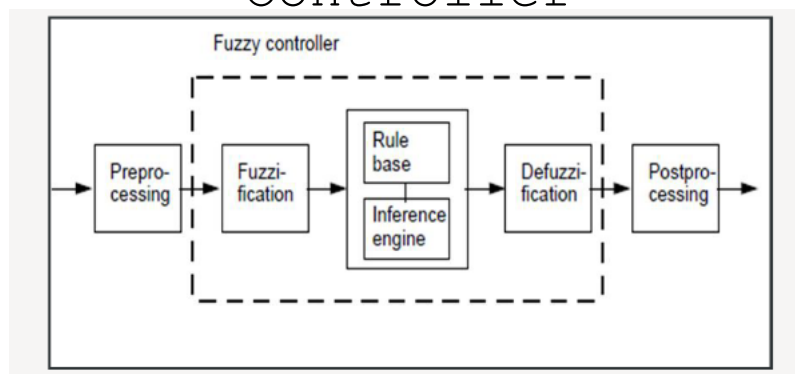


Έλεγχος Κινητήρα με Ασαφή Ελεγκτή

DC Motor Control with Fuzzy Controller



Χάρης Φίλης AEM: 9449
Github Repository Link : [here](#)

October 9, 2022

0.1 Περιγραφή Προβλήματος

Στόχος της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ασαφούς ελεγκτή, ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός συμβατικού DC κινητήρα με υψηλή ακρίβεια και με ασαφή σύνολο εισόδων. Αρχικά, σχεδιάζεται ένας γραμμικός ελέγκτής σύμφωνα με τις αρχές του κλασσικού αυτόματου ελέγχου ώστε να προσδιοριστούν αρχικές παράμετροι του κλασσικού PI ελεγκτή που θα χρησιμοποιηθεί και ώστε να τηρούνται ορισμένες προδιαγραφές που ορίζονται από την ανάθεση. Στην συνέχεια, υλοποιείται ο ζητούμενος ασαφής ελεγκτής με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (πχ. Singleton Defuzzifier, AND υλοποίηση τελεστή min, Center of Largest Area defuzzification method κτλ.). Για τον ασαφή ελεγκτή θα προσομοιωθούν και 3 διαφορετικά σενάρια χρήσης.

0.2 Σχεδίαση του Γραμμικού Ελεγκτή

Σε αυτό το στάδιο ασχολήθηκα με την σχεδίαση ενός κλασσικού γραμμικού ελεγκτή όπως φαίνεται στην παρακάτω

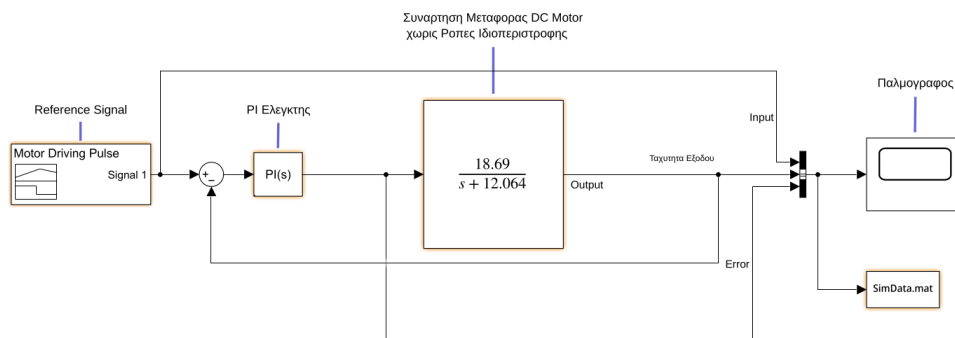


Figure 1: Γραμμικό Σύστημα Ελέγχου

Ο γραμμικός ελεγκτής PI είναι της μορφής: $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(s+c)}{s}$, όπου $c = \frac{K_i}{K_p}$. Οι προδιαγραφές που θέλουμε να πληρούνται είναι οι εξής:

- Απόρριψη Διαταραχών λόγω ιδιοπεριστροφής του δρομέα για $\omega(k) < 1 \text{ rad/s}$, κέρδος διαταραχών $g_d \leq 20 \text{ dB}$ (Το οποίο επιτυγχάνεται εξορισμού μιας και δεν έχουμε λάβει διαταραχή στο σύστημα για μικρή μεταβολή της ροπής, η ω_s μπορεί να μεταβληθεί παροδικά και να επιστρέψει στην τιμή πριν την διαταραχή).
- Το πολύ 5% υπέρψωση για βηματική είσοδο.

- μηδενικό σφάλμα θέσης ($e_{ss} = 0$).
- Χρόνο ανόδου $\tau_{rise} \leq 160ms$
- Είσοδο αναφοράς στον κινητήρα μικρότερη από 200V.

Για την επίτευξη αυτών των προδιαγραφών και για να μην μπούμε σε μία διαδικασία **trial and error** με τοποθέτηση πόλων σε ευσταθή περιοχή στο μιγαδικό επίπεδο και κατάλληλα κέρδη ελεγκτών για να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, γίνεται χρήση του **PID tuner** του **simulink** έτσι πετυχαίνουμε με ακρίβεια τις επιθυμητές παραμέτρους του ελεγκτή. Βλέπουμε πως όλες οι προδιαγραφές

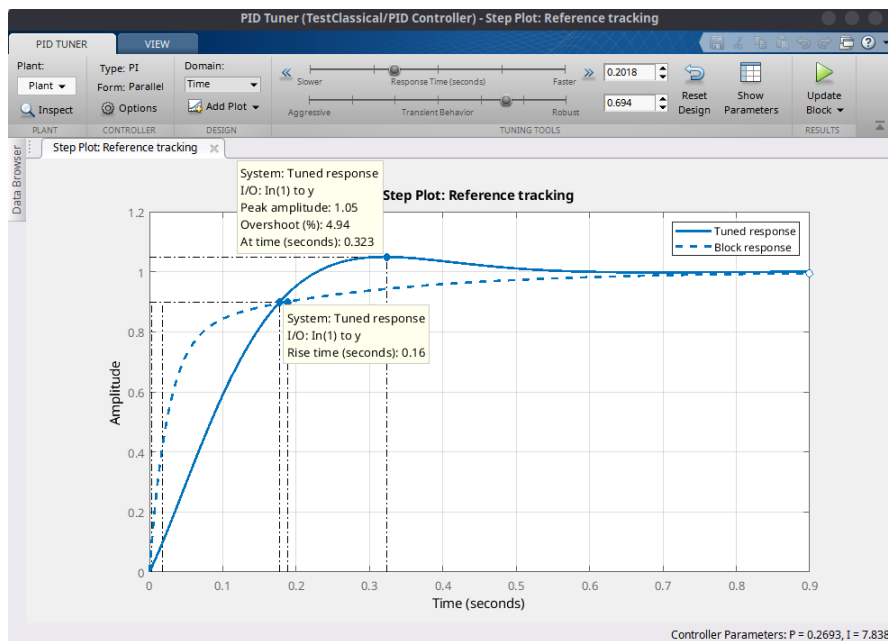


Figure 2: Διαδικασία Επιλογής Παραμέτρων Ελεγκτή

ικανοποιούνται:

- χρόνος ανόδου: $t_r = 0.16s$
- υπερύψωση(overshoot): $M_p = 4.94\%$

Επομένως κατά προσέγγιση δεύτερου δεκαδικού ψηφίου οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή που επιλέγονται είναι:

- $K_p = 0.27$
- $K_i = 7.83$

Άρα $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{0.27(s+29)}{s}$,

όπου $29 = \frac{K_i}{K_p}$ είναι η εξίσωση του ελεγκτή μας.

0.3 Προσομοίωση σεναρίου 1 - Απόκριση Γραμμικού Ελεγκτή

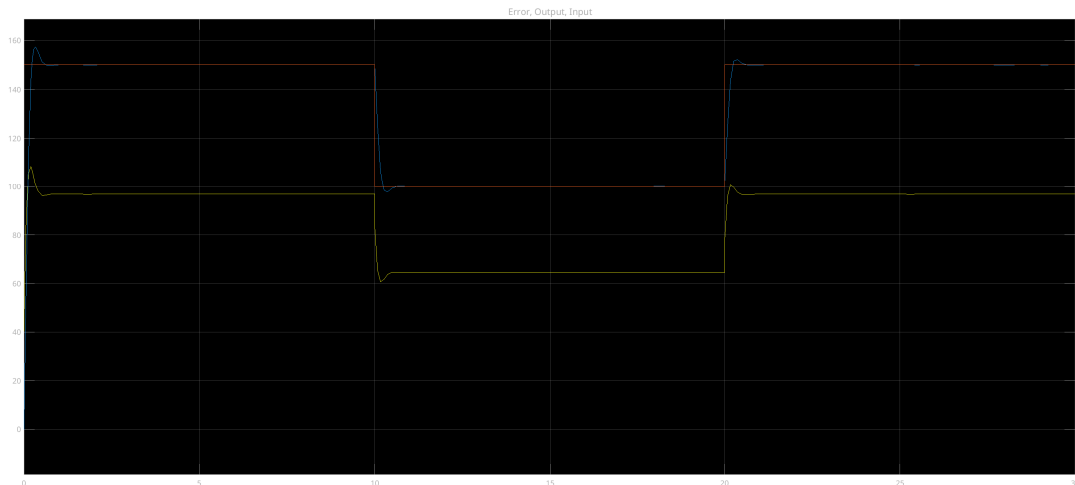


Figure 3: Έξοδος γραμμικού συστήματος Είσοδος, Σφάλμα, Ταχύτητα Εξόδου

0.4 Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)

Τα χαρακτηριστικά του FLC που απαιτούνται από την ανάθεση είναι:

- Ασαφοποιητής Singleton
- Το συνδετικό AND υλοποιείται με τον τελεστή MIN
- Η συνάρτηση συμπερασμού υλοποιείται με τον κανόνα Larson
- Το συνδετικό ALSO υλοποιείται με τον τελεστή max.
- Ο απο-ασαφοποιητής υλοποιείται με την τεχνική COA (Center of largest area)

Ο ελεγκτής που θα σχεδιαστεί απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

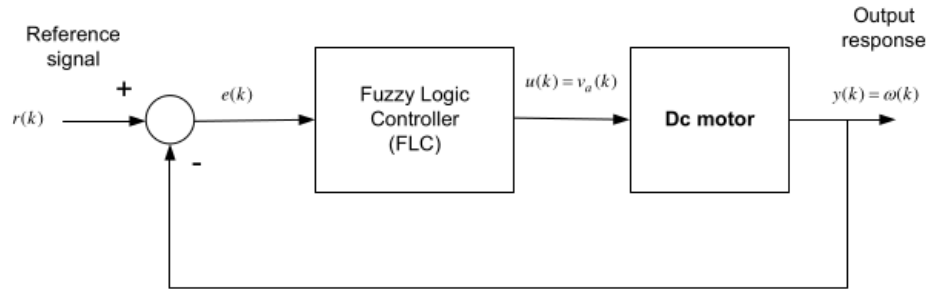


Figure 4: Αρχικό σχηματικό Ασαφούς Ελεγκτή

Οι λεκτικές μεταβλητές του σφάλματος, της μεταβολής του σφάλματος και της μεταβολής του σήματος ελέγχου περιγράφονται από τα παρακάτω διαγράμματα: Εφαρμόζεται κλιμακοποίηση (normalization) στο σφάλμα E και στην μεταβολή του σφάλματος E , με σκοπό τα μεγέθη να βρίσκονται στο διάστημα $[-1,1]$ όπως ζητείται από την εργασία. Δίνεται ότι το σήμα αναφοράς r μπορεί να κινείται οπουδήποτε στο διάστημα $[0, 150]$ συνεπώς η μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να είναι $\omega_{max} = 150 \frac{rad}{s}$. Συνεπώς για την κανονικοποίηση αρκεί να διαιρέσουμε με το 150, έτσι το νέο πεδίο ορισμού βρίσκεται στο $[-1,1]$. Συνεπώς οι λεκτικές μεταβλητές πλέον περιγράφονται ως εξής: ¹

¹Για έναν περίεργο λόγο όταν επέλεγα την συνάρτηση που έφτιαξα μου πετούσε έναν error: "Fail evaluating fis"

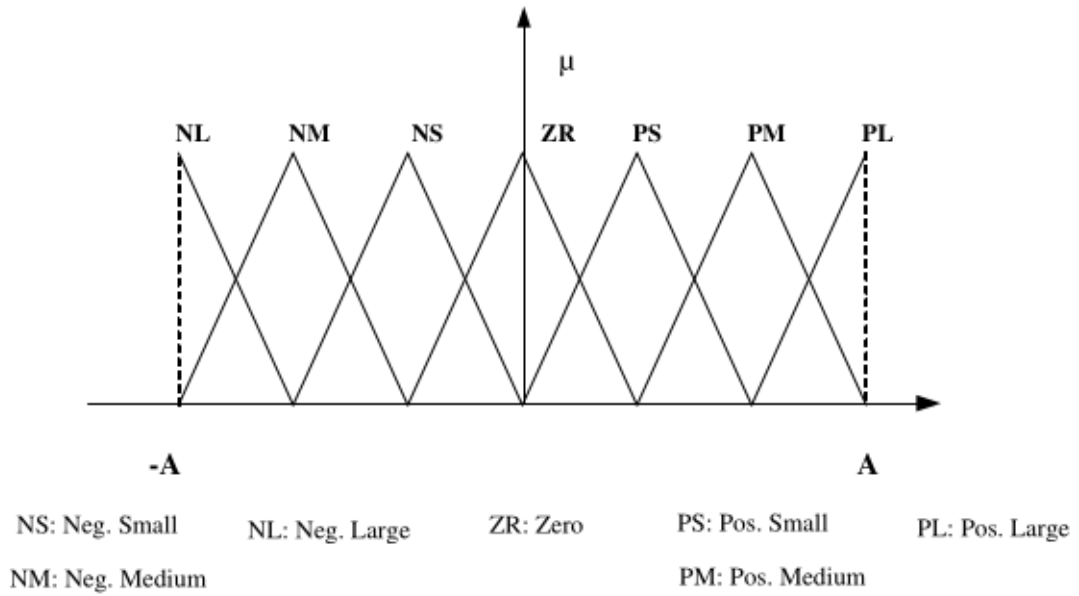


Figure 5: Λεκτικές μεταβλητές σφάλματος μεταβολής του σφάλματος \dot{E} και μεταβολής του σήματος ελέγχου \dot{U} (9-λεκτικές μεταβλητές)

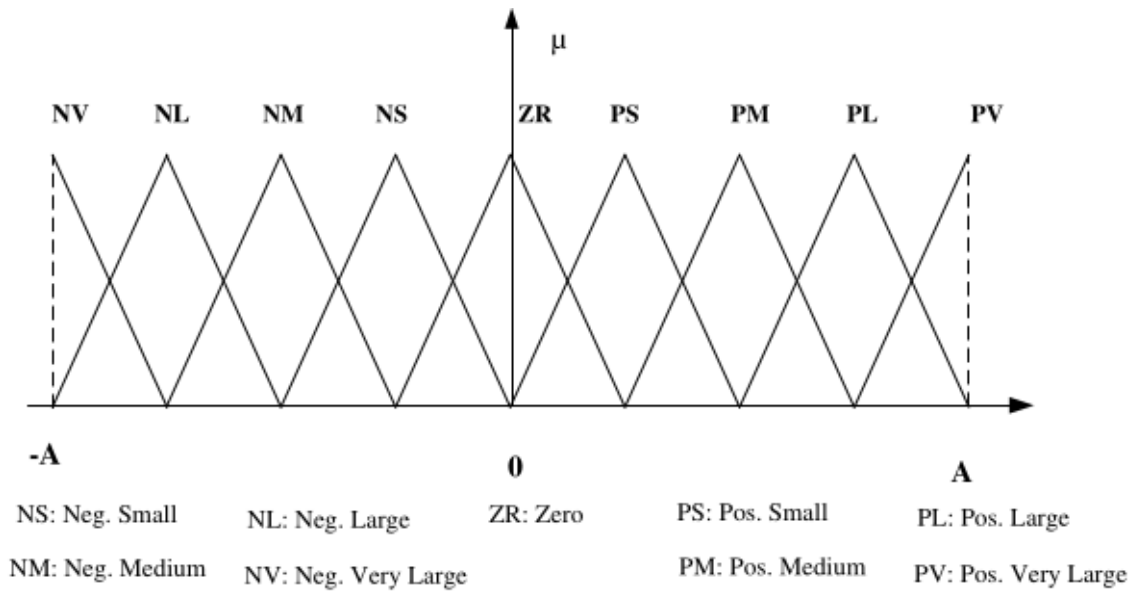


Figure 6: Λεκτικές Μεταβλητές Σφάλματος E (7-λεκτικές μεταβλητές)

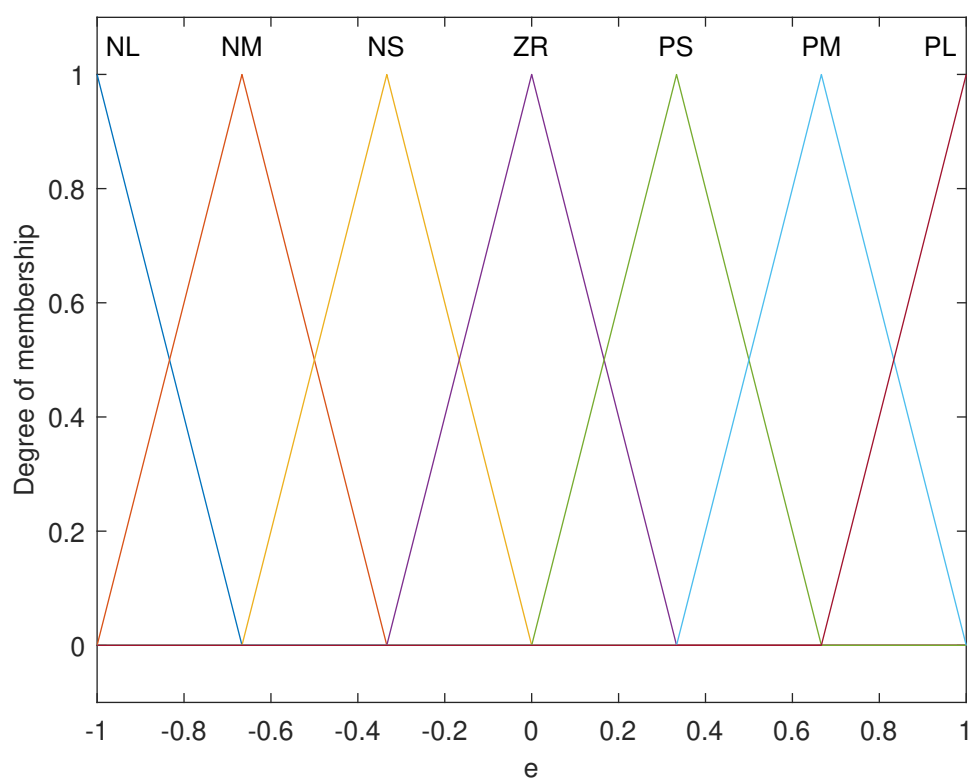


Figure 7: Συνάρτηση Συμμετοχής της μεταβλητής E

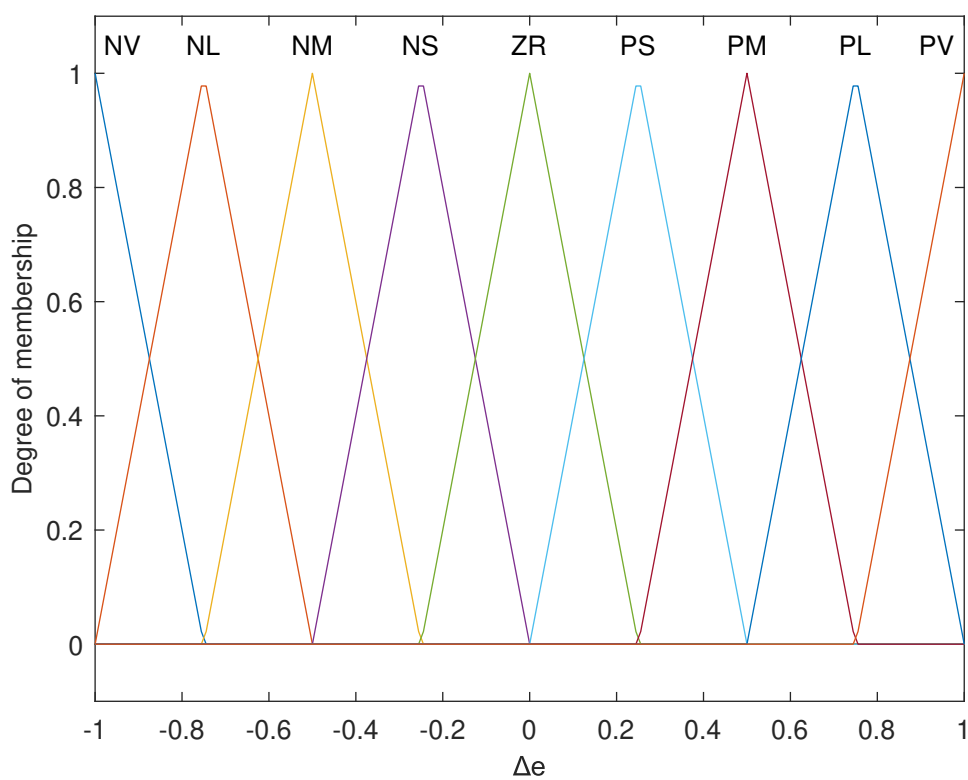


Figure 8: Συνάρτηση Συμμετοχής της μεταβλητής \dot{E}

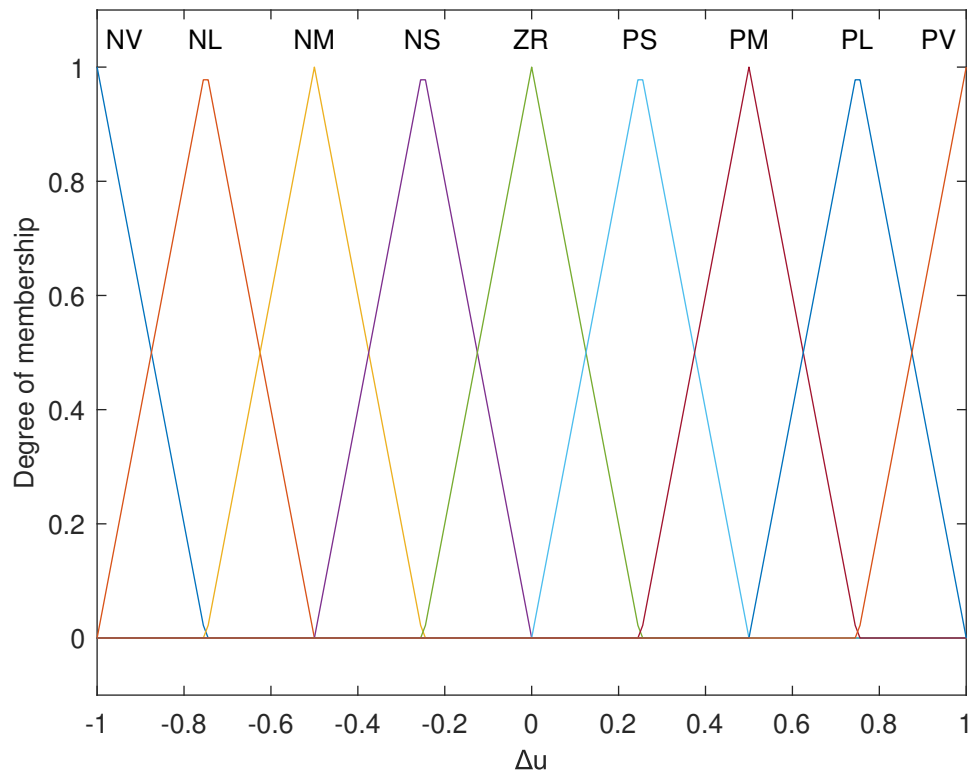
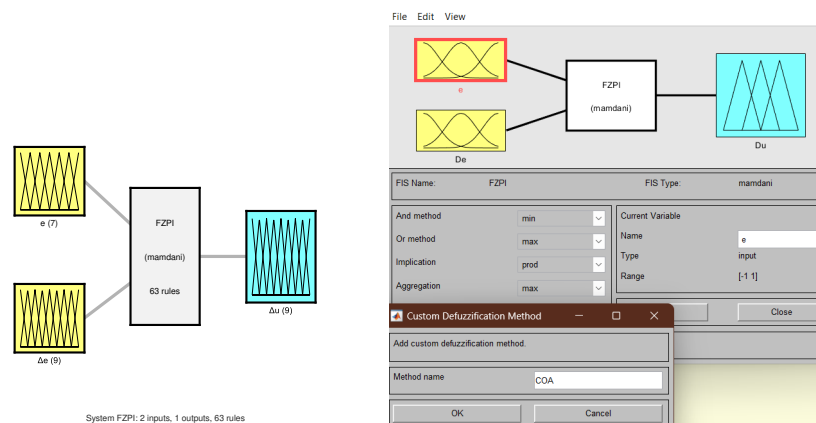
Figure 9: Συνάρτηση Συμμετοχής της μεταβλητής \dot{U} 

Figure 10: Ασαφής Ελεγκτή Fuzzy-Logic-Designer

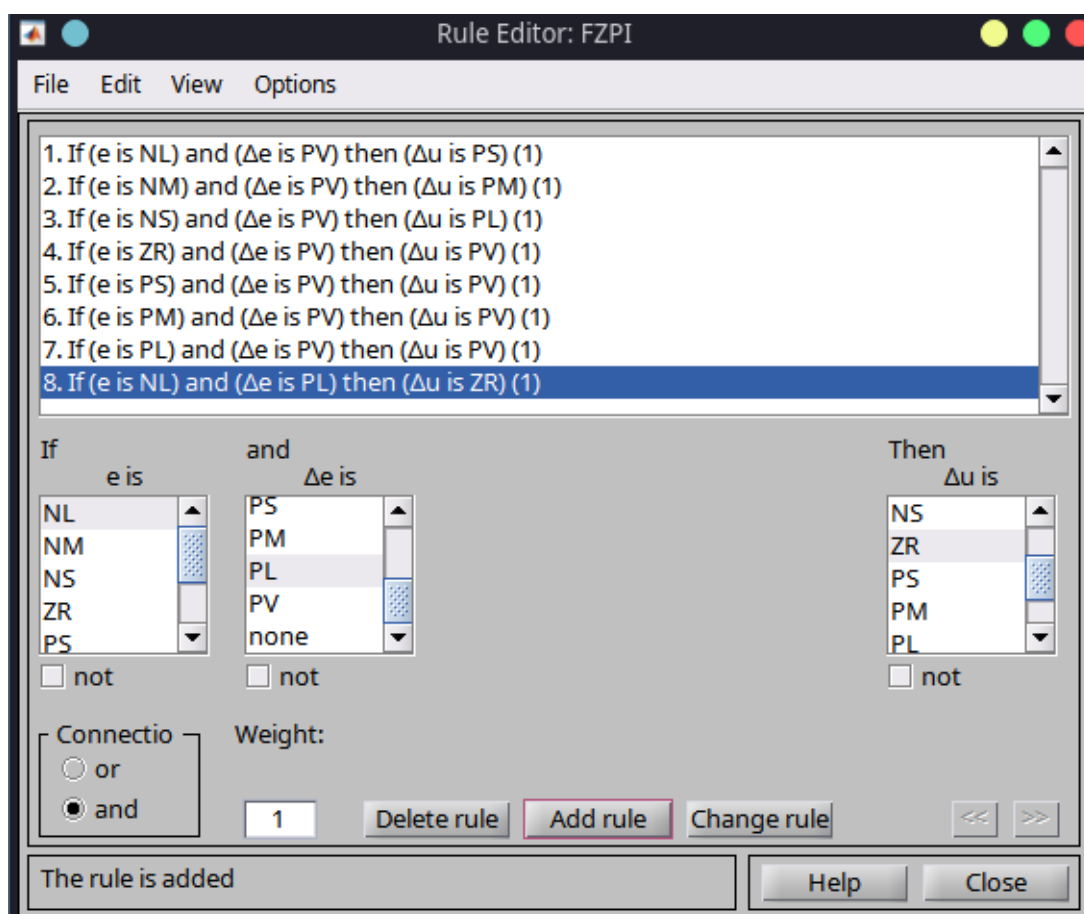


Figure 11: Στιγμιότυπο επεξεργασίας κανόνων

Οι κανόνες για τον FZ-PI ελεγκτή που επιλέχθηκαν όπως προκύπτουν από τους μετακανόνες προσδιορισμού προσήμου που περιγράφονται στις σημειώσεις, περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

E\Δe	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
PL	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV
PM	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV
PS	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV
ZR	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
NS	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NM	NV	NV	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NV	NV	NV	NV	NV	NL	NM	NS	ZR

Πέραν αυτού το MATLAB δεν παρέχει έτοιμη υλοποίηση της συνάρτησης αποσαφοποίησης με την μέθοδο Center of Area ή Center of Larges Area(COA). Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε η συνάρτηση αυτή, η οποία έχοντας ως είσοδο τις τιμές των x και των y της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου, υπολογίζει την έξοδο του ελεγκτή με βάση τα παρακάτω.

Στην CoA μέθοδο αποσαφοποίησης που επίσης καλείται και μέθοδος CoG (Center of Gravity), ο ασαφής ελεγκτής πρώτα υπολογίζει το εμβαδόν της περιοχής κάτω από τις κλιμακοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής εντός ενός εύρους της μεταβλητής εξόδου. Στην συνέχεια, ο ασαφής ελεγκτής χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση για να υπολογίσει το γεωμετρικό κέντρο αυτής της περιοχής.

$$C_oA = \frac{\int_{X_{max}}^{X_{min}} f(x) * x dx}{\int_{X_{max}}^{X_{min}} f(x) dx}$$

Μια οπτικοποίηση αυτού το αλγορίθμου βρίσκεται στην παρακάτω εικόνα:

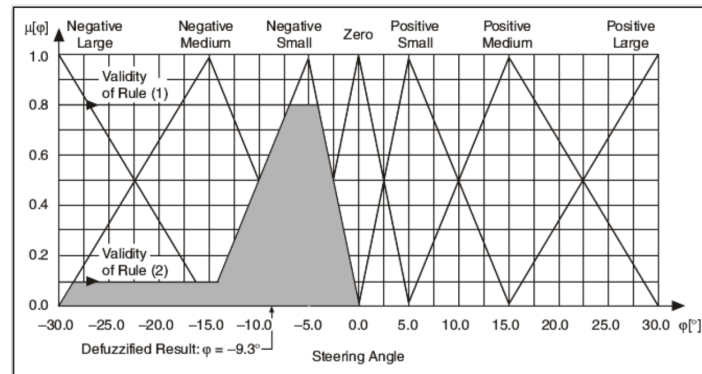


Figure 12: Area of scaled Membership function

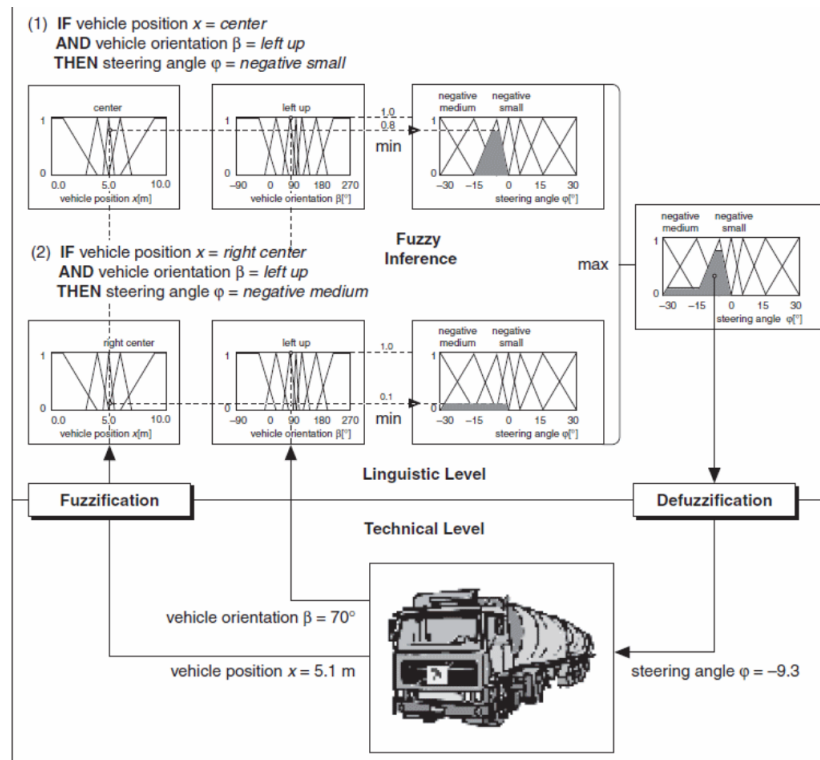


Figure 13: Defuzzification Method

Διάγραμμα/Επιφάνεια Ενεργοποίησης κανόνων

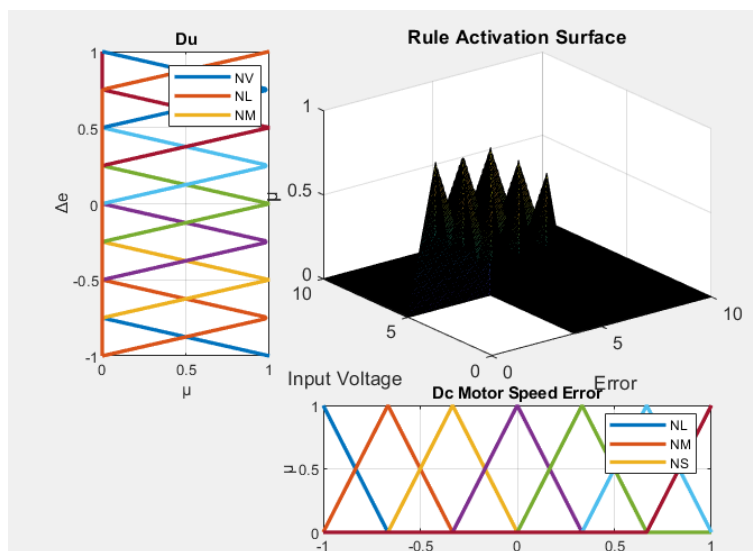


Figure 14: Rule Activation Surface

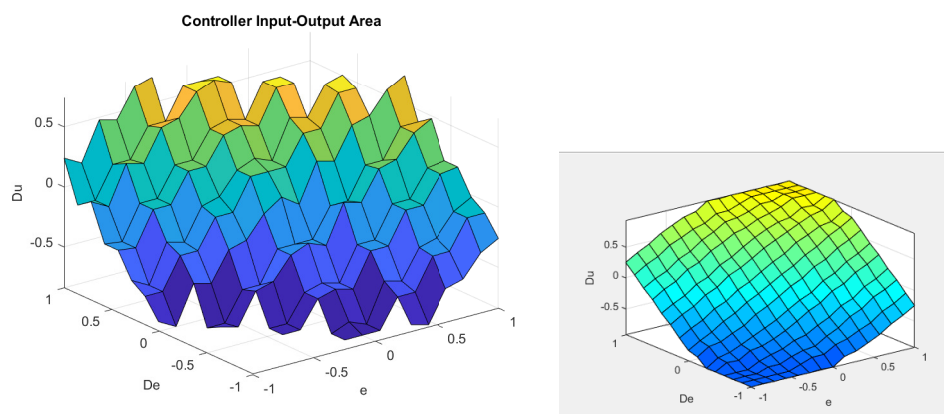


Figure 15: Controller Input - Output Area

0.5 Σενάρια Χρήσης

Σε κάθε σενάριο χρήσης απαιτείται ένα βασικό ίσως τροποποιημένο σε ορισμένες περιπτώσει μοντέλο κυκλώματος ασαφή ελέγχου το οποίο αρχικά φαίνεται παρακάτω όπως δημιουργήθηκε στο **simulink**.

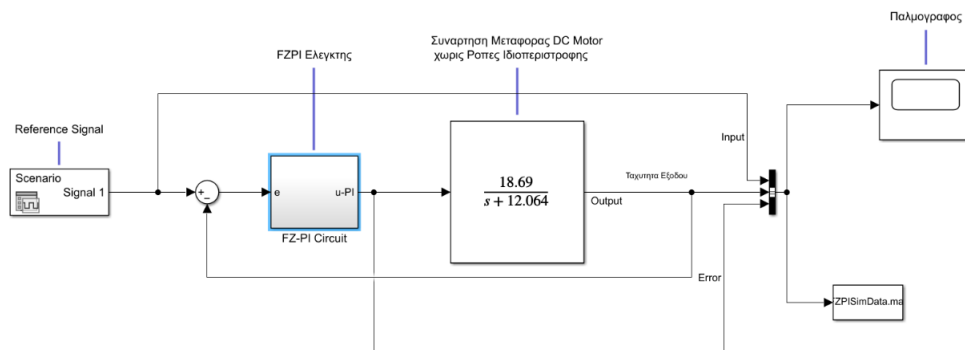


Figure 16: Σχηματικό ασαφής ελεγκτής - κινητήρα

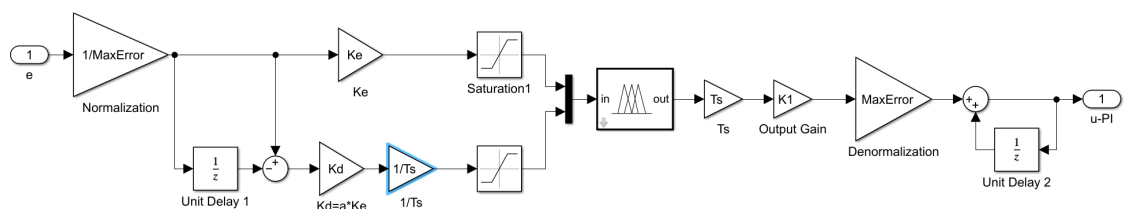


Figure 17: Σχηματικό Κυκλώματος Ασαφούς PI ελεγκτή

0.5.1 Σενάριο 1

Είσοδος και Σχηματικό μοντέλου

Για το σενάριο 1 η κυματομορφή εισόδου είναι ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγησή του γραμμικού PI ελεγκτή.

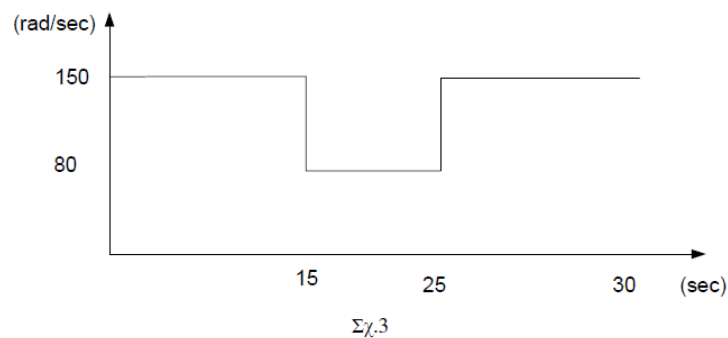


Figure 18: IN : Reference Signal

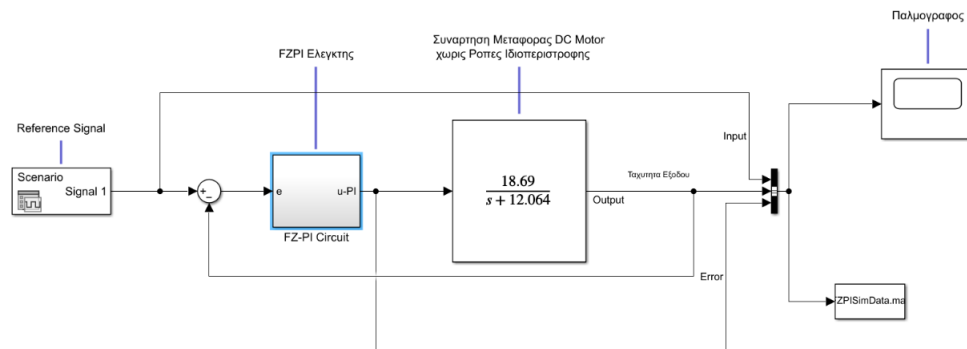


Figure 19: Σχηματικό ασαφής ελεγκτής - κινητήρα

0.5.2 Αποκρίσεις

1η Περίπτωση: Τα κέρδη του ελεγκτή παίρνουν τις τιμές που υπολογίστηκαν από την τυπική διαδικασία υπολογισμού (Κεφάλαιο 9ο): Επειδή το Scope είχε θέμα στο να αποτυπώσει τα δεδομένα τα έκανα save σε mat file και τα έκανα ένα απλό plot.

Παρατηρώ ότι ο ασαφής ελεγκτής αργεί αρκετά να θέσει το σύστημα στην σωστή απόκριση ωστόσο το σήμα εξόδου είναι σχετικά καλό. Με αλλαγή των

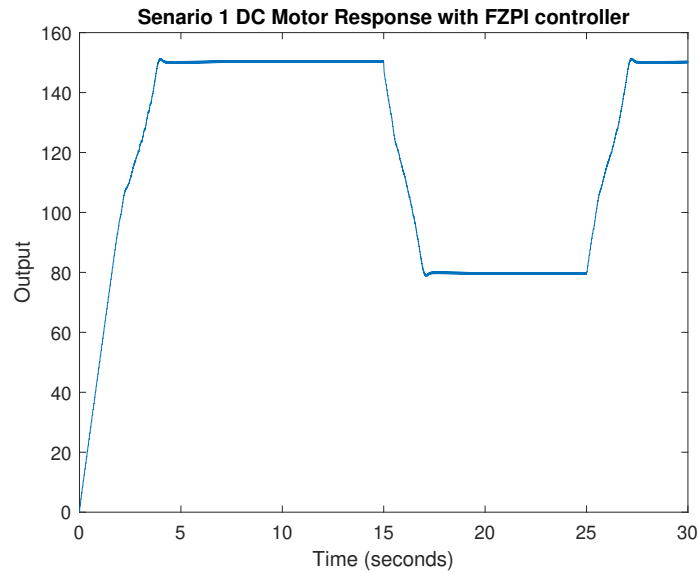


Figure 20: Απόκριση Συστήματος Σεναρίου 1

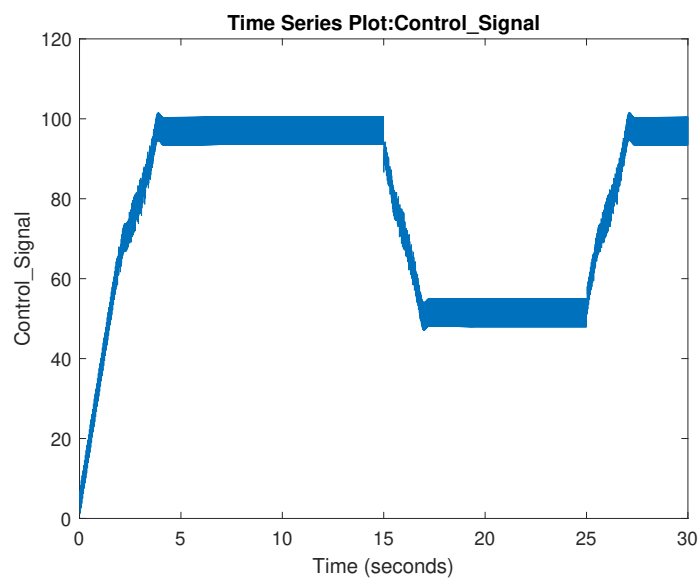


Figure 21: Σήμα Ελέγχου μετά τον ασαφή ελεγκτή

παραμέτρων όπως αναφέρει η μεθοδολογία του κεφαλαίου 9. Παρατηρώ ότι επιτυγχάνονται οι προδιαγραφές που τίθενται.

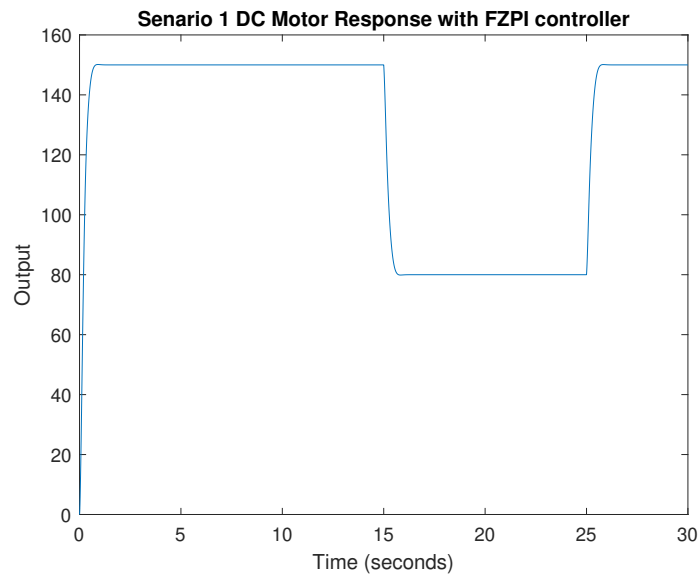
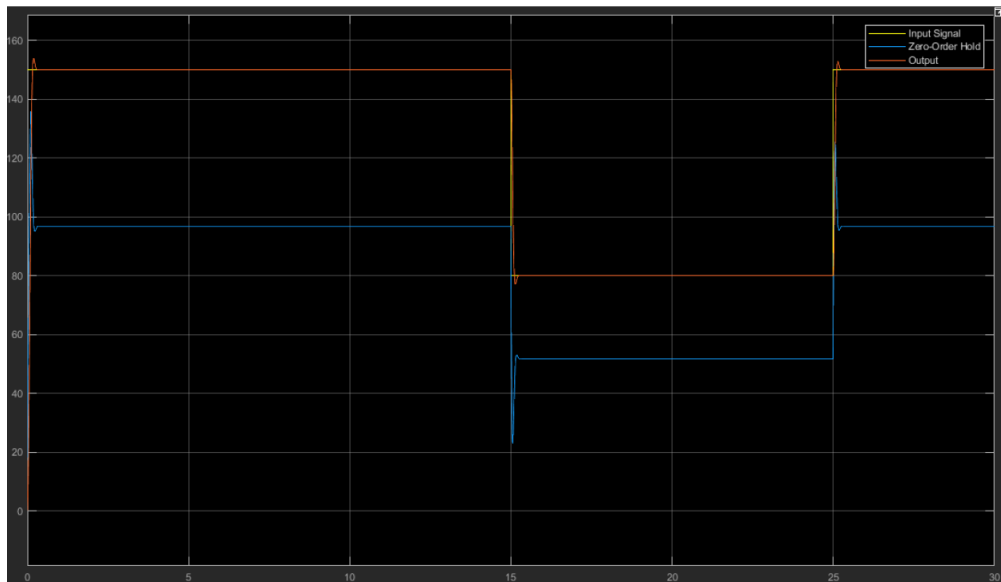


Figure 22: System Response with Tunned Parameters

0.5.3 Παράδειγμα Απόκρισης e is PM and Δe is NS

Επιλέγοντας στον Fuzzy Logic Designer με τον μοντέλο ελεγκτή που έχει υλοποιηθεί, μια διέγερση PM = 0.5 του e και μια διέγερση NS = -0.25 TO Δe μέσω του rule view προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα. Παρατηρώ ότι δεν διεγείρεται κανένας κανόνας και αυτό επαληθεύει τον πίνακα Rule Base ??

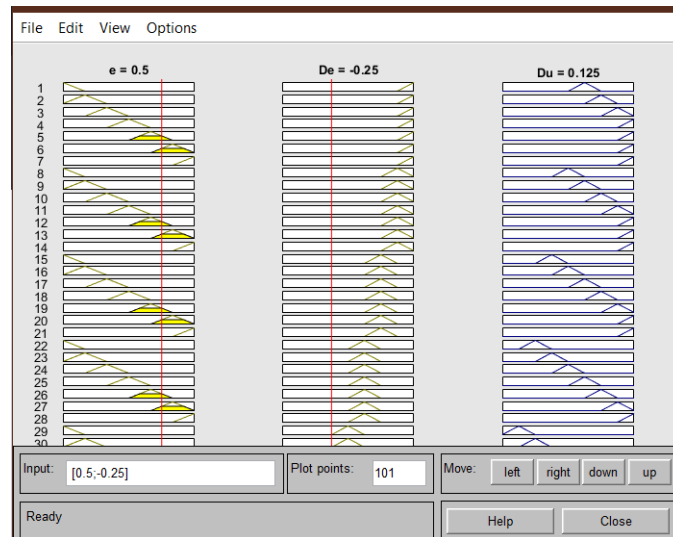


Figure 23: Response Rule View

0.5.4 Τριδιάστατη Επιφάνεια Εξόδου ελεγκτή

Παρακάτω φαίνεται η τριδιάστατη επιφάνεια της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή Du σε σχέση με τις εισόδους του e και De .

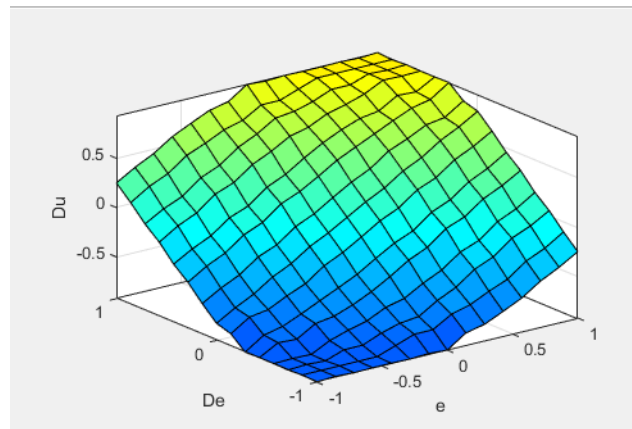


Figure 24: FIS surface

0.5.5 Σενάριο 2

Για το σενάριο 2 η κυματομορφή εισόδου είναι ένας τραπεζοειδής παλμός που φαίνεται παρακάτω σαφώς όπως και στο σενάριο 1 λαμβάνουμε $T_L = 0$ μιας και θεωρούμε ότι δεν έχουμε διαταραχές λόγω της ροπής που προκαλεί η ιδιοπεριστροφή του κινητήρα.

Είσοδος και Σχηματικό μοντέλου

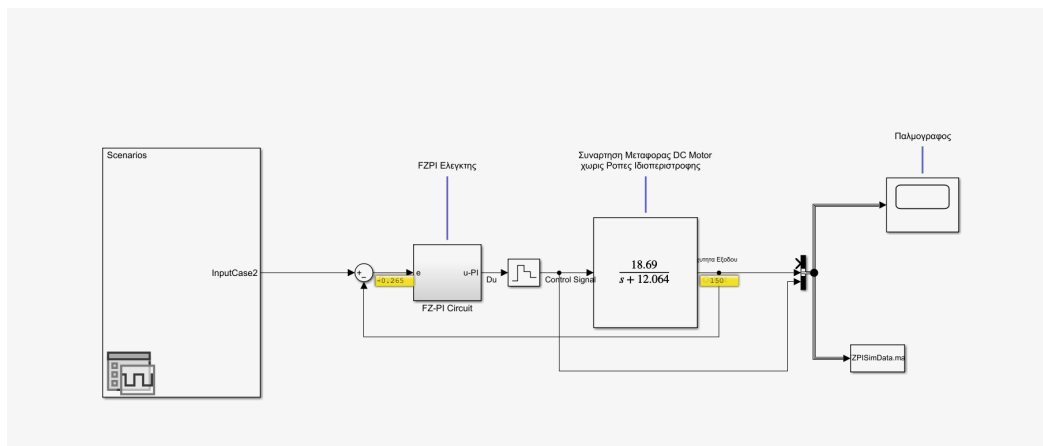


Figure 25: Circuit During Simulation

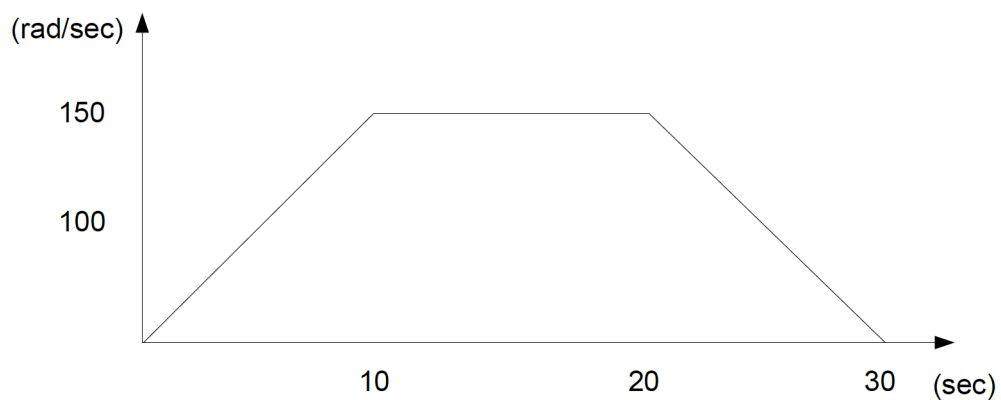


Figure 26: IN : Reference Signal

0.5.6 Αποκρίσεις

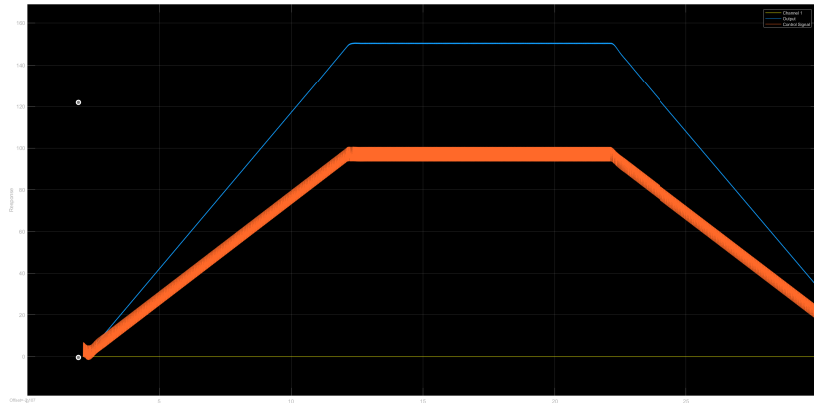


Figure 27: Απόκριση Σεναρίου 2 Μπλέ:Έξοδος Πορτοκαλί:Σήμα Ελέγχου στην έξοδο του Ελεγκτή

Παρατηρείται μηδενική υπερύψωση που συμφωνεί με τις προδιαγραφές που τίθενται.

0.5.7 Σενάριο 3

Είσοδος και σχηματικό Μοντέλου

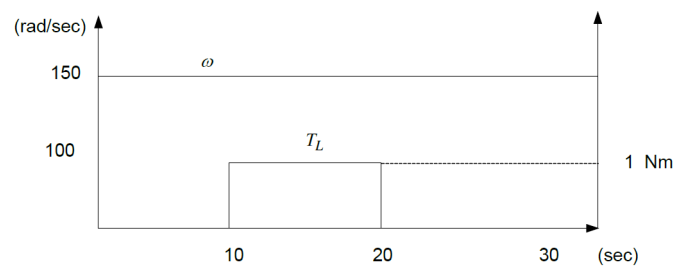
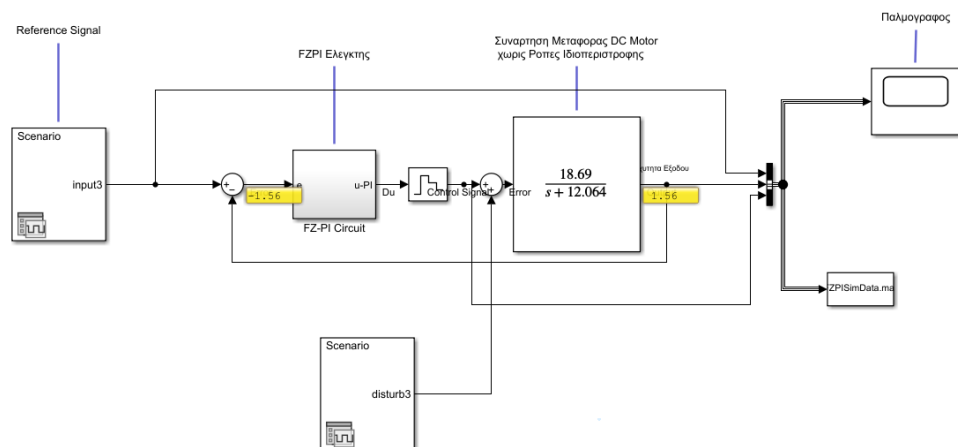
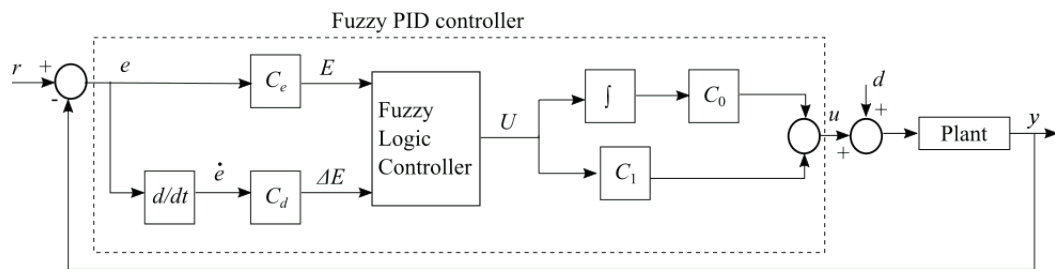


Figure 28: IN : Reference Signal

Το πρότυπο που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του σχηματικού φαίνεται στο παρακάτω κύκλωμα.



0.5.8 Αποκρίσεις

Παρατηρείται μικρή βύθιση της εξόδου που προκαλείται από την διαταραχή όπως αναμένεται. Ωστόσο αυτό επανέρχεται στην μόνιμη κατάσταση.

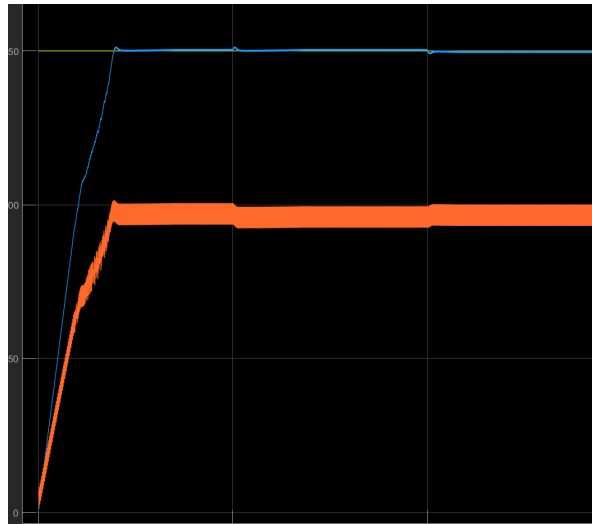


Figure 29: Case 3 Responses Blue : Output Signal Red:Control Signal

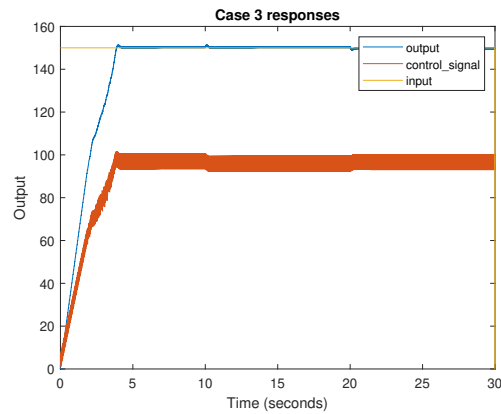


Figure 30: Case 3 Responses Blue : Output Signal Red:Control Signal

Παραδοτέο

- Αναφορά : Report9449.pdf
- Φάκελος **img** : Αποθετήριο εικόνων κατα την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας
- Φάκελος **Test** : Αρχείο με **script** για εκμάθηση καθώς και παλιών αρχείων που αντικαταστάθηκαν με νέα.(δεν αποτελούν μέρος της εργασίας)
- Φάκελοι: **slprj,SimData,TestClassical_grt_rtw** -> Αρχεία **simulink** και αποτελεσμάτων

Κώδικες :

- **LinearPIModel.m** : Αρχείο υλοποίηση του γραμμικού PI ελεγκτή πριν και μετά την ρύθμισή του μέσω του **PI tuning** εργαλείου
- **Init.m**: Βασικό αρχείο αρχικοποίησης παραμέτρων **workspace**
- **create_fis.m**: Αρχείο υλοποίησης του Ασαφούς Ελεγκτή **FZPI**
- **FZPI.fis**: Ασαφής ελεγκτής (σε αυτό το αρχείο δεν κατάφερα να εισάγω την **custom COA** συνάρτηση μιας και η γραφική διεπαφή **FuzzyLogicDesigner** είχε θέμα έτσι χρησιμοποιήθηκε το πάνω αρχείο).
- **FZPI_codegenerated.fis**: Τελικό αρχείο ασαφούς ελεγκτή ώστε να γίνει παράκαμψη των **bugs** του **Fuzzy Logic Toolbox**.
- **COA.m**: Συνάρτηση Αποσαφοποίησης **Center Of Area**

Μοντέλα/Σήματα/Εξοδοι :

- **LinearClassicControlSystem.slx**: Μοντέλο γραμμικού συστήματος - Γραμμικού PI ελεγκτή για αρχική προσομοίωση.
- **myFZPI.slx**: Μοντελο **FZPI-DCmotor** κυκλώματος
- **SignalCase1**: Σήμα Αναφοράς Σενάριο 1
- **SignalCase2**: Σήμα Αναφοράς Σενάριο 2
- **SignalCase3**: Σήμα Αναφοράς Σενάριο 3
- **DisturbSignalCase3**: Σήμα Διαταραχής Σενάριο 3
- ****mat** : Τα υπόλοιπα **mat** αρχεία αναφέρονται σε αποτελέσματα Πειραμάτων/Προσομοιώσεων