

بهینه‌سازی کارایی در سیستم درایو موتور القایی-پمپ، در شرایط تغییر دبی با استفاده از کنترل کننده جستجوگر فازی

محمد ابراهیمی^{۱*}، قاسم اسفندیاری^۲، احمد رضا عظیمیان^۳

۱- دانشیار، دانشکده برق مهندسی و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

*اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

mbrahim@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۸)

چکیده- در این مقاله نوعی روش کنترل جستجوگر فازی همراه با جداول جستجو برای بهینه‌سازی کارایی در درایو موتور القایی- پمپ ارائه شده است. برای مدل‌سازی موتور القایی و کانورتر از مدل‌های مبتنی بر تلفات حرارتی و برای مدل‌سازی پمپ و سیستم هیدرولیکی- که سیستم غیرخطی و نسبتاً پیچیده‌ای است- از شبکه عصبی استفاده شده است. بهینه‌سازی کارایی پمپ و سیستم هیدرولیکی، از طریق کنترل مقدار دبی خروجی به وسیله تنظیم سرعت چرخش پمپ انجام می‌شود. همچنین با انتخاب مناسب فرکانس سویچ‌زنی اینورتر و تعیین مقدار مناسب فرکانس و ولتاژ تغذیه موتور، میزان تلفات مجموعه درایو حداقل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی توانسته است علاوه بر افزایش کارایی مجموعه درایو در شرایط تغییر دبی، مشکلات موجود در روش‌های بهینه‌سازی کارایی مانند کند بودن همگرایی و نوسان حول نقطه بهینه را بهبود بخشد.

کلید واژگان: بهینه‌سازی کارایی، پمپ، شبکه عصبی، کنترل‌کننده فازی، موتور القایی.

۱- مقدمه

در هر فرایند صنعتی که مبتنی بر انتقال مایعات از یک سطح فشار به سطحی دیگر است، از پمپ‌ها به‌عنوان بخش اصلی فرایند استفاده می‌شود و لذا پمپ‌ها مصرف‌کننده‌های اصلی انرژی به‌شمار می‌روند [۱]. از آنجا که در بیشتر کاربردهای صنعتی از موتورهای القایی در پمپ‌ها استفاده می‌شود [۲]، لذا تمرکز اصلی این

مقاله بر بهینه‌سازی کارایی در مجموعه درایو شامل

موتور القایی، پمپ و کانورتر است.

موتورهای القایی به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در حوالی سرعت و بار نامی کارایی بهینه را داشته باشند؛ و اگر موتور از نقطه کار نامی فاصله بگیرد، کارایی کاهش می‌یابد [۳]. از طرف دیگر در هر پمپ و به‌ازای هر سرعت چرخش، نقطه کار بهینه‌ای از نظر دبی و هد وجود دارد که

می‌شود. یکی از عیوب این روش، نیاز به دانستن مدل و پارامترهای سیستم و همچنین حساسیت نسبت به تغییر پارامترهای سیستم است.

در روش کنترل به‌وسیله جدول جستجو، ابتدا با انجام آزمایشگاهی، جدولی برای تعیین مقادیر مناسب ولتاژ و فرکانس تغذیه به‌ازای شرایط مختلف کاری تهیه می‌شود. معایب این روش آن است که در عمل تعداد نقاطی را که می‌توان آزمایش کرد محدود است و همچنین اگر پارامترهای موتور و بار تغییر کند، جدول مزبور باید به‌روز شود که در بیشتر موارد امکان‌پذیر نیست.

در روش جستجوگر حداقل تلفات، با سعی و خطا برخی از پارامترها را حداقل یا حداکثر می‌کنیم، این هدف ممکن است حداکثر کردن کارایی، حداقل کردن توان ورودی اینورتر، حداقل کردن توان خط واسط dc، حداقل کردن توان ورودی موتور، حداقل کردن تلفات موتور، حداقل کردن تلفات درایو، حداقل کردن جریان خط واسط dc و جریان استاتور باشد. برخی از عیوب این روش، کند بودن همگرایی و نوسان حول نقطه بهینه است. مهمترین مزیت روش جستجوگر، نیاز نداشتن به مدل و پارامترهای سیستم است.

در این مقاله نوعی کنترل‌کننده بهینه‌سازی کارایی ارائه شده که مزایای روشهای جستجوگر حداقل تلفات، جدول جستجو و کنترل‌کننده فازی را در بر دارد. در این سیستم علاوه بر حداقل شدن تلفات اجزای مختلف درایو در شرایط تغییر دبی، مشکلات مربوط به کند بودن همگرایی و نوسان حول نقطه بهینه نیز حل شده است.

در ادامه مقاله دلایل کاهش کارایی در درایو موتور القایی - پمپ، بلوک دیاگرام سیستم و روش مدل‌سازی اجزای مختلف آن، تعیین فرکانس مناسب سوچ‌زنی برای اینورتر، کنترل‌کننده جستجوگر سنتی، طراحی سیستم

به‌ازای آن، کارایی پمپ حداکثر می‌شود. لذا اگر در طراحی اولیه، پمپ مناسبی انتخاب شده باشد، می‌توان متناسب با نقطه کار خواسته شده، پمپ را به‌گونه‌ای کنترل کرد که در حوالی نقطه کار بهینه عمل کند.

به منظور کنترل بهینه کارایی در مجموعه درایو موتور القایی - پمپ، ابتدا متناسب با دبی خواسته شده، فرکانس موتور تغییر کرده و در این شرایط پمپ در حوالی نقطه بهینه خود کار می‌کند. سپس سیستم کنترل‌کننده، ولتاژ موتور را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که تلفات کل درایو حداقل شود.

روشهای بهینه‌سازی کارایی در درایو موتور القایی را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از: الف) کنترل ساده متغیرهایی مانند ضریب قدرت [۴] یا فرکانس لغزش رتور [۵].

ب) کنترل مبتنی بر مدل، قابل اجرا در کنترل اسکالر [۶] یا کنترل برداری [۷].

ج) کنترل به‌وسیله جدول‌های جستجو [۸].

د) کنترل جستجوگر حداقل تلفات [۹، ۱۰].

با استفاده از کنترل ساده، می‌توان متغیر مورد نظر مانند ضریب قدرت یا فرکانس لغزش رتور را با توجه به مقادیر مرجع از قبل تعیین شده‌ای کنترل کرد. این مقادیر مرجع با استفاده از تحلیل مدل ساده سیستم و با هدف ایجاد شرایط لازم برای نیل به کارایی بهینه تعیین می‌شوند و می‌توان نشان داد که به‌ازای شرایط کاری مختلف مورد نیاز بار، تقریباً ثابت می‌مانند. اشکال مهم این روش آن است که ضریب قدرت مرجع یا فرکانس لغزش رتور مرجع برای تأمین شرایط کارایی بهینه، برای یک موتور مشخص معتبر بوده و با تغییر بار و سرعت کاملاً ثابت نخواهند بود و همچنین نسبت به تغییر پارامترهای موتور حساس است.

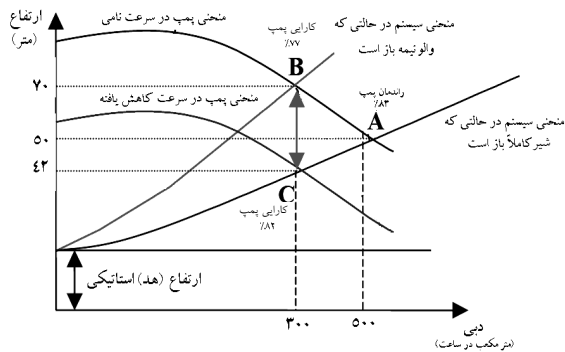
در روش کنترل بهینه مبتنی بر مدل، با استفاده از مدل درایو، مقدار بهینه متغیر کنترلی محاسبه و به سیستم اعمال

۲-۲- کنترل نقطه کار پمپ به وسیله تغییر سرعت

چرخش پمپ

با تغییر سرعت چرخش پمپ، منحنی مشخصه پمپ نیز تغییر می‌کند. در شکل ۱ نشان داده شده که اگر برای کاهش دبی پمپ از ۵۰۰ به ۳۰۰ متر مکعب در ساعت، سرعت پمپ را کاهش دهیم، نقطه کار پمپ C خواهد بود. در این حالت کارایی پمپ برابر ۸۲٪ بوده و میزان هد (ارتفاع) تولیدی مورد نیاز ۴۲ متر است. بنابراین کارایی مجموعه پمپ و سیستم هیدرولیکی نسبت به حالت قبل بسیار بهتر خواهد بود.

از طرف دیگر موتورها معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در نزدیکی سرعت نامی و بار نامی دارای کارایی بهینه باشند. از آنجا که در حالت کنترل دبی به وسیله تغییر سرعت پمپ، موتور در سرعت و باری کمتر از مقدار نامی خود عمل می‌کند، لذا کارایی موتور و در نتیجه کارایی کل سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین باید با استفاده از روش‌های کنترلی، کارایی موتور را افزایش داد.



شکل ۱ کنترل نقطه کار پمپ

۳- مدل سازی سیستم

برای طراحی سیستم کنترل کننده و انجام شبیه‌سازیهای دقیق و نیز محاسبات مربوط به افزایش کارایی در سیستم درایو،

کنترل کننده پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ارائه و تشریح می‌شود.

۲- کنترل دبی و دلایل کاهش کارایی در

درایو موتور القایی-پمپ

در صورت نیاز به کنترل و تنظیم دبی یا هد در سیستم هیدرولیکی لازم است محل تلاقی منحنی مشخصه پمپ و منحنی سیستم هیدرولیکی در نقطه مطلوب قرار گیرد. برای این منظور به دو روش می‌توان عمل کرد: الف) تغییر منحنی مشخصه سیستم هیدرولیکی ب) تغییر منحنی مشخصه پمپ.

۲-۱- کنترل نقطه کار پمپ به وسیله تغییر منحنی

مشخصه سیستم

در سیستم‌های هیدرولیکی به وسیله باز و بسته کردن شیر کنترلی می‌توان منحنی مشخصه سیستم را تغییر داد، در حقیقت شیر کنترلی مانند مقاومت عمل کرده و بسته شدن آن باعث کاهش دبی عبوری از سیستم می‌شود.

در شکل ۱ نشان داده شده که اگر شیر کنترلی کاملاً باز باشد و پمپ نیز در سرعت نامی خود کار کند، نقطه کار پمپ A است. در این شرایط کارایی پمپ حداکثر بوده و برابر ۸۳٪ است. برای کاهش دبی پمپ از ۵۰۰ به ۳۰۰ متر مکعب در ساعت، شیر کنترلی را در حالت نیمه باز قرار می‌دهیم. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با بسته شدن شیر کنترلی، نقطه کار پمپ B خواهد شد. در این حالت کارایی پمپ برابر ۷۷٪ بوده و میزان هد (ارتفاع) تولیدی مورد نیاز برابر ۷۰ متر است، که از این مقدار، ۴۲ متر برای تأمین ارتفاع مورد نیاز سیستم هیدرولیکی بوده و ۲۸ متر آن در شیر کنترلی تلف می‌شود و این خود باعث کاهش کارایی کلی خواهد شد.

$$R_{Fe} i_{qFe} = L_m di_{qm}/dt + w_a L_m i_{dm} \quad (6)$$

$$i_{dm} + i_{dFe} = i_{ds} + i_{dr}, \quad i_{qm} + i_{qFe} = i_{qs} + i_{qr} \quad (7)$$

$$\psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m i_{dm}, \quad \psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m i_{qm} \quad (8)$$

$$\psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m i_{dm}, \quad \psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m i_{qm} \quad (9)$$

$$T_s = (L_m/L_r) (\psi_{dr}(i_{qs} - i_{qFe}) - (\psi_{qr}(i_{ds} - i_{dFe}))) \quad (10)$$

در این روابط، v ، $\dot{\alpha}$ و ω به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ، جریان، شار مغناطیسی و سرعت چرخش است. اندوکتانس‌های پراکنده با شاخص l و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی با شاخص m نشان داده شده است و همچنین متغیرها و پارامترهای مربوط به تلف هسته با شاخص Fe مشخص شده است. S نشان‌دهنده پارامترهای استاتور و r نشان‌دهنده پارامترهای رتور است. مقاومت R_{Fe} استفاده شده در روابط [۵ و ۶] به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_{fe} = \frac{3V_m^\gamma}{P_{core}} = \frac{3(2\pi)^\gamma \psi_m^\gamma f_s^\gamma}{P_{core}(\psi_m, f_s, S)} \quad (11)$$

در این رابطه S نشان‌دهنده لغزش بوده و تلفات هسته از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{core} = P_{core,s} + P_{core,r} = (1 + S^\gamma \frac{m_r}{m_s}) k_{e,s} \psi_m^\gamma f_s^\gamma + (1 + S^\gamma \frac{m_r}{m_s}) k_{h,s} \psi_m^n f_s^n \quad (12)$$

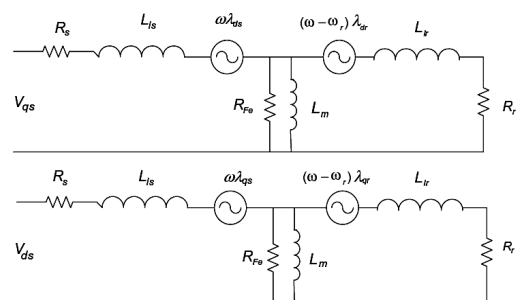
در این رابطه $P_{core,s}$ تلفات هسته استاتور، $P_{core,r}$ تلفات هسته رتور، $k_{h,s}$ ضریب هیستریزیس، $k_{e,s}$ ضریب

به مدل تلفاتی اجزای مختلف سیستم با دقت و قابلیت اطمینان کافی نیاز داریم. اجزای اصلی این درایو عبارتند از: پمپ، موتور القایی، کانورتر و کنترل کننده. در ادامه روش مدل‌سازی هر یک از این اجزا بیان می‌شود.

۳-۱- مدل موتور القایی دارای تلفات هسته

مدلهای دینامیکی سنتی موتور القایی فاقد اثر تلفات هسته است. در این مقاله از آنجا که هدف بهینه‌سازی کارایی در اجزای مختلف درایو است، به مدل موتور القایی با احتساب اثر تلفات هسته نیاز داریم. در شکل ۲ مدل پویای ماشین القایی با در نظر گرفتن تلف هسته نشان داده شده است. با استفاده از این مدل، معادلات حالت ماشین در دستگاه مرجع اختیاری به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۱]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + d\psi_{ds}/dt - w_a \psi_{qs} \quad (1)$$



شکل ۲ مدل دینامیکی ماشین القایی با در نظر گرفتن تلف هسته

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + d\psi_{qs}/dt + w_a \psi_{ds} \quad (2)$$

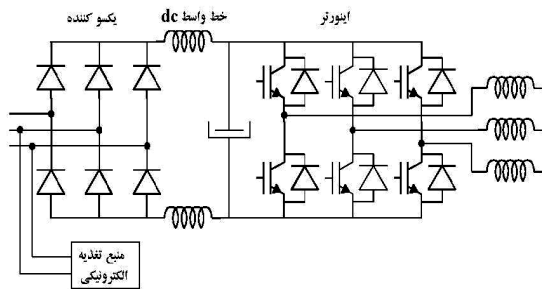
$$0 = R_r i_{dr} + d\psi_{dr}/dt - (w_a - w) \psi_{qr} \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + d\psi_{qr}/dt + (w_a - w) \psi_{dr} \quad (4)$$

$$R_{Fe} i_{dFe} = L_m di_{dm}/dt - w_a L_m i_{qm} \quad (5)$$

$$P_{loss,rec} = 2V_D I_{dc} = 2V_D \frac{P_{rec,out}}{V_{dc}} \quad (13)$$

در این رابطه، V_D ولتاژ هدایت دیود، $P_{rec,out}$ توان خروجی یکسوکننده دیودی و V_{dc} ولتاژ خط واسط dc است.



شکل ۳ ساختار کانورتر

ب- تلفات هدایتی اینورتر

رابطه بین ولتاژ و جریان در ترانزیستور و دیود، به صورت زیر است:

$$V_{on,T} = V_{,T} + r_{,T} \cdot I_T^{B_{con,T}} \quad (14)$$

$$V_{on,D} = V_{,D} + r_{,D} \cdot I_D^{B_{con,D}} \quad (15)$$

که در این روابط، $V_{,T}, r_{,T}, B_{con,T}$ ثابت‌های نشان‌دهنده تلفات هدایتی ترانزیستور، $V_{,D}, r_{,D}, B_{con,D}$ ثابت‌های نشان‌دهنده تلفات هدایتی دیود، $V_{on,T}, V_{on,D}$ ولتاژهای حالت هدایت دیود و ترانزیستور و I_T, I_D جریان‌های حالت هدایت دیود و ترانزیستور است. با توجه به روابط فوق تلفات توان در ترانزیستور و دیود به صورت زیر به دست می‌آیند:

جریان گردابی، m_r جرم هسته رتور، m_s جرم هسته استاتور و f_s فرکانس استاتور است.

موتور القایی شبیه‌سازی شده در این مقاله از نوع سه‌فاز قفسه‌سنجایی با توان نامی ۵۰ اسب بخار است که پارامترها و مقادیر نامی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترها و مقادیر نامی موتور القایی شبیه‌سازی شده

$L_m = 30/39 \text{ mH}$	$K_{h,s} = 0/006$
$L_{ls} = 0/877 \text{ mH}$	$K_{e,s} = 0/006$
$L_{lr} = 0/877 \text{ mH}$	$V_n = 380 \text{ V}_{rms,LL}$
$R_s = 0/9961 \Omega$	$P_n = 37/3 \text{ Kw}$
$R_r = 0/5837 \Omega$	$f_n = 60 \text{ Hz}$
$m_r / m_s = 1$	

۳-۲- مدل تلفاتی کانورتر شامل تلفات

در شکل ۳ مدار معادل مدل تلفاتی کانورتر نشان داده شده است. تلفات کانورتر، مشتملاست بر: تلفات نیمه‌هادی‌های یکسوکننده، تلفات منبع تغذیه قسمت‌های الکترونیکی، تلفات مسی چک خط واسط dc و چک خروجی، تلفات هدایتی و سوئیچ‌زنی در ترانزیستورها و دیودها. مقالات متعددی به طور خاص در زمینه مدل‌سازی دقیق تلفات کانورتر ارائه شده است [۱۲، ۱۳]. بیشتر روش‌های این مقالات برای محاسبات زمان واقعی^۱، پیچیده و زمانبر است. در این مقاله، از روش ساده‌ای استفاده شده که ضمن داشتن دقت مناسب، به محاسبات پیچیده‌ای نیاز ندارد. در ادامه، روش مدل‌سازی اجزای مختلف کانورتر بیان می‌شود.

الف- تلفات نیمه‌هادیهای یکسوکننده

در هر زمان فقط دو دیود هدایت می‌کند و با این فرض که افت ولتاژ دیود یکسوکننده ثابت باشد، تلفات کل یکسوکننده دیودی سه‌فاز به صورت زیر به دست می‌آید:

1. Real.Time

ج- تلفات سویچ‌زنی اینورتر

مدل ساده‌ای که برای محاسبه تلفات سویچ‌زنی اینورتر در نظر گرفته می‌شود، به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$P_{SW,lin} = K_{SW} I_s f_{SW} \quad (21)$$

در این رابطه، K_{SW} ثابت سویچ‌زنی و f_{SW} فرکانس سویچ‌زنی اینورتر است. در این مقاله برای تعیین مقدار ثابت سویچ‌زنی اینورتر، شبیه‌سازی‌هایی به‌ازای مقادیر مختلف جریان و فرکانس سویچ‌زنی انجام شد. اگر جریان را بر حسب آمپر و فرکانس سویچ‌زنی بر حسب کیلوهرتز باشد، K_{SW} تقریباً برابر ۰/۷۵، به دست می‌آید.

تلفات کل اینورتر را می‌توان به صورت مجموع تلفات هدایتی و تلفات سویچ‌زنی و با استفاده از روابط [۱۶ تا ۲۱] محاسبه و در الگوریتم از آن استفاده کرد. پارامترهای اینورتر شبیه‌سازی شده در این مقاله عبارتند از:

$$\begin{aligned} V_{\cdot,T} &= 1/1V & V_{\cdot,D} &= 0/9V & m_i &= 0/85 \\ R_{\cdot,T} &= 0/0045\Omega & R_{\cdot,D} &= 0/006\Omega \end{aligned}$$

۳-۳- مدل سازی پمپ با استفاده از شبکه عصبی

در شکل ۴ منحنی‌های مشخصه پمپ و سیستم هیدرولیکی نشان داده شده که شامل منحنی‌های ارتفاع (هد) و کارایی برحسب دبی پمپ در سرعت‌های مختلف و منحنی ارتفاع برحسب دبی سیستم هیدرولیکی است (که پمپ در آن کار می‌کند). از تلاقی منحنی ارتفاع برحسب دبی مربوط به پمپ و سیستم هیدرولیکی، نقطه کار پمپ به دست می‌آید. با توجه به این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که ارتباط متغیرهای پمپ نظیر دبی، ارتفاع تولیدی و کارایی با سرعت چرخش پمپ، غیرخطی بوده و مدل‌سازی این معادلات به سهولت امکان‌پذیر نیست. به علاوه اگر برای

$$P_{on,T} = (V_{\cdot,T} + r_{\cdot,T} \cdot I_T^{B_{con,T}}) i_T \quad (16)$$

$$P_{on,D} = (V_{\cdot,D} + r_{\cdot,D} \cdot I_T^{B_{con,D}}) i_D \quad (17)$$

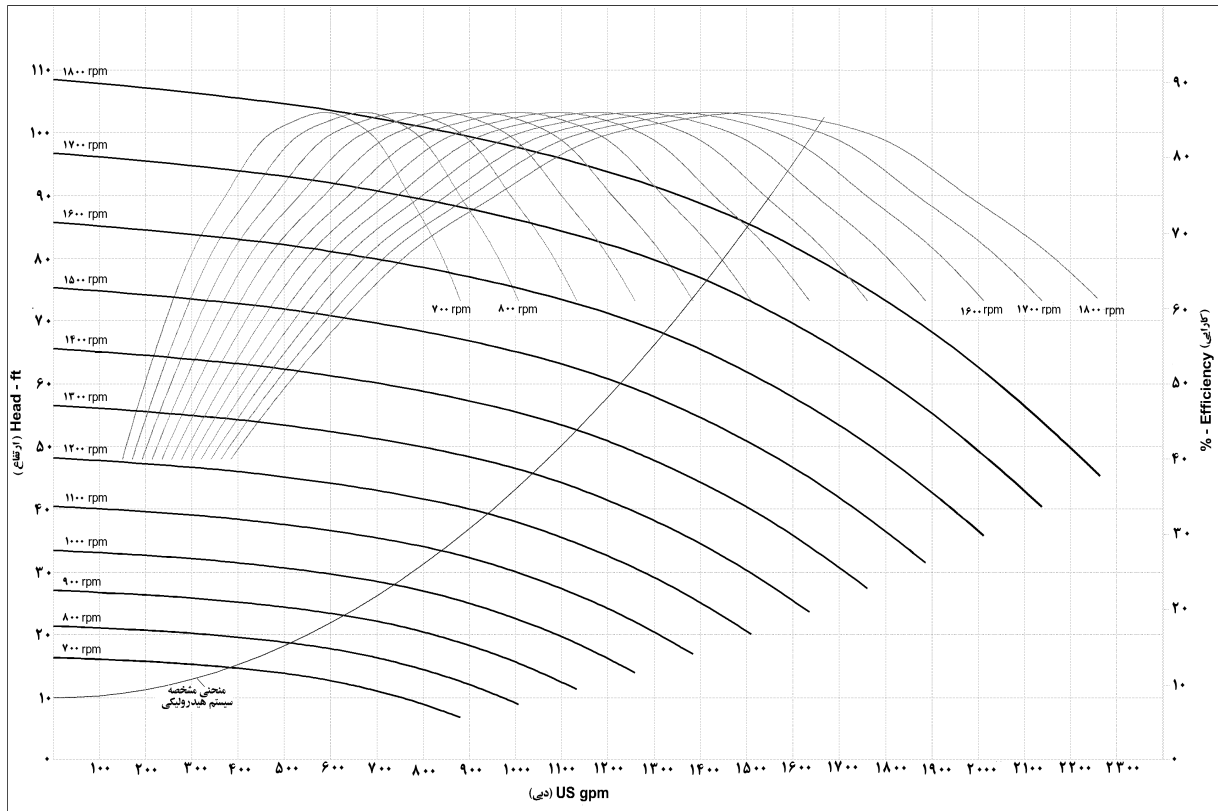
برای محاسبه تلفات هدایتی اینورتر دو ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شود. ساده‌سازی اول اینکه ولتاژ حالت هدایت دیود و ترانزیستور به صورت یک تابع درجه اول مدل سازی شود، یعنی پارامترهای $B_{con,D}$ و $B_{con,T}$ در روابط ۱۴ و ۱۵ برابر یک فرض شوند و ساده‌سازی دوم این است که از روابط زمانی شامل مولفه‌های اول و سوم در محاسبات توان استفاده شود. می‌توان نشان داد که پس از ساده‌سازی‌هایی روابط تلفات هدایتی دیود و ترانزیستور به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۴]:

$$\begin{aligned} P_{con,T} &= \frac{V_{\cdot,T} I_s \sqrt{2}}{\pi} + \frac{I_s V_{\cdot,T} m_i \cos(\varphi)}{\sqrt{6}} + \frac{R_{\cdot,T} I_s^2}{2} \\ &+ \frac{R_{\cdot,T} I_s^2 m_i}{\sqrt{3} \cos(\varphi) \cdot 6\pi} - \frac{\epsilon R_{\cdot,T} I_s^2 m_i \cos(\alpha\varphi)}{45\pi\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (18)$$

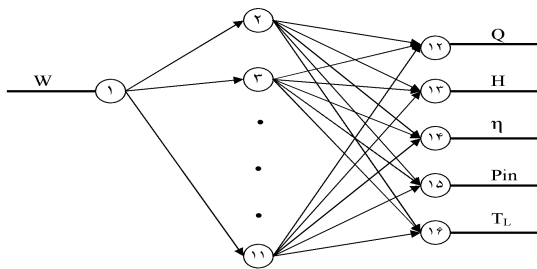
$$\begin{aligned} P_{con,D} &= \frac{V_{\cdot,D} I_s \sqrt{2}}{\pi} + \frac{I_s V_{\cdot,D} m_i \cos(\varphi)}{\sqrt{6}} + \frac{R_{\cdot,D} I_s^2}{2} \\ &+ \frac{R_{\cdot,D} I_s^2 m_i}{\sqrt{3} \cos(\varphi) \cdot 6\pi} - \frac{\epsilon R_{\cdot,D} I_s^2 m_i \cos(\alpha\varphi)}{45\pi\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (19)$$

که در این روابط m_i ضریب مدولاسیون، I_s جریان rms استاتور، ω_s سرعت زاویه‌ای استاتور و φ زاویه شیفت فاز است. با توجه به روابط فوق میانگین تلفات هدایتی اینورتر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{con,inv} = 3(P_{con,T} + P_{con,D}) \quad (20)$$



شکل ۴ منحنی‌های مشخصه پمپ



شکل ۵ بلوک دیاگرام شبکه عصبی برای مدل‌سازی پمپ

به منظور طراحی و آموزش شبکه عصبی، با استفاده از منحنی‌های ارائه شده توسط شرکت سازنده پمپ، جدولی شامل ۶ سطر و ۱۶ ستون تهیه شده که سطر اول آن شامل داده‌های ورودی پمپ و سطر دوم تا ششم شامل خروجی‌های مطلوب است. این مقادیر در جدولهای ۲ و ۳ آورده شده است.

توصیف ارتباط ورودی و خروجی‌های سیستم از جدول اطلاعات استفاده شود، با توجه به داده‌های محدودی که در اختیار است، مسأله درونیابی پیش می‌آید که نیاز به محاسبات پیچیده داشته و به سهولت امکان‌پذیر نیست. لذا در مدل‌سازی پمپ، از شبکه عصبی استفاده شده که بلوک دیاگرام آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود ورودی شبکه عصبی، سرعت چرخش پمپ و خروجی‌های آن، دبی، هد و کارایی پمپ، توان ورودی مورد نیاز پمپ و همچنین گشتاور باری است که پمپ بر موتور القایی اعمال می‌کند.

جدول ۲ داده‌های ورودی شبکه عصبی

W(rpm)	[۰ ۲۰۰ ۴۰۰ ۶۰۰ ۷۰۰ ۸۰۰ ۹۰۰ ۱۰۰۰ ۱۱۰۰ ۱۲۰۰ ۱۳۰۰ ۱۴۰۰ ۱۵۰۰ ۱۶۰۰ ۱۷۰۰ ۱۸۰۰]
--------	---

که در تمامی موارد، میزان خطای شبکه عصبی از حد مجاز مورد نظر یعنی یک درصد کمتر است.

جدول ۵ خطاهای شبکه عصبی

$\Delta Q(\%)$	[۰ /۰۰۰۹ -/۰۰۰۵ /۰۰۰۹ -/۰۰۱۸ /۰۰۲۰ -/۰۰۱۶ /۰۰۰۸ -/۰۰۰۷ /۰۰۲۶ -/۰۰۳۴۹ -/۰۰۲۵ /۰۰۶۳۱ -/۰۰۷۴۳ /۰۰۳۶۰ -/۰۰۰۶۳]
$\Delta H(\%)$	[۰/۰۲ -/۰۱۳۴۶ /۰۲۶۷۵ -/۰۳۸۸۴ /۰۳۱۷۶ -/۰۲۲۴۶ /۰۱۲۱۲ -/۰۰۲۵۰ /۰۰۸۶۸ -/۰۰۰۵۱ /۰۰۸۹۹ -/۰۲۲۰۵ -/۰۱۳۳۳ /۰۱۳۹۹ /۰۲۲۵۱ -/۰۱۵۶۹]
$\Delta \eta(\%)$	[۰ -/۰۰۰۳۲ /۰۰۰۹۱ -/۰۰۳۱۴ -/۰۰۷۹۲ -/۰۱۴۳۹ /۰۱۱۱۲ -/۰۰۶۰۲ /۰۱۹۷۴ -/۰۰۹۷۳ -/۰۱۶۲۶ -/۰۰۵۶۱ /۰۱۲۲۷ /۰۱۰۱۵ -/۰۰۰۵۸ -/۰۰۶۱۸]
$\Delta T_L(\%)$	[۰ /۰۳۱۸۴ -/۰۰۶۰۶ /۰۵۲۳۱ -/۰۰۱۰۲ /۰۰۲۹۶ -/۰۰۴۲۱ /۰۴۹۲۴ /۰۱۱۵۳ -/۰۲۳۸۱ -/۰۲۹۷۰ -/۰۵۳۶۶ -/۰۳۸۱۶ -/۰۱۴۳۵ /۰۱۴۸۹ -/۰۱۵۲۴]
$\Delta P_{in}(\%)$	[۰ -/۰۱۳۱۶ /۰۲۵۶۰ -/۰۳۳۲۵ /۰۳۳۴۲ -/۰۰۷۶۵ /۰۰۰۹۴ /۰۰۳۸۱ -/۰۱۱۶۹ /۰۱۱۷۸ /۰۲۱۷۶ -/۰۱۶۷۴ - /۰۱۹۲۱ -/۰۰۳۵۰ /۰۲۶۶۹ -/۰۱۰۱۴]

جدول ۳ خروجی‌های مطلوب

Q(gpm)	[۰ ۱۰۸/۵۷ ۲۱۷/۱۴ ۳۲۵/۷۱ ۳۸۰ ۵۱۰ ۶۲۸ ۷۳۵ ۸۴۰ ۹۳۸ ۱۰۳۶ ۱۱۳۱ ۱۲۲۴ ۱۳۱۹ ۱۴۱۰ ۱۵۰۰]
H(ft)	[۰ ۱۰/۴ ۱۱/۵۹ ۱۳/۵۷۴ ۱۴/۸ ۱۸/۷ ۲۳/۱ ۲۸ ۳۳/۳۹ ۴/۳ ۴۵/۶ ۵۲/۶ ۶۰ ۶۷/۹ ۷۷/۴ ۸۵/۴]
$\eta(\%)$	[۰ ۶۲ ۶۶ ۷۰ ۷۵/۸ ۸۲ ۸۳/۶ ۸۴/۷ ۸۵/۱ ۸۵/۳ ۸۵/۵ ۸۵/۶ ۸۵/۶ ۸۵/۷ ۸۵/۸ ۸۵/۸]
T_L	[۰ ۱/۷۱۴۷ ۱/۹۵۱ ۱/۹۸۳ ۱/۹۹۵۹ ۲/۳۷۶ ۳/۶۳۰۷۴/۵۷۵۴ ۵/۶۴۳۸ ۶/۸۱۶ ۸/۰۰۳۶ ۹/۳۴۷۹ ۱۰/۷۷۰۵ ۱۲/۲۹۹۴ ۱۳/۹۰۷۴ ۱۵/۶۱۹۲]
$P_{in}(w)$	[۰ ۳۴۲/۹۵ ۷۱۸/۰۳ ۱۱۸۹/۳۲ ۱۳۹۷/۱۴ ۲۱۹۰/۱۲ ۳۲۶۷/۶۶ ۴۵۷۵/۳۹ ۶۲۰۸/۱۸ ۸۱۳۷/۹۷ ۱۰۴۰۴/۶۸ ۱۳۰۸۷/۱۱ ۱۶۱۵۵/۸۱ ۱۹۶۷۸/۹۵ ۲۳۶۴۲/۵۷ ۲۸۱۱۴/۵۳]

۴- بلوک دیاگرام سیستم

بلوک دیاگرام سیستم درایو موتور القایی- پمپ برای کنترل دبی در شرایط بهینه‌سازی کارایی، در شکل ۶ نشان داده شده است. این درایو از اجزای مختلفی تشکیل شده که عبارتند از: موتور القایی، پمپ، سیستم انتقال قدرت مکانیکی، کانورتر، کنترل‌کننده دبی و کنترل‌کننده بهینه‌سازی. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در ابتدا مدار یکسوکننده، ولتاژ سه‌فاز را از شبکه دریافت کرده و به نوع dc تبدیل می‌کند، در ادامه با سوئیچ‌زنی مناسب المانهای اینورتر، ولتاژ سه‌فازی با فرکانس و اندازه مشخص تولید و موتور القایی توسط آن تغذیه می‌شود. این موتور از طریق محور خود، پمپ را به حرکت در می‌آورد. سیستم کنترل‌کننده دبی با استفاده از دبی مرجع و دبی اندازه‌گیری شده، فرکانس مرجع را تعیین می‌کند. از طرف دیگر سیستم کنترل‌کننده بهینه‌سازی، با توجه به توان ورودی اینورتر، دبی مرجع، دبی اندازه‌گیری شده و فرکانس مرجع، مقدار ولتاژ مرجع مناسب را تعیین و به اینورتر اعمال می‌کند. ضمناً مقدار سوئیچ‌زنی مناسب اینورتر برای این درایو از قبل تعیین می‌شود.

در مرحله بعد با استفاده از مبانی اولیه و همچنین آزمون و خطا، ساختار اولیه شبکه عصبی، یعنی تعداد لایه‌ها و نورون‌ها مشخص می‌شود. تابع شبکه عصبی استفاده شده، از نوع جلودرورنده بوده و برای آموزش آن از روش بازگشت به عقب استفاده شده است. شبکه عصبی مناسب برای مدل‌سازی پمپ به‌کار رفته در این مقاله، دارای مشخصات جدول ۴ است.

جدول ۴ مشخصات شبکه عصبی

تعداد لایه‌ها	سه لایه
تعداد نورون‌های لایه ورودی	یک نورون
تعداد نورون‌های لایه مخفی	ده نورون
تعداد نورون‌های لایه خروجی	پنج نورون
تابع فشرده‌ساز لایه مخفی	سیگموئید
تابع فشرده‌ساز لایه خروجی	خطی

آموزش شبکه عصبی در ابتدا با استفاده از ۸۰٪ داده‌های موجود و با به‌کارگیری روش بازگشت به عقب انجام شد و از ۲۰٪ داده‌های باقیمانده برای آزمایش شبکه استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در جدول ۵ نشان می‌دهد

۵- سیستم کنترل کننده جستجوگر سنتی

یکی از روشهای متداول در کاهش تلفات و افزایش کارایی در درایو موتور القایی، روش جستجو است. اساس این روش، ثابت نگاه داشتن توان خروجی و یافتن نقطه‌ای است که در آن توان ورودی حداقل شود [۳]. یافتن این نقطه کار، بر اندازه‌گیری توان ورودی و تغییر پله‌ای و مکرر متغیرهای کنترلی مؤثر بر تلفات مانند ولتاژ و فرکانس مبتنی است تا جایی که توان ورودی کمینه شود. اگر پس از اعمال تغییر پله‌ای به متغیر کنترلی (ΔV) تغییرات توان ورودی اندازه‌گیری شده در برای کاهش توان باشد، پله‌ای دیگر در همان راستای قبلی به متغیر کنترلی اعمال می‌شود، در غیر این صورت اعمال پله در راستای معکوس انجام شده و این عملیات تا رسیدن به نقطه کمینه توان ورودی ادامه می‌یابد. این روش را به صورت ریاضی چنین می‌توان توصیف کرد:

$$V_S(n+1) = V_S(n) + k\Delta V_S(n) \begin{cases} k=1 & \text{if } \Delta P(n) < 0 \\ k=-1 & \text{if } \Delta P(n) > 0 \end{cases} \quad (۲۲)$$

که در این رابطه $\Delta P(n) = P(n) - P(n-1)$ و $\Delta V_S(n) = V_S(n) - V_S(n-1)$ می‌باشند.

یکی از ایرادهای وارد شده به کنترل کننده جستجوگر، کند بودن آن است، زیرا دامنه تغییرات پله‌ای در هر دوره از عملیات بهینه‌سازی مقدار ثابتی است. به علاوه برای جلوگیری از تغییرات شدید گشتاور و ضربات ناشی از آن، نمی‌توان تغییرات پله‌ای

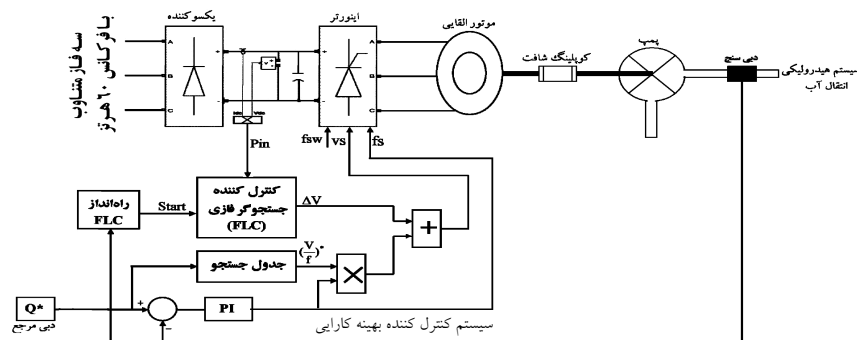
بزرگی را در متغیر کنترلی اعمال کرد. در صورتی که مقدار متغیر کنترلی اولیه موتور در شروع عمل بهینه‌سازی نسبت به مقدار متغیر کنترلی بهینه تفاوت زیادی داشته باشد، سیستم کنترل کننده جستجوگر به زمان زیادی برای یافتن نقطه بهینه نیاز دارد. یکی دیگر از ایرادهای وارد شده به کنترل کننده جستجوگر آن است که ممکن است در حوالی نقطه بهینه نوساناتی داشته باشد.

۶- طراحی سیستم کنترل کننده

کنترل کننده استفاده شده در این درایو شامل کنترل کننده دبی و سیستم کنترل بهینه کارایی است که در شکل ۶ نشان داده شده. کنترل کننده دبی فرکانس مرجع اینورتر و سیستم کنترل بهینه کارایی، اندازه ولتاژ مرجع اینورتر را تعیین می‌کند. در ادامه درباره طراحی آنها توضیح داده می‌شود.

۶-۱- طراحی کنترل کننده دبی

کنترل کننده دبی از نوع PI انتخاب شده است. این کنترل کننده با مشاهده اختلاف در دبی مرجع و دبی واقعی اندازه‌گیری شده، فرکانس خروجی اینورتر را به نحو مناسب تغییر می‌دهد. این باعث تغییر سرعت چرخش موتور و پمپ شده و در نتیجه دبی واقعی و دبی مرجع در حالت دائمی برابر می‌شوند. البته بدیهی است که اگر کنترل دبی صرفاً از طریق تغییر فرکانس تغذیه موتور انجام شود و اندازه ولتاژ تغذیه ثابت بماند، تلفات موتور به شدت افزایش خواهد یافت. لذا



شکل ۶ بلوک دیاگرام سیستم درایو موتور القایی - پمپ

روش تهیه جدول جستجو چنین است که در ابتدا نسبت V/f موتور را برابر مقدار نامی قرار داده، کنترل‌کننده جستجوگر فازی را به‌ازای چند دبی مرجع مختلف فعال کرده، نسبت V/f بهینه را به‌دست آورده و سپس این مقادیر در جدول جستجو قرار داده می‌شوند. جدول جستجو، متناسب با دبی مرجع، ولتاژ موتور را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که نزدیک به ولتاژ بهینه باشد. این باعث می‌شود که کنترل‌کننده جستجوگر فازی، ولتاژ بهینه را سریعتر پیدا کند. استفاده از جدول جستجو علاوه بر اینکه باعث تسریع در عملکرد کنترل‌کننده جستجوگر می‌شود، باعث می‌شود که مصرف انرژی در حالت دینامیکی نیز در شرایط بهینه باشد.

ب- مدار راه‌انداز کنترل‌کننده جستجوگر فازی

به‌ازای هر تغییر در دبی مرجع یا گشتاور بار، مقدار دبی واقعی پمپ تغییر خواهد کرد. مدار راه‌انداز کنترل‌کننده جستجوگر فازی، همواره دبی واقعی پمپ را دریافت کرده و به‌محض مشاهده تغییر ناگهانی دبی، ابتدا صبر می‌کند تا کنترل‌کننده PI فرکانس تغذیه و جدول جستجو اندازه ولتاژ تغذیه موتور را تنظیم کرده و سیستم به حالت دائمی رسیده و دبی اندازه‌گیری شده نیز در مقدار جدید خود تثبیت شود. سپس این مدار سیگنال فرمان را برای شروع بهینه‌سازی به کنترل‌کننده فازی ارسال می‌کند. الگوریتم مدار راه‌انداز در شکل ۷ نشان داده شده است.

ج: کنترل‌کننده جستجوگر فازی

اساس کنترل‌کننده جستجوگر آن است که برای توان خروجی ثابت، نقطه کاری را برای موتور پیدا کند که توان ورودی اینورتر حداقل شود.

تعیین این نقطه کار توسط تغییرات پله‌ای ولتاژ، و اندازه‌گیری توان ورودی متناظر با آن انجام می‌شود. از آنجا که کنترل‌کننده فازی به مدل دقیق سیستم و محاسبات پیچیده نیاز ندارد و با قواعد زبانی کنترل می‌شود، در این مقاله کنترل‌کننده جستجوگر از نوع فازی انتخاب شده است.

به‌نحوی که در ادامه توضیح خواهیم داد، اندازه ولتاژ مناسب توسط کنترل‌کننده بهینه کارایی تعیین می‌شود.

۶-۲- طراحی کنترل‌کننده بهینه کارایی

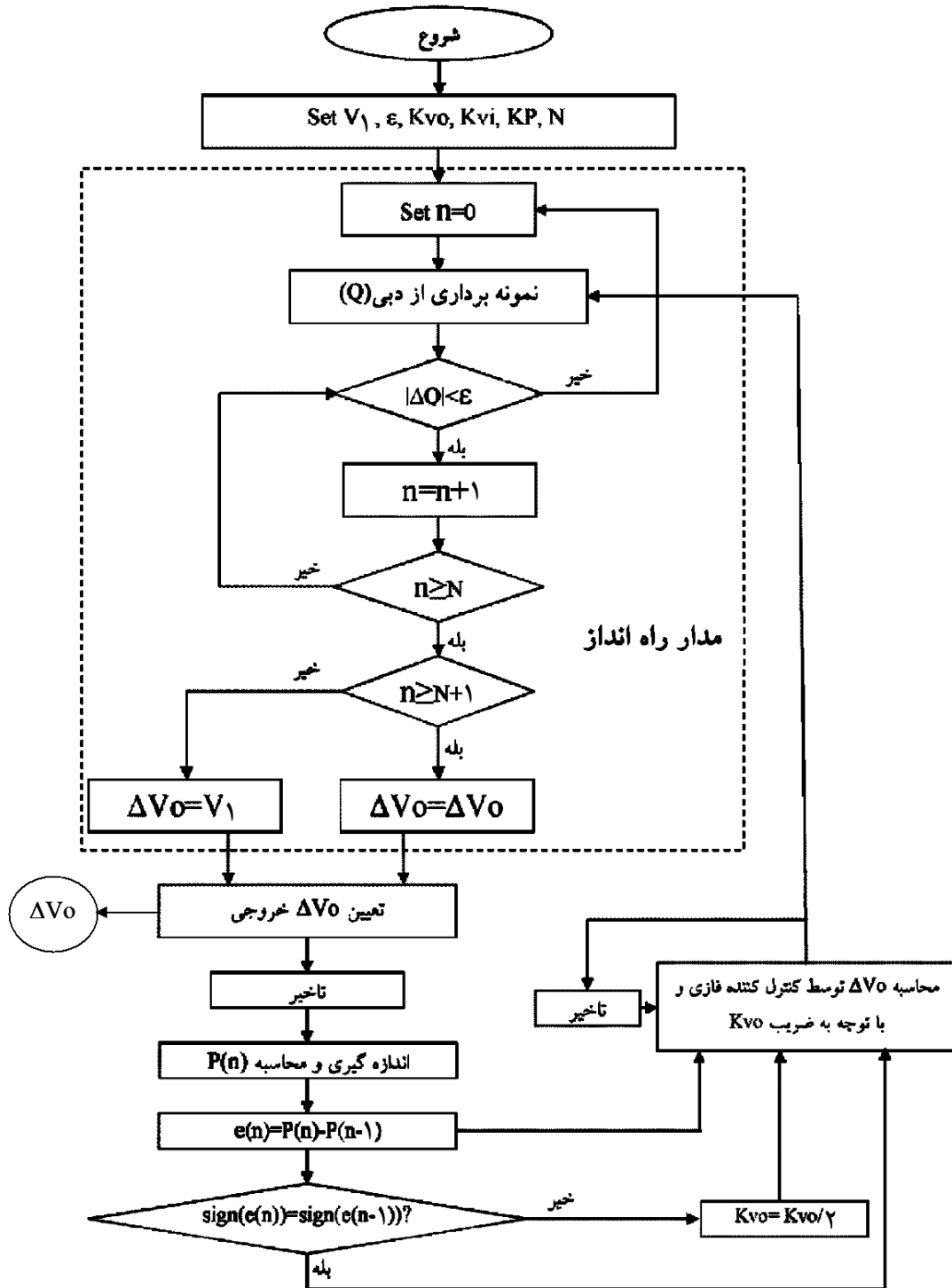
سرعت چرخش موتور متناسب با دبی مرجع تغییر می‌یابد که این کار از طریق تغییر فرکانس انجام می‌شود. در ادامه با توجه به مقادیر جدید سرعت، دبی، هد و مقدار گشتاور بار حاصل، اندازه ولتاژ تغذیه موتور به‌نحو مناسبی تغییر می‌یابد تا مقدار توان مصرفی درایو حداقل شود. به‌منظور کم کردن مدت زمان مورد نیاز برای یافتن نقطه بهینه، باید کاری کرد که متغیر کنترلی اولیه موتور در شروع عمل بهینه‌سازی، به متغیر کنترلی بهینه نزدیک باشد. در این مقاله تعیین اندازه ولتاژ اولیه مناسب توسط جدول جستجو انجام شده و برای تعیین اندازه ولتاژ (یا نسبت ولتاژ به فرکانس) بهینه، از کنترل‌کننده جستجوگر فازی استفاده شده است.

اساس کار این کنترل‌کننده بر ایجاد و تغییرات پله‌ای مناسب در اندازه ولتاژ تغذیه مبنای اولیه استوار است، به نحوی که در شرایط ثابت بودن توان خروجی، میزان توان ورودی به اینورتر - که با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خط واسط dc تعیین می‌شود - به حداقل ممکن برسد. تعیین اندازه ΔV با استفاده از قواعد فازی انجام می‌شود.

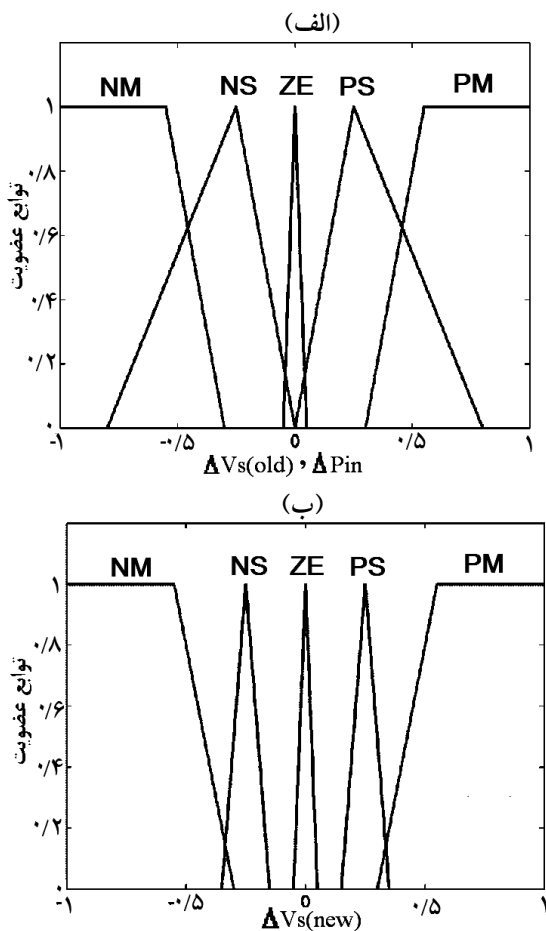
در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده بهینه کارایی از سه قسمت اصلی تشکیل شده که عبارتند از: جدول جستجو، مدار راه‌انداز کنترل‌کننده جستجوگر فازی و کنترل‌کننده جستجوگر فازی که در ادامه درباره هر یک از آنها توضیح می‌دهیم.

الف- جدول جستجو

در جدول جستجو به‌ازای هر دبی پمپ، یک مقدار اولیه ولتاژ موتور (نسبت ولتاژ به فرکانس) پیشنهاد شده است.



شکل ۷ الگوریتم کنترل کننده بهینه کارایی



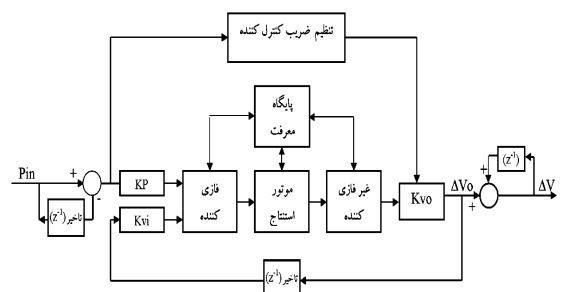
شکل ۹ توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترل‌کننده فازی

یکی دیگر از ایرادهای کنترل‌کننده جستجوگر، ثابت بودن دامنه ΔV در طول یک دوره از عملیات بهینه‌سازی است. در سیستم کنترل‌کننده فازی، دامنه ΔV بر حسب نیاز کوچک یا بزرگ می‌شود، بنابراین زمان همگرایی سیستم به حداقل می‌رسد.

توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترل‌کننده فازی به کار رفته در این مقاله در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی مثلثی بوده و برای هر متغیر ۵ تابع عضویت با نام‌های PM (مثبت بزرگ)،

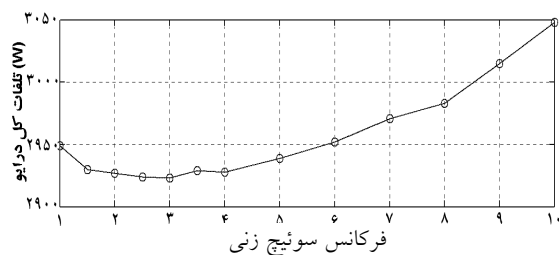
بلوک دیاگرام کنترل‌کننده جستجوگر فازی در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل ضرایب K_p و K_{vi} برای پیرویت کردن تغییرات توان و ولتاژ ورودی به کنترل‌کننده جستجوگر به کار می‌رود. ضریب K_{vo} در خروجی کنترل‌کننده جستجوگر فازی برای کم کردن نوسانات در حول نقطه بهینه بوده و قابل تغییر است. این ضریب در ابتدا برابر واحد بوده و سپس مدار تنظیم‌کننده ضریب خروجی کنترل‌کننده، با مشاهده نوسان در حوالی نقطه عملکرد بهینه، آن را نصف می‌کند.

الگوریتم کنترل‌کننده بهینه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. ابتدا ضرایب کنترل‌کننده فازی و مقادیر اولیه تعیین شده و سپس از دبی سیستم نمونه‌برداری می‌شود. اگر تغییرات دبی کم باشد (کمتر از ε)، چند دوره زمانی صبر می‌کند تا از رسیدن سیستم به حالت دائمی مطمئن شود، سپس در یک فاصله زمانی نمونه‌برداری، ΔV_0 را برابر V_1 قرار می‌دهد. این کار سبب می‌شود که ولتاژ اعمالی به موتور تغییر کرده و در نتیجه توان سیستم تغییر کند، پس از کمی تأخیر، توان سیستم محاسبه شده و کنترل‌کننده فازی با مقایسه تغییرات توان و تغییرات ولتاژ اعمالی در حالت قبل، تغییرات جدید ولتاژ را محاسبه می‌کند.



شکل ۸ بلوک دیاگرام کنترل‌کننده فازی

است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش فرکانس سویچ‌زنی، تلفات کل درایو در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش اولیه فرکانس سویچ‌زنی، دامنه هارمونی‌های اضافی موجود در ولتاژ کاهش یافته و به تبع آن تلفات حرارتی ناشی از اثر این هارمونی‌ها در موتور القایی کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر فرکانس، تلفات سویچ‌زنی اینورتر افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که فرکانس بهینه سویچ‌زنی برابر ۳ کیلوهرتز است. این فرکانس بهینه به‌ازای بارهای مختلف تغییرات اندکی دارد و می‌توان آن را تقریباً ثابت در نظر گرفت.



شکل ۱۱ تلفات درایو به‌ازای فرکانس‌های مختلف سویچ‌زنی

۸- نتایج شبیه‌سازی

سیستم درایو موتور القایی- پمپ، متشکل از موتور القایی، پمپ، کانورتر و سیستم کنترل‌کننده با استفاده از مدل‌های ارائه شده در نرم‌افزار سیمولینک مطلب^۱ شبیه‌سازی شده و عملکرد درایو از نظر تلفات انرژی و کارایی با استفاده از سه روش کنترلی مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج شبیه‌سازی در این بخش ارائه می‌شود.

۸-۱- کنترل دبی توسط شیر کنترلی

در این روش، موتور مستقیماً به شبکه برق سه‌فاز وصل شده و کنترلی روی ولتاژ یا جریان آن وجود ندارد.

PS (مثبت کوچک)، ZE (صفر)، NS (منفی کوچک)، NM (منفی بزرگ) وجود دارد.

در شکل ۱۰ جدول دستورها یا قواعد کنترل‌کننده فازی نشان داده شده است. مطابق این جدول تغییرات جدید ولتاژ خروجی، با توجه به تغییرات توان ورودی اینورتر و تغییرات ولتاژ در حالت قبل به‌دست می‌آید. به‌عنوان مثال با توجه به این جدول می‌توان گفت که اگر تغییرات توان "منفی بزرگ" و تغییرات ولتاژ در حالت قبل "منفی کوچک" باشد، تغییرات جدید ولتاژ، "منفی کوچک" است.

		$\Delta V_s(\text{old})$				
		NM	NS	ZE	PS	PM
ΔP_{in}	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
	NS	NS	NS	ZE	PS	PM
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS
	PM	PM	PS	ZE	NS	NM

شکل ۱۰ جدول دستورات کنترل‌کننده فازی

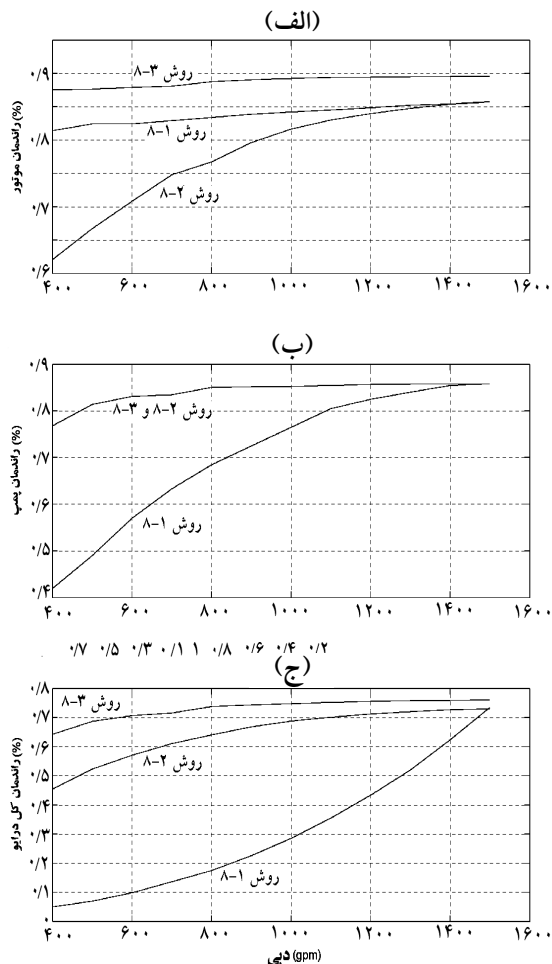
۷- تعیین فرکانس سویچ‌زنی اینورتر

در [۱۴] نشان داده شده است که در درایو موتور القایی با سرعت متغیر، فرکانس سویچ‌زنی کانورتر را می‌توان به‌گونه‌ای انتخاب کرد که برای بارهای مختلف، تلفات درایو حداقل باشد.

برای تعیین فرکانس مناسب سویچ‌زنی با هدف حداقل سازی تلفات، سیستم درایو را به‌ازای فرکانس‌های مختلف سویچ‌زنی شبیه‌سازی کرده و تلفات درایو را در هر فرکانس سویچ‌زنی به‌دست آورده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۱ ارائه شده

1. Matlab-Simulink

پمپ و همچنین کارایی کل درایو در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ مقایسه کارایی در سه روش مختلف شبیه‌سازی

شده الف) کارایی موتور القایی ب) کارایی پمپ

ج) کارایی کل درایو

باتوجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در این روش کارایی موتور، پمپ و کارایی کل درایو در دبی‌های مختلف نسبت به سایر روش‌های کنترلی بالاتر است. لذا این روش مناسبترین روش کنترلی برای بهینه‌سازی کارایی در درایو موتور القایی - پمپ است.

سرعت چرخش پمپ تقریباً ثابت بوده و کنترل دبی توسط شیر کنترلی انجام می‌شود. این آزمایش را به‌ازای دبی‌های مختلف انجام داده و در هر حالت توان خروجی پمپ و توان ورودی موتور را به‌دست آورده و با توجه به آنها کارایی درایو را محاسبه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی این روش کنترلی، شامل کارایی موتور، پمپ و همچنین کارایی کل درایو در شکل ۱۲- آورده شده است. ملاحظه می‌شود که به‌ازای دبی‌های کم کارایی پمپ پایین است. بنابراین در این روش، پمپ در محدوده بهینه کار نمی‌کند.

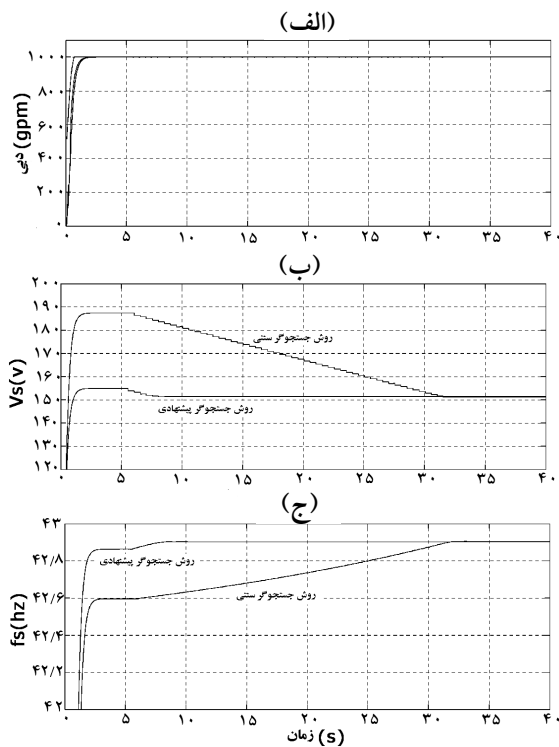
۲-۸- کنترل دبی به‌وسیله تغییر سرعت پمپ و استفاده از روش V/f ثابت برای کنترل موتور

در این روش فرض می‌شود که سیستم هیدرولیکی ثابت بوده (شیر کنترلی نباشد) و کنترل دبی، توسط تغییر منحنی پمپ (تغییر سرعت چرخش پمپ) انجام شود و همچنین از روش V/f ثابت برای کنترل موتور استفاده شود. نتایج شبیه‌سازی این روش کنترلی، شامل کارایی موتور، پمپ و همچنین کارایی کل درایو در شکل ۱۲- نشان داده شده است.

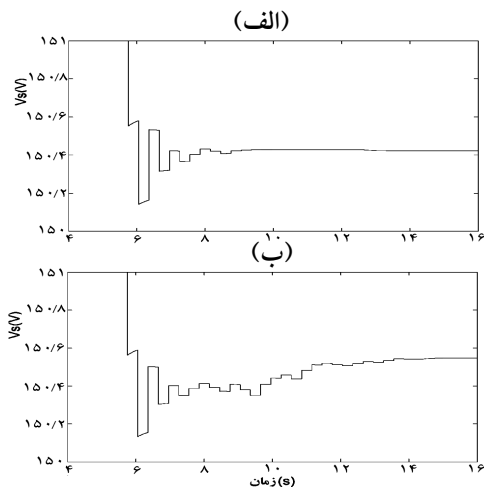
ملاحظه می‌شود که به‌ازای دبی‌های کم کارایی موتور پایین است. بنابراین در این روش، موتور در محدوده عملکرد بهینه کار نمی‌کند.

۳-۸- کنترل دبی به‌وسیله تغییر سرعت پمپ و استفاده از روش پیشنهادی کنترل بهینه کارایی

در این روش نیز فرض می‌شود که سیستم هیدرولیکی ثابت بوده (شیر نباشد) و کنترل دبی توسط تغییر منحنی پمپ (تغییر سرعت چرخش پمپ) انجام شود و همچنین از روش کنترل جستجوگر فازی برای بهینه‌سازی استفاده شود. نتایج شبیه‌سازی این روش کنترلی، شامل کارایی موتور،



شکل ۱۳ مقایسه عملکرد کنترل کننده بهینه پیشنهادی و روش جستجوگر سنتی الف) دبی مرجع و دبی واقعی سیستم ب) ولتاژ استاتور ج) فرکانس استاتور



شکل ۱۴ اندازه ولتاژ استاتور حول نقطه بهینه الف) کنترل کننده جستجوگر فزای پیشنهادی ب) کنترل کننده جستجوگر معمولی

در شکل ۱۳ عملکرد کنترل کننده بهینه پیشنهادی و همچنین کنترل کننده جستجوگر سنتی نشان داده شده است. از آنجا که پمپ شبیه سازی شده دارای توان نامی ۲۸/۴ کیلووات بوده و کوچکترین موتور پیشنهادی توسط سازنده پمپ دارای توان نامی ۳۷/۳ کیلووات است، لذا نسبت V/f موتور را، در حالتی که از کنترل کننده جستجوگر سنتی استفاده شود برابر V/f مورد نیاز در دبی نامی قرار می دهیم.

در شکل [۱۳-الف]، دبی مرجع و دبی واقعی سیستم ترسیم شده و در شکل [۱۳-ب و ج] به ترتیب ولتاژ و فرکانس استاتور ترسیم شده است. در این شکل ها دیده می شوند که متغیرهای سیستم در ثانیه ۶ به حالت پایدار رسیده و در این زمان مدار راه انداز کنترل کننده جستجوگر فزای، فرمان شروع عمل بهینه سازی را به کنترل کننده می دهد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود در حالتی که از کنترل کننده پیشنهادی استفاده شده، پس از ثانیه ۸، سیستم نقطه بهینه خود را می یابد اما در صورتی که از کنترل کننده جستجوگر سنتی استفاده شود، سیستم در ثانیه ۳۳ نقطه بهینه را پیدا می کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استفاده از جدول جستجو باعث کاهش زمان مورد نیاز برای یافتن نقطه بهینه شده است.

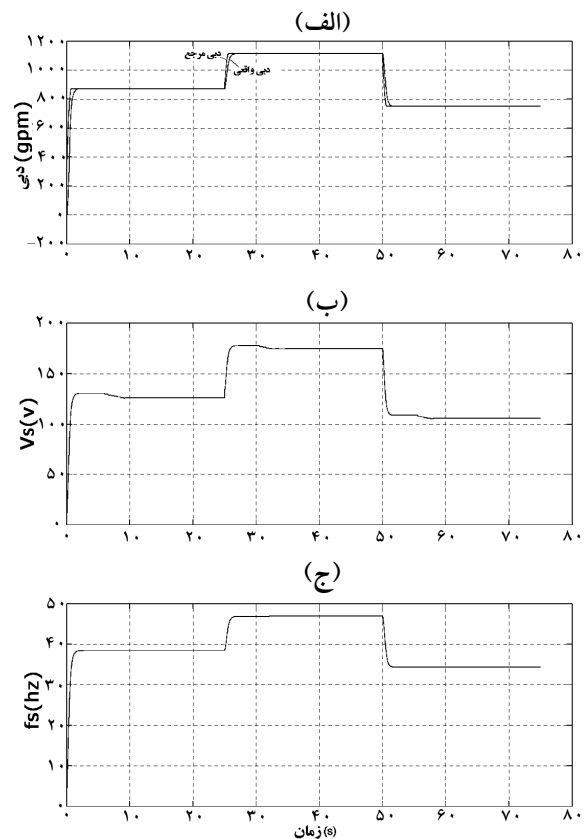
در شکل ۱۴ اندازه ولتاژ استاتور در حوالی نقطه بهینه کارایی نشان داده شده است. همان طور که در شکل [الف و ب] ملاحظه می شود، در شرایط استفاده از کنترل کننده جستجوگر فزای پیشنهادی، سیستم پس از چند نوسان به حالت پایدار می رسد اما در شرایط استفاده از کنترل کننده جستجوگر معمولی، به مدتی نسبتاً طولانی نوسان در حوالی نقطه بهینه وجود دارد.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای طراحی سیستم کنترل‌کننده بهینه کارایی در درایو موتور القایی- پمپ، ابتدا اجزای مختلف درایو شامل موتور، پمپ و اینورتر مدل‌سازی شد. مدل‌های استفاده شده شامل تلفات نیز هست. در ادامه پس از بررسی روش‌های بهینه‌سازی کارایی در درایوهای موتور القایی- پمپ، ملاحظه شد که یکی از ساده‌ترین روش‌ها استفاده از جدول جستجو است، اما این روش نقاط ضعفی دارد. یکی اینکه در عمل تعداد محدودی نقاط کار را می‌توان آزمایش کرد و از طرف دیگر با گذشت زمان با ایجاد تغییرات در پارامترهای موتور و بار، این جدول باید بار دیگر تهیه شود. یکی دیگر از روش‌ها، روش کنترل‌کننده جستجوگر حداقل تلفات است. اشکال مهم این روش کند بودن و احتمال بروز نوسان حول نقطه بهینه است.

در این مقاله، یک روش کنترل جستجوگر فازی همراه با جدول جستجو برای بهینه‌سازی کارایی درایو موتور القایی- پمپ در شرایط تغییر دبی طراحی و ارائه شد، یکی از مزایای کنترل‌کننده ارائه شده عبارتند از:

- هریک از اجزای درایو، از جمله پمپ، موتور القایی و کانورتر در حوالی نقطه عملکرد بهینه خود کار می‌کنند، بنابراین کارایی کل درایو افزایش می‌یابد.
- به‌ازای تغییرات ناگهانی دبی مرجع، کنترل‌کننده به‌خوبی عمل کرده و در دبی‌های مختلف سیستم در شرایط کارایی بهینه قرار دارد.
- استفاده از کنترل‌کننده فازی و جدول جستجو باعث شده است که زمان رسیدن به نقطه مطلوب کاهش یابد.
- ضریب خروجی کنترل‌کننده فازی به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که از نوسهای شدید حول نقطه بهینه جلوگیری کرده و سیستم پس از چند نوسان به حالت دائمی می‌رسد.



شکل ۱۵ عملکرد کنترل‌کننده جستجوگر فازی پیشنهادی به‌ازای تغییر ناگهانی در دبی مرجع. الف) دبی واقعی و دبی مرجع ب) ولتاژ استاتور ج) فرکانس استاتور

در شکل ۱۵ عملکرد کنترل‌کننده به‌ازای تغییرات ناگهانی در دبی مرجع نشان داده شده است. در شکل [۱۵-الف]، دبی مرجع و دبی واقعی سیستم ترسیم شده؛ باتوجه به این شکل ملاحظه می‌شود که دبی واقعی به‌خوبی دبی مرجع را دنبال کرده و با تغییر ناگهانی در دبی مرجع، سیستم در حالت پایدار باقی می‌ماند. در شکل [۱۵-ب و ج] به‌ترتیب ولتاژ و فرکانس استاتور ترسیم شده است، باتوجه به این شکل ملاحظه می‌شود که پس از پایدار شدن سیستم، کنترل‌کننده به‌خوبی عمل کرده و سیستم را در حالت کارایی بهینه قرار می‌دهد.

- values for variable voltage part load performance optimization “, IEEE Trans. Power App. And Syst., Vol. 102, pp.38-46, 1983.
- [6] Kusko, A. and Galler, D., “Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 9, pp. 561-570, 1983.
- [7] Chakraborty, C. and Hori, Y., “Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives,”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1070–1076, Jul./Aug. 2003.
- [8] Park, M. H. and Sul, S. K., “Microprocessor based optimal efficiency drive of an induction motor”, IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 31, pp. 69-73, 1984.
- [9] Durval, A. S. and Wilson C. P., “Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors ”, IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 54, pp. 2157-2164, 2007.
- [10] Dong, G. and Ojo, O., “Efficiency optimizing control of induction motor using natural variables,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 6, pp. 1791–1798, Dec. 2006.
- [11] S. M. Yang, F. C. Lin, "Loss-minimization control of vector-controlled induction motor drives", Journal of the Chinese
- این سیستم قابلیت پیاده‌سازی عملی را داشته و در هر درایو حلقه باز موتور القایی - پمپ، با اضافه کردن سنسور دبی و سنسورهای ولتاژ و جریان و همچنین کانورتر مناسب قابل اجرا است. مدار کنترل با استفاده از پردازنده‌های دیجیتال قابل پیاده‌سازی است.

۱۰- منابع

- [1] Devinter F. A., and Kedrosky B. J., “The Application of a 3500-hp Variable Frequency Drive for Pipeline Pump Control,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 25, no. 6, pp. 1019–1024, Nov./Dec. 1989.
- [2] Hickock H. N., “Adjustable speed-A tool for saving energy losses in pumps, fans, blowers, and compressors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 1, pp. 124-136, Jan./Feb. 1985.
- [3] Abrahamsen F., Blaabjerg F., Pedersen J.K., and Grabowski P.Z., "On the Energy Optimized Control of Standard and High Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Application." IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no.4, pp.822-83 1, July/August 1998.
- [4] Rosenberg, S. A., Dewan, S. B. and Selemon, G. R., “Inverter fed induction motor drive using power factor control”, IEEE Trans. Ind. Appl., pp 810-814, 1976.
- [5] Jain, T. W., Schmitz, N. L. and Novotny, D. W., “Characteristic induction motor slip

- [13] Kolar, J. W., Ertl, H. and Zach, F. C., "Calculation of the passive and active component stress of three-phase PWM converter systems with high pulse rate", Proceed. of EPE'89, Aachen Germany, Oct. 9-12, 1989, pp. 1303-1311.
- [14] Abrahamsen, F., "Energy optimal control of an induction motor drives" PHD Thesis, Institute of Energy Technology , Aalborg University, 2000.
- Institute of Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 37-45, 2003.
- [12] Blaabjerg, F., Jaeger, U., Munk-Nielsen, S. and Pedersen, J. K., "Power Losses in PWM-VSI Inverter Using NPT or PT IGBT Devices", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 10, No. 3, pp. 225-232, May 1995.