

کنترل سرعت هوشمند موتور القایی

سحر محمدی، علیرضا صدیقی انارکی

دانشگاه یزد

E-mail: mohammadi_505@yahoo.com

sedighi@yazduni.ac.ir

چکیده- از آنجاییکه موتورهای القایی از نظر هزینه و سادگی ساخت نسبت به ماشینهای جریان مستقیم ارجحیت دارند، به طور وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار گرفته اند، لذا کنترل این نوع موتورها از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. در این مقاله سرعت یک موتور القایی سه فاز با استفاده از منطق فازی کنترل شده است. روش استفاده شده کنترل برداری می باشد که الهام گرفته از مفهوم کنترل سرعت در موتورهای جریان مستقیم می باشد. اثر تغییرات بار و سرعت مرجع در این کنترل کننده مد نظر قرار گرفته است. ویژگی روش پیشنهادی کنترل هوشمند در حین کار کردن موتور و مقاوم بودن پاسخها نسبت به تغییرات ممان اینرسی (J)، اصطکاک (B) و گشتاور بار می باشد. روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات یک ماشین القایی توسط نرم افزار مطلب در محیط سیمولینک شبیه سازی شده است. نتایج نشان می دهند که بواسطه استفاده از روش پیشنهادی نوسانی در پاسخها مشاهده نمی شود و زمان رسیدن به سرعت مطلوب بسیار کم می باشد.

کلید واژه- کنترل سرعت، کنترل هوشمند، منطق فازی، موتور القایی

1- مقدمه

های القایی و هم برای ماشین های سنکرون قابل پیاده سازی می باشد و اساساً ساختار دینامیکی ماشین جریان متناوب را بدل به موتور جریان مستقیم تحریک مستقل می کند. [1]

هدف این مقاله ارائه روشی جهت کنترل هوشمند سرعت موتور القایی، با استفاده از منطق فازی می باشد. در ادامه و در بخش دوم مدل موتور القایی عنوان شده است. بخش سوم به توضیح پیرامون منطق فازی می پردازد. روش پیشنهادی در بخش چهارم توضیح داده شده است و نتایج در بخش پنجم آمده اند.

با توجه به اینکه موتورهای القایی از لحاظ اندازه، وزن، اینرسی، حداکثر سرعت، راندمان و هزینه نسبت به ماشین های جریان مستقیم برتری دارند، اما بکار گیری کنترل ساده موتورهای جریان مستقیم برای آنها ممکن نیست. زیرا موتور القایی ساختار و کنترل چند متغیره وابسته و غیرخطی دارد. برعکس یک موتور جریان مستقیم تحریک مستقل، دارای ساختار کنترلی ایزوله (ناوابسته بین متغیرها) است که می توان در آن گشتاور و شار را بصورت مستقل کنترل نمود. روش کنترل برداری هم برای ماشین

2- کنترل برداری موتور القایی

تعریف می شوند: [3]

جدول 1: پارامترهای بکار رفته در مدلسازی

پارامتر	تعریف
R_s, L_{ls}	اندوکتانس پراکندگی و مقاومت استاتور
R'_r, L'_{lr}	اندوکتانس پراکندگی و مقاومت روتور
L_m	اندوکتانس متقابل
L_s, L'_r	کل اندوکتانس های روتور و کل اندوکتانس های استاتور
V_{qs}, i_{qs}	جریان و ولتاژ استاتور روی محور q
V'_{qr}, i'_{qr}	جریان و ولتاژ روتور روی محور q
V_{ds}, i_{ds}	جریان و ولتاژ استاتور روی محور d
V'_{dr}, i'_{dr}	جریان و ولتاژ روتور روی محور d
j_{qs}, j_{ds}	شار استاتور روی محور d و q
j'_{qr}, j'_{dr}	شار روتور روی محور d و q
w_m	سرعت زاویه ای روتور
q_m	موقعیت زاویه ای روتور
P	تعداد جفت قطب ها
w_r	سرعت زاویه ای الکتریکی
q_r	موقعیت زاویه ای الکتریکی
T_e	گشتاور الکترومغناطیسی
T_m	گشتاور مکانیکی محور
J	ضریب لختی بار
H	ثابت لختی بار
B	ضریب اصطکاک بار

مشخصات و پارامترهای موتور القایی شبیه سازی

شده به شرح زیر می باشد:

$$V_n(rms) = 460V, 50HP, 60Hz, R_s = 0.087\Omega, L_{ls} = 0.8mH$$

$$R'_r = 0.228\Omega, L'_{lr} = 0.8mH, L_m = 34.7mH, J = 1.662kg.m^2$$

$$B = 0.1, P = 2$$

2-2- کنترل برداری موتور القایی

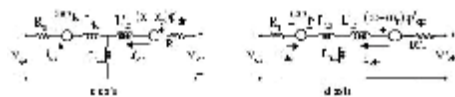
همان طور که می دانیم در ماشین های جریان مستقیم در صورتیکه از اشباع صرف نظر شود می توان گشتاور تولید شده را بر حسب جریان آرمیچر و شار تحریک به صورت زیر بیان کرد:

$$T_e = K y_f \times i_a \quad (14)$$

که در آن K یک عدد ثابت و y_f, i_a به ترتیب اندازه فازورهای فضایی تحریک و جریان آرمیچر می باشند.

1-2- مدلسازی موتور القایی

مدل موتور القایی در مختصات d-q به صورت شکل (1) می باشد [3و2].



شکل 1: مدل موتور القایی در مختصات d-q [3]

و روابط الکتریکی حاکم بر این موتور عبارتند از:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} j_{qs} + w j_{ds} \quad (1)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} j_{ds} - w j_{qs} \quad (2)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} j'_{qr} + (w - w_r) j'_{dr} \quad (3)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} j'_{dr} - (w - w_r) j'_{qr} \quad (4)$$

$$T_e = 1.5P (j_{ds} i_{qs} - j_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

$$j_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (6)$$

$$j_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (7)$$

$$j'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (8)$$

$$j'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (9)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (10)$$

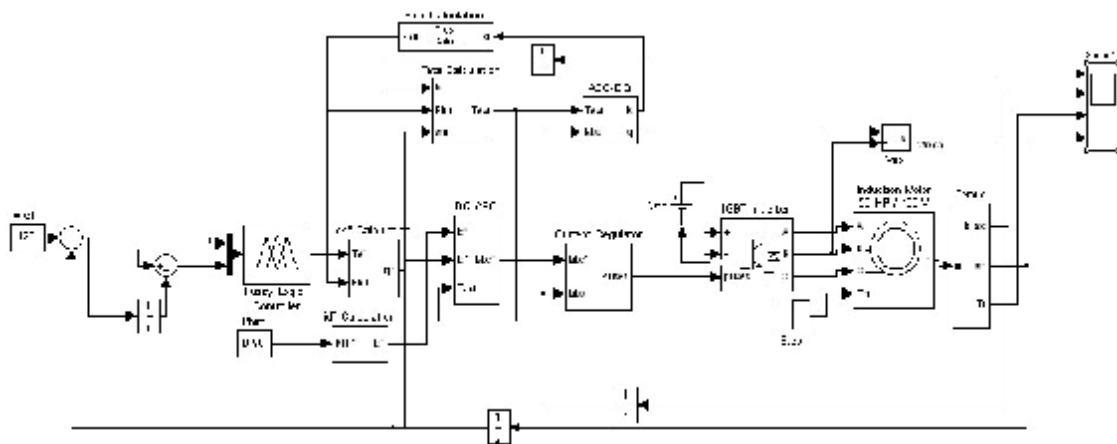
$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (11)$$

و روابط مکانیکی آن به صورت زیر می باشد:

$$\frac{d}{dt} w_m = \frac{1}{2H} (T_e - B w_m - T_m) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} q_m = w_m \quad (13)$$

که در این روابط پارامترها به صورت جدول (1)



شکل 2: راه انداز برداری موتور القایی

موتور القایی توسط یک اینورتر PWM که به عنوان یک منبع جریان سه فاز سینوسی عمل می کند، کنترل می شود. به منظور کنترل گشتاور T_e^* ، سرعت موتور W ، با سرعت مرجع W^* ، مقایسه می شود و توسط کنترل کننده سرعت، خطای سرعت پردازش می شود. همان طور که در شکل (2) می بینیم، شار روتور و گشتاور می توانند به طور مجزا توسط i_{ds}^* و i_{qs}^* کنترل شوند. جریان مرجع محور عمود بر استاتور i_{qs}^* ، با استفاده از گشتاور مرجع T_e^* ، از رابطه (16) محاسبه می شود [7 و 6 و 5].

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|Y_r|_{est}} \quad (16)$$

که L_r اندوکتانس روتور، L_m اندوکتانس متقابل و $|Y_r|_{est}$ شار پیوندی تخمین زده شده روتور می باشد که از رابطه (17) محاسبه می گردد:

$$|Y_r|_{est} = \frac{L_m i_{ds}}{1 + t_r S} \quad (17)$$

که $t_r = \frac{L_r}{R_r}$ ، ثابت زمانی روتور می باشد. جریان مرجع i_{ds}^* از مقادیر شار مرجع روتور طبق رابطه (18) به دست می آید:

$$i_{ds}^* = \frac{|Y_r|_{est}^*}{L_m} \quad (18)$$

موقعیت شار روتور q_e ، از سرعت روتور W_m و فرکانس لغزش W_{sl} طبق رابطه (19) به دست می آید:

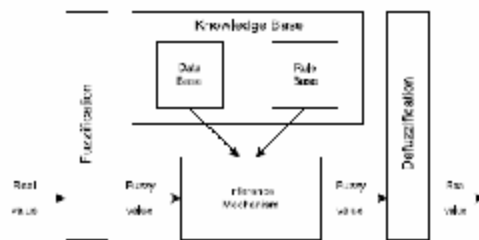
$$q_e = \int (W_m + W_{sl}) dt \quad (19)$$

در ماشین DC جریان آرمیچر و توزیع شار در فضا ثابت هستند و گشتاور با کنترل مستقل شار و جریان آرمیچر کنترل می شود و در ضمن به علت عمود بودن دو بردار همیشه گشتاور ماکزیمم تولید می شود. در ماشین های جریان متناوب کنترل مانند ماشین های DC ساده نمی باشد، زیرا متغیرهای فوق (شار استاتور و جریان روتور) از یکدیگر مجزا نمی باشند و هر کدام نسبت به استاتور یا روتور ساکن می باشند و همچنین به دامنه، فرکانس و زاویه فاز جریان های استاتور بستگی دارند و نهایتاً اینکه در ماشین های القایی با روتور قفسه سنجابی دسترسی به جریان های روتور به راحتی امکان پذیر نمی باشد. تحقیق در مورد کنترل ماشین های القایی به فرم ماشین های جریان مستقیم سر انجام مبحث کنترل برداری را پیشنهاد می کند. در این روش با استفاده از دو مؤلفه مستقل جریان، یکی تولید کننده شار تحریک و دیگری تولید کننده گشتاور، انجام می پذیرد.

گشتاور لحظه ای در ماشین های AC سه فاز متقارن با فاصله هوایی یکنواخت می تواند به صورت زیر باشد:

$$T_e = Y_s \times i_r' \quad (15)$$

جائیکه تحت شرایط مغناطیسی خطی، Y_s و i_r' به ترتیب فازورهای فضائی شار استاتور و جریان روتور در مختصات ساکن می باشند. برای اینکه معادلات روتور و گشتاور را از یکدیگر تفکیک نمائیم از چارچوب مرجع قرار داده شده روی روتور استفاده می نمائیم، در شکل (2) یک راه انداز میدان گرای موتور القایی نشان داده شده است [4 و 5 و 6 و 7].



شکل 3: قسمت های مختلف یک کنترل کننده فازی [6]

در مرحله استنتاج دو روش وجود دارد: روش ممدانی و سوگنو. سیستم های ممدانی در سال 1975 ابداع شده و سیستم های سوگنو برای اولین بار در سال 1985 معرفی گردید. شیوه فازی سازی متغیرهای ورودی در این دو نوع سیستم مشابه و تفاوت آنها در شیوه تعریف متغیرهای خروجی و در نتیجه در روش غیرفازی سازی است.

4- روش پیشنهادی

هدف از طراحی یک کنترل کننده افزایش پایداری و کاهش زمان رسیدن به حالت مطلوب در برابر اعمال یک اغتشاش، در یک پروسه می باشد. در این مقاله از کنترل کننده PI جهت مقایسه نتایج آن با روش پیشنهادی استفاده شده است. این کنترل کننده در مسیر سیگنال خطای شکل (3) قرار می گیرد و با رابطه (21) نشان داده می شود.

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_P + \frac{K_I}{S} \quad (21)$$

که در آن K_P بهره تناسبی و K_I بهره انتگرالی می باشد. که با تنظیم پارامترهای فوق می توان خطای حالت دائم و نوسانات خروجی را در پاسخ به ورودی پله کنترل نمود. عمده اشکال این نوع کنترل کننده، علاوه بر دشواری تنظیم پارامترها برای داشتن پاسخ مطلوب، نیاز به اصلاح آنها بواسطه تغییر شرایط کارکرد موتور می باشد که عملاً "تنظیم مجدد پارامترها در حین کار کردن موتور امکان پذیر نیست. جهت بر طرف کردن این مشکل روشهای هوشمند پیشنهاد می گردند. کنترل کننده فازی بعنوان یک کنترلر هوشمند معرفی می گردد.

شکل (2) چگونگی استفاده از این کنترل کننده را برای کنترل سرعت موتور القایی نشان می دهد.

فرکانس لغزش از جریان مرجع استاتور i_{qs}^* و پارامترهای روتور بنابر رابطه (20) محاسبه می گردد. [2]

$$w_{sl} = \frac{L_m}{|y_r|_{est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}^* \quad (20)$$

جریان های مرجع i_{ds}^* و i_{qs}^* برای رگولاتور جریان به جریان های مرجع سه فاز i_a^* و i_b^* و i_c^* تبدیل می شوند. رگولاتور ها جریان های اندازه گیری شده و مرجع را پردازش می نمایند تا سیگنال های با قطع متناوب برای اینورتر تولید نمایند.

3- منطق فازی

تفکر فازی برای اولین بار در سال 1965 توسط پروفیسور لطفی زاده استاد ایرانی الاصل دانشگاه برکلی کالیفرنیا در مقاله ای با عنوان ((مجموعه های فازی)) ارائه گردید. این مقاله جرقه اولیه ای از پرتو یک جهان بینی جدید در عرصه ریاضیات و علوم و اولین قدم در معرفی نو و واقع گرایانه از جهان در قالب مفاهیمی کاملاً "بدیع اما سازگار با طبیعت انسان بود [8].

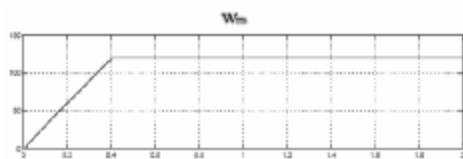
منطق فازی یک تکنولوژی بر پایه مهندسی تجربه و مشاهدات است. در منطق فازی از متغیر های زبانی برای تعریف رفتار سیستم استفاده شده است به همین دلیل به مدل ریاضی کاملاً "صحیح نیاز نمی باشد. برخی از مشکلات همچون پایداری در هردو کنترلر فازی و مرسوم وجود دارند. بر خلاف طراحی کنترلر مرسوم که از مدل های ریاضی برای حل این مشکلات استفاده می کند، طراحی کنترل کننده فازی شامل قوانین اگر-آنگاه تعریف شده توسط یک متخصص برای رویارویی با این مشکلات می باشد. [9]

به طور کلی کنترل کننده های فازی از چهار قسمت تشکیل شده اند: فازی ساز، مکانیسم استنباط، پایگاه قوانین، غیرفازی ساز. شکل (3) قسمت های مختلف یک کنترل کننده فازی را نشان می دهد. [6]

5- نتایج

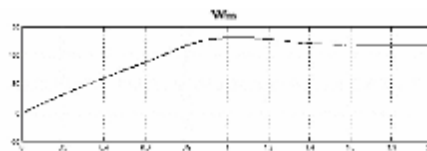
در این بخش نتایج روش پیشنهادی در شرایط مختلف کارکرد موتور بررسی شده است.

الف) ابتدا موتور را بدون بار راه اندازی و سرعت مرجع را بر روی $w_{ref} = 120 \frac{rad}{s}$ تنظیم می کنیم. همان گونه که در شکل (5) ملاحظه می شود موتور در $t = 0.4 \text{ sec}$ بدون هیچ بالادگی و یا پایین زدگی به سرعت مطلوب می رسد و در همان سرعت باقی می ماند.



شکل 5: نتایج شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده فازی

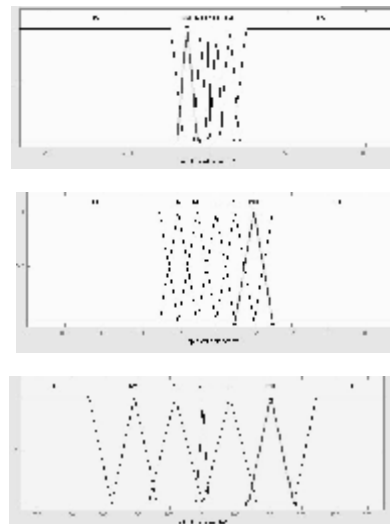
اگر به جای کنترل کننده فازی از کنترل کننده PI پس از تنظیم پارامترها، $K_p = 13$ و $K_I = 26$ ، و در شرایط یکسان استفاده می شد، همانگونه که در شکل (6) نشان داده شده است سرعت موتور بعد از $t = 1.62 \text{ sec}$ به سرعت مطلوب می رسد. پاسخ دارای فراجهش نیز می باشد.



شکل 6: نتایج شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده PI

ب) به منظور بررسی تغییرات سرعت مرجع و گشتاور بار آنها را مطابق شکل (7) تغییر می دهیم. ضمناً تغییرات 10% برای اصطکاک و ممان اینرسی نیز در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل (8) نشان داده شده است در مدت 0.8 sec موتور به سرعت مرجع می رسد و پس از افزایش سرعت مرجع در لحظه $t = 2$ به $w_{ref} = 130 \frac{rad}{s}$ موتور در کمتر از 0.1 sec تغییرات سرعت را دنبال میکند. پس از آن با کاهش سرعت مرجع در لحظه $t = 4$ به $w_{ref} = 100 \frac{rad}{s}$ موتور در کمتر از 0.1 sec به سرعت مطلوب می رسد. همانگونه که در شکل (8) نشان داده شده

در این کنترل کننده ورودی ها خطای سرعت و تغییرات خطای سرعت، و خروجی مرجع گشتاور می باشد. برای هر کدام از ورودی ها و خروجی از هفت تابع عضویت استفاده شده است. شکل (4) توابع عضویت پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل 4: توابع عضویت پیشنهادی

در ادامه قواعد فازی بیان می شوند که در این روش از چهل و نه قاعده مطابق جدول (2) استفاده شده است که در آن:

NB=Negative Big, PB=Positive Big,
NM=Negative Medium, PM=Positive Medium ,
NS=Negative Small, PS=Positive Small,
ZE=Zero

جدول 2: قواعد فازی

error	error	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NM	NM	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NB	PB	NS	ZE	PB	PB	PB	PB
PM	NS	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

در این کنترل کننده از روش ممدانی برای فازی سازی و از روش lom برای غیرفازی سازی استفاده شده است.

مراجع

[1] Peter Vas, ((vector control of AC machines)), oxford university press, 1992.

[2] ((تحلیل ماشین های الکتریکی)) - تألیف کراز، ترجمه سقائیان نژاد و م. نیک خواجوی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، سال 1376.

[3] راهنمای نرم افزار مطلب

[4] ((الکترونیک قدرت، مدارها - عناصر و کاربردها)) - تألیف ه. رشید، ترجمه ا. افجعی و م. مهاجر، انتشارات نوپردازان، چاپ چهارم، سال 1382.

[5] Leonhard, w., ((Control of Electrical Drives)), Springer-Verlag, Berlin, 1996.

[6] Murphy, J.M.D., and Turnbull, F.G., ((Power Electronic Control of AC Motors)), Pergamon Press, Oxford, 1985.

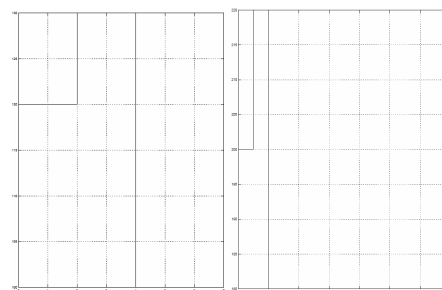
[7] Bose, B.K., ((Power Electronics and AC Drives)), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1986.

[8] ((سیستم های فازی و کنترل فازی)) - تألیف ل. وانگ، ترجمه م. تشنه لب و ن. صفارپور و د. افیونی، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، مهرماه 1380.

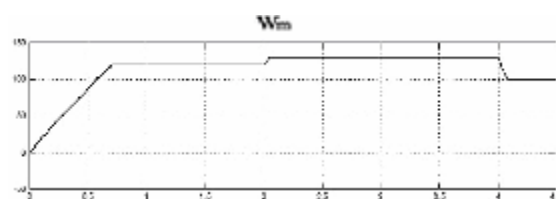
[9] Hu B, Mann GKI, Gosine RG, ((New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers)), IEEE Trans Fuzzy Syst 1999; 7(5):521-39.

[10] Erhan Akln, Mehmet kaya, Mehmet Karakose, ((A robust integrator algorithm with genetic based fuzzy controller feedback for direct vector control)), Computers and Electrical Engineering 29(2003) 379-394.

است تغییرات گشتاور بار اثری بر روی سرعت موتور ندارد.

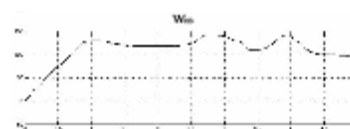


شکل 7: (الف) تغییرات گشتاور بار (ب) تغییرات سرعت مرجع



شکل 8: نتایج شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده فازی

اگر از کنترل کننده PI استفاده کنیم در شرایط یکسان و با اعمال تغییرات بالا موتور قادر به دنبال کردن سرعت مرجع نمی باشد. به همین علت در این حالت فقط سرعت مرجع را مطابق شکل (7) تغییر دادیم که نتایج در شکل (9) جهت مقایسه آورده شده اند.



شکل 9: نتایج شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده PI

6- نتیجه گیری

در این مقاله سرعت یک موتور القایی با استفاده از کنترل کننده فازی، کنترل شده است. ویژگی روش پیشنهادی کنترل هوشمند در حین کارکرد موتور و مقاوم بودن پاسخ ها نسبت به تغییرات ممان اینرسی و اصطکاک و گشتاور بار می باشد. حال آنکه در کنترل کننده PI، علاوه بر دشواری تنظیم پارامترها برای داشتن پاسخ مطلوب، نیاز به اصلاح آنها بواسطه تغییر شرایط موتور می باشد که عملاً تنظیم مجدد این پارامترها در حین کارکرد موتور امکان پذیر نمی باشد. روش پیشنهادی جهت کنترل سرعت توانایی حذف فراجش و کاهش زمان رسیدن به سرعت مطلوب را دارا می باشد.