

کنترل بهینه سیستم تجمیع توان دو موتور الکتریکی برای افزایش کارایی

مهرداد جعفر بلند^{۱*}، علیرضا صدوقی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۴۵-۱۱۵

J_mehrdad405@hotmail.com

(دریافت مقاله: بهمن ۱۳۸۸، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۹)

چکیده - تجمیع توان دو موتور الکتریکی با توان متفاوت از طریق تزویج مکانیکی محور آنها در تجهیزاتی که سرعت و توان بار آنها متغیر بوده و کارایی دارای اهمیت است کاربرد دارد. استفاده از این روش در سیستم محرک زیردریایی باعث کاهش مصرف انرژی و لذا افزایش برد زیردریایی می‌شود. این صرفه‌جویی در سرعت‌های زیاد، اندک است و در سرعت‌های کم، بیشتر بوده و تا ۴۰٪ می‌رسد. به‌کارگیری این روش در محورهای آبیگری و خشک‌کن در خطوط کاغذسازی، انرژی زیادی را صرفه‌جویی می‌کند. اما استفاده از قابلیت‌های این روش به کنترل‌کننده‌های پیچیده‌ای برای تنظیم و تطبیق هم‌زمان دو موتور تزویج شده با توان متفاوت نیاز دارد. هدف اصلی کنترل‌کننده‌ها، تنظیم سرعت دلخواه برای محور بار و تقسیم توان بار بین دو موتور تزویج شده است. کنترل‌کننده‌های قبلی، توان بار را به‌صورت غیربهینه بین دو موتور تقسیم می‌کنند. در این مقاله کنترل‌کننده جدیدی ارائه می‌شود که ضمن تحقق اهداف یاد شده، می‌تواند توان بار را در تمامی سرعتها به‌صورت بهینه بین دو موتور تقسیم کند. راهکار این مقاله کارایی مجموعه را برای تمامی سرعتها افزایش می‌دهد و باعث افزایش برد زیردریایی یا صرفه‌جویی در انرژی در صنایع کاغذسازی و موارد مشابه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، امتیاز کنترل‌کننده جدید را نسبت به انواع پیشین مشخص می‌کند و در یک نمونه، کارایی علاوه بر افزایش قبلی، تا ۱۳٪ نیز افزایش مجدد داشته است.

کلیدواژه‌گان: کارایی سیستم رانش، تزویج مکانیکی، کنترل بهینه سرعت موتور، مدل‌سازی دینامیکی.

۱- مقدمه

تغییرات توان مصرفی پروانه زیردریایی نسبت به

تغییرات سرعت دوران آن تقریباً به‌صورت توان سوم

است [۲] و [۳]. برای مثال اگر در سرعت ۳[knot]،

صرفه‌جویی در مصرف انرژی در تمامی زیردریایی‌ها اهمیت

زیادی دارد به‌ویژه در زیردریایی‌های کوچک [۱].

در حالت اول نشان می‌دهد و در حالت سوم برتری خاصی نداشته و با طرح قبلی مشابه است. از طرفی برای بهره‌برداری از حالت سوم که دو موتور به صورت تزویج شده کار می‌کنند به کنترل‌کننده پیچیده‌تری نیاز است. در [5] کنترل‌کننده‌ای ارائه شده که می‌تواند از طریق تنظیم ولتاژ تحریک دو موتور، دو هدف را تأمین کند. هدف اول، تنظیم سرعت موتورها برابر با سرعت دلخواه است و هدف دوم، تنظیم دلخواه سهم توان دو موتور است. در این حالت توان بار برابر مجموع توان دو موتور است. برای هر توان بار مشخص - به شرط آنکه برابر حداکثر توان بار نباشد - به بینهایت حالت می‌توان توان بار را بین دو موتور تقسیم کرد. در راستای بهبود وضعیت سیستم فوق در این مقاله روش جدیدی ارائه شده که در آن کنترل‌کننده بهینه می‌تواند سهم توان دو موتور را به نحوی تعیین کند که تابع هدف بیشینه شده و کارایی در تمامی سرعتها بیشتر شود، از جمله در حالت سوم، کارایی سیستم تا ۱۳٪ افزایش یابد و به این طریق برد زیردریایی بیشتر شود.

۲- سیستم تزویج دو موتور و کنترل کننده آن

مدل دینامیکی دو موتور جریان مستقیم تحریک مستقل مختلف که محور آنها توسط تسمه و پولی مطابق شکل (۱) تزویج شده از [6] و کنترل‌کننده آن از [4] یادآوری می‌شود.

۲-۱- مدل دینامیکی موتور تزویج شده

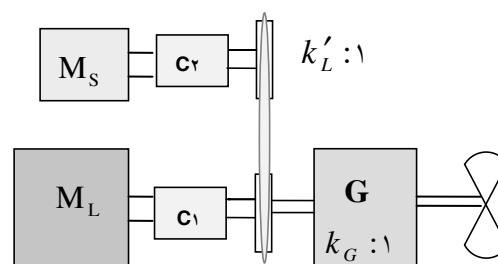
در شکل (۱) موتور بزرگ M_L با موتور کوچک M_S تزویج شده است. L پارامترهای موتور بزرگ و S پارامترهای موتور کوچک را نشان می‌دهد.

توان [4kw] مصرف شود، و برای سرعت [9knot]، به توان [108kw] نیاز است. وقتی از موتور DC در توانهای بسیار کمتر از توان نامی استفاده شود، کارایی آن کاهش چشمگیری می‌یابد. استفاده از موتور منفرد به عنوان محرک پروانه زیردریایی که آن را طرح تک‌موتور می‌نامیم، موجب می‌شود که برای سرعت‌های کم توان مصرفی به شدت کاهش یابد و چون زیردریایی بیشتر مواقع در سرعت کروز که سرعت کمی است حرکت می‌کند، کارایی بهره‌برداری از سیستم پیشرانه زیردریایی کم است. این کاهش کارایی در یک نمونه در سرعت کروز ۵۰٪ بوده است [4]. در [4] از اتصال مکانیکی محور دو موتور الکتریکی از طریق تسمه و پولی استفاده شده که آن را طرح تزویج موتورها می‌نامیم. مجموع توان نامی این دو موتور برابر توان نامی یک موتور در طرح تک‌موتوره است. در این صورت وزن و حجم مجموعه تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. در طرح تزویج موتورها سه حالت بهره‌برداری وجود دارد. در حالت اول، موتور کوچک به تنهایی برای سرعت‌های کم با کارایی مطلوب کار می‌کند. در این حالت کارایی نسبت به طرح یک موتور در سرعت کروز ۳۸٪ بیشتر می‌شود و در بیشینه سرعت حاصل با موتور کوچک تا ۲۵٪ بهبود دارد. در حالت دوم، موتور بزرگتر به تنهایی سرعت‌های متوسط را تأمین می‌کند و کارایی آن نسبت به طرح یک موتوره در بازه تغییر سرعت بین ۲٪ تا ۴٪ بیشتر می‌شود. در حالت سوم، هر دو موتور به صورت تزویج شده و هم‌زمان کار می‌کنند و سرعت‌های زیاد را با اندک افزایش در کارایی نسبت به طرح تک‌موتوره تأمین می‌کنند. استفاده از طرح تزویج شده برتری خود را بیشتر در سرعت‌های کم و

دوران، و T_{eL} و T_{eS} گشتاورهای الکتریکی موتورها است. β ضریب اصطکاک معادل و J ممان اینرسی معادل سیستم است که با روابط (۲) و (۳) توصیف می‌شوند. J_L ، β_L به ترتیب ضریب اصطکاک و ممان اینرسی موتور بزرگ و J_S ، β_S به ترتیب ضریب اصطکاک و ممان اینرسی موتور کوچک همراه با تسمه و پولی و J_G ، β_G به ترتیب ضریب اصطکاک و ممان اینرسی جعبه‌دنده و J_P و β_P به ترتیب ضریب اصطکاک و ممان اینرسی پروانه است. محور دو موتور از طریق تسمه و پولی به هم متصل شده و از طریق جعبه‌دنده با پروانه ارتباط دارند. k_G نسبت تبدیل جعبه‌دنده k'_L نسبت تبدیل تسمه و پولی است [۶].

۲-۲- ساختار قالبی سیستم کنترل کننده

به دلیل محدودیت فضا در موتورخانه زیردریایی، امکان استفاده از مبدل کنترل ولتاژ آرمیچرها وجود ندارد و ولتاژ آرمیچرها ثابت و برابر $V_{aS} = V_{aL} = V_a$ فرض می‌شوند. در حالت تزویج شده، توان بار بزرگتر از توانی موتور بزرگتر بوده و این توانهای زیاد متناظر با سرعت زیاد پروانه است. دستیابی به سرعت‌های زیاد که معمولاً فراتر از سرعت نامی موتورها است، از طریق کنترل ولتاژ تحریک امکان‌پذیر است. لذا کنترل فقط از طریق تغییر ولتاژ تحریک دو موتور انجام می‌شود. در اینجا برای تحقق دو هدف یاد شده از دو کنترل‌کننده مجزا که تزویج یک‌طرفه دارند [۷] استفاده شده است. هدف اول تنظیم سرعت موتورها برابر با سرعت دلخواه و هدف دوم تنظیم مناسب سهم توان دو موتور است. اولین کنترل کننده از دومی مستقل بوده و مطابق شکل (۲) از طریق تنظیم ولتاژ تحریک موتور بزرگتر، فقط سرعت موتورها را برای تحقق سرعت دلخواه برای پروانه تنظیم می‌کند.



شکل ۱ آرایش مکانیکی دو موتور تزویج شده

معادلات رفتار دینامیک این دو موتور به صورت زیر

نوشته می‌شود:

(۱)

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{aL} \\ \dot{i}_{aS} \\ \dot{i}_{fL} \\ \dot{i}_{fS} \\ \dot{\omega}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{aL}}{L_{aL}} i_{aL} - \frac{k_L \phi_L}{L_{aL}} \omega_L \\ -\frac{R_{aS}}{L_{aS}} i_{aS} - \frac{k'_L k_S \phi_S}{L_{aS}} \omega_L \\ -\frac{R_{fL}}{L_{fL}} i_{fL} \\ -\frac{R_{fS}}{L_{fS}} i_{fS} \\ \frac{k_L \phi_L}{J} i_{aL} + \frac{k'_L k_S \phi_S}{J} i_{aS} - \frac{\beta}{J} \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{aL}}{L_{aL}} \\ \frac{V_{aS}}{L_{aS}} \\ \frac{V_{fL}}{L_{fL}} \\ \frac{V_{fS}}{L_{fS}} \\ \frac{-T_{Load}}{J k_G} \end{bmatrix}$$

$$J = J_L + k_L^\gamma J_S + J_G + \frac{J_P}{k_G^\gamma} \quad (۲)$$

$$\beta = \beta_L + k_L^\gamma \beta_S + \beta_G + \frac{\beta_P}{k_G^\gamma} \quad (۳)$$

که در آن V_{aS} و V_{aL} ولتاژ آرمیچرها و i_{aS} و i_{aL} جریان آرمیچر موتورها، R_{aS} و R_{aL} مقاومت‌ها و L_{aS} و L_{aL} ضریب القایی آرمیچرها است. $k_L \phi_L$ و $k_S \phi_S$ ثابت‌ها و شارهای تحریک دو موتور، V_{fL} و V_{fS} ولتاژها و i_{fL} و i_{fS} جریان‌های تحریک، R_{fL} و R_{fS} مقاومت‌ها و L_{fL} و L_{fS} ضریب القایی سیم پیچ‌های تحریک است. ω_S و ω_L سرعت‌های زاویه‌ای

از اهداف این مقاله یافتن نسبت توان مناسبی است که تلفات موتورها در آن حداقل شود. در این صورت کنترل‌کننده، کارایی دو موتور توزیع شده را بیشینه کرده و کنترل‌کننده‌ای بهینه است. کنترل‌کننده [۳] نسبت جریان آرمیچر موتورها را به صورت (۴) تعیین می‌کند و کنترل‌کننده‌ای غیر بهینه است:

$$\frac{i_{a1}}{i_{a2}} = \frac{I_{aN1}}{I_{aN2}} \quad (4)$$

این انتخاب، توان بار را تقریباً به نسبت توان نامی موتورها بین دو موتور تقسیم می‌کند. در حالت کلی بسته به مشخصه‌های هر یک از موتورها و مقدار توان بار، نسبت خاصی از جریان آرمیچر باعث بیشینه شدن کارایی سیستم می‌شود. این نسبت جریان آرمیچرها، نسبت جریان بهینه نامیده شده و به صورت $(I_{aS} / I_{aL})^*$ مشخص می‌شود. به منظور مقایسه این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده قبلی نسبت جریانها به صورت (۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{i_{a1}}{i_{a2}} = k \frac{I_{aN1}}{I_{aN2}} \quad (5)$$

k عدد مثبتی است که توسط کنترل‌کننده بهینه تعیین می‌شود و به مشخصه موتورها و مقدار توان بار بستگی داشته و باید در هر لحظه - بسته به نقطه کار - به نحوی انتخاب شود که کارایی سیستم بیشینه باشد. اگر $k=1$ و ثابت باشد، همان کنترل‌کننده غیر بهینه قبلی به دست می‌آید.

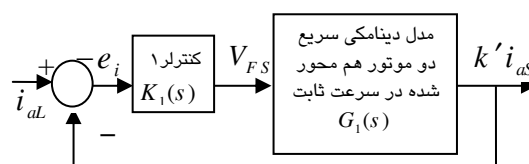
۳-۱- تعیین تابع هدف

هدف اصلی بیشینه شدن کارایی مجموعه دو موتور است. بنابر این نسبت توان بار به مجموع توان ورودی دو موتور

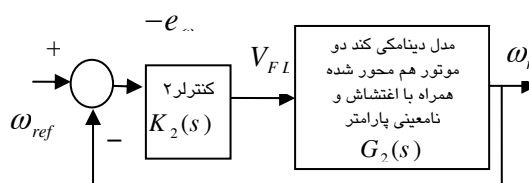
عملکرد این کنترل‌کننده به دینامیک کند موتورها که مشخصه‌ای مکانیکی است اختصاص دارد [۸] تا [۱۲]. خطای سرعت موتور بزرگ از سرعت مطلوب، $e_\omega = \omega_{ref} - \omega$ ورودی به کنترل‌کننده اول است. مطابق شکل (۳) دومین کنترل‌کننده که به دینامیک‌های تند موتورها - که مشخصه‌ای الکتریکی است - اختصاص دارد، وابسته به عملکرد کنترل‌کننده اول است و بر اساس خطای مشخص شده در رابطه

$$e_i = (i_{aS} - i_{aL} \times I_{aS(N)} / I_{aL(N)})$$

تحریک موتور کوچکتر را تنظیم می‌کند تا نسبت جریانهای آرمیچر دو موتور i_{aS} / i_{aL} به مقدار ثابت $I_{aS(N)} / I_{aL(N)}$ برسد.



شکل ۲ دینامیک تند سیستم و کنترلگر ۱



شکل ۲ دینامیک کند سیستم و کنترلگر ۲

i_{aL} و i_{aS} به ترتیب جریانهای آرمیچر موتور کوچک و بزرگ است. N مقادیر نامی کمیتها را نشان می‌دهد [۳].

۳- کنترل کننده بهینه

زمانی که توان بار کمتر از مجموع توان دو موتور باشد، تعیین سهم توان موتور، پاسخ یکتایی ندارد و می‌توان با نسبت‌های مختلفی توان را بین دو موتور تقسیم کرد. یکی

۳-۲- صورت مسأله کنترل بهینه

مطابق (۱۰) مجموع توان خروجی دو موتور برابر با توان بار و توان بار برابر $(k'/k_G^r)\omega_L^r$ است.

$$(V_a i_L - R_{aL} i_L^r - p_{feL} - \beta_L \omega_L^r) + (V_a i_S - R_{aS} i_S^r - p_{feS} - \beta_S \omega_S^r) = (k'/k_G^r)\omega_L^r \quad (10)$$

که در آن k' ثابتی مثبت است. از جایگذاری (۱۰) در (۹)، رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$\eta_{AL} = [(k'/k_G^r)\omega_L^r] / [V_a (i_{aL} + i_{aS})] \quad (11)$$

با استفاده از تعریف (۱۲):

(۱۲)

$$f_1(\omega_L) = p_{feL} + p_{feS} + \beta_L \omega_L^r + \beta_S \omega_S^r + (k'/k_G^r)\omega_L^r$$

لازم است مطابق (۱۳) مجموع توان خروجی موتورها برابر با توان بار باشد و مطابق (۱۴) و (۱۵) سهم توان هر موتور، کوچکتر یا مساوی توان نامی همان موتور و همچنین جریان هر موتور، کوچکتر یا مساوی جریان نامی همان موتور باشد. قیود تعادل توان بار و موتورها و محدودیت توان نامی موتورها در زیر آورده شده است:

قید ۱)

$$V_a (i_{aL} + i_{aS}) - (R_{aL} i_{aL}^r + R_{aS} i_{aS}^r) = f_1(\omega_L) \quad (13)$$

قید ۲)

$$P_L \leq P_{L(N)} \Rightarrow \quad \text{or} \quad i_L \leq I_{aL(N)} \\ V_a i_{aL} - R_{aL} i_{aL}^r - p_{feL} - \beta_L \omega_L^r \leq P_{L(N)} \quad (14)$$

به عنوان تابع هدف انتخاب می شود و با η_{AL} مشخص می شود. توان بار برابر با مجموع توانهای خروجی دو موتور است:

$$\eta_{AL} = \frac{P_{inL} \eta_L + P_{inS} \eta_S}{P_{inL} + P_{inS}} = \frac{V_a (i_{aL} \eta_L + i_{aS} \eta_S)}{V_a (i_{aL} + i_{aS})} = \frac{i_{aL} \eta_L + i_{aS} \eta_S}{i_{aL} + i_{aS}} \quad (6)$$

که در آن η_L و η_S به ترتیب کارایی موتورهای کوچک و بزرگ است که در (۷) و (۸) آورده شده. P_{inL} و P_{inS} توانهای ورودی موتور کوچک و بزرگ بوده و به صورت $P_{inL} = V_a i_{aL}$ و $P_{inS} = V_a i_{aS}$ توصیف می شوند:

(۷)

$$\eta_L = \frac{P_{outL}}{P_{inL}} = \frac{V_a i_{aL} - R_{aL} i_{aL}^r - p_{feL} - \beta_L \omega_L^r}{V_a i_{aL}}$$

(۸)

$$\eta_S = \frac{P_{outS}}{P_{inS}} = \frac{V_a i_{aS} - R_{aS} i_{aS}^r - p_{feS} - \beta_S \omega_S^r}{V_a i_{aS}}$$

P_{outL} و P_{outS} تلفات آهنی موتورها، p_{feL} و p_{feS} توانهای خروجی موتورها است. با جایگذاری (۷) و (۸) در (۶)، رابطه (۹) به دست می آید:

(۹)

$$\eta_{AL} = \frac{V_a (i_{aL} + i_{aS}) - (R_{aL} i_{aL}^r + R_{aS} i_{aS}^r)}{V_a (i_{aL} + i_{aS})} - \frac{(p_{feL} + p_{feS} + \beta_L \omega_L^r + \beta_S \omega_S^r)}{V_a (i_{aL} + i_{aS})}$$

فید ۳)

قرار می‌دهیم تا i_{as}^* به دست آید [۱۳] و [۱۴]. توجه شود

$$:\omega_L \neq 0 \text{ و } g' \neq 0 \text{ که}$$

$$\frac{\partial \eta_{AL}}{\partial i_{as}} = \left[-\left(\frac{\partial g(i_{as})}{\partial i_{as}} \right) \frac{k'}{k_G} \omega_L^r \right] / g'(i_{as}) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial g(i_{as})}{\partial i_{as}} = 0 \quad (18)$$

از (۱۸) معادله درجه دومی به دست می‌آید که پاسخ منفی آن برای جریان قابل قبول نیست و i_{as}^* به صورت (۱۹) مشخص می‌شود.

$$i_{as}^* = \frac{V_a}{2R_{as}} - \sqrt{\frac{V_a^r}{4R_{as}^r} - \frac{R_{al} f_1(\omega_L)}{R_{as}(R_{as} + R_{al})}} \quad (19)$$

i_{al}^* در (۱۶) به جای i_{as} ، جایگذاری می‌شود تا i_{al}^* مقدار جریان بهینه موتور بزرگتر مشخص شود. نسبت جریان بهینه i_{as}^* / i_{al}^* به عنوان نسبت مبنا (i_{ref}) در ساختار قالبی کنترل کننده دوم در شکل (۳) انتخاب می‌شود:

۳-۴- بررسی وجود بیشینه برای کارایی

i_{as}^* اکسترمم تابع هدف است و برای آنکه بیشینه کننده تابع هدف باشد، لازم است مشتق دوم تابع هدف نسبت به i_{as} در محدوده کاربردی دو موتور توزیع شده، منفی باشد [۱۵] و [۱۶]. از آنجا که جریان دو موتور و ولتاژ آرمیچرها همواره مثبت هستند، پس g نیز همواره مثبت است. لذا پس از محاسبه مشتق دوم و حذف مقدار مثبت g از دوطرف شرط (۲۰) به دست می‌آید:

$$-(\partial^2 g / \partial i_{as}^2) g + 2(\partial g / \partial i_{as}) < 0 \quad (20)$$

$$P_S \leq P_{S(N)} \Rightarrow \text{or } i_{as} \leq I_{as(N)} \quad (15)$$

$$V_a i_{as} - R_{as} i_{as}^r - p_{fes} - \beta_S \omega_S^r \leq P_{S(N)}$$

۳-۳- قانون کنترل بهینه

در هر سرعتی، توان باری که برابر مجموع توان دو موتور است مقداری مشخص دارد. اما سهم توان هر موتور می‌تواند متفاوت باشد. به این طریق جریان آرمیچر دو موتور به هم وابسته‌اند و هر افزایشی در جریان یکی از موتورها، باعث کاهش در جریان دیگری می‌شود. با فرض اینکه هیچ یک از جریانهای دو موتور به محدوده جریان نامی نرسیده‌اند، جریان i_{al} بر حسب جریان i_{as} به صورت (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$i_{al} = \frac{V_a}{2R_{as}} - \sqrt{\frac{V_a^r}{4R_{as}^r} - \frac{V_a i_{as} - R_{as} i_{as}^r - f_1(\omega_L)}{R_{al}}} \quad (16)$$

برای توان بار مشخص - که نظیر سرعت دوران خاصی است - جریان i_{al} فقط تابع i_{as} است و به این طریق رابطه $V_a(i_{al} + i_{as})$ هم فقط تابع i_{as} است. با استفاده از تعریف $g(i_{as}) = V_a(i_{al} + i_{as})$ و جایگذاری در (۱۱) تابع هدف مطابق (۱۷) فقط تابع تک‌متغیره i_{as} است:

$$\eta_{AL} = [(k'/k_G^r) \omega_L^r] / g(i_{as}) \quad (17)$$

در این صورت برای هر توان بار مشخص - که نظیر سرعت منحصر به فردی است - جریان i_{as} خاصی کارایی را بیشینه می‌کند که جریان بهینه موتور کوچک بوده و با i_{as}^* نشان داده می‌شود. برای تعیین کارایی بیشینه، از (۱۷) نسبت به i_{as} مشتق گرفته و برابر صفر

$$i_{as} = \frac{V_a}{\sqrt{2}R_{as}} - \sqrt{\frac{V_a^2}{\epsilon R_{as}^2} - \frac{V_a i_{al} - R_{as} i_{al}^* - f_1(\omega_L)}{R_{as}}} \quad (23)$$

اگر $i_{al}^* < I_{al(N)}$ و $i_{as}^* < I_{as(N)}$ آنگاه
 $i_{ref} = i_{as}^* / i_{al}^*$

اگر $i_{al}^* > I_{al(N)}$ و $i_{as}^* < I_{as(N)}$ آنگاه $i_{al} = I_{al(N)}$
 انتخاب می‌شود و از (۲۳)، i_{as} محاسبه می‌شود، آنگاه
 $i_{ref} = i_{as} / I_{al(N)}$

اگر $i_{al}^* < I_{al(N)}$ و $i_{as}^* > I_{as(N)}$ آنگاه
 $i_{as} = I_{as(N)}$ انتخاب می‌شود و از (۱۶)، i_{al} محاسبه
 می‌شود، آنگاه $i_{ref} = i_{as(N)} / i_{al}$

اگر $i_{al}^* > I_{al(N)}$ و $i_{as}^* > I_{as(N)}$ موتورها دچار
 اضافه بار شده‌اند و آنگاه $i_{ref} = I_{as(N)} / I_{al(N)}$

لازم است توضیح دهیم که در زمان کوتاه راه‌اندازی
 موتورها جریان موتورها بیشتر از جریان نامی است و به
 کنترل‌کننده بهینه نیاز نیست و از $i_{ref} = I_{as(N)} / I_{al(N)}$
 استفاده می‌شود.

۵- شبیه‌سازی کنترل‌کننده بهینه

این شبیه‌سازی برای جفت موتورهای مختلفی تکرار شده
 است. در این مقاله نتایج دو گروه از موتورها
 آورده می‌شود.

۵-۱- دو موتور با مجموع توان [kw] ۱/۴

در این مرحله سعی شده برای دو موتوری که امکان
 آزمودن آن در آزمایشگاه نیز فراهم باشد، نحوه کنترل بهینه
 از طریق شبیه‌سازی بررسی و سپس در آزمایشگاه آزموده
 شود. دو موتور با مشخصات جدول (۱) برای راه‌اندازی دو

سمت چپ رابطه (۲۰) به صورت (۲۱) محاسبه
 می‌شود و در آن از تعریف $M = (V_a / \sqrt{2}R_{al}) - i_{al}$
 استفاده شده است. در (۲۱)، g و M هر دو مثبت است
 و $2R_{as} i_{as} -$ حتی در جریان نامی - بسیار کوچکتر از
 V_a است؛ پس جملات اول و دوم سمت چپ (۲۱)
 همواره منفی است:

$$-(\partial^2 g / \partial i_{as}^2)g + 2(\partial g / \partial i_{as}) = \frac{-R_{as} g}{R_{al} M} - \quad (21)$$

$$\frac{(V_a - \sqrt{2}R_{as} i_{as})^2}{\sqrt{2}R_{al} M^2} (g + \epsilon M) - 2(-1 + \frac{V_a - \sqrt{2}R_{as} i_{as}}{R_{al} M})$$

و چون تساوی $\sqrt{2}R_{al} M = V_a - \sqrt{2}i_{al}R_{al}$ برقرار
 است، عبارت جمله سوم به صورت (۲۲) است.

$$V_a - \sqrt{2}R_{as} i_{as} / R_{al} M = \quad (22)$$

$$2(V_a - \sqrt{2}R_{as} i_{as}) / (V_a - \sqrt{2}R_{al} i_{al})$$

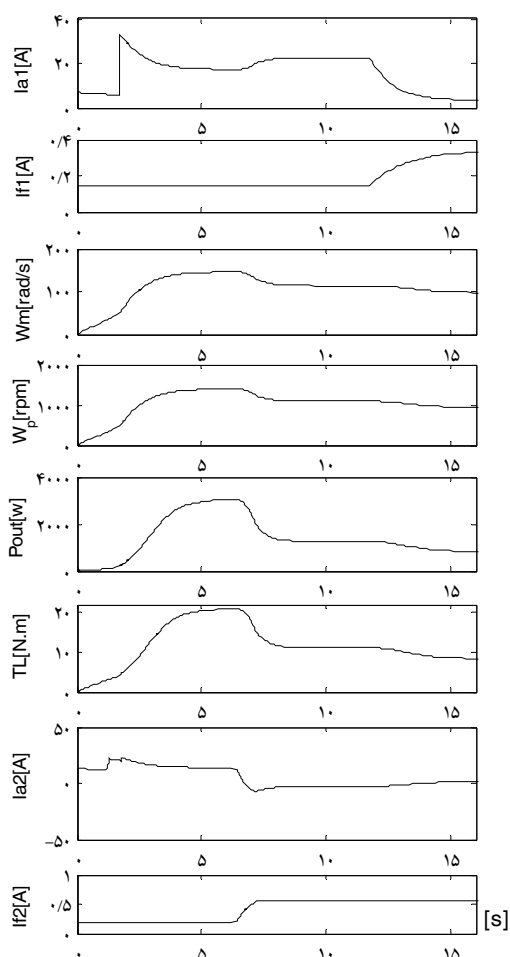
عبارتهای $i_{al}R_{al}$ و $i_{as}R_{as}$ کوچکتر از V_a است،
 پس عبارت (۲۲) بزرگتر از ۱ و جمله سمت راست
 (۲۱) نیز منفی است. در این صورت (۲۰) معتبر است
 و i_{as}^* به دست آمده، بیشینه‌کننده تابع هدف است؛ به
 بیانی دیگر، کارایی سیستم، بیشینه و کنترل بدست
 آمده، کنترل بهینه است.

۴- الگوریتم تعیین جریان مبنا (i_{ref})

در زیر، الگوریتم تعیین جریان مبنا کنترل‌کننده اول بر
 اساس قانون کنترل بهینه بخش ۳-۳ و با در نظر گرفتن
 قيود (۱۳) تا (۱۵) ارائه شده که در آن از رابطه (۲۳)
 استفاده می‌شود. در الگوریتم، محدودیت جریان نامی
 آرمیچرها در نظر گرفته شده است:

مختلف نشان می‌دهد. رفتار دینامیکی موتورها در شکل (۳)

مشخص شده است. در اینجا $k_G = 1$ و $k_L = 1.81$.



شکل ۴ به ترتیب جریان آرمیچر و تحریک موتور کوچک سرعت دوران موتور و پروانه، توان و گشتاور بار و جریان آرمیچر و تحریک موتور بزرگ در خلال راه‌اندازی موتورها برای رسیدن به سرعت موتور به 100 [rad/s] با کنترل‌کننده بهینه

۵-۲- دو موتور با مجموع توان ۹۹/۵ کیلووات

در این مرحله کنترل‌کننده بهینه و غیربهینه برای دو موتور با مشخصات جدول (۲) مقایسه می‌شود. برای کنترل‌کننده

موتور با مقاومت راه‌انداز برای رسیدن سرعت موتورها به سرعت 100 [rad/s] یا $954/93 \text{ [rpm]}$ بررسی می‌شود. این سرعت نظیر گشتاور بار $8/668 \text{ [N.m]}$ یا توان بار $866/844 \text{ [w]}$ است.

جدول ۱ مشخصات موتورهای تزویج شده گروه اول

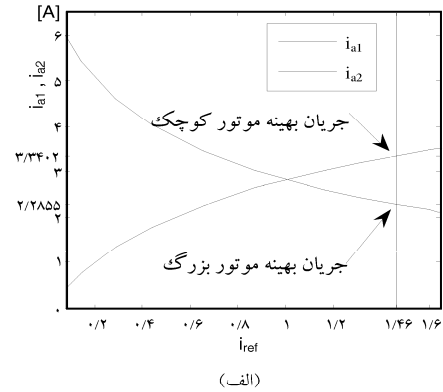
| موتور کوچک | موتور بزرگ | مشخصه |
|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| ۲۰۰V | ۲۰۰V | ولتاژ آرمیچر |
| ۳/۵A | ۶A | جریان نامی آرمیچر |
| ۲۳۰H | ۱۶۰H | ضریب القایی تحریک |
| ۰/۰۲H | ۰/۰۲۶۹H | ضریب القایی آرمیچر |
| ۳/۱۵۵۷H | ۳/۵۴۱۴H | ضریب القایی متقابل |
| ۴/۸۲۱ Ω | ۷/۰۴۵۷ Ω | مقاومت آرمیچر |
| ۵۶۸/۵۷۱۴ Ω | ۴۰۴/۰۸۱۶ Ω | مقاومت تحریک |
| ۰/۰۰۸۵ kg.m ^۲ | ۰/۰۱۱ kg.m ^۲ | ممان اینرسی |
| ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۷ | ضریب اصطکاک |
| N.m.s/rad | N.m.s/rad | |

در شکل (۴) مراحل راه‌اندازی موتورها در مدت 16 [s] ترسیم شده که شاخص ۱ برای موتور کوچک و شاخص ۲ برای موتور بزرگ است. در حالت پاسخ بهینه $i_{as}^* = 3.34 \text{ [A]}$ و $i_{al}^* = 2.286 \text{ [A]}$ و جریان مبنای کنترل‌کننده اول برابر $i_{ref} = i_{as}^* / i_{al}^* = 1.4615$ است. برای همان سرعت 100 [rad/s] و بهینه تعیین شده، به ازای تغییرات مختلف مقادیر جریان آرمیچر موتورها در شکل (۵) الف و کارایی و مشتق دوم کارایی به ترتیب در اشکال (۵) ب و (۵) ج ترسیم شده است. در شکل (۵) ج، در $i_{ref} = 1.461$ کارایی بیشینه و برابر $77/042\%$ شده و مقدار مربوط به کنترل بهینه را مشخص می‌کند. در شکل (۵) ب مشخص است که برای تمامی مقادیر انتخابی برای i_{ref} مشتق دوم کارایی همواره منفی است. شکل (۵) الف نحوه جابه‌جایی جریان از یک موتور به موتور دیگر را برای بار ثابت $866/844 \text{ [w]}$ به ازای i_{ref} های

جدول ۲ مشخصات موتورهای تزویج شده گروه دوم

| موتور کوچک | موتور بزرگ | مشخصه |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| ۲۶۰۷ | ۲۶۰۷ | ولتاژ آرمیچر |
| ۲۳۰A | ۳۰۴A | جریان نامی آرمیچر |
| ۳H | ۲/۵H | ضریب القایی تحریک |
| ۰/۰۰۳۲۸H | ۰/۰۰۲۱۶H | ضریب القایی آرمیچر |
| ۰/۴۶۳۴H | ۰/۳۴۸۵H | ضریب القایی متقابل |
| ۰/۳۶Ω | ۰/۰۹۹Ω | مقاومت آرمیچر |
| ۴۲/۶۲۳Ω | ۲۰Ω | مقاومت تحریک |
| ۱/۲۱ kg.m ^۲ | ۱/۹۱ kg.m ^۲ | ممان اینرسی |
| ۰/۴۲ | ۰/۱۵۳۵ | ضریب اصطکاک |
| N.m.s/rad | N.m.s/rad | |

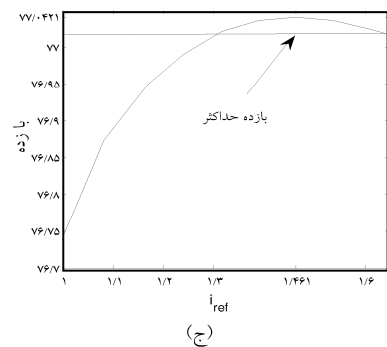
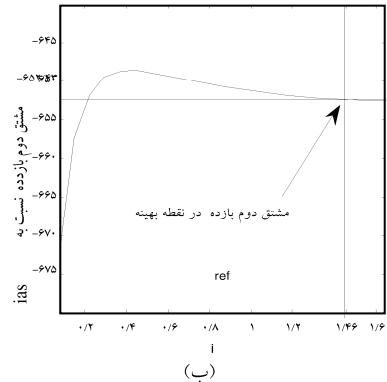
غیربهبینه $k=1.77$ انتخاب شده است. این مقایسه برای رسیدن به سرعت‌های مختلف دوران از $۱۳۷/۶۸۷$ [rad/s] تا ۱۵۰ [rad/s] انجام شده و نتایج در جدول (۳) آورده شده است.



جدول ۳ مقایسه مشخصه‌های موتورها پس از تعادل برای دو حالت با کنترل‌کننده بهینه و کنترل‌کننده غیربهبینه و

برای سه سرعت و توان بار مختلف

| سرعت موتور [rad/s] | | | بهبینه | جریان آرمیچر موتور کوچک [A] |
|--------------------|---------|---------|-----------|-----------------------------|
| ۱۳۷/۶۸۷ | ۱۴۰ | ۱۵۰ | | |
| ۶۰/۳۵۷ | ۶۴/۴۸۹ | ۸۶/۱۲۷ | غیر بهینه | جریان آرمیچر موتور بزرگ [A] |
| ۱۷۹ | ۱۹۶/۶۰۹ | ۲۷۳/۲۳۷ | بهبینه | توان موتور کوچک [kw] |
| ۲۱۹/۴۸ | ۲۳۴/۵۰۷ | ۳۰۳/۹۵۴ | غیر بهینه | توان موتور بزرگ [kw] |
| ۱۳۳/۶۷ | ۱۴۴/۵۷۶ | ۲۰۴/۰۳۳ | بهبینه | کارایی سیستم |
| ۴/۰ | ۴/۴۵۸ | ۶/۸۲۸ | غیر بهینه | |
| ۱۹/۸۸۳ | ۲۰/۸۶۷ | ۲۳/۷۸۵ | بهبینه | |
| ۴۰/۶۰۷ | ۴۳/۱۳۹ | ۵۴/۲۷۰ | غیر بهینه | |
| ۲۴/۷۲۸ | ۲۶/۷۲۹ | ۳۷/۳۱۲ | بهبینه | |
| ٪۷۲/۴۶۳ | ٪۷۲/۳۵۹ | ٪۷۱/۱۹۴ | غیر بهینه | |
| ٪۶۴/۸۵۳ | ٪۶۳/۹۷۳ | ٪۵۸/۱۸ | بهبینه | |

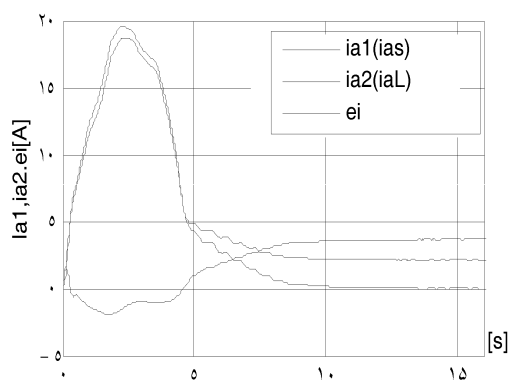


مقادیر کارایی برای تمامی سرعتها در شکل (۵) آورده شده است. از شکل (۶) برای سرعت ۱۵۰ [rad/s] - که متناظر با توان بار $۶۱/۸$ [kw] است - کارایی با کنترل‌کننده بهینه $٪۱۳$ بهتر شده است. از جدول (۳) برای این سرعت در حالت بهینه بار موتور بزرگ و کوچک به ترتیب برابر $۵۴/۲۷$ و $۶/۸۲۸$

شکل ۵ الف) جریان دو موتور (ب) مشتق دوم کارایی (ج) کارایی سیستم به ازای تغییر i_{ref} و برای رسیدن به سرعت موتور به ۱۰۰ [rad/s]

نمونه‌گیری از سرعت، جریانهای آرمیچر، ولتاژها و جریانهای تحریک و ولتاژ آرمیچر انجام شده و پس از دیجیتال شدن مقادیر، منطق کنترل‌کننده در نرم‌افزار اجرا می‌شود. فرمان‌های کنترل‌کننده که خروجی کامپیوتر هستند توسط دو درایو به ولتاژ تحریک موتورها تبدیل می‌شود.

برای توان بار $900[W]$ جریان آرمیچر دو موتور و خطای جریان از زمان استارت اندازه‌گیری و در شکل (۸) نشان داده شده است. در چهار ثانیه اول مقاومت راه‌انداز در مدار بوده و کنترل‌کننده فعال نیست و پس از آن عمل کرده و خطای تقسیم جریان را به صفر می‌رساند.

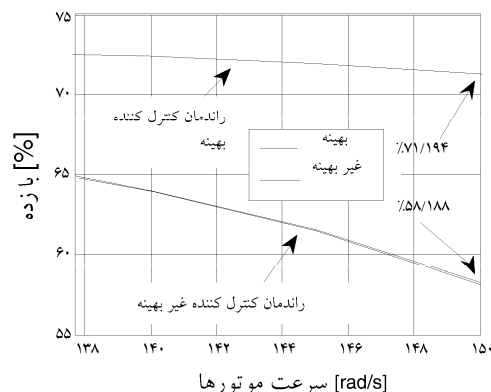


شکل ۸ جریانها و خطای جریان برای بار $900[W]$

۷- نتیجه‌گیری

کنترل‌کننده دو موتور الکتریکی تزویج شده قبلی توان بار را به صورت غیربهینه بین دو موتور تقسیم می‌کرد. در این مقاله کنترل‌کننده‌ای با نوعی قانون کنترل بهینه ارائه شد که بر اساس روشهای تحلیلی مطرح شده در مباحث کنترل بهینه می‌تواند بر اساس مقدار بار و مشخصه‌های موتورها، سهم توان هر موتور را به نحوی تعیین کند که کارایی سیستم بیشینه شود. در نمونه شبیه‌سازی شده، کارایی

کیلووات است اما در حالت غیربهینه به ترتیب برابر $37/312$ و $23/785$ کیلووات بوده است.



شکل ۶ مقایسه کارایی در حالت با کنترل‌کننده بهینه و بدون کنترل‌کننده بهینه برای سرعت‌های مختلف

۶- ساخت نمونه آزمایشگاهی

نمونه آزمایشگاهی سیستم تزویج مکانیکی دو موتور مختلف در آزمایشگاه دانشکده برق دانشگاه صنعتی مالک اشتر ساخته شد. نتایج عملی نیز نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. دو موتور الکتریکی با توانهای $520[W]$ و $860[W]$ که اطلاعات آن در جدول (۱) آورده شده مطابق شکل (۶) تزویج شده است.



شکل ۷ نمای تجهیزات سیستم تزویج دو موتور

- [۶] جعفربلند، م.، زاده باقری، م.، "ارائه متد جدیدی برای کویلاژ بهینه دو موتور الکتریکی سیستم رانش زیردریایی بر اساس الگوریتم ژنتیک"، یازدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش - ۱۹ الی ۲۱ آبان ۱۳۸۸.
- [۷] جعفربلند، م.، "کنترل بهینه سهم توان دو موتور الکتریکی مختلف تزویج شده جهت بهبود و افزایش برد زیردریایی"، هفدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ۲۲ تا ۲۴ اردیبهشت ۱۳۸۸.
- [8] Jafarboland, M, Sadati, N., Momeni, H., R., "Robust Tracking Control of Attitude Satellite with Using New SMC and EKF for Large Maneuvers," IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, March 4-11, 2006.
- [۹] جعفر بلند، م.، زاده باقری، م.، "بهینه سازی انرژی مصرفی دو موتور الکتریکی تزویج شده بر اساس الگوریتم ژنتیک"، نشریه علمی پژوهشی الکترونیک و قدرت دانشکده مهندسی برق، سال اول، شماره سوم، صفحه ۳ الی ۹، تابستان ۱۳۸۸.
- [۱۰] جعفربلند، م.، "مدل سازی دینامیک زیردریایی میدجت در عمق پریسکوپ به صورت ترکیبی از دینامیک های فرکانس کم و فرکانس زیاد"، چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، ۲۶-۲۸ اردیبهشت ۱۳۸۵، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [11] N. Prljaca and Z. Gajic, "A Method for Optimal Control and Filtering of Multi-time Scale Linear Stochastic Singularly Perturbed Systems," Automatica, Vol. 44, pp. 2149-2156, 2008.
- سیستم تا ۱۳٪ افزایش داشته است. این کنترل کننده امکان تنظیم سرعت دلخواه بار را نیز دارد.
- ### ۸- منابع
- [1] Yamamoto, T. Aoki, S. Tsukioka, H. Yoshida, T Hyakudome, T. Sawa, "Fuel Cell System of AUV "Urashima," IEEE TECHNO-OCEAN '04, Vol. 3, pp. 1732 – 1737, 2004.
- [2] Chu Jianxin, Gu Wei, Chen Xiaoya, "Study on Adaptive Control of The Propelling And Turning Manoeuvre of An Autonomous Water Vehicle for Ocean Observation," MTS/OCEANS '08, QUEBEC, pp. 1-4, 15-18-Sept., 2008.
- [3] T. Inoue, H. Suzuki, T. Shimamura, K. Nakajima, G. Shioji, "Experimental Research on Horizontal Rotation of ROV Induced by External Forces near Sea Surface," MTS/OCEANS '08, QUEBEC, pp. 1-6, Sept. 2008.
- [۴] جعفربلند، م. صدوقی، ع.ر.، "مدل سازی و طراحی کنترل کننده برای سیستم تزویج مکانیکی دو موتور الکتریکی متفاوت جهت افزایش کارایی سیستم محرک زیردریایی"، نشریه علمی پژوهشی مدرس، پذیرش مهر ۱۳۸۸.
- [۵] جعفربلند، م.، "جدا سازی سیستم کنترل وابسته دو موتور الکتریکی هم محور شده متفاوت با استفاده از دو کنترل کننده فازی برای بهبود سیستم محرک زیردریایی"، چهارمین همایش ملی علوم و فناوری زیردریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۹-۱۰ خرداد ۱۳۸۶.

- [15] R.C. Loxton, K.L. Teo, V. Rehbock, "Computational Method for a Class of Switched System Optimal Control Problems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54, NO. 10, pp. 2455-2460, OCTOBER 2009.
- [16] R. Omran, R. Younes, J. C. Champoussin, "Optimal Control of a Variable Geometry Turbocharged Diesel Engine Using Neural Networks Applications on the ETC Test Cycle," IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 17, NO. 2, pp. 380-393, MARCH 2009.
- [12] S. Koskie and Z. Gajic, "Optimal SIR-based Power Control Strategies Wireless CDMA Networks," International Journal of Information & Systems Science, Vol. 4, 204-218, 2008.
- [13] N. Fukushima, M.S. Arslan, I. Hagiwara, "An Optimal Control Method Based on the Energy Flow Equation," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 866 - 875, July 2009.
- [14] Hoam Chung, E. Polak, S. Sastry, "An External Active-Set Strategy for Solving Optimal Control Problems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54, No. 5, pp. 1129- 1133, May 2009 .