتی که سر سیم‌های رتور آن دو به یکدیگر متصل شده‌اند، استفاده می‌شود. چنانچه ترمینال‌های استاتور این مجموعه توسط یک منبع سه فاز به صورت مشترک تغذیه شوند، این دو موتور در سرعت خاصی که توسط فرکانس رتور مشخص می‌شود به

www.SID.ir

Archive of SID

صورت همزمان حرکت خواهند کرد. به چنین مجموعه‌ای سلسین قدرت[1] گفته می‌شود که کلمه سلسین مخفف کلمه Self_Synchronizing است. در این سیستم ماشین‌های القایی استفاده شده به عنوان سلسین، مانند یک محور الکتریکی قابل انعطاف عمل می‌کنند. این روش در مقایسه با روشهای دیگر ساده‌تر و ارزان قیمت‌تر بوده و به تجهیزات کمکی کنترل موقعیت نیاز ندارد [۱۰،۹].

سلسین قدرت به دو صورت استفاده می‌شود؛ سلسین چهار موتوره و سلسین دوموتوره. در سلسین چهار موتوره، هر موتور سلسین با یکی از دو موتور القایی اصلی به صورت مکانیکی کوپله می‌شود و سرهای خروجی سیم‌پیچ‌های رتور سلسین‌ها به صورت متناظر به یکدیگر متصل می‌شوند، در نتیجه سیستم سلسین به عنوان یک محور الکتریکی بین دو موتور القایی اصلی عمل می‌کند[۹]. در سلسین دو موتوره، موتورهای القایی اصلی هم به عنوان محرک اصلی و هم به عنوان سلسین استفاده می‌شوند. بنابراین هزینه سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد[۴،۳]. اما از طرف دیگر مشکلاتی در راه اندازی و سرعت حداکثر و ترمز دارد.

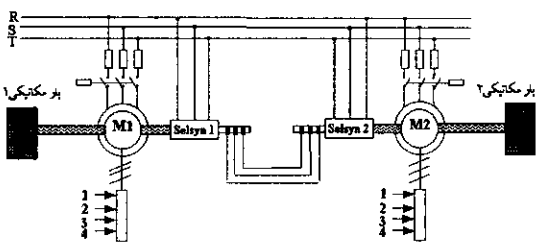
در این مقاله ابتدا سلسین‌های قدرت از نظر ساختمان، عملکرد، شرایط پایداری و به طور کلی مزایا و معایب مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه راه حلهایی برای بر طرف ساختن مشکلات سلسین‌های دو موتوره ارائه شده و نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی ارائه خواهند شد.

۲- ساختمان سلسین‌های قدرت

بهترین روشی که در سیستمهای سنتی برای یکسان کردن سرعت دو موتور استفاده شود، روش سلسین قدرت است. مزایای اصلی روش سلسین، برابری زاویه پیموده شده توسط رتورها، حتی در شرایط عدم برابری بار مکانیکی و همچنین سادگی و ارزان قیمت بودن سیستم است [۱۰،۹،۳]. این روش به صورت چهارموتوره و دوموتور قابل اجرا است که در ادامه بررسی خواهند شد.

۲-۱- طرح سلسین چهار موتوره

شکل ۱ نمایی از نحوه اتصال سلسین چهار موتوره را نشان می‌دهد. در این حالت هر موتور القایی اصلی با یک سلسین به طور مکانیکی کوپل شده است. سیم‌پیچی‌های استاتور همه موتورها به طور موازی به یک منبع تغذیه مشترک متصل می شوند تا تحریک لازم را برای برقرار



شکل ۱ طرح اتصال سلسین چهار موتوره

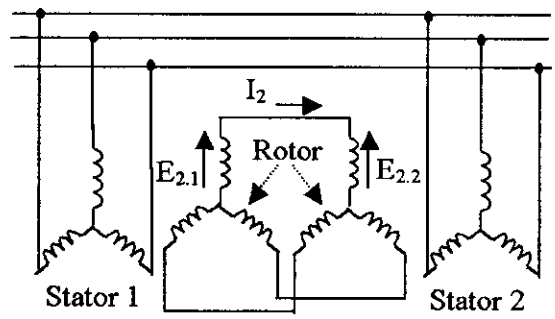
کردن میدان مغناطیسی در فاصله هوایی موتورها به وجود آورند. ضمناً سرهای سیم‌پیچ رتور مربوط به دو موتور القایی اصلی، به مجموعه مقاومت های سه‌فاز سری متصل شده‌اند تا بدین وسیله بتوان سرعت این سیستم را کنترل نمود. از طرف دیگر سرهای خروجی رتور سلسین‌ها نیز به طور متناظر به یکدیگر متصل می شوند تا جریان سنکرون کننده را جاری نمایند (شکل ۲- الف).

چنانچه بار مکانیکی بر روی موتورها برابر باشد، رتور سلسین‌ها هم‌زاویه خواهند بود، لذا تا وقتی که سرعت ماشین‌های القایی اصلی برابر است، متقابل بودن نیروی ضد محرکه در رتور سلسین‌ها، از جاری شدن جریان در آنها جلوگیری کرده و مانع تولید گشتاور در آنها می‌شود . در این حالت اصطلاحاً دو سلسین روی خط تغذیه AC شناور هستند. حال چنانچه موتور ۱ در بار کامل بوده و بار مکانیکی بر روی موتور شماره ۲ کاهش پیدا کند، سرعت مجموعهٔ موتور و سلسین ۲ به دلیل طبیعت مشخصه‌های سرعت -گشتاور موتور القایی افزایش یافته

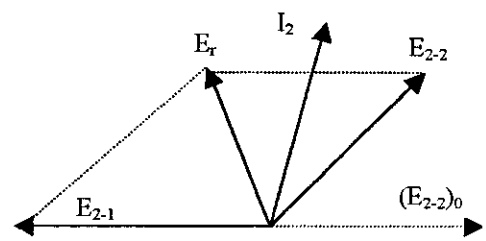
1. Power Selsyn

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- الف



شکل ۲- ب

شکل ۲- الف - مدار معادل موتورهای سلسین، **ب** - دیاگرام فازوری ولتاژها و جریانها

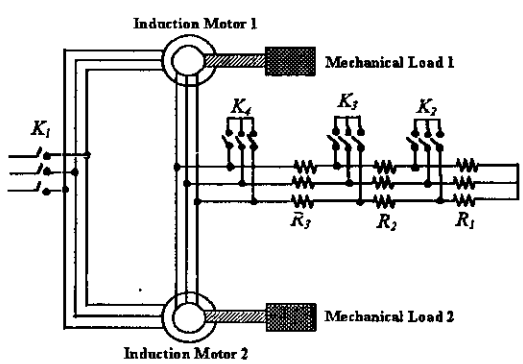
یا میل به افزایش پیدا می کند. نتیجه این عمل ، به هم خوردن تعادل emf ها در مدار بین دو رتور سلسین‌ها و در نتیجه جاری شدن جریان بین آنها است. این جریان در تقابل با شار اولیه یک گشتاور منتجه در جهت مناسب، برای یکسان کردن سرعت دو مجموعه تولید خواهد کرد.

در شکل ۲- ب دیافراگم فازوری emf های دو رتور موتورهای سلسین و جریان سنکرون کننده بین آنها نشان داده شده است. فازور $(E_{2\text{-}2})_0$ معرف emf رتور سلسین شماره ۲ است که در شرایط برابری بارهای مکانیکی روی دو موتور در فاز مخالف با emf رتور سلسین شماره ۱ $(E_{2\text{-}1})$ است. حال چنانچه فازور $E_{2\text{-}2}$ از موقعیت اولیه خود $(E_{2\text{-}2})_0$ پیش بیفتد، جریان I_2در مدار بین دو رتور به نحوی به وجود می آید که نسبت به ولتاژ منتجه E_r پس فاز باشد. این جریان نسبت به $E_{2\text{-}2}$ در حالت پیش فاز ولی نسبت به $E_{2\text{-}1}$ در حالت پس فاز است، بنابراین سلسین شماره ۲ به عنوان ژنراتور و سلسین شماره ۱ در حکم موتور خواهد بود. نتیجه اینکه گشتاور ژنراتوری ناشی از سلسین شماره ۲ در جهت خلاف گشتاور تولیدی توسط موتور القایی شماره ۲ که با آن کوپله شده است، خواهد بود، لذا سرعت آنها کاهش می‌یابد. در همین شرایط گشتاور موتوری ناشی از سلسین شماره ۱ به حرکت موتور القایی شماره ۱ کمک می‌کند تا در نهایت دو موتور مجدداً در یک سرعت قرار گیرند.

در این حالت ماشین‌های القایی استفاده شده به عنوان سلسین مانند یک محور الکتریکی قابل انعطاف رفتار می‌کنند. این مجموعه در بسیاری از کاربردها می‌تواند جایگزین محور مکانیکی شود. مزیت عمده سلسین‌های چهارموتوره علاوه بر سادگی، امکان حفظ برابری موقعیت زاویه‌ای موتورها در همه سرعتها شامل زمانهای راه‌اندازی و شتابگیری یا کاهش سرعت و توقف بوده و در این شرایط، به هیچ گونه تجهیزات کمکی کنترلی نیاز نیست [۳]. در این روش به دلیل استفاده از چهار موتور، هزینه درایو افزایش چشمگیری خواهد داشت، برای کاهش هزینه ها می‌توان از طرح سلسین دو موتوره استفاده کرد.

۲-۲- طرح سلسین دو موتوره [۵،۱۰]

شکل ۳ طرح دیگری از سلسین قدرت را نشان می‌دهد.



شکل ۳ طرح سلسین دوموتوره

در این طرح از دو موتور القایی رتور سیم‌پیچی شده مشابه به عنوان محرک اصلی و همچنین به عنوان سلسین استفاده شده است. سیم‌پیچ‌های رتور این دو موتور با

www.SID.ir

Archive of SID

توالیهای مشابه به یکدیگر متصل می‌شوند. حال اگر سیم‌پیچ‌های استاتور آنها به یک منبع تغذیه سه فاز مشترک متصل شود، از آنجا که emf های تولید شده در دو مدار رتور دارای دامنه یکسان و فاز مخالف هستند، لذا هیچ جریانی بین دو رتور جاری نشده و گشتاور محرکی تولید نمی‌شود، مگر اینکه مسیر جداگانه‌ای به شکل مقاومت‌های سه فاز برای عبور جریان قرار دهیم. در این شرایط گشتاور محرک تولید شده و دو موتور با یک سرعت به حرکت در می‌آیند. چنانچه یک موتور نسبت به دیگری جلو بیفتد یک جریان گردشی در جهتی که موجب تاثیر ترمز بر روی این موتور و شتاب بر روی موتور دیگر شود، به وجود می‌آید؛ به طوری که دو موتور مجددا تمایل پیدا می‌کنند که وضعیت سنکرون خود را حفظ کنند. این عمل "خود سنکرونیزاسیون" مشابه اتصال موازی ماشین‌های سنکرون است [۵، ۱۰].

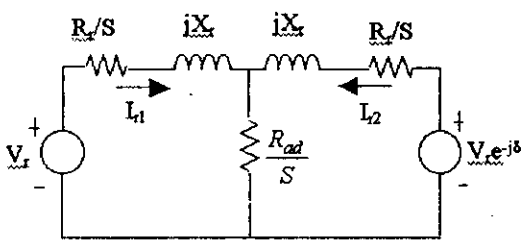
در این روش با تغییر میزان مقاومتهای سه فاز امکان کنترل سرعت فراهم می‌شود. البته باید توجه داشت که مقاومت موثر دیده شده توسط هر موتور معادل دو برابر مقاومت تعبیه شده در شاخهٔ موازی سلسین است، یعنی اگر به مقاومت R در مدار رتور نیاز باشد کافی است مقاومت R/2 در مدار موازی سلسین قرار گیرد.

در روش سلسین دو موتوره به علت استفاده از دو موتور، هزینهٔ درایو نسبت به حالت قبلی کاهش خواهد یافت، اما از طرف دیگر این سیستم در شرایط راه‌اندازی، حالت پایدار و ترمز مشکلاتی دارد که در قسمتهای بعدی به تجزیه و تحلیل آن پرداخته وراه‌حلهایی برای این منظور ارائه خواهد شد.

۳- تجزیه و تحلیل عملکرد سلسین دو موتوره و بررسی شرایط پایداری

هدف اصلی در استفاده از سلسین، یکسان سازی سرعت دو موتور القایی در شرایط متفاوت بودن بارهای مکانیکی است، اما در عمل ملاحظه می‌شود که دامنهٔ پایداری این درایو در شرایط فوق محدود بوده و چنانچه اختلاف بارهای مکانیکی افزایش یابد، احتمال از دست رفتن حالت سلسین وجود دارد. در این صورت دو موتور در دو سرعت متفاوت که متناظر با مشخصه‌های سرعت گشتاور است. کار خواهند کرد. در این شرایط میزان تلفات در مدار رتور افزایش چشمگیری خواهد داشت زیرا بر طبق قضیهٔ جمع آثار، دو جریان با فرکانسهای متفاوت در مدار رتورهای سلسین جاری خواهد شد. در ادامهٔ این مبحث معادلات گشتاور و شرایط پایداری در سیستمهای سلسین بررسی خواهد شد.

برای محاسبهٔ گشتاور موتورهای سلسین ، مدار معادل شکل ٤ درنظر گرفته می‌شود. دو موتور کاملاً مشابه و مقادیر مقاومتها و راکتانسهای نشتی رتور آن دو برابر و به ترتیب برابر با R_r و X_r درنظر گرفته شده است. R_{ad} معادل اندازهٔ مقاومت سه فازی است که در مدار رتور



شکل ٤ مدار معادل سلسین دوموتوره

موتورها به صورت موازی قرار می‌گیرد و V_r ولتاژ رتور در حالت سکون است.

در ابتدا سرعت دو موتور یکسان فرض می‌شود $(S_1=S_2=S)$ در حالی که رتورها دارای اختلاف فاز δ هستند، این اختلاف فاز در ولتاژ القایی رتورها ظاهر می‌شود. در این صورت جریان رتور دو موتور از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۶]:

$$I_{r1}=\frac{\left(V_r+V_re^{-j\delta}\right)/2}{\left(\frac{R_r}{S}+jX_r\right)+\frac{2R_{ad}}{S}}+\frac{V_r-V_re^{-j\delta}}{2\left(\frac{R_r}{S}+jX_r\right)} \qquad (1)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$I_{r2}=\frac{\left(V_r+V_r e^{-j\delta}\right)/2}{\left(\frac{R_r}{S}+jX_r\right)+\frac{2R_{ad}}{S}}-\frac{V_r-V_r e^{-j\delta}}{2\left(\frac{R_r}{S}+jX_r\right)} \qquad (۲)$$

توان فاصلهٔ هوایی یا به عبارت دیگر توان اکتیو رتور موتور سلسین اول از مؤلفه حقیقی جریان رتور و ولتاژ القایی رتور به دست می‌آید و اندازه گشتاور الکتریکی از روی توان فاصله هوایی محاسبه می‌شود:

$$P_{ma}=3V_r\,Real[I_{r1}] \qquad (۳)$$

$$T_{e1}=\frac{P_{mech}}{\omega_m}=\frac{(1-S)P_{ma}}{(1-S)\omega_e}=\frac{P_{ma}}{\omega_e} \qquad (٤)$$

با توجه به روابط فوق، اندازه گشتاور الکتریکی موتور ۱ به صورت رابطه(۵) به دست می‌آید. به همین ترتیب گشتاور الکتریکی موتور ۲ نیز از رابطه(٦) قابل محاسبه است.

در این روابط P تعداد زوج قطب است و لغزشی که به ازای آن گشتاور حداکثر می‌شود برابر $S_{T\,max}=\frac{R_r}{X_r}$ است.

روابط (۵) و (٦) دارای تعدادی عبارتهای مشترک و تعدادی عبارت با علامت مخالف هستند. عبارتهای مشترک را گشتاور آسنکرون (T_{asyn}) و عبارتهای با علامت مخالف را گشتاور سنکرون‌کننده (T_{syn}) می‌نامیم. با ساده‌سازی روابط فوق این گشتاورها به صورت روابط زیر به دست می‌آیند:

$$T_{e1}=T_{asyn}+T_{syn} \qquad (۷)$$

$$T_{e2}=T_{asyn}-T_{syn} \qquad (۸)$$

$$\frac{T_{syn}}{T_{max}}=Sin\delta\left[\frac{\frac{S}{S_{T\,max}}}{\frac{S_{T\,max}}{S}+\frac{S}{S_{T\,max}}}-\frac{\frac{S}{S'_{T\,max}}}{\frac{S'_{T\,max}}{S}+\frac{S}{S'_{T\,max}}}\right] \qquad (۹)$$

$$\frac{T_{asyn}}{T_{maz}}=\left[\frac{1-Cos\delta}{\frac{S_{T\,max}}{S}+\frac{S}{S_{T\,max}}}+\frac{1+Cos\delta}{\frac{S'_{T\,max}}{S}+\frac{S}{S'_{T\,max}}}\right] \qquad (۱۰)$$

$$T_{max}=\frac{\frac{1}{\omega_s}}{p}\frac{3V_r^2}{2}\frac{1}{X_r} \qquad (۱۱)$$

$$S'_{T\,max}=\frac{R_r+2R_{ad}}{X_r}=S_{T\,max}\frac{R_r+2R_{ad}}{R_r} \qquad (۱۲)$$

گشتاور آسنکرون که در دو موتور به صورت مشابه تولید می‌شود، گشتاور بار را تأمین می‌کند، در مقابل گشتاور سنکرون که در دو موتور دارای علامت متفاوت است، با انتقال توان اکتیو بین دو موتور موجب می‌شود که سرعت دو موتور سنکرون شود. در حالتی که گشتاور بار دو موتور یکسان است δ=۰ خواهد بود و گشتاور سنکرون کننده نیز برابر صفر است. به ازای گشتاورهای بار متفاوت، δ طوری تغییر می‌کند که سرعت موتورها در حالت سنکرون باقی بماند. حداکثر گشتاور سنکرون کننده برای δ=۹۰ حاصل می‌شود، بنابراین موتورهای سلسین در حد محدودی قادر به جبران عدم تعادل بار موتورها است و اگر اختلاف بین گشتاورهای بار دو موتور اصلی زیاد شود، δ از حد ۹۰° بیشتر شده و در نتیجه سلسین از دست می‌رود. بنابراین حد پایداری δ برابر ۹۰° و حداکثر اختلاف گشتاور بار مجاز برابر $\Delta TL = 2Tsyn$ است که ΔTL برحسب پارامترهای موتور، نقطهٔ کار و مقدار مقاومت موجود در مدار رتور محاسبه می‌شود.

$$T_{e1}=\frac{1}{\frac{\omega_s}{P}}\frac{3V_r^2}{2}\left[\frac{\frac{R_r}{S}}{\frac{R_r^2}{S^2}+X_r^2}(1-Cos\delta+\frac{S}{S_{T\max}}Sin\delta)+\frac{\frac{R_r+2R_{ad}}{S}}{(\frac{R_r+2R_{ad}}{S})^2+X_r^2}(1+Cos\delta-\frac{S}{\frac{R_r+2R_{ad}}{X_r}}Sin\delta)\right] \qquad (۵)$$

$$T_{e2}=\frac{1}{\frac{\omega_s}{P}}\frac{3V_r^2}{2}\left[\frac{\frac{R_r}{S}}{(\frac{R}{S})^2+X_r^2}(1-Cos\delta-\frac{S}{S_{T\max}}Sin\delta)+\frac{\frac{R_r+2R_{ad}}{S}}{(\frac{R_r+2R_{ad}}{S})^2+X_r^2}(1+Cos\delta+\frac{S}{\frac{R_r+2R_{ad}}{X_r}}Sin\delta)\right] \qquad (٦)$$

www.SID.ir

Archive of SID

٤- بررسی مزایا و معایب سلسین دو موتوره

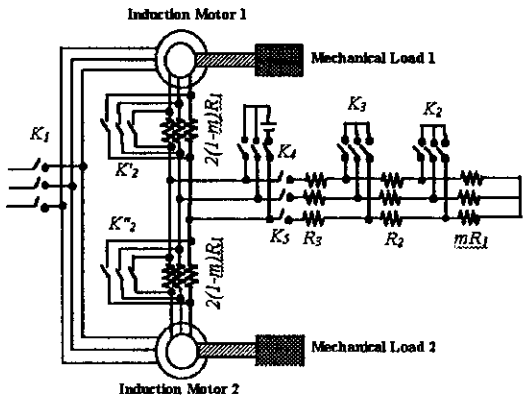
مهمترین مزایای این روش علاوه بر سنکرون‌کردن سرعت و زاویه چرخش دو رتور، سادگی ساختمان و در نتیجه سهولت حفظ و نگهداری و تعمیرات است. از طرف دیگر چون فقط از دو موتور استفاده می‌شود هزینهٔ تجهیزات آن نسبتاً کم است. در این حالت با ترکیب روش تغییر مقاومت رتور و سلسین دو موتوره ، علاوه بر کنترل سرعت، رفتار سیستم در حالت راه‌اندازی و معکوس کردن سرعت مناسب خواهد بود. برای این منظور مقاومتهای راه‌انداز در شاخهٔ موازی سلسین و به طور مشترک برای دو موتور قرار داده می‌شود. در این شرایط به علت وجود سلسین، سرعت و زاویهٔ پیموده شده توسط رتورها برابر خواهد بود.

نقاط ضعف روش سلسین دو موتوره به شرح زیر است:

- با توجه به شکل ۳ برای کنترل و افزایش سرعت باید مقاومت در شاخه سلسین کاهش یابد. اما کاهش مقاومت سلسین، محدودیت داشته و اگر مقاومت از حد مجاز کمتر شود، سلسین از دست رفته و در نتیجه سرعت چرخش دو موتور متفاوت خواهد شد. بنابراین در روش سلسین دو موتوره باید همواره مقداری مقاومت در مدار رتور موجود باشد، لذا امکان دست‌یابی به حداکثر سرعت فراهم نیست.
- برای راه‌اندازی و همچنین تنظیم و کنترل سرعتهای کم، به استفاده از مقاومتهای بزرگ در مدار رتور نیاز است؛ اما افزایش مقاومت در مدار سلسین می‌تواند در شرایط حفظ سلسین، موجب نوسانی شدن سرعت شود.
- در روش سلسین سنتی برای ترمز و توقف سیستم، منبع تغذیه استاتور قطع شده و گشتاورهای بار موجب کاهش سرعت و توقف سیستم می شوند، در این حالت چنانچه گشتاورهای بار متفاوت باشند، عملیات ترمز با اختلاف سرعت و زاویه پیموده شده همراه خواهد بود.

٥- پیشنهادهایی برای بهبود و اصلاح عملکرد سلسین دو موتوره

برای بهبود عملکرد و بر طرف ساختن مشکلات سلسین دو موتوره، پیشنهاد می‌شود که ساختار این سیستم مطابق شکل ٥ اصلاح شود.



شکل ٥ ساختار سلسین دوموتوره اصلاح شده

در این سیستم مشکلات به شرح زیر مرتفع می‌شوند:

الف- همانگونه که ملاحظه شد برای راه‌اندازی و کنترل در سرعتهای پایین، به مقاومتهای بزرگ در مدار رتور نیاز است. حال فرض می‌کنیم که مقاومت بزرگ $2R_1$ در مدار رتور نیاز باشد. برای این منظور همانگونه که قبلاً توضیح داده شد باید مقاومت R_1 در شاخهٔ موازی (عمودی) مدار سلسین قرار داده شود، اما از طرف دیگر وجود مقاومت بزرگ در مدار سلسین موجب نوسانی شدن سرعت می‌شود. برای اجتناب از مقاومت بزرگ در شاخهٔ موازی سلسین، مقاومت R_1 به دو قسمت تجزیه شده، مقدار mR_1 , $(m \prec 1)$ در شاخه موازی و مقدار $2(1\text{-m})R_1$ در شاخهٔ سری قرار داده می‌شود، در این صورت مقاومت مؤثر در مدار رتور هر یک از موتورهای $2R_1$ خواهد بود. بنابراین دست‌یابی به سرعت پایین موردنظر امکان‌پذیر شده و در عین حال از نوسانی شدن سیستم اجتناب می‌شود.

در عمل برای راه‌اندازی سلسین بهبود یافته مراحل زیر انجام می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

- کلید K_1 در وضعیت راستگرد یا چپگرد قرار داده شده و دو استاتور توسط برق سه فاز شبکه تغذیه می‌شوند؛ همچنین کلید K_5، در وضعیت بسته قرار می‌گیرد. سایر کلیدها باز هستند. لذا راه‌اندازی با حداکثر مقدار مقاومت در مدار رتور انجام می‌شود.
- برای افزایش سرعت، اولین دسته مقاومت از مدار رتور حذف می‌شود، برای این منظور بطور همزمان کلیدهای K_2، K_2' و K_2'' وصل شده در نتیجه مقاومتهای سه فاز mR_1 و $2(1-m)R_1$ اتصال کوتاه می‌شود.
- برای افزایش بیشتر سرعت کلید K3 وصل و مقاومت R2 حذف می‌شود.

ب- برای دستیابی به حداکثر سرعت در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی باید مقاومتهای خارجی در مدار رتور بطور کامل حذف شود، اما از طرف دیگر این موجب از دست رفتن سلسین و متفاوت شدن سرعتها در شرایط عدم برابری بارها می‌شود. برای حل این مشکل مطابق شکل ۵ از یک منبع dc در آخرین مرحله حذف مقاومتهای خارجی استفاده می‌شود. برای این منظور کلید K_5 باز و کلید K_4 بسته می‌شوند، به این ترتیب کلیه مقاومتها از مدار رتور حذف و با اضافه شدن باتری و جاری شدن جریان dc در سیم‌پیچهای رتور، سیستم تبدیل به موتور سنکرون گشته و سرعت هر دو موتور برابر و معادل مقدار سنکرون می‌شود.

ج- برای ترمز کردن سیستم باید به طریقی عمل شود که تا توقف کامل سیستم، سلسین همواره برقرار بوده و در نتیجه زاویه پیموده شده مساوی باشد. برای این منظور مطابق شکل ۵ در شرایطی که برق تغذیه استاتورها وصل است، کلیدهای K_4 و K_5 باز و ارتباط مدارهای رتور از شاخهٔ عمودی و همچنین باتری قطع می‌شود. در این صورت مدار مربوط به جاری شدن جریان رتورها قطع می‌شود، لذا امکان تولید گشتاور الکتریکی موتوری فراهم نیست، اما در عین حال به دلیل اتصال سیم‌پیچهای دو رتور به یکدیگر عملکرد سلسین برقرار بوده و سرعت دو رتور به طور یکسان کاهش یافته و به صفر خواهد رسید. پس از توقف کامل، کلید K_1 نیز باز و برق تغذیه استاتور قطع می‌شود.

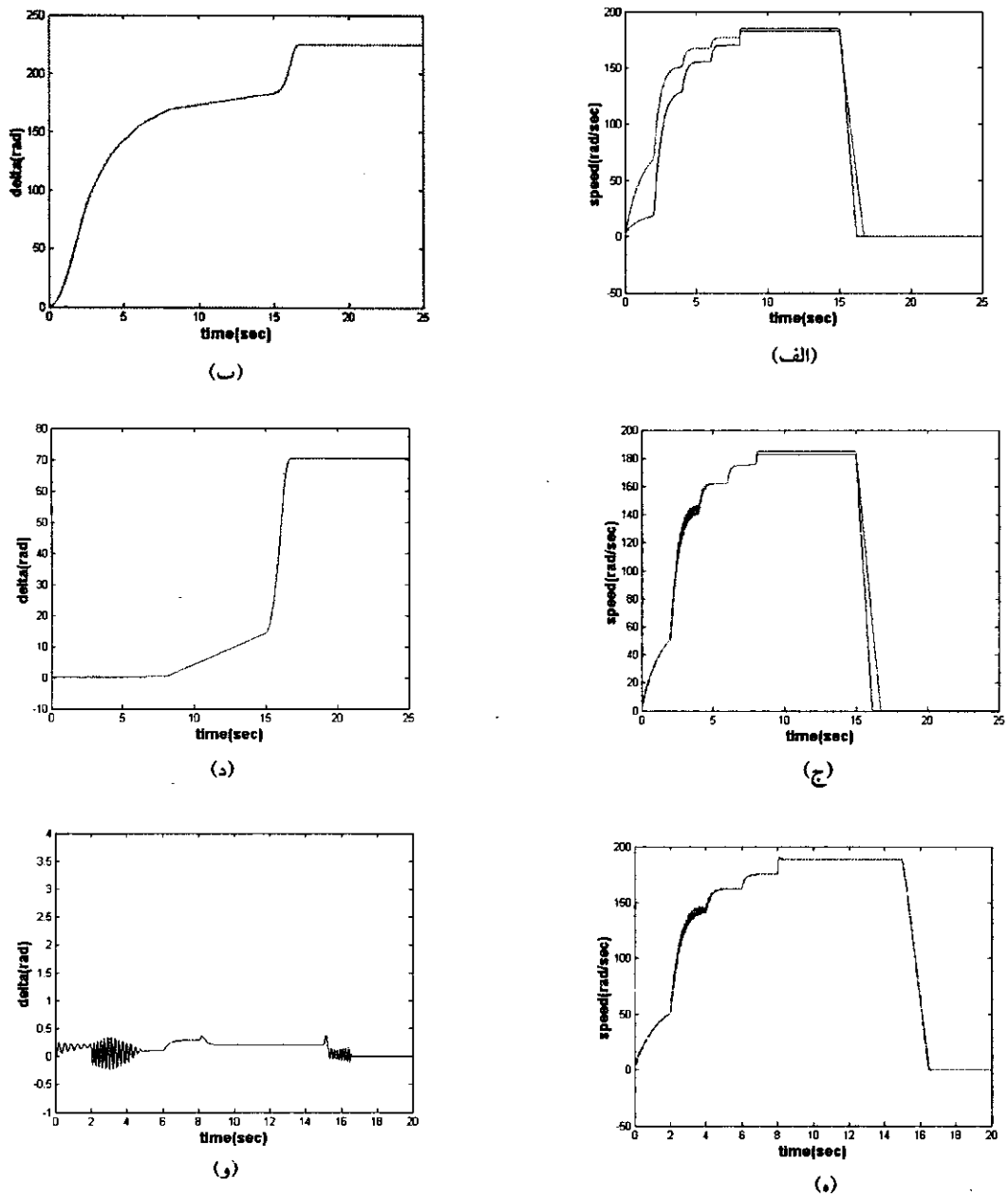
٦- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی و مقایسهٔ عملکرد روشهای مختلف شامل دو موتور مستقل، سلسین دو موتوره سنتی و سلسین دوموتورهٔ اصلاح شده، دو موتور القایی به قدرت ۷/۵ اسب بخار مطابق مشخصات ضمیمه با استفاده از نرم‌افزار سیمولینگ شبیه‌سازی شد. معادلهٔ گشتاور بار استفاده شده برابر $T_{L1}=A+B\omega_m$ و $T_{L2}=\frac{2}{3}(A+B\omega_m)$ و تعداد مقاومتهای راه‌اندازی برابر ۴ عدد در نظر گرفته شد.

در شکل ٦ نتایج شبیه سازی برای حالت راه‌اندازی و ترمز روشهای مختلف نشان داده شده است. شکلهای ٦- الف و ٦- ب مربوط به سرعت و اختلاف زاویه پیموده شده توسط دو موتور مستقل است، در این حالت برای ترمز کردن سیستم، برق تغذیه استاتور قطع می‌شود، لذا اختلاف سرعت و زاویه پیموده شده قابل توجه است. در شکلهای ٦- ج و ٦- د نتایج مربوط به روش سلسین سنتی نشان داده شده است. در هنگام راه‌اندازی سرعتها تقریباً یکسان است، اما در حالت پایدار اختلاف سرعت جزئی وجود دارد و لذا با گذشت زمان اختلاف زاویه پیموده شده افزایش می‌یابد. برای ترمز کردن این سیستم، برق تغذیه استاتور قطع می‌شود و همانگونه که ملاحظه می‌شود به دلیل تفاوت گشتاورهای بار، سرعتها متفاوت شده و اختلاف زاویه پیموده شده توسط دو موتور افزایش می‌یابد. در شکل ٦- ه و ٦- و نتایج برای سلسین اصلاح شده نشان داده شده است. عملکرد سیستم در هنگام راه‌اندازی مانند حالت قبل است اما در حالت پایدار به دلیل وجود منبع dc در مدار رتور، سرعتها معادل سنکرون

www.SID.ir

Archive of SID



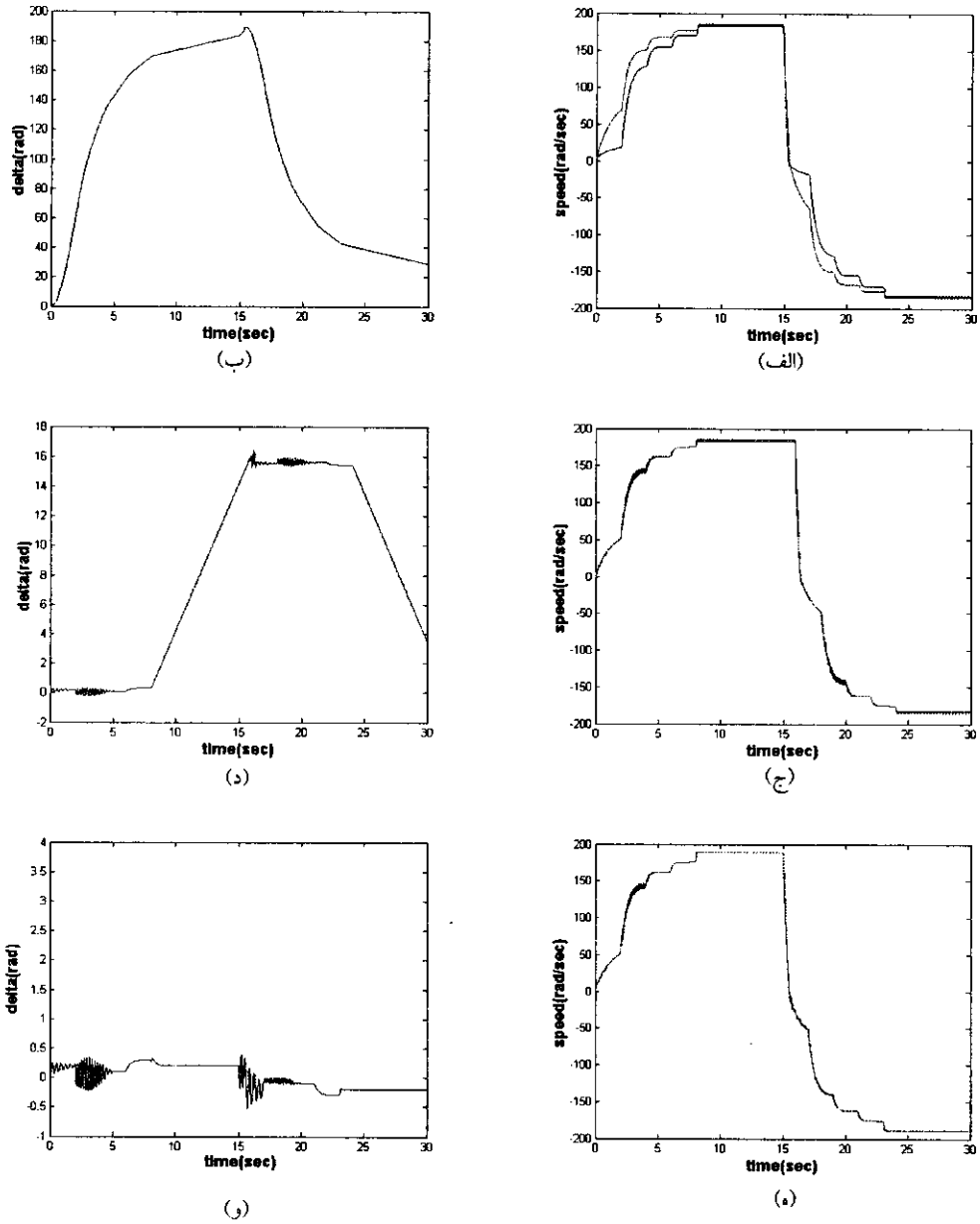
شکل ٦ نتایج شبیه‌سازی در حالت راه‌اندازی و ترمز، الف- سرعت دو موتور مستقل ب- زاویه بین رتورها در دو موتور مستقل ج- سرعت دو موتور در سلسین سنتی د- زاویه بین دو رتور در سلسین سنتی ه- سرعت دو موتور در سلسین اصلاح شده و- زاویه بین دو رتور در سلسین اصلاح شده.

و برابرند. در هنگام ترمز کردن نیز به دلیل برقراری سلسین، زاویه پیموده شده توسط دو موتور برابر بوده و در مجموع اختلاف زاویه بین رتور دوموتور نسبت به روشهای قبلی بسیار کاهش یافته است.

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی برای حالت راه‌اندازی و معکوس کردن سرعت نشان داده شده است. شکلهای۷- الف و ۷- ب مربوط به سرعت و اختلاف زاویهٔ پیموده شده توسط دو موتور مستقل، شکلهای ۷- ج و ۷- د مربوط به سلسین سنتی و شکلهای ۷- و و ۷- ه مربوط به سلسین اصلاح شده است. همانگونه که ملاحظه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی برای راه‌اندازی و معکوس کردن سرعت، الف- سرعت دو موتور مستقل، ب- زاویه بین رتور دوموتوز مستقل، ج- سرعت دوموتور در سلسین سنتی، د- زاویه بین دو رتور در سلسین سنتی، ه- سرعت دوموتور در سلسین اصلاح شده، و- زاویه بین دو رتور در سلسین اصلاح شده.

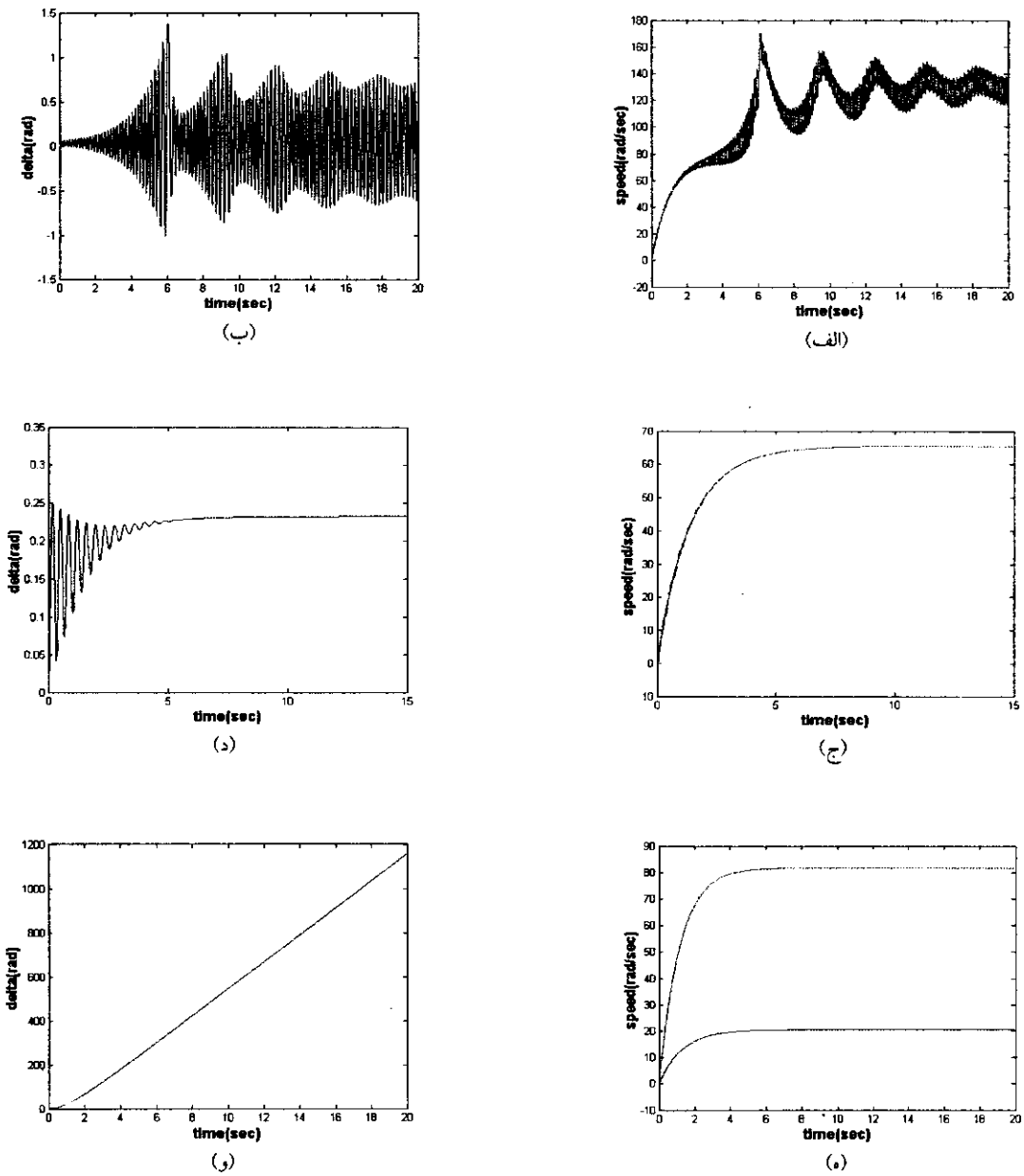
می‌شود عملکرد هر یک از سه سیستم در حالت معکوس کردن سرعت، مشابه عملکرد آن سیستم در حالت راه‌اندازی بوده و تنها در سلسین اصلاح شده سرعتها تقریباً برابر و اختلاف زاویهٔ پیموده شده بسیار اندک است.

در شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی برای حالت راه‌اندازی و کنترل سرعتهای کم و با استفاده از مقادیر بزرگ مقاومت راه‌انداز نشان داده شده است. شکلهای ۸- الف و ۸- ب مربوط به روش سلسین سنتی است و همانگونه که ملاحظه می‌شود، اگرچه خاصیت سلسین به طور کامل از دست نخواهد رفت اما سرعت دچار نوسان می‌شود. حال

www.SID.ir

Archive of SID

چنانچه مطابق روش سلسین اصلاح شده بخشی از این مقاومت در شاخهٔ موازی سلسین و قسمتی به طور سری در مدارهای رتور قرار گیرد، خاصیت سلسین برقرار بوده و مطابق شکلهای ۸- ج و ۸- د سرعتها برابر خواهند بود.



شکل ۸ راه‌اندازی سلسین، **الف**، **ب** - بترتیب سرعت و اختلاف زاویه دو رتور در حالتی که تمام مقاومت راه‌نداز بزرگ در شاخهٔ موازی سلسین باشد. **ج**، **د** - سرعت و اختلاف زاویه دو رتور در روش سلسین اصلاح شده. **ه** ، **و** - سرعت و اختلاف زاویه دو رتور در حالتی که تمامی مقاومت راه‌نداز به طور سری در مدار دو رتور باشد.

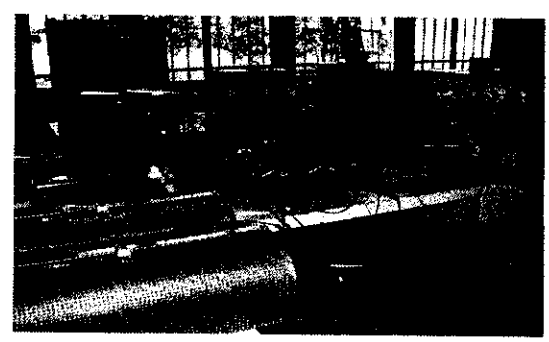
www.SID.ir

Archive of SID

از طرف دیگر چنانچه تمامی مقاومت راه‌انداز را از شاخهٔ موازی سلسین حذف کرده و به طور سری با مدارهای رتور قرار دهیم، اگرچه راه‌اندازی امکان‌پذیر است، اما خاصیت سلسین برقرار نبوده و سرعتهای حالت تعادل کاملاً متفاوت خواهند بود، (شکلهای ۸- ه و ۸- و).

۷- نتایج آزمایشهای عملی

سیستم مورد آزمایش شامل دو موتور القایی مشابه به قدرت ۴ کیلووات، ۳۸۰ ولت، ۵۰ هرتز و ۴ قطب است که دو ژنراتور dc، ۶/۸ کیلووات، ۲۲۰ ولت با تحریک مستقل با هریک از آنها کوپل شده و به عنوان بارهای مکانیکی قابل تنظیم سیستم عمل می‌کنند (شکل ۹). با تغییر بار مقاومتی تعبیه شده در خروجی هر یک از ژنراتورها، گشتاور بار اعمال شده به موتورهای القایی‌تنظیم می‌شوند. سیستم در سه حالت زیر آزمایش شد:



شکل ۹ سیستم عملی مورد آزمایش

الف: دو موتور مستقل

در این حالت دو موتور به طور مستقل و بدون استفاده از هیچ‌گونه تجهیزات اضافی توسط منبع سه فاز تغذیه شدند برای اعمال گشتاورهای بار متفاوت به دو موتور، بار مصرفی ژنراتور مربوط به موتور اول برابر ۱۲۵۰ وات و بار ژنراتور دوم برابر صفر قرار داده شد. در این حالت سرعت موتور اول برابر ۱۴۵۸ دور در دقیقه و سرعت موتور دوم برابر ۱۴۹۷ دور در دقیقه شد. برای ترمز و توقف، برق تغذیه استاتورها به طور همزمان قطع شد، در این شرایط موتور اول بعد از ۴ ثانیه و موتور دوم بعد از ۱۲ ثانیه به حالت توقف کامل رسید.

ب: سلسین سنتی

برای این منظور سیم‌پیچ رتور دوموتور القایی مشابه شکل ۳ به یکدیگر متصل و مقاومت راه‌انداز فقط در شاخهٔ مشترک موازی قرار داده شد. در این حالت با استفاده از مقاومت راه‌انداز بزرگ که معادل ۵ اهم بود و در حالتی که بار یک ژنراتور معادل ۳۵۰ وات و بار دیگری صفر بود، سیستم دچار نوسان شد و با کاهش مقاومت یا کاهش اختلاف بار دو موتور، این نوسان از بین رفت. در حالت دائمی با حفظ مقداری حداقل برای مقاومت در شاخهٔ عمودی سلسین، سرعت دو موتور یکسان باقی ماند اما سرعت به حداکثر مقدار خود نرسید. با حذف کامل این مقاومت، سرعت افزایش یافت اما عملکرد سیستم مشابه دو موتور مستقل شده و سرعتها متفاوت شدند. برای ترمز نیز با قطع برق تغذیه استاتورها، سرعت دو موتور به دلیل وجود گشتاورهای بار متفاوت کاهش یافته و بترتیب پس از ۴ و ۱۲ ثانیه متوقف شدند.

ج: سلسین اصلاح شده

برای راه‌اندازی سیستم سلسین اصلاح شده از یک مقاومت دو اهمی در شاخهٔ موازی و دو مقاومت یک اهمی در شاخهٔ سری با مدار رتور استفاده و نوسانی در سرعت ملاحظه نشد. سپس برای دستیابی به حداکثر سرعت مطابق شکل ۵ پس از حذف کامل مقاومتهای راه‌انداز، یک منبع dc در مدار رتور قرار داده شد، در نتیجه سرعت هر دو موتور برابر با ۱۵۰۰ دور در دقیقه شد. برای ترمز در شرایط حفظ تغذیه استاتور، ارتباط مدار دو رتور با مقاومتهای موجود در شاخهٔ موازی و همچنین منبع dc قطع شد. در نتیجه هر دو موتور با

www.SID.ir

Archive of SID

وجود اختلاف گشتاور بار در زمانهای مساوی ۷ ثانیه متوقف شدند.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در کاربردهایی از موتورهای الکتریکی نیاز به حداقل، دو موتور با سرعت مساوی وجود دارد، و برای این منظور می‌توان از موتورهای القایی استفاده کرد لذا در این مقاله ابتدا روش سلسین دوموتوره به عنوان بهترین روش سنتی بررسی و مزایا و معایب آن توضیح داده شد. در این حالت استفاده از مجموعهٔ مقاومتهای سه‌فاز در مدار رتور، برای حل مسائل راه‌اندازی و همچنین کنترل سرعت امکان‌پذیر است، همچنین امکان برابر کردن سرعت چرخش دو موتور در شرایط متفاوت بودن گشتاورهای بار فراهم است. البته مقدار تفاوت گشتاور بارها به لحاظ پایداری محدود است و در این مورد روابط ریاضی برای محاسبه حداکثر اختلاف گشتاورهای بار ارائه شد. از طرف دیگر اگرچه هزینهٔ سلسین دو موتوره، نسبت به چهار موتوره به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد، اما این روش معایبی در راه‌اندازی با مقادیر مقاومت بزرگ، عملکرد در سرعتهای بالا و همچنین ترمز دارد. لذا در این مقاله پیشنهاداتی برای حل مشکلات فوق ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی و همچنین آزمایش عملی مؤید کارامد بودن سلسین اصلاح شده است.

۹- ضمیمه

مشخصات موتورهای القایی استفاده شده در شبیه‌سازی:

$P = ۷/۵$ hp	pole = ٤
$V_{ph} = ۱۱۰$ V	$f = ٦۰$ Hz
$R_s = ۰/۳\ \Omega$	$R_r' = ۰/۱۵\ \Omega$
$L_{ls} = ۰/۰۰۱۵$ H	$L_{lr}' = ۰/۰۰۰۷$ H
$L_{ms} = ۰/۰۳۵$ H	$J = ۰/۱۲$ kgm^2

۱۰- فهرست واژگان لاتین

E : ولتاژ القایی در رتور	T_e : گشتاور الکتریکی
E_r : ولتاژ منتجه دو رتور	T_l : گشتاور بار مکانیکی
P : تعداد زوج قطب	V_r : ولتاژ رتور در حال سکون
P_{ma} : توان فاصله هوایی	X_r : راکتانس نشتی رتور
R_{ad} : مقاومت شاخه سلسین	δ : اختلاف زاویه بین دورتور
R_r : مقاومت رتور	ω_e : سرعت سنکرون
S : عدد لغزش	ω_m : سرعت چرخش رتور
T_{asyn} : گشتاور آسنکرون	ω_s : فرکانس تغذیه
T_{syn} : گشتاور سنکرون‌کننده	

۱۱- منابع

[1] Gierlotka, K.; "Cotrol of Overhead Crane Drive With Centered Motion and Elimination of the Bevel"; Proc. IEEE-IASE'96; Vol. 2; June 1996; pp 1061-1065.

[2] Siemens; Drive and Control Components for Hoisting Gear; Catalog HE 1;1999.

[3] Fuentes, R.; "A Static Quasi Electric Shaft for n Similar Rotor Winding Induction Motors"; IEEE; Industry Applications Conference, Vol. 3; 2000, pp 1632-1639.

[4] Telichko, L. Y.; Shchedrinov, A. V.; Meshcheryakov, V.N.; "Load Limiting in Metal Structures of Bridge Cranes by Speed Synchronization of Drive Motors"; Izv. VUZ Elektromekh. (USSR); No. 3; March 1986; pp 93-98.

[5] FSS/3453, Catalogue; "Cold Mill Crane 50 Ton, Bridge, Esfahan Still Plant"; 1999.

[6] Lenzkes, D.; "Series 1LT6 Motors-a New Generation of Crane-Type Slip Ring Motors"; Siemens power engineering & automation; Vol. 7; No. 2; 1985; pp 92-96.

[7] Backstrand, J. E.; "The Application of Adjustable Frequency Drives to Electric

www.SID.ir

Archive of SID

[8] Busschots, F.; Belman, R.; Geysen, W.; "Application of Field Oriented Control in Crane Drives"; Proc. IEEE-IAS, Annual Meeting; U.S.A.; Vol. 1; September 1991; pp 347-353.

[9] Langsdorf, A. S.; Theory of Alternating Current Machinery; Second Edition; McGraw-Hill; 1988.

[10] Hindmarsh, J.; Electrical Machines and Their Applications; 4th Edition Pergamon Press; 1996.

www.SID.ir