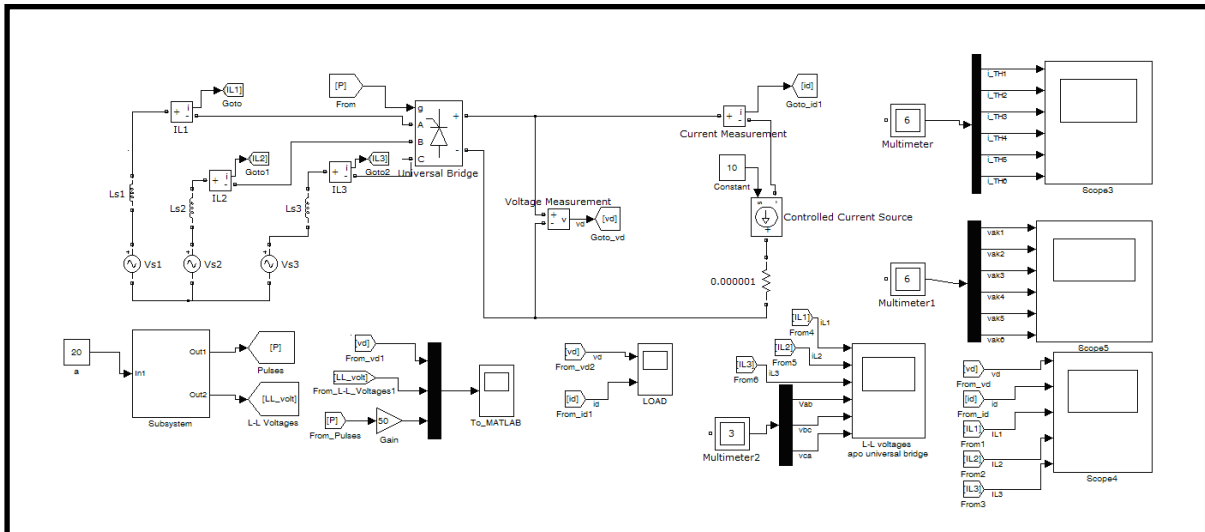


Διονύσιος Γ. Πυλαρινός  
Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &  
Τεχνολογίας Υπολογιστών, Παν. Πατρών

## Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος με χρήση MATLAB και SIMULINK

Ελεγχόμενοι ανορθωτές και AC ρυθμιστές



- Δέκα εργαστηριακές ασκήσεις σε MATLAB και SIMULINK
- Διαχείριση και απεικόνιση σημάτων
- Ρυθμός δειγματοληψίας, ενεργός και μέση τιμή
- Ανάλυση Fourier, φάσματα πλάτους και γωνίας
- Αρμονικές και ισχύς
- Η εργαλειοθήκη SimPowerSystems
- Ηλεκτρικά στοιχεία, όργανα και blocks
- Απλά κυκλώματα ανόρθωσης με διόδους
- Μονοφασικοί και τριφασικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές (ενός, δύο, τριών, τεσσάρων και έξι παλμών)
- R, L,  $E_d$  φορτία και συνδυασμοί τους
- Μονοφασικοί και τριφασικοί AC ρυθμιστές

**Διονύσιος Γ. Πυλαρινός**  
**Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &**  
**Τεχνολογίας Υπολογιστών, Παν. Πατρών**

## **Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος με χρήση MATLAB και SIMULINK**

**Ελεγχόμενοι ανορθωτές και AC ρυθμιστές**

- Δέκα εργαστηριακές ασκήσεις σε MATLAB και SIMULINK
- Διαχείριση και απεικόνιση σημάτων
- Ρυθμός δειγματοληψίας, ενεργός και μέση τιμή
- Ανάλυση Fourier, φάσματα πλάτους και γωνίας
- Αρμονικές και ισχύς
- Η εργαλειοθήκη SimPowerSystems
- Ηλεκτρικά στοιχεία, όργανα και blocks
- Απλά κυκλώματα ανόρθωσης με διόδους
- Μονοφασικοί και τριφασικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές (ενός, δύο, τριών, τεσσάρων και έξι παλμών)
- R, L, E<sub>d</sub> φορτία και συνδυασμοί τους
- Μονοφασικοί και τριφασικοί AC ρυθμιστές

# Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος με χρήση MATLAB και SIMULINK

Ελεγχόμενοι ανορθωτές και AC ρυθμιστές

Έκδοση: Ηώς Πολιτιστικός Σύλλογος, Ήλιδος 16, Γαστούνη, 27300  
email: [contact@hws.org.gr](mailto:contact@hws.org.gr)

Το παρόν σύγγραμμα διατίθεται σε ηλεκτρονική μορφή με ανοικτή πρόσβαση (open access) στην ιστοσελίδα του συλλόγου: [hws.org.gr](http://hws.org.gr)  
(direct link: <http://hws.org.gr/books/EHIMXMS.pdf>)

**ISBN 978-618-82223-0-4**

Copyright © Δ. Πυλαρινός, 2015

Διατίθεται με τύπο άδειας CC-BY 4.0 (Αναφορά Δημιουργού 4.0) όπως περιγράφεται στο <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> και αναλυτικότερα στο <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Η άδεια CC-BY 4.0 (Αναφορά Δημιουργού 4.0) εμπίπτει στις άδειες Ελεύθερων Έργων Κουλτούρας (Free Cultural Works) όπως περιγράφονται στο <http://creativecommons.org/freeworks>

This work is available under the CC-BY 4.0 license.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται σε προπτυχιακούς φοιτητές ανώτατης εκπαίδευσης και ειδικά φοιτητές των Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων. Εφαρμόζει μια δομημένη προσέγγιση κατά την οποία ο φοιτητής καλείται να εκτελέσει 10 διαφορετικές εργαστηριακές ασκήσεις, διάρκειας δύο διδακτικών ωρών, σε περιβάλλον MATLAB και SIMULINK. Η εκπαιδευτική προσέγγιση έχει ως κύριο στόχο να ωθήσει τον φοιτητή να εργαστεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό από την πρώτη στιγμή για να εξοικειωθεί με βασικές αρχές, έννοιες και κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος. Γίνεται συνειδητή προσπάθεια αποφυγής εκτενής παρουσίασης του λογισμικού αλλά και του γενικότερου θεωρητικού υποβάθρου<sup>1</sup>. Νέες έννοιες αλλά και λειτουργίες του λογισμικού εισάγονται σταδιακά, ώστε να διατηρηθεί το ενδιαφέρον, να αποφευχθεί η επανάληψη παρόμοιων βημάτων σε κάθε άσκηση και να μετριασθεί η ροή της πληροφορίας. Κάθε άσκηση ολοκληρώνεται με παράθεση των βασικών σημείων και των εκπαιδευτικών στόχων.

Η προσέγγιση που περιγράφεται σε αυτό το βιβλίο ακολουθήθηκε κατά το χειμερινό εξάμηνο του 2014-2015 στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Κρήτης<sup>2</sup>. Στο τέλος του κύκλου των ασκήσεων, οι φοιτητές κλήθηκαν να απαντήσουν σε σχετικό ερωτηματολόγιο. Το διδακτικό πλάνο καθώς και μια πρώτη ανάλυση των απαντήσεων των φοιτητών στο ερωτηματολόγιο παρουσιάστηκαν στο Πανελλήνιο Συνέδριο Ηλεκτρονικής και Τηλεπικοινωνιών (Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications - PACET) του 2015<sup>3,4</sup>. Η ανάλυση των απαντήσεων έδειξε ότι, σύμφωνα με την κρίση των φοιτητών, η συγκεκριμένη προσέγγιση βελτίωσε σημαντικά τις γνώσεις και την ευχέρεια χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού αλλά και τις βασικές γνώσεις τους για θεμελιώδεις έννοιες και ζητήματα της ευρύτερης επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Παράλληλα πέτυχε να αυξήσει σημαντικά το ενδιαφέρον τους για τον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και για το χρησιμοποιούμενο λογισμικό. Σημαντικό ποσοστό των φοιτητών θεώρησε τις γνώσεις που αποκτήθηκαν χρήσιμες για άλλα μαθήματα, για την εξομίωση άλλων κυκλωμάτων στο μέλλον και για την πτυχιακή τους εργασία. Το γενικότερο ποσοστό ικανοποίησης έφτασε το 90%.

*Δ. Πυλαρινός*

---

<sup>1</sup> για μια γρήγορη εισαγωγή στο αντικείμενο ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει και στις σχετικές βιντεο-διαλέξεις του συγγραφέα που αφορούν το μάθημα «Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος» στα πλαίσια του Προγράμματος Επικαιροποίησης Γνώσεων Αποφοίτων «Φωτοβολταϊκά Ενεργειακά Συστήματα» στον σύνδεσμο <http://tinyurl.com/o3varby>.

<sup>2</sup> το βιβλίο αυτό ουσιαστικά αποτελεί έκδοση των εργαστηριακών σημειώσεων που αλλού μπορεί να αναφέρονται με την βιβλιογραφική αναφορά: «Δ. Πυλαρινός, Ηλεκτρονικά Ισχύος: Εργαστηριακές Σημειώσεις, ΤΕΙ Κρήτης, 2014-2015»

<sup>3</sup> η σχετική εργασία παρατίθεται στο παράρτημα του βιβλίου.

<sup>4</sup> θα ήθελα και από εδώ να ευχαριστήσω τους συν-συγγραφείς της συγκεκριμένης εργασίας (Κ. Σιδεράκη, Ε. Δρακάκη, Ι. Ανδρουλιδάκη), τους δύο πρώτους για την γενικότερη βοήθεια αλλά και την διασύνδεση με προηγούμενους κύκλους διδασκαλίας του μαθήματος στα ΤΕΙ Κρήτης και τον τελευταίο για την βοήθεια στην κατάρτιση του ερωτηματολογίου και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 1: Βασικές γνώσεις MATLAB-Κατασκευή, σχεδίαση και χειρισμός σημάτων, ημιτονοειδή σήματα και ενεργές τιμές.....</b>	<b>1</b>
1.1 Πράξεις.....	1
1.2 Ονοματοδοσία μεταβλητών, η μεταβλητή ans.....	1
1.3 Σήματα και πίνακες.....	3
1.3.1 Ορισμός πινάκων, ονοματοδοσία, πράξεις και ανάστροφος.....	3
1.3.2 Πράξεις με χρήση τελείας.....	4
1.3.3 Δημιουργία σημάτων με χρήση του συμβόλου άνω και κάτω τελείας.....	4
1.3.4 Η εντολή whos.....	5
1.3.5 Μιγαδικοί αριθμοί και διανύσματα (complex).....	6
1.3.6 Διανύσματα μεγάλου αριθμού στοιχείων (πραγματικά σήματα), χρόνος και συχνότητα δειγματοληψίας Ts.....	6
1.3.7 Επιλογή και χρήση στοιχείων διανύσματος – η εντολή length.....	7
1.3.8 Σχεδιασμός (γραφικές παραστάσεις) - η εντολή plot.....	8
1.3.9 Σχεδιασμός ημιτόνου, ο αριθμός π.....	10
1.4.1 Σήματα σε ΜΗΚ.....	10
1.4.2 Σχεδιάζοντας τάση και ρεύμα σε αντίσταση (η εντολή hold).....	11
1.5 Υπολογίζοντας ενεργό και μέση τιμή σημάτων σε μη ΜΗΚ - κύκλωμα με αντίσταση και δίοδο-η εντολή trapz.....	11
1.6 Βασικά σημεία.....	13
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 2: Αρμονικές και Ανάλυση Fourier.....</b>	<b>14</b>
2.1 Αρμονικές.....	14
2.2 Ανάλυση Fourier.....	14
2.3.1 Ανάλυση Fourier στη MATLAB – Η εντολή fft – Φάσματα.....	15
2.3.2 Ανάλυση Fourier στη MATLAB –Σχεδιάζοντας το φάσμα πλάτους.....	17
2.3.3 Ανάλυση Fourier στη MATLAB – Προσαρμογή (scaling) Φασμάτων.....	20
2.3.4 Συγκεντρωμένος κώδικας για σχεδιασμό φάσματος πλάτους.....	21
2.3.5 Υπολογισμός στοιχείων.....	22
2.4 Αρμονικές και ενεργός τιμή.....	23
2.5 Αρμονικές και ισχύς.....	24
2.6 Λόγος αρμονικής παραμόρφωσης THD.....	27
2.7 Βασικά σημεία.....	28
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 3: Βασικές γνώσεις SIMULINK (SimPowerSystems).....</b>	<b>29</b>
3.1.1 SIMULINK.....	29
3.1.2 Εργαλειοθήκες, αναζήτηση και επιλογή block.....	29
3.1.3 Αποθήκευση μοντέλων.....	30
3.1.4 Τύπος αρχείων.....	30
3.2.1 Η εργαλειοθήκη SimPowerSystems.....	31
3.2.2 Το powergui block.....	31
3.3 Παράδειγματα.....	31
3.3.1 DC πηγή και αντίσταση – αμπερόμετρο.....	32
3.3.2 AC πηγή και αντίσταση – RMS τιμή.....	33
3.3.3 AC πηγή και βολτόμετρο– βήμα και τύπος αλγορίθμων επίλυσης.....	35
3.3.4 Πολυπλέκτες (mux), αποπολυπλέκτες (demux) και πολύμετρο (multimeter).....	37
3.3.5 Διαφορετικές AC πηγές – Fourier ανάλυση.....	38
3.4 Βασικά σημεία.....	40
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 4: Ανορθωτές με διόδους.....</b>	<b>41</b>
4.1 Το block της διόδου στο simulink – snubber κύκλωμα.....	41
4.2 Το snubber κύκλωμα.....	41
4.3 Παράμετροι.....	42
4.4 Το measurement port (ακροδέκτης μετρήσεων).....	42
4.5 Αλγόριθμοι επίλυσης.....	42
4.6 Ανορθωτές.....	42
4.6.1 Ανόρθωση μισού κύματος (ημιανόρθωση), RMS και μέση τιμή.....	43
4.6.2 Ανόρθωση μισού κύματος (ημιανόρθωση), τάση στα άκρα της διόδου.....	44
4.6.3 Ανόρθωση πλήρους κύματος με γέφυρα.....	44
4.6.4 Ανόρθωση πλήρους κύματος με χρήση M/Σ.....	45
4.6.5 Ωμικό φορτίο με πηγή τάσης Ed.....	45

4.6.6 Ωμικό επαγωγικό φορτίο.....	46
4.6.7 Μεγάλη επαγωγή ( $\omega L \gg R$ ), άπειρο πηνίο.....	48
4.6.8 Επίλυση με χρήση ιδανικών συνθηκών.....	48
4.7 Βασικά σημεία.....	49
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 5: Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος (ενός παλμού).....</b>	<b>50</b>
5.1 Ελεγχόμενοι ανορθωτές (controlled rectifiers).....	50
5.2 Το θυρίστορ (thyristor) – Αρχή λειτουργίας.....	50
5.3 Το thyristor block στο simulink.....	50
5.4 Εισαγωγή παλμού με χρήση του pulse generator block.....	50
5.5 Απεικονίζοντας περισσότερα γραφήματα στο ίδιο scope.....	51
5.6 Δίνοντας ονόματα στα σήματα και προσαρμόζοντας τους άξονες στο scope.....	51
5.7 Μαθηματικές πράξεις.....	52
5.8 Μεταφορά τιμών και σημάτων στην MATLAB.....	52
5.9.1 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο.....	53
5.9.2 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο.....	55
5.9.3 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο και DC πηγή.....	57
5.9.4 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και DC πηγή.....	58
5.9.5 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης.....	58
5.10 Βασικά σημεία.....	60
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 6: Ελεγχόμενος ανορθωτής πλήρους κύματος (δύο παλμών).....</b>	<b>61</b>
6.1.1 Ωμικό φορτίο.....	61
6.1.2 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στο φορτίο και στα θυρίστορ.....	62
6.1.3 RMS και dc τιμές.....	63
6.2 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – ασυνεχής αγωγή.....	63
6.2.2 RMS και dc τιμές.....	65
6.2.3 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – συνεχής αγωγή.....	65
6.3 R-L-Ed φορτίο, FWD.....	67
6.4 Βασικά σημεία.....	67
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 7: Ελεγχόμενος ανορθωτής τεσσάρων παλμών.....</b>	<b>68</b>
7.1 Γενικά (ωμικό φορτίο).....	68
7.2 Τα Goto και From blocks.....	69
7.3 Κυματομορφές για ωμικό φορτίο.....	70
7.4 RMS και dc τιμές.....	70
7.5 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	70
7.5.1 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – ασυνεχής αγωγή.....	71
7.5.2 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – συνεχής αγωγή.....	72
7.6 Μετάβαση.....	72
7.7 Βασικά σημεία.....	74
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 8: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών.....</b>	<b>75</b>
8.1 Γενικά.....	75
8.2 Ελεγχόμενος ανορθωτής τριών παλμών.....	75
8.3 Συνεχή και ασυνεχή αγωγή.....	76
8.4 Μοντελοποίηση στο simulink.....	77
8.5 Υπολογισμός crest factor (συντελεστής πλάτους ή συντελεστής κορυφής).....	77
8.6 Υπολογισμός μέγιστης ανάστροφης τάσης (Peak Inverse Voltage ή PIV).....	78
8.7 Κυματομορφή τάσης στο φορτίο – ωμικό φορτίο.....	78
8.8 Μέση και RMS τιμή της τάσης στο φορτίο.....	80
8.9 Τάση στα άκρα των θυρίστορ.....	80
8.10 Το add block.....	81
8.11 Κυματομορφές συνολικά.....	82
8.12.1 Ωμικό επαγωγικό φορτίο – συνεχή αγωγή.....	83
8.12.2 Ωμικό επαγωγικό φορτίο – ασυνεχή αγωγή.....	84
8.13 Βασικά σημεία.....	86
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 9: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής έξι παλμών.....</b>	<b>87</b>
9.1 Γενικά (ωμικό φορτίο).....	87
9.2 Συνολική δημιουργία παλμών – Synchronized 6-Pulse Generator block.....	89
9.3 Μοντελοποίηση στο simulink – Αναλυτικά.....	91
9.4 Μοντελοποίηση στο simulink – To Universal Bridge block.....	91
9.5 Το Gain block.....	92
9.6 Δημιουργία Υποσυστημάτων (Subsystems).....	93

9.7.1 Ωμικό φορτίο - Τάση στο φορτίο.....	94
9.7.2 Ωμικό φορτίο - Ρεύματα και τάσεις στα άκρα των θυρίστορ.....	95
9.7.3 Ωμικό φορτίο - Ρεύματα στις φάσεις.....	96
9.8.1 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	96
9.8.2 Συνεχή-ασυνεχή αγωγή (ωμικό-επαγωγικό φορτίο).....	97
9.9.1 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – το Controlled Current Source block.....	98
9.9.2 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – Κυματομορφές.....	99
9.9.3 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – Μετάβαση.....	100
9.10 Βασικά σημεία.....	101
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 10: AC Μετατροπείς.....</b>	<b>103</b>
10.1 Γενικά.....	103
10.2 Υλοποίηση στο SIMULINK – Κυματομορφές (ωμικό φορτίο).....	103
10.3 Ωμικό επαγωγικό φορτίο.....	105
10.4.1 Τριφασικοί AC μετατροπείς – Γενικά.....	107
10.4.2 Τριφασικοί AC μετατροπείς – Φάσεις λειτουργίας.....	108
10.5 Το Transport Delay block.....	110
10.6.1 Κυματομορφές – Φάση 1.....	111
10.6.2 Κυματομορφές – Φάση 2.....	112
10.6.3 Κυματομορφές – Φάση 3.....	113
10.7 Βασικά σημεία.....	114
Παράρτημα: D. Pylarinos, I. Androulidakis, K. Siderakis, E. Drakakis, "A Matlab/Simulink Approach for a First Course in Power Electronics", 3rd Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications, Ioannina, Greece, May 8-9, 2015.....	115





## ΕΝΟΤΗΤΑ 1: Βασικές γνώσεις MATLAB-Κατασκευή, σχεδίαση και χειρισμός σημάτων, ημιτονοειδή σήματα και ενεργές τιμές

### 1.1 Πράξεις

Οι βασικοί μαθηματικοί τελεστές στην MATLAB είναι οι : \* + - / ^. Ακολουθείται η γνωστή σειρά των πράξεων ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί απεριόριστος αριθμός παρενθέσεων. Να σημειωθεί ότι το σύμβολο ^ χρησιμοποιείται για την ύψωση σε δύναμη (οπότε το  $3^2$  συμβολίζεται ως  $3^2$ ) και η εντολή sqrt δίνει την ρίζα (οπότε το  $\sqrt{2}$  θα δοθεί με το sqrt(2)).

#### Παράδειγμα:

```
>> 2^3/(1+3)
ans =
     2
```

### 1.2 Ονοματοδοσία μεταβλητών, η μεταβλητή ans

Πέρα από την προφανή χρήση των τελεστών, όπως φαίνεται παραπάνω, το αποτέλεσμα κάθε πράξης στην MATLAB αποθηκεύεται σε μια μεταβλητή με το όνομα **ans** (από το answer=απάντηση). Υπάρχει όμως και η δυνατότητα να καθορίσει ο χρήστης το όνομα της μεταβλητής:

#### Παράδειγμα:

```
>> x=2^3
x =
     8
```

Ως όνομα μεταβλητής μπορεί να δοθεί ένα μόνο γράμμα αλλά και περισσότεροι αλφαριθμητικοί χαρακτήρες (γράμματα και αριθμοί) αλλά και ορισμένα σύμβολα. Σύνθηες είναι να χρησιμοποιείται το σύμβολο '\_' αντί για το κενό.

#### Παράδειγμα:

```
>> metabliti_1=2^3
metabliti_1 =
     8
```

Αν ο χρήστης δεν επιθυμεί η MATLAB να του δείξει το αποτέλεσμα τότε αρκεί να προσθέσει ένα ελληνικό ερωτηματικό στο τέλος της εντολής. Για να δει την τιμή της μεταβλητής αργότερα αρκεί απλά να πληκτρολογήσει το όνομά της ή να χρησιμοποιήσει την εντολή **disp** (από το display) με όρισμα το όνομα της μεταβλητής (δλδ το disp(x) θα δώσει την τιμή της μεταβλητής x)

**Παράδειγμα:**

```
>> x1=2^3;
>> x2=2*x1;
>> x1

x1 =

    8

>> x2

x2 =

   16

>> disp(x2)
   16
```

**Παρατήρηση 1:** η όποια μεταβλητή αποθηκεύεται από την MATLAB για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Αν χρησιμοποιηθεί περισσότερες της μίας φορές, τότε συγκρατείται η τελευταία τιμή της. Η MATLAB θεωρεί κάτι τέτοιο ως φυσιολογικό και δεν θα εμφανίσει κάποιο μήνυμα σφάλματος ή σχετική προειδοποίηση.

**Παράδειγμα**

```
>> x1=5;
>> x1=6;
>> disp(x1)
    6
```

**Παρατήρηση 2:** επειδή η MATLAB είναι μια γλώσσα ανωτέρου επιπέδου, σχεδιασμένη ώστε να είναι φιλική προς το χρήστη η οποία παρέχει «έτοιμες» αρκετές εντολές/ρουτίνες, ο χρήστης πρέπει να είναι προσεκτικός ώστε να μην προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει κάποιες από αυτές ως όνομα μεταβλητών. Για παράδειγμα η εντολή `date` εμφανίζει την τρέχουσα ημερομηνία. Υπάρχει όμως η δυνατότητα να δοθεί η λέξη `date` σαν όνομα μεταβλητής. Τέτοιες πρακτικές καλό είναι να αποφεύγονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του κώδικα. Ο εύκολος τρόπος να εξετασθεί αν μια λέξη χρησιμοποιείται ήδη από την MATLAB, είναι να χρησιμοποιηθεί η εντολή `help` η οποία επιστρέφει την βασική περιγραφή της εντολής που την ακολουθεί.

**Παράδειγμα:**

```
>> help date
DATE Current date as date string.
S = DATE returns a string containing the date in dd-mmm-yyyy format.

See also now, clock, datenum.

Reference page in Help browser
doc date
```

Πιο αναλυτική περιγραφή οποιασδήποτε εντολής δίνεται με την χρήση της εντολής `doc` που ανοίγει την σχετική σελίδα στη βοήθεια της MATLAB.

### 1.3 Σήματα και πίνακες

Η MATLAB έχει πάρει το όνομά της από τις λέξεις MATrix LABoratory (Εργαστήριο Πινάκων). Πράγματι η ευκολία χρήσης πινάκων είναι από τα βασικά πλεονεκτήματά της. Βασικό μέρος της κατανόησης των βασικών κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος που θα εξετασθούν στα επόμενα εργαστήρια είναι η εξέταση διαφόρων κυματομορφών (π.χ. τάση εισόδου, εξόδου κλπ). Η οποιαδήποτε κυματομορφή στον ψηφιακό κόσμο προκύπτει στην ουσία από δύο διανύσματα τιμών που περιέχουν τις συντεταγμένες κάθε σημείου της κυματομορφής. Συνεπώς είναι χρήσιμο να δούμε ορισμένα βασικά σημεία που αφορούν την κατασκευή και τον χειρισμό πινάκων στην MATLAB. Να σημειωθεί ότι σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται και ο όρος *σήμα/σήματα* για διανύσματα/πίνακες αλλά και ότι ένα διάνυσμα είναι ουσιαστικά ένας μονοδιάστατος πίνακας και έτσι αυτοί οι όροι μπορεί να εναλλάσσονται σε αυτό ή σε άλλα συγγράμματα.

#### 1.3.1 Ορισμός πινάκων, ονοματοδοσία, πράξεις και ανάστροφος

Η MATLAB αντιμετωπίζει τους πίνακες με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που αντιμετωπίζει τις μεταβλητές όσον αφορά την ονομασία τους και τις βασικές μαθηματικές πράξεις.

Επιπλέον προστίθενται τα εξής:

1. τα περιεχόμενα ενός πίνακα δίνονται μέσα σε **αγκύλες**
2. το **κενό** χρησιμοποιείται για να δοθεί επόμενο στοιχείο στην ίδια γραμμή
3. το **ερωτηματικό** χρησιμοποιείται για να σηματοδοτηθεί η αλλαγή γραμμής
4. ο **τόνος** χρησιμοποιείται για να δώσει τον **ανάστροφο** ενός πίνακα

#### Παράδειγμα:

```
>> x1=[1 2]
```

```
x1 =
```

```
1 2
```

```
>> x2=[3; 4]
```

```
x2 =
```

```
3
```

```
4
```

```
>> x1'
```

```
ans =
```

```
1
```

```
2
```

Πράξεις μεταξύ πινάκων γίνονται με τους ίδιους τελεστές προϋποθέτοντας ότι είναι δυνατές. Αν όχι, η MATLAB επιστρέφει σχετικό μήνυμα σφάλματος

**Παράδειγμα:**

```
>> x1=[1 2];
>> x2=[3; 4];
>> x3=x1*x2

x3 =

    11

>> >> x4=x1'*x2
??? Error using ==> mtimes
Inner matrix dimensions must agree.
```

### 1.3.2 Πράξεις με χρήση τελείας

Εξαιρετικά σημαντική είναι η δυνατότητα που δίνει η MATLAB να γίνουν πράξεις για κάθε στοιχείο του πίνακα. Για να γίνει κάτι τέτοιο αρκεί να γραφεί μια τελεία πριν τον αντίστοιχο τελεστή. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι θέλουμε ένα νέο διάνυσμα που κάθε στοιχείο του να είναι το τετράγωνο των στοιχείων του διανύσματος  $x1$ . Αν όμως δώσουμε  $x1^2$  τότε η MATLAB θα προσπαθήσει να πολλαπλασιάσει έναν πίνακα διαστάσεων  $1 \times 2$  με τον εαυτό του (δλδ έναν πίνακα πάλι  $1 \times 2$ ) και προφανώς θα δώσει σφάλμα. Αντίθετα με την χρήση της τελείας η ύψωση γίνεται για κάθε στοιχείο του διανύσματος ξεχωριστά.

**Παράδειγμα:**

```
>> x1=[1 2];
>> x1^2
??? Error using ==> mpower
Matrix must be square.

>> x1.^2

ans =

    1    4
```

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον χειρισμό ψηφιακών σημάτων που αφορούν φυσικά μεγέθη μετρούμενα στον χρόνο. Για παράδειγμα αν υπάρχουν καταγραφές στιγμιαίων τιμών τάσης και ρεύματος, εύκολα έτσι μπορεί να υπολογιστεί η στιγμιαία ισχύς (το γινόμενο τάσης και ρεύματος κάθε χρονική στιγμή).

### 1.3.3 Δημιουργία σημάτων με χρήση του συμβόλου άνω και κάτω τελείας

Για να κατασκευαστούν απλά σήματα με πολλές τιμές, δίνεται η δυνατότητα χρήσης του συμβόλου άνω και κάτω τελείας `':'` με δύο τρόπους.

**Πρώτος τρόπος**

Η MATLAB δίνει την δυνατότητα μαζικής ανάθεσης τιμών σε σύνολο στοιχείων ενός σήματος. Η τιμή μπορεί να είναι σταθερή, να ανατίθεται από μαθηματική παράσταση κλπ

**Παράδειγμα:**

```
>> x(1:3)=1; x(4:6)=2;
>> disp(x)
    1    1    1    2    2    2
```

**Δεύτερος τρόπος**

Εκτός από το να ορίσει το σύνολο των σημείων, μπορεί να ορίσει και τις τιμές

**Παράδειγμα:**

```
>> pin1=1:6
pin1 =
    1    2    3    4    5    6
```

Κατασκευάζεται έτσι ένα διάνυσμα με 6 τιμές με αρχική τιμή την τιμή 1 και τελική τιμή την τιμή 6 και βήμα την μονάδα. Για να καθοριστεί η τιμή του βήματος αρκεί να εισαχθεί άλλο ένα πεδίο ανάμεσα στην αρχική και την τελική τιμή. Έτσι, η γενική λογική είναι:

$$\mathbf{ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ=ΑΡΧΙΚΗ ΤΙΜΗ:ΒΗΜΑ:ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ.}$$

Εφόσον δεν καθοριστεί η τιμή του βήματος, η MATLAB υποθέτει ότι το βήμα έχει την τιμή 1 (όπως στο παραπάνω παράδειγμα). Το βήμα όμως μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή (και αρνητική).

**Παράδειγμα:**

```
>> pin2=1:2:6;
>> disp(pin2)
    1    3    5

>> pin3=9:-1:7;
>> disp(pin3)
    9    8    7

>> pin4=0:0.01:0.05
>> disp(pin4)
    0    0.0100    0.0200    0.0300    0.0400    0.0500
```

**Παρατήρηση:** προφανώς και μπορεί να γίνει συνδυασμός των δύο τρόπων.

**1.3.4 Η εντολή whos**

Ειδικά σε περιπτώσεις διανυσμάτων που περιέχουν μεγάλο αριθμό στοιχείων είναι σημαντικό να έχουμε την πληροφορία του ακριβούς αριθμού των στοιχείων. Αν έχει

επιλεγεί στην εμφάνιση του GUI της MATLAB να δίνεται και το παράθυρο που εμφανίζει της μεταβλητής του χώρου εργασίας (workspace) τότε εκεί μπορούν να εντοπιστούν οι συγκεκριμένες πληροφορίες. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει διάφορες αδυναμίες και το ορθότερο είναι να χρησιμοποιείται η εντολή **whos**. Η εντολή αυτή εμφανίζει πληροφορίες είτε για όλες τις μεταβλητές που υπάρχουν στην μνήμη (αν δοθεί απλά whos) ή για συγκεκριμένες μεταβλητές που θα γράφονται μετά την whos. Η σύνταξη της σε αυτή την περίπτωση θα είναι whos metabliti1 metabliti2 κ.ο.κ. Η σημασία της πληροφορίας αυτής θα γίνει πιο κατανοητή στην συνέχεια.

#### Παράδειγμα:

```
>> t=1/5000:1/5000:1;
>> whos t
Name      Size      Bytes Class  Attributes
t         1x5000    40000 double
```

### 1.3.5 Μιγαδικοί αριθμοί και διανύσματα (complex)

Η MATLAB Μπορεί να χειριστεί και μιγαδικούς αριθμούς και διανύσματα. Για το φανταστικό μέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το *i* είτε το *j*. Σε περίπτωση μιγαδικού αριθμού ή διανύσματος, στα αποτελέσματα της εντολής whos θα συμπεριληφθεί και ο χαρακτηρισμός **complex**.

#### Παράδειγμα:

```
>> x=3+5j
>> disp(x)
3.0000 + 5.0000i

>> x=3+5j
>> disp(x)
3.0000 + 5.0000i

>> y= [x 2-j]
>> disp(y)
3.0000 + 5.0000i 2.0000 - 1.0000i

>> whos x y
Name      Size      Bytes Class  Attributes
x         1x1        16 double complex
y         1x2        32 double complex
```

### 1.3.6 Διανύσματα μεγάλου αριθμού στοιχείων (πραγματικά σήματα), χρόνος και συχνότητα δειγματοληψίας Ts

Η χρησιμότητα της γραφής που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.2.3 γίνεται πιο προφανής όταν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας σημάτων (διανυσμάτων) με μεγάλο αριθμό στοιχείων. Ας υποθεθεί ότι θέλουμε να εξομοιώσουμε/σχεδιάσουμε την τιμή ενός στοιχείου συναρτήσει του χρόνου π.χ. την στιγμιαία τιμή μιας τάσης η οποία έχει συχνότητα 50Hz. Αυτό σημαίνει ότι έχει 50 περιόδους σε ένα δευτερόλεπτο και

αν υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε μόλις 100 σημεία για να σχεδιάσουμε μία περίοδο (αριθμός που είναι πολύ μικρός), τότε σημαίνει ότι χρειαζόμαστε 5000 σημεία για να σχεδιάσουμε την τάση για ένα δευτερόλεπτο. Το διάνυσμα που περιέχει τις διαφορετικές τιμές του χρόνου για αυτό το διάστημα μπορεί εύκολα να κατασκευασθεί ως εξής:

```
>> t=1/5000:1/5000:1;
```

**Παρατήρηση 1:** Ο προσεκτικός αναγνώστης θα παρατήρησε ότι το διάνυσμα του χρόνου  $t$  έχει σαν αρχική τιμή την  $1/5000$  και όχι την  $0$ . Αυτό συμβαίνει γιατί ως τελική τιμή έχει επιλεγεί το  $1$ . Αν ο χρόνος ορίζονταν ως  $t=0:1/5000:1$ ; τότε τα στοιχεία του διανύσματος θα ήταν  $5001$  και όχι  $5000$ . Αυτό συμβαίνει γιατί τότε θα είχαν ληφθεί υπόψη  $50$  περιόδους +  $1$  σημείο. Το ορθό είναι είτε  $t=1/5000:1/5000:1$ ; είτε  $t=0:1/5000:1-1/5000$ ;

**Παρατήρηση 2:** Αν ακολουθηθεί η αντίστροφη λογική και υποθεθεί ότι υπάρχει ένα καταγραφικό σύστημα (DAQ) που καταγράφει με ένα συγκεκριμένο ρυθμό μία μέτρηση (π.χ. το ρεύμα). Ο αριθμός των σημείων που θα καταγραφούν σε ένα δευτερόλεπτο δίνει τον **ρυθμό δειγματοληψίας** και συμβολίζεται συνήθως με  $F_s$  ενώ ο χρόνος ανάμεσα σε δύο καταγραφές καλείται **χρόνος δειγματοληψίας** και συμβολίζεται συνήθως με  $T_s$ , ισχύει δε ότι  $F_s=1/T_s$ . Η σημασία των παραπάνω εννοιών θα γίνει πιο κατανοητή σε επόμενο εργαστήριο όταν και θα παρουσιασθεί η ανάλυση Fourier. Για το παράδειγμα που εξετάζουμε ισχύει  $F_s=5000$  και  $T_s=1/5000$ . Αν θέλουμε να εξομοιώσουμε αυτή την λειτουργία για ένα δευτερόλεπτο έχουμε δύο επιλογές, ουσιαστικά επιλέγοντας αν το σημείο που αντιστοιχεί στο  $0$ ,  $T$ ,  $2T$  κ.ο.κ. θα υποθεθεί ότι είναι το πρώτο σημείο μιας περιόδου ή το τελευταίο της προηγούμενης.

Συγκεντρώνοντας τις παραπάνω πληροφορίες σε μορφή κώδικα, έχουμε τα παρακάτω (όπου τα διανύσματα  $t_1$  και  $t_2$  δίνουν τις δύο πιθανές προσεγγίσεις):

#### Παράδειγμα:

```
>> Fs=5000;
>> Ts=1/Fs;
>> t1=Ts:Ts:1;
>> whos t1
Name      Size      Bytes Class  Attributes
t         1x5000    40000 double

>> t2=0:Ts:1-Ts;
>> whos t2
Name      Size      Bytes Class  Attributes
t2        1x5000    40000 double
```

### 1.3.7 Επιλογή και χρήση στοιχείων διανύσματος – η εντολή length

Για να δοθεί η τιμή ενός στοιχείου του διανύσματος αρκεί να δοθεί η θέση του μέσα σαν όρισμα της μεταβλητής που συμβολίζει το διάνυσμα. Για παράδειγμα το `pin2(2)` θα δώσει το δεύτερο στοιχείο του διανύσματος με το όνομα `pin2`.



**Παράδειγμα:**

```
>> pin2=1:2:6;
>> disp(pin2)
    1    3    5

>> pin2(2)

ans =

    3
```

Και φυσικά η τιμή αυτή μπορεί να ανατεθεί σε άλλη μεταβλητή, να χρησιμοποιηθεί σε μαθηματικές παραστάσεις κ.ο.κ.

**Παρατήρηση 1:** Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι και η δυνατότητα επιλογής όλων των στοιχείων μιας γραμμής ή μιας στήλης. Αν χρειάζεται να ανατεθεί σε μια μεταβλητή ο αριθμός των στοιχείων ενός διανύσματος χρησιμοποιείται η εντολή **length**.

**Παράδειγμα:**

```
>> x=[1 2;3 4]

x =

    1    2
    3    4

>> x2=x(:,2)

x2 =

    2
    4

>> x2=x(1,:)

x2 =

    1    2

>> length(x2)

ans =

    2
```

**1.3.8 Σχεδιασμός (γραφικές παραστάσεις) - η εντολή plot**

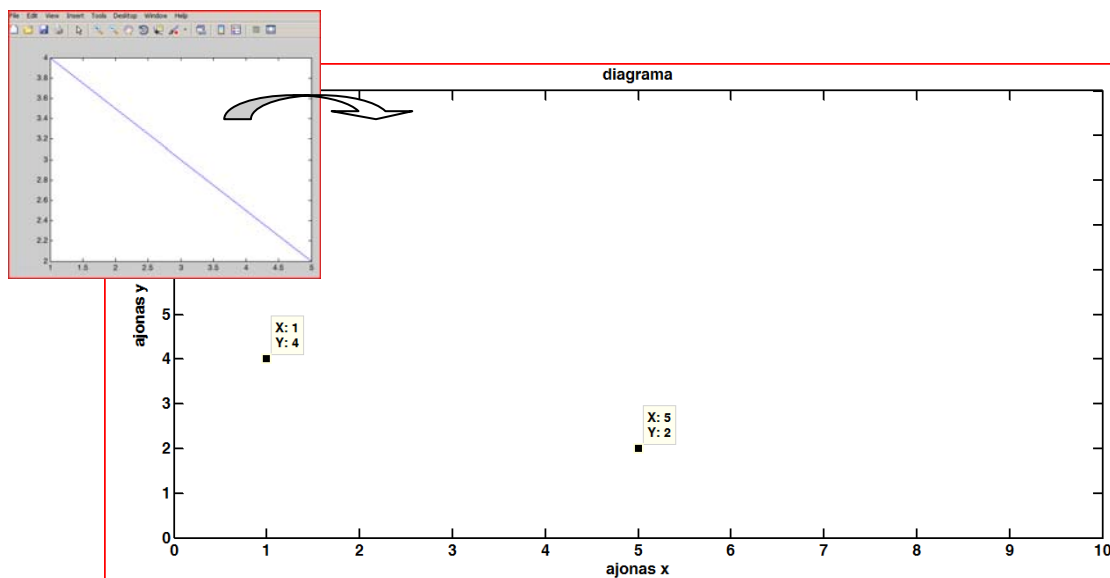
Για να κατασκευασθεί η γραφική παράσταση (κυματομορφή) ενός σήματος (διανύσματος) αρκεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή **plot**. Άρα π.χ. η εντολή `plot(pin4)` θα δώσει την γραφική παράσταση του διανύσματος με το όνομα `pin4`. Για κάθε

σημείο θα χρησιμοποιηθούν ως συντεταγμένες η θέση (οριζόντιος άξονας) και η τιμή (κάθετος άξονας) κάθε στοιχείου. Δίνοντας όμως δύο διανύσματα σαν ορίσματα στην εντολή plot μπορούν να καθοριστούν οι συντεταγμένες κάθε σημείου. Ουσιαστικά το `plot(x,y)` σχεδιάζει γραφική παράσταση στην οποία το διάνυσμα  $x$  έχει τις τιμές του οριζόντιου άξονα και το διάνυσμα  $y$  τις τιμές του κάθετου άξονα. Προφανώς τα δύο διανύσματα πρέπει να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Σε αντίθετη περίπτωση η MATLAB θα εμφανίσει μήνυμα σφάλματος. Η εντολή `plot` δέχεται πλήθος άλλων ορισμάτων ενώ άλλες συνοδευτικές εντολές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί η επιθυμητή εμφάνιση του γραφήματος (`>> help plot`). Αν δεν χρησιμοποιηθούν επιπλέον ορίσματα τότε η `plot` θα εμφανίσει μια γραμμή μπλε χρώματος συνδέοντας όλα τα σημεία

### Παράδειγμα:

```
>> x=[1 5];y=[4 2];
>> plot(x,y)
```

Ο πλέον εύκολος τρόπος για να αλλάξει η εμφάνιση του γραφήματος είναι να επιλεγεί το εικονίδιο του βέλους και στην συνέχεια να γίνει διπλό κλικ σε όποιο στοιχείο επιθυμείται να αλλάξει η εμφάνισή του (άξονες, γράφημα κλπ). Χρήσιμη είναι και η επιλογή `Export Setup` (στο `File`) η οποία επιτρέπει συνολικές αλλαγές αλλά και εξαγωγή σε διαφορετικούς τύπους αρχείων με συγκεκριμένες προδιαγραφές. Χρησιμοποιώντας και τις υπόλοιπες δυνατότητες ο χρήστης μπορεί να κατασκευάσει ένα διάγραμμα όπως ακριβώς το επιθυμεί. Η λεπτομερής παρουσίαση των δυνατοτήτων της εντολής `plot` δεν συμπεριλαμβάνεται στους σκοπούς αυτού του εγχειριδίου αλλά οι εκπαιδευόμενοι μπορούν να συμβουλευθούν το `help` της MATLAB καθώς και πλήθος άλλων εγχειριδίων πολλά εκ των οποίων διατίθενται δωρεάν στο δίκτυο και στην ελληνική γλώσσα.

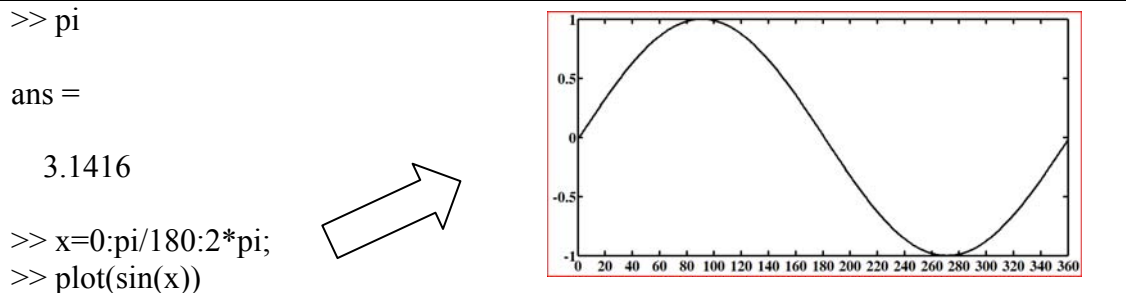


**Παρατήρηση:** αν επιχειρηθεί να σχεδιασθεί ένα μιγαδικό διάνυσμα τότε υπενθυμίζεται ότι κάθε μιγαδικός  $(a+bj)$  αριθμός αντιστοιχεί στο σημείο  $(a,b)$

### 1.3.9 Σχεδιασμός ημιτόνου, ο αριθμός $\pi$

Είναι προφανές ότι στην μελέτη μεγεθών και κυκλωμάτων εναλλασσόμενης τάσης ιδιαίτερα θα συναντώνται συχνά ημιτονοειδή σήματα. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε την γραφική παράσταση της συνάρτησης  $\eta\mu(x)$  ( $\sin(x)$ ) για μία περίοδο. Η MATLAB έχει ενσωματωμένες τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις, τα ορίσματα των οποίων δέχεται όμως σε **ακτίνια**. Ο αριθμός  $\pi$  συμβολίζεται στην MATLAB ως **pi**.

#### Παράδειγμα:



**Παρατήρηση 1:** στο παραπάνω παράδειγμα ένα απλό **whos x** θα δείξει ότι το διάνυσμα  $x$  περιέχει 361 στοιχεία (και όχι 360). Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί; Πως θα διορθώνατε τον κώδικα;

**Παρατήρηση 2:** η MATLAB δίνει την δυνατότητα εύκολης μετατροπής μοιρών σε ακτίνια με την εντολή **deg2rad**. Έτσι αντίστοιχο αποτέλεσμα θα έδινε ο κώδικας:

```
>> x=0:360;
>> plot(sin(deg2rad(x)))
```

### 1.4.1 Σήματα σε ΜΗΚ

Προσεγγίζοντας περισσότερο την ηλεκτρική πλευρά ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα σήμα (π.χ. μια τάση) σε μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση (ΜΗΚ).

Γενικά ένα τέτοιο σήμα δίνεται από τον τύπο:

$$A = A_0 \sin \varphi = A_0 \sin(\omega t) = A_0 \sin(2\pi f \cdot t) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

όπου  $A_0$  το πλάτος,  $f$  η συχνότητα και  $T$  η περίοδος.

Η τάση του δικτύου στην Ελλάδα αντίστοιχα δίνεται από τον τύπο:

$$v(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$$

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε μία περίοδο αυτού του σήματος. Εφόσον η συχνότητα είναι 50 Hz, η μία περίοδος καλύπτει χρονικό διάστημα  $1/50$  ή 0.02 sec.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας θα καθορίσει και την ακρίβεια στην απεικόνιση. Ας υποτεθεί εδώ ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 10kHz και άρα ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 0.0001.

#### Παράδειγμα:

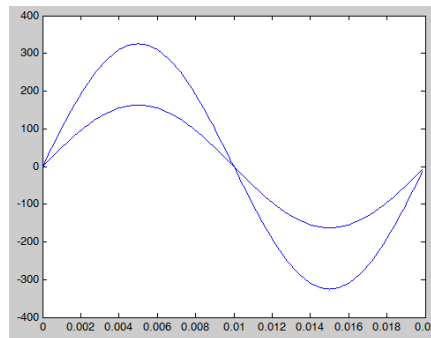
```
>> Ts=0.0001;
>> t=0:Ts:0.02-Ts;
>> v=230*sqrt(2)*sin(100*pi*t);
>> plot(t,v)
```

### 1.4.2 Σχεδιάζοντας τάση και ρεύμα σε αντίσταση (η εντολή hold)

Στην περίπτωση που χρειάζεται να κατασκευαστούν περισσότερες από μια συναρτήσεις που χρησιμοποιούν ίδιες μεταβλητές, συνήθως προτιμάται να δηλώνονται αυτές οι μεταβλητές στην αρχή του κώδικα ώστε να είναι εύκολη η επαναχρησιμοποίησή τους. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε την τάση και το ρεύμα πάνω σε μια αντίσταση  $2 \Omega$ .

#### Παράδειγμα:

```
>> Ts=0.0001;
>> t=0:Ts:0.02-Ts;
>> f=50;
>> R=2;
>> Vo=230*sqrt(2);
>> w=2*pi*f;
>> v=Vo*sin(w*t);
>> i=v/R;
>> plot(t,v);hold on;plot(t,i)
Current plot held
```



**Παρατήρηση 1:** στον παραπάνω κώδικα χρησιμοποιήθηκε μια σωστότερη προγραμματιστικά (και φιλικότερη προς τον χρήστη) προσέγγιση καθώς οι σταθερές δηλώθηκαν στην αρχή του κώδικα με ονόματα παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα (στον «φυσικό» κόσμο) κάνοντας έτσι ευκολότερη την κατανόηση και τον έλεγχο του κώδικα

**Παρατήρηση 2:** για να επιτραπεί ο σχεδιασμός δύο κυματομορφών στην ίδια γραφική χρησιμοποιήθηκε η εντολή **hold** (>> plot(t,v);hold on;plot(t,i)). Με το πρώτο plot ανοίχτηκε ένα γραφικό παράθυρο (Figure) ενώ με την εντολή hold on η MATLAB το «κράτησε» (εξ ου και το hold) και σχεδίασε την δεύτερη γραφική πάνω σε αυτό. Αν δεν είχε χρησιμοποιηθεί το hold on το δεύτερο plot θα «έσβηνε» το πρώτο με τον ίδιο τρόπο που η ανάθεση δεύτερης τιμής σε μια μεταβλητή «σβήνει» την πρώτη.

### 1.5 Υπολογίζοντας ενεργό και μέση τιμή σημάτων σε μη ΜΗΚ - κύκλωμα με αντίσταση και δίοδο-η εντολή trapz

Ο γνωστός τύπος που συνδέει την μέγιστη τιμή με την ενεργό τιμή ( $X_o = X_{rms} \cdot \sqrt{2}$ ) ενός μεγέθους ισχύει **ΜΟΝΟ** για μεγέθη σε ΜΗΚ. Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος έχει σαν αποτέλεσμα σήματα που δεν είναι σε ΜΗΚ.

Για να υπολογιστεί η ενεργός και η μέση τιμή αυτών των σημάτων πρέπει να χρησιμοποιηθεί οι γενικοί τύποι:

**Για την ενεργό τιμή:** αν έχουμε μία περίοδο του σήματος τότε αρκεί να υπολογιστεί η τετραγωνική ρίζα του εμβαδού που περικλείει η καμπύλη του τετραγώνου του σήματος διαιρεμένη με τον αριθμό των σημείων.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) \cdot dt}$$

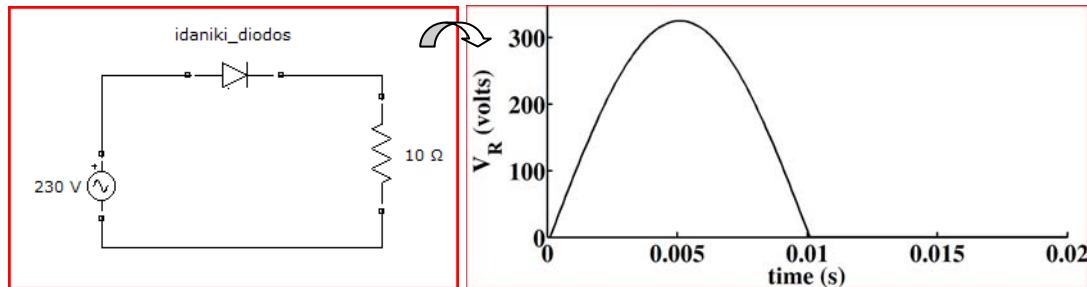
**Για την μέση τιμή:** αν έχουμε μια περίοδο του σήματος τότε αρκεί να υπολογιστεί το εμβαδό που περικλείει η καμπύλη και να διαιρεθεί με τον αριθμό των σημείων.

$$X_{av} = \bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt$$

Οι υπολογισμοί αυτοί είναι εύκολο να γίνουν στην MATLAB. Για τον υπολογισμό του εμβαδού που περικλείει μία καμπύλη η MATLAB παρέχει αρκετές διαφορετικές εντολές/δυνατότητες, η απλούστερη και πιο κατανοητή αφορά την προσέγγιση μέσω αθροίσματος τραπεζίων που γίνεται με την εντολή **trapz**. Αν έχουμε πάνω από μία περιόδους τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ολόκληρο το σήμα και αντί για T να χρησιμοποιηθεί ο συνολικός αριθμός σημείων. Προφανώς για να προκύψει σωστό αποτέλεσμα πρέπει το σήμα να αποτελείται από ακέραιο αριθμό περιόδων

**Παράδειγμα:**

Ας υποθέσουμε ότι μια AC πηγή τάσης (π.χ. 230 V) συνδέεται σε σειρά με μια ιδανική δίοδο και μια αντίσταση (π.χ. R=10 Ω). Ποια θα είναι η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος στην αντίσταση;



Το πρώτο βήμα είναι να κατασκευαστούν τα σήματα που μας ενδιαφέρουν. Στην παρούσα φάση δεν θα εξετασθεί το πώς μπορεί να επιλυθεί το κύκλωμα ώστε να προκύψουν τα ζητούμενα μεγέθη. Αντίθετα για λόγους απλότητας και εφόσον είναι γνωστή η λειτουργία του κυκλώματος, θα κατασκευαστούν απευθείας τα σήματα. Αρχικά ας υποθέσουμε ότι ο χρόνος δειγματοληψίας είναι \$T\_s=0.0001\$ και ότι η μελέτη περιορίζεται σε μία περίοδο (0.02 sec). Άρα η περίοδος θα αποτελείται από 200 σημεία εκ των οποίων τα πρώτα 100 θα ανήκουν στο ημίτονο ενώ τα επόμενα 100 θα έχουν μηδενική τιμή. Ο κώδικας παρατίθεται στην επόμενη σελίδα. Στον κώδικα παρατίθεται και η τιμή της RMS τάσης όπως προκύπτει από τα γνωστά από την θεωρία ( $\gg \text{disp}(\text{max}(v1)/2)$ ).

**Παρατήρηση 1:** από την θεωρία γνωρίζουμε ότι σε ιδανική ημιανόρθωση η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου είναι \$V\_{rms}=V\_o/2\$ ενώ η μέση τιμή της είναι ίση με \$V\_o/\pi\$.

**Παρατήρηση 2:** όσον αφορά το ρεύμα, αρκεί να ληφθεί υπόψη ότι αφού το φορτίο είναι ωμικό σε κάθε χρονική στιγμή ισχύει ο νόμος του Ohm.

**Παρατήρηση 3:** στον παραπάνω κώδικα χρησιμοποιείται ακρίβεια 4 δεκαδικών ψηφίων για αυτό και το 16.26346 έχει στρογγυλοποιηθεί από την MATLAB σε 16.2635. Αν επιθυμείται μεγαλύτερη ακρίβεια τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή **format** (π.χ. **format long**)

**Παρατήρηση 4:** στον παραπάνω κώδικα δεν έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές τάσης και ρεύματος. Καθώς η διαδικασία είναι παρόμοια ο υπολογισμός αφήνεται σαν άσκηση στον εκπαιδευόμενο

```
>> Ts=0.0001;
>> t=0:Ts:0.02-Ts;
>> f=50;
>> R=10;
>> w=2*pi*f;
>> v1(1:100)=230*sqrt(2)*sin(w*t(1:100));
>> v1(101:200)=0;
>> v1rms=sqrt(1/200*trapz(v1.^2))
v1rms =

    162.6346
>> disp(max(v1)/2)
    162.6346
> i1=v1/R;
>> i1rms=sqrt(1/200*trapz(i1.^2))

i1rms =

    16.2635
```

## 1.6 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- βασικές εντολές σχεδίασης όπως οι plot, subplot, hold και να είναι ικανός να σχεδιάσει γραφήματα
- χειρισμό μεταβλητών, διανυσμάτων και πινάκων
- την έννοια του ρυθμού δειγματοληψίας και του χρόνου δειγματοληψίας
- την κατασκευή σημάτων στο πεδίο του χρόνου (δηλαδή συναρτήσει της μεταβλητής t)
- τον υπολογισμό ενεργής και μέσης τιμής με χρήση της εντολής trapz

## ΕΝΟΤΗΤΑ 2: Αρμονικές και Ανάλυση Fourier

### 2.1 Αρμονικές

Με τον όρο αρμονικές εννοούνται ημιτονοειδείς συναρτήσεις που έχουν συχνότητα ακέραια πολλαπλάσια της κύριας ή βασικής ημιτονοειδούς συνάρτησης (η οποία καλείται **θεμελιώδης ή πρώτη αρμονική**). Για παράδειγμα αν η θεμελιώδης ή πρώτη αρμονική έχει συχνότητα 50Hz τότε η δεύτερη έχει 100Hz, η τρίτη έχει 150Hz κ.ο.κ. Αν χρησιμοποιήσουμε ένα γενικό συμβολισμό  $A_n$  για την  $n$ -οστή αρμονική τότε ισχύει:

$$A_1 = A_{1m} \sin(\omega_1 t)$$

$$A_2 = A_{2m} \sin(2 \cdot \omega_1 t) = A_{2m} \sin(\omega_2 t), \quad \text{προφανώς } \omega_2 = 2\omega_1 \Leftrightarrow f_2 = 2f_1$$

$$A_3 = A_{3m} \sin(3 \cdot \omega_1 t) = A_{3m} \sin(\omega_3 t), \quad \text{αντίστοιχα } \omega_3 = 3\omega_1 \Leftrightarrow f_3 = 3f_1$$

...

$$A_\kappa = A_{\kappa m} \sin(\kappa \cdot \omega_1 t) = A_{\kappa m} \sin(\omega_\kappa t), \quad \text{αντίστοιχα } \omega_\kappa = \kappa\omega_1 \Leftrightarrow f_\kappa = \kappa f_1$$

### 2.2 Ανάλυση Fourier

Η βασική ιδέα της ανάλυσης Fourier είναι ότι κάθε περιοδικό σήμα που τηρεί ορισμένες γενικές προϋποθέσεις μπορεί να παρασταθεί σαν άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων με πολλαπλάσιες συχνότητες (δλδ σαν άθροισμα αρμονικών). Δεν είναι στους σκοπούς της ενότητας να γίνει εκτενής παρουσίαση της σχετικής θεωρίας (Σειρών Fourier, Μετασχηματισμών Διακριτού και Συνεχούς κλπ). Ενδεικτικά, αν  $x(t)$  μια συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου, ορίζεται η αντίστοιχη συνάρτηση  $x(\omega)$  στο πεδίο της συχνότητας ως:

$$x(\omega) = \bar{x} + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cdot \cos(h \cdot \omega t) + b_h \cdot \sin(h \cdot \omega t)\}, \quad b_h = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} x(t) \cdot \sin(h \cdot \omega t) \cdot d(\omega t),$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} x(t) \cdot \cos(h \cdot \omega t) \cdot d(\omega t), \quad h = 1, 2, \dots, \infty$$

Αυτό που περιγράφει ο παραπάνω μαθηματικός ορισμός είναι ότι (σχεδόν) κάθε περιοδική συνάρτηση μπορεί να δοθεί ως το άθροισμα μίας σταθερής τιμής (η οποία είναι η μέση τιμή της συνάρτησης και καλείται και DC συνιστώσα) και ενός αριθμού (πιθανόν άπειρου) αρμονικών.

**Παρατήρηση 1:** Το συγκεκριμένο θεώρημα έχει ιδιαίτερη σημασία στις ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές εφαρμογές οι οποίες κατά κανόνα εμφανίζουν περιοδικότητα.

**Παρατήρηση 2:** χρησιμοποιώντας την θεωρία Fourier **μετασχηματίζουμε** μια συνάρτηση από το πεδίο του χρόνου (π.χ.  $f(t)$ ) στο πεδίο της συχνότητας (π.χ.  $F(\omega)$ ) (εξ ου και η διαδικασία ονομάζεται και **μετασχηματισμός Fourier**). Η αντίστροφη διαδρομή εξυπηρετείται μέσω του **αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier**. Για τον

ορθό μετασχηματισμό Fourier ένας ορισμός είναι: 
$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i \cdot f \cdot t} dt$$

**Παρατήρηση 3:** Η ακριβής υλοποίηση του μετασχηματισμού μπορεί να είναι υπερβολικά απαιτητική σε υπολογισμούς. Σε πραγματικά σήματα, η επεξεργασία σε ΗΥ αφορά προφανώς ψηφιακά σήματα (ή αλλιώς σήματα **διακριτού χρόνου**) και για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier (ο οποίος καλείται **Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier** σε αυτή την περίπτωση) χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα ταχύτεροι επαναληπτικοί αλγόριθμοι. Οι αλγόριθμοί αυτοί δίνουν τον **Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier** (fast Fourier transform ή fft)

**Παρατήρηση 4:** Στην πράξη όταν εξετάζουμε ένα πραγματικό διακριτό σήμα (π.χ. έχουμε μια σειρά μετρήσεων ή μια κυματομορφή) ακόμα και αν δεν γνωρίζουμε αν υπάρχει περιοδικότητα, πάλι μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας (δλδ στον Fourier μετασχηματισμό του), θεωρώντας το σύνολο του σήματος σαν μία περίοδο.

**Παρατήρηση 5:** Στα ηλεκτρονικά ισχύος έχουμε προφανώς περιοδικά σήματα αλλά όχι καθαρά ημίτονα και ως εκ τούτου η χρησιμότητα της ανάλυσης Fourier είναι προφανής.

**Παρατήρηση 6:** Αν το ζητούμενο ήταν να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος (ή αλλιώς η συνάρτηση στο πεδίο της συχνότητας) τότε αυτό που ουσιαστικά απαιτείται είναι να υπολογιστεί μια σειρά συντελεστών

**Παρατήρηση 7:** Για τον υπολογισμό αυτών των συντελεστών η MATLAB χρησιμοποιεί την εντολή fft. Παρόλα αυτά η διαδικασία είναι ελαφρώς πιο πολύπλοκη και θα παρουσιασθεί λεπτομερώς σε αυτή την ενότητα.

**Παρατήρηση 8:** Για ορισμένες ενδιαφέροντες οπτικοποιήσεις στρεφόμενων διανυσμάτων παρουσία αρμονικών και των κυματομορφών που προκύπτουν, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο λήμμα της wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier\\_series](http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_series)

### 2.3.1 Ανάλυση Fourier στη MATLAB – Η εντολή fft – Φάσματα

Η MATLAB παρέχει την συνάρτηση **fft** για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier. Ο αλγόριθμος που υλοποιεί η συγκεκριμένη συνάρτηση περιγράφεται λεπτομερώς στο help της MATLAB.

**Παρατήρηση 1:** σε περίπτωση που εξετάζουμε ένα πραγματικό σήμα, τότε πέρα από τις τιμές, απαιτείται και η γνώση του **ρυθμού δειγματοληψίας** για να εφαρμοστεί σωστά ο αλγόριθμος.

Επειδή η διαδικασία είναι ελαφρώς πολύπλοκη θα παρουσιαστεί κατά βήματα, από την δημιουργία ενός σήματος μέχρι τον τελικό υπολογισμό του συχνοτικού (ή αρμονικού) περιεχόμενου του (δλδ τον Fourier μετασχηματισμό του)

Αρχικά ας κατασκευάσουμε ένα σήμα, για παράδειγμα το:

$$y = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot \eta\mu(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + 100 \cdot \eta\mu(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t)$$

με διάρκεια 0.1 sec, με ρυθμό δειγματοληψίας 2 kHz

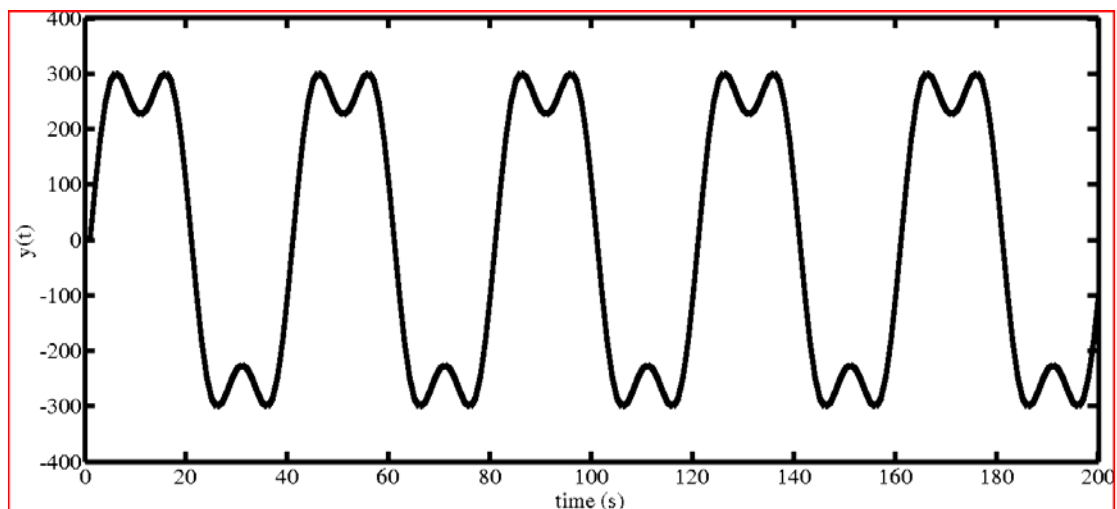


Το συγκεκριμένο σήμα αποτελείται από την θεμελιώδη με συχνότητα 50 Hz και πλάτος περίπου 325.2 και την τρίτη αρμονική με πλάτος 100 και συχνότητα 150 Hz.

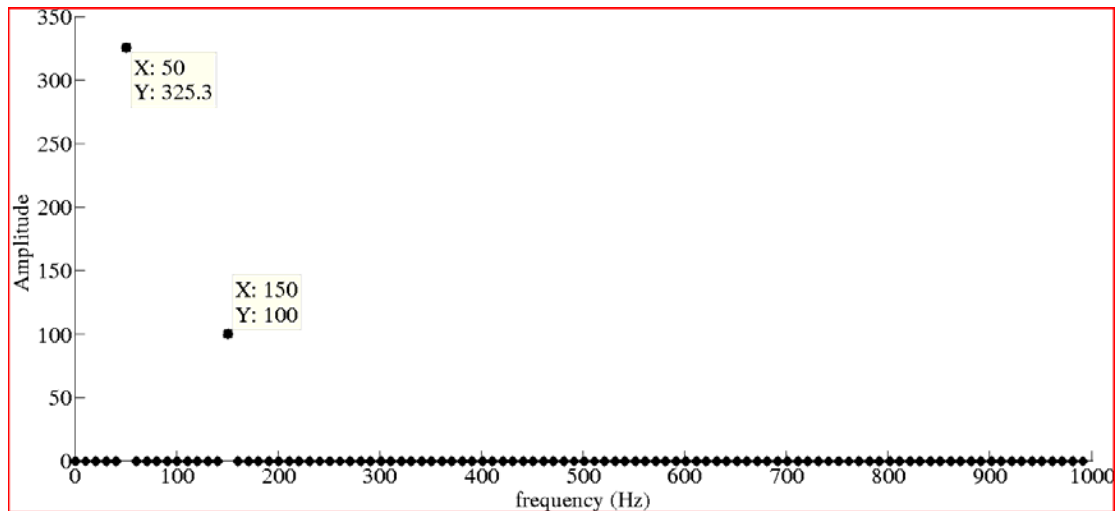
```
>> Fs=2000;
>> Ts=1/Fs;
>> tmax=0.1;
>> t=0:Ts:tmax-Ts;
>> y1=230*sqrt(2)*sin(2*pi*50*t);
>> y2=100*sin(2*pi*150*t);
>> y=y1+y2;
```

```
>> disp(230*sqrt(2))
325.2691
```

**Παρατήρηση 2:** Για να γίνει πιο κατανοητή η χρησιμότητα του μετασχηματισμού Fourier μπορούν να υποθεθούν δύο σενάρια ιδιαίτερα απλουστευμένα ώστε να είναι εύκολα κατανοητά. Στο πρώτο ας υποθέσουμε ότι μετράται ένα ηλεκτρικό σήμα (π.χ. μια τάση) που θα έπρεπε να είναι καθαρό ημίτονο 50Hz και λαμβάνεται η παρακάτω γραφική (η οποία είναι η γραφική του  $y(t)$ ). Η εξακρίβωση του συχνοτικού περιεχομένου μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες π.χ. προς τον εντοπισμό/αντιμετώπιση μιας διαταραχής που προκαλεί την παραμόρφωση (δλδ την τρίτη αρμονική). Σε ένα δεύτερο σενάριο, ας υποθέσουμε ότι ένα τέτοιο σήμα αφορά π.χ. τηλεπικοινωνίες και γνωρίζουμε ότι το σήμα στην πηγή του απαρτίζεται από συγκεκριμένες συχνότητες αλλά κατά την μετάδοσή του προστίθεται θόρυβος σε αυτό. Η γνώση του συχνοτικού περιεχομένου μπορεί να βοηθήσει ώστε να αναγνωρίσουμε την αρχική πληροφορία αλλά και να εφαρμόσουμε κατάλληλα φίλτρα για να απαλλαγούμε από τον θόρυβο.



**Παρατήρηση 3:** Το ζητούμενο λοιπόν είναι να καταλήξουμε σε ένα διάγραμμα πλάτους/συχνότητας (ή αλλιώς να δούμε το συχνοτικό **φάσμα πλάτους**) για τις διάφορες αρμονικές που περιέχονται στο σήμα σαν αυτό που παρατίθεται παρακάτω. Μέσα από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει ένα ημίτονο πλάτους 325.3 στα 50 Hz και ένα ημίτονο πλάτους 100 στα 150 Hz. Δηλαδή από την μετρούμενη κυματομορφή του πάνω σχήματος και την ανάλυση Fourier του κάτω σχήματος, μπορούμε να καταλήξουμε στον πλήρη μαθηματικό ορισμό του σήματος.



**Παρατήρηση 4:** Το σύνηθες είναι αντί σημείων, το φάσμα να σχεδιάζεται με συνεχή γραμμή. Η ένωση των σημείων από την MATLAB (ανάλογα και με την διαθέσιμη ακρίβεια του οριζόντιου άξονα) μπορεί να δώσει την εντύπωση ύπαρξης και γειτονικών τιμών και γι' αυτό αποφεύγεται στο παραπάνω διάγραμμα. Στην συνέχεια θα δοθούν παραδείγματα απεικόνισης και με συνεχή γραμμή ώστε να γίνει περισσότερο αντιληπτό. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι σε πραγματικά (δηλαδή μετρούμενα) σήματα και λαμβάνοντας υπόψη θορύβους και προσεγγίσεις, το διάγραμμα που προκύπτει συνήθως δεν είναι τόσο «καθαρό» όσο το παραπάνω

**Παρατήρηση 5:** Στο συγκεκριμένο παράδειγμα δεν υπάρχει διαφορά φάσης στις αρμονικές χάριν απλότητας. Θα μπορούσε όμως να υπάρχει οπότε θα έπρεπε να κατασκευασθεί και εξετασθεί και ένα δεύτερο αντίστοιχο σχήμα διαφοράς φάσης και συχνότητας (γνωστό και ως **φάσμα φάσης ή φάσμα γωνίας**)

Συνεχίζοντας, ας δούμε τι θα επιστρέψει η εντολή fft:

```
>> Y=fft(y);
>> whos Y
```

Name	Size	Bytes	Class	Attributes
Y	1x200	3200	double	complex

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο χαρακτηρισμός **complex** σηματοδοτεί μιγαδικό περιεχόμενο. Με άλλα λόγια η fft θα επιστρέψει ένα διάνυσμα 200 μιγαδικών στοιχείων (συντελεστών).

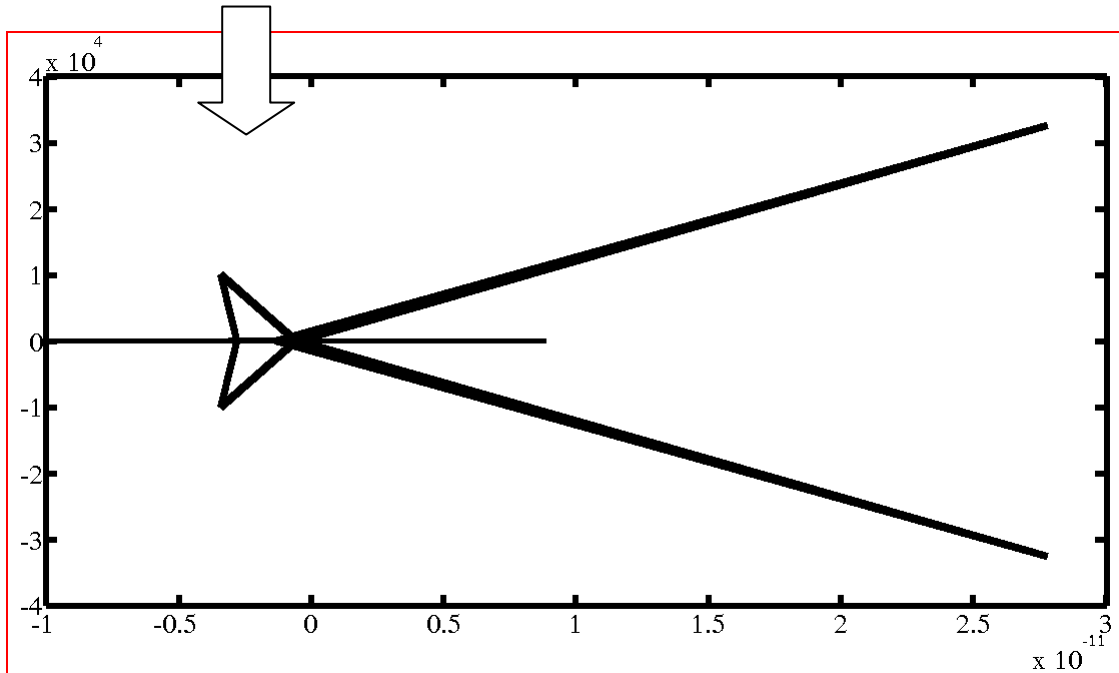
**Παρατήρηση 6:** Η fft επιστρέφει μιγαδικό διάνυσμα τόσων σημείων όσο και το αρχικό. Μπορεί να συνταχθεί με επιπλέον ορίσματα ώστε να επιστρέψει διαφορετικό αριθμό σημείων, αλλά αυτό ξεπερνάει τους σκοπούς της συγκεκριμένης ενότητας.

### 2.3.2 Ανάλυση Fourier στη MATLAB –Σχεδιάζοντας το φάσμα πλάτους

Αν επιχειρηθεί να σχεδιασθεί ένα μιγαδικό διάνυσμα με ένα plot (για το συγκεκριμένο παράδειγμα plot(Y)) θα προκύψει ένα μάλλον ακατανόητο διάγραμμα αφού κάθε μιγαδικό στοιχείο θα αντιστοιχηθεί σε ένα σημείο και όλα τα σημεία θα ενωθούν βάσει της default λειτουργίας της εντολής plot.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα έχουμε 200 σημεία και το διάγραμμα θα είναι:

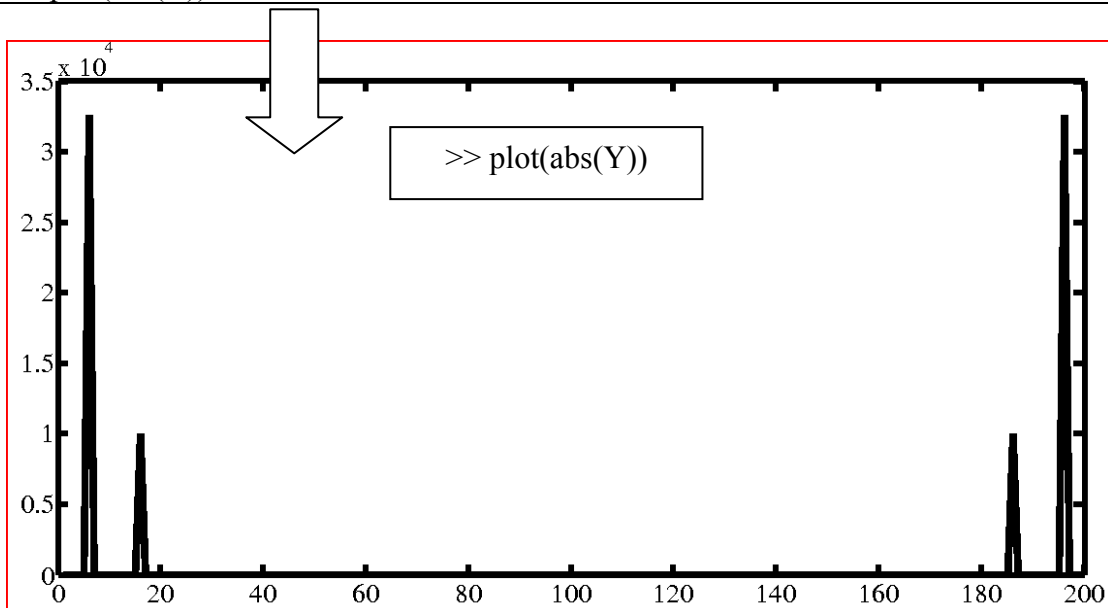
```
>> plot(Y)
```



Για να μετασχηματιστεί η πληροφορία σε πιο κατανοητή μορφή, πρέπει να σχεδιαστεί το μέτρο και η φάση κάθε μιγαδικού αριθμού. Για το μέτρο παρέχεται η εντολή **abs** ενώ για την φάση η εντολή **angle**. Στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχει διαφορά φάσης σε κάποια αρμονική οπότε θα περιοριστούμε στο διάγραμμα του μέτρου.

Άρα:

```
>> plot(abs(Y))
```



Στο παραπάνω διάγραμμα είναι σημαντικό να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις:

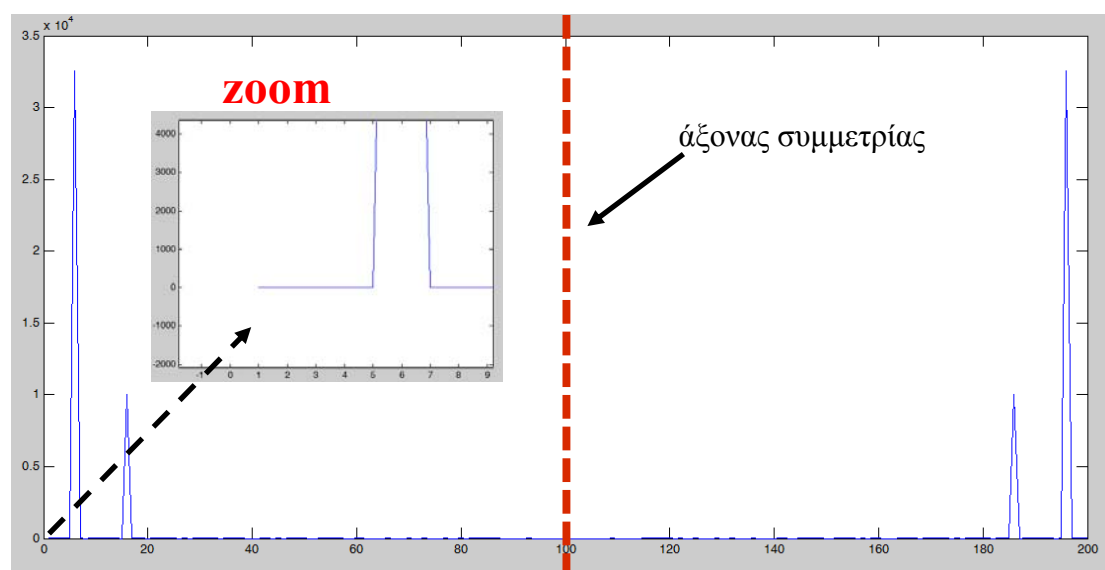
**Παρατήρηση 1:** Το διάγραμμα είναι συμμετρικό ως προς έναν κάθετο άξονα που διέρχεται από το μέσο του άξονα x. Ο διπλασιασμός αυτός σχετίζεται με την διαδικασία ψηφιοποίησης και εκφράζει έναν εκ των πραγμάτων περιορισμό, γνωστό ως **Θεώρημα Nyquist** (ή Nyquist-Shannon), το οποίο ουσιαστικά περιορίζει την δυνατότητα μελέτης στο πεδίο της συχνότητας στο μισό της συχνότητας δειγματοληψίας (αυτό το ποσό καλείται και **συχνότητα Nyquist** και προφανώς ισχύει  $F_N=0.5 \cdot F_S$ , όπου  $F_N$  η συχνότητα Nyquist και  $F_S$  η συχνότητα δειγματοληψίας).

**Παρατήρηση 2:** ο οριζόντιος άξονας αφορά μεν συχνότητες αλλά όχι σε Hz. Η μονάδα την οποία χρησιμοποιεί σχετίζεται επίσης με την συχνότητα δειγματοληψίας και είθισται να αναφέρεται ως **frequency bins** (δλδ απλά «διαστήματα συχνοτήτων»)

**Παρατήρηση 3:** Το διάγραμμα που προκύπτει δίνει μεν κάποια ποιοτικά στοιχεία (π.χ. μπορεί κάποιος να αντιληφθεί ότι υπάρχουν δύο αρμονικές στο σήμα και μάλιστα μπορεί να δει την σχέση που έχουν τα πλάτη τους ή να εξακριβώσει την σχέση που συνδέει τις συχνότητές τους σε σχέση με την συχνότητα Nyquist και άρα την συχνότητα δειγματοληψίας). Το χρήσιμο όμως θα ήταν οι πληροφορίες αυτές να ήταν άμεσα κατανοητές από το διάγραμμα και να μην χρειάζονταν περαιτέρω αναγωγές. Απαιτείται λοιπόν η αναγωγή των αξόνων σε σωστή κλίμακα (διαδικασία γνωστή και ως **scaling**)

**Παρατήρηση 4:** Αν και δεν είναι εμφανές με την πρώτη ματιά, περαιτέρω μεγέθυνση στην περιοχή του μηδενός δείχνει ότι το πρώτο σημείο του διαγράμματος δεν αντιστοιχεί στο μηδέν του οριζόντιου άξονα αλλά στο 1. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι το πρώτο στοιχείο του διάνυσματος αντιστοιχεί μεν στην τιμή 0 στον πραγματικό κόσμο αλλά το MATLAB σχεδιάζοντας θα το αντιστοιχήσει στην θέση του στο διάνυσμα (δηλαδή στην τιμή 1).

Για την οπτικοποίηση των παραπάνω παρατηρήσεων δίνεται το παρακάτω σχήμα όπου έχει διατηρηθεί η default εμφάνιση των γραφημάτων όπως δίνεται από την MATLAB.

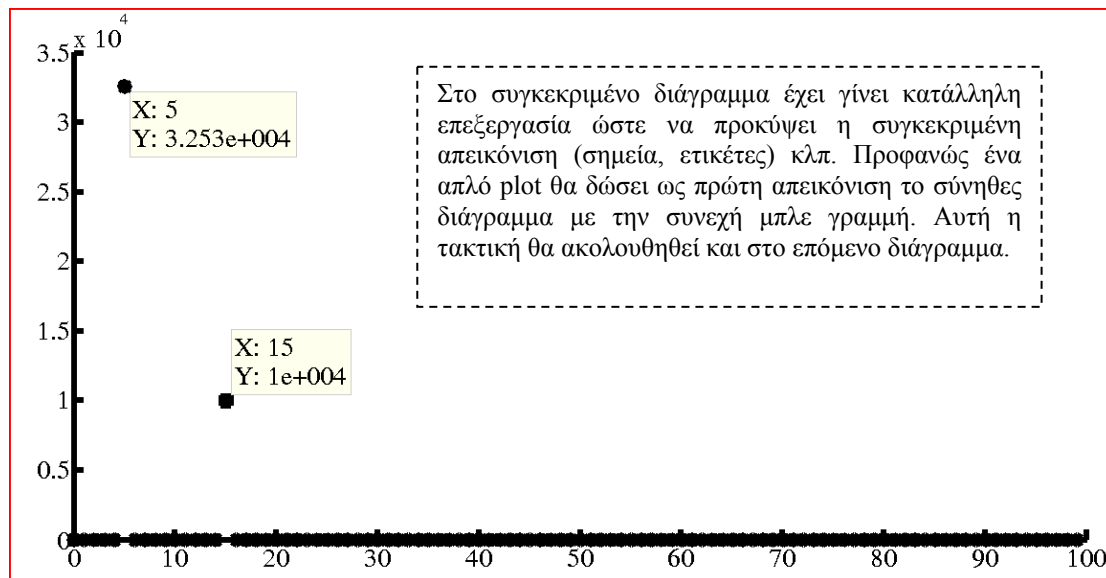


### 2.3.3 Ανάλυση Fourier στη MATLAB – Προσαρμογή (scaling) Φασμάτων

Ως πρώτη κίνηση, πρέπει το διάγραμμα να μετακινηθεί ένα σημείο προς τα αριστερά και να σχεδιασθεί το μέρος που αντιστοιχεί αριστερά από τον άξονα συμμετρίας. Για την μετακίνηση θα χρειαστεί να κατασκευαστεί ένα νέο διάνυσμα (εδώ θα ονομαστεί **fb** από το **frequency bin**) και να αντιστοιχηθεί το πρώτο στοιχείο του στην τιμή 0, το δεύτερο στην τιμή 1 κ.ο.κ.

#### Παράδειγμα:

```
>> fb(1:100)=0:99;
>> plot(fb,abs(Y(1:100)))
```



Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. στο σήμα περιέχονται δύο ημίτονα που το ένα έχει τριπλάσια συχνότητα από το άλλο (αφού το ένα αντιστοιχεί σε 5 frequency bins ενώ το άλλο σε 15 frequency bins)
2. το πλάτος του ενός είναι 3.25 φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του άλλου
3. εφόσον είναι γνωστή η συχνότητα δειγματοληψίας (2000Hz) και άρα και η συχνότητα Nyquist (1000 Hz), μπορεί αναλογικά να εξαχθεί ότι η συχνότητα που αντιστοιχεί στο frequency bin 5 είναι 50 Hz και αυτή που αντιστοιχεί στο frequency bin 15 είναι 150 Hz
4. ο πλάτος των αρμονικών εμφανίζεται μεγαλύτερο από το ορθό κατά ένα παράγοντα ίσο με τον αριθμό των σημείων που συμμετέχουν σε αυτό και άρα ίσο με το μισό του συνολικού αριθμού σημείων του αρχικού σήματος (στο συγκεκριμένο παράδειγμα 100)

Αν συμβολιστεί με  $f_{hz}$  η συχνότητα σε  $hz$  τότε ο απαιτούμενος κώδικας για να αντιστοιχηθούν τα frequency bins σε  $hz$  (γενικά) είναι:

```
>> fhz=fb*Fs/N
```

Εδώ να σημειωθεί ότι ο ενδιάμεσος ορισμός του διανύσματος fb έγινε για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας. Θα μπορούσε όμως να παραληφθεί και να οριστεί απευθείας το διάνυσμα συχνοτήτων σε Hz και ο κώδικας σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν:

```
>> N=length(y);
>> fhz=0:Fs/N:((N/2)-1)*(Fs/N);
>> plot(fhz, abs(Y(1:N/2)/(N/2)))
```

**Παρατήρηση 1:** με τον παραπάνω κώδικα γίνεται η μετακίνηση του γραφήματος ένα σημείο αριστερά και η αντιστοίχιση του οριζόντιου άξονα σε Hz

**Παρατήρηση 2:** παράλληλα διαιρώντας με N/2 στο εσωτερικό της plot γίνεται και η απαραίτητη προσαρμογή στον κάθετο άξονα.

Τα παραπάνω βήματα ακολουθήθηκαν ώστε να γίνει κατανοητός ο συνολικός κώδικας που απαιτείται για την ορθή εύρεση του μετασχηματισμού Fourier ενός σήματος στην MATLAB. Ο συγκεντρωμένος κώδικας ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο.

### 2.3.4 Συγκεντρωμένος κώδικας για σχεδιασμό φάσματος πλάτους

Αν συγκεντρωθούν τα παραπάνω βήματα χωρίς να αναλυθούν τα ενδιάμεσα τότε ο συνολικός κώδικας που δίνει το συχνοτικό διάγραμμα πλάτους μίας γνωστής συνάρτησης y, με γνωστό ρυθμό δειγματοληψίας Fs είναι:

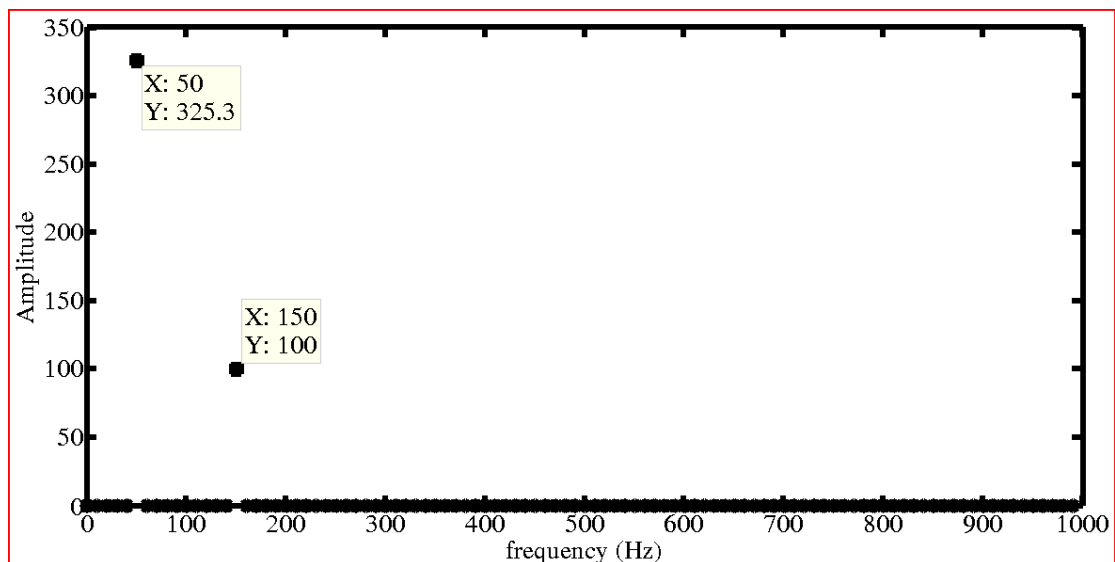
```
>> N=length(y);
>> Y=fft(y)/(N/2);
>> fhz=0:Fs/N:((N/2)-1)*(Fs/N);
>> plot(fhz, abs(Y(1:N/2)))
```

Συγκεντρώνοντας ολόκληρο των κώδικα για το προηγούμενο παράδειγμα έχουμε:

#### Παράδειγμα:

Να γίνει ανάλυση Fourier του σήματος  
 $y=230*\sqrt{2}*\sin(2\pi\cdot 50\cdot t)+100\cdot\sin(2\pi\cdot 150\cdot t)$

```
>> Fs=2000;
>> Ts=1/Fs;
>> tmax=0.1;
>> t=0:Ts:tmax-Ts;
>> y1=230*sqrt(2)*sin(2*pi*50*t);
>> y2=100*sin(2*pi*150*t);
>> y=y1+y2;
>> N=length(y);
>> Y=fft(y)/(N/2);
>> fhz=0:Fs/N:((N/2)-1)*(Fs/N);
>> plot(fhz, abs(Y(1:N/2)))
```



**Παρατήρηση 1:** στους παραπάνω κώδικες η διαίρεση με το μισό του συνόλου των στοιχείων ( $N/2$ ) που είναι απαραίτητη για την προσαρμογή του κάθετου άξονα έγινε στην γραμμή που περιέχει την `fft` και όχι στο `plot`. Το αποτέλεσμα είναι προφανώς το ίδιο, αλλά ακολουθήθηκε (και προτείνεται) αυτή η προσέγγιση καθώς δίνει περισσότερο ευανάγνωστο κώδικα

**Παρατήρηση 2:** στην γενική περίπτωση (π.χ. κυματομορφή με άγνωστη γραφική παράσταση) θα έπρεπε να εργαστούμε ανάλογα ώστε να έχουμε και το συχνοτικό διάγραμμα φάσεων

### 2.3.5 Υπολογισμός στοιχείων

Πρέπει να σημειωθεί ότι η προσαρμογή των αξόνων (*scaling*) δεν σημαίνει ότι έχει προσαρμοστεί το διάνυσμα αυτό καθαυτό. Για παράδειγμα αν ζητείται να βρεθεί η τιμή (σε Hz) κάποιας αρμονικής τότε πρέπει να αναζητηθεί η ανάλογη τιμή στο προσαρμοσμένο διάνυσμα (εδώ στο `fhz` δηλαδή).

#### Παράδειγμα:

Για το παραπάνω διάγραμμα να γραφεί κώδικας που να επιστρέφει την τιμή της αρμονικής με το μεγαλύτερο πλάτος

```
>> [y1,x1]=max(abs(Y(1:N/2)))
>> disp(y1)
325.2691
>> disp(x1)
6
>> fhz(x1)
ans =
50
```

**Παρατήρηση 1:** εδώ ακριβώς επειδή η διαίρεση με  $N/2$  έχει γίνει νωρίτερα, κατά την κλήση της fft (και όχι στο plot), δίνεται σωστή τιμή σε ότι αφορά τον κάθετο άξονα (δλδ το πλάτος). Η τιμή του οριζόντιου άξονα που επιστρέφεται όμως αφορά frequency bins και όχι Hz. Για να δοθεί η τιμή σε Hz λοιπόν πρέπει να δοθεί η αντίστοιχη τιμή του προσαρμοσμένου διανύσματος (fhz)

## 2.4 Αρμονικές και ενεργός τιμή

Μέρος των εφαρμογών των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η μελέτη των δημιουργούμενων αρμονικών και της παραμόρφωσης που προκαλούν. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα ο τύπος ( $X_o = X_{rms} \cdot \sqrt{2}$ ) που συνδέει την μέγιστη τιμή με την ενεργό τιμή ισχύει **MONO** για μεγέθη σε ΜΗΚ, δηλαδή για «καθαρά ημίτονα».

Αντίθετα όταν υπάρχουν αρμονικές ισχύει ότι η ενεργός τιμή του μεγέθους προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων όλων των αρμονικών. Για παράδειγμα, για το ρεύμα παρουσία αρμονικών ισχύει:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{hrms}^2}$$

(εδώ εννοείται συμμετρικό AC ρεύμα)

### Παράδειγμα:

Ας υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε ότι πέρα από την θεμελιώδη αρμονική του ρεύματος (η οποία έχει πλάτος 10 A) παρατηρείται και μία τρίτη αρμονική με μικρότερο πλάτος (π.χ. 15% του πλάτους της θεμελιώδους). Για να κατασκευαστούν τα σήματα αυτά αρκεί ο παρακάτω κώδικας:

```
>> Ts=0.0001;
>> t= Ts:Ts:0.02;
>> f=50;
>> w=2*pi*f;
>> Io=10;
>> i1=Io*sin(w*t);
>> i3=0.15*Io*sin(3*w*t);
```

Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική κυματομορφή του ρεύματος θα είναι το άθροισμα των δύο ρευμάτων  $i_1$  και  $i_3$ . Ποια θα είναι η ενεργός τιμή του συνολικού ρεύματος  $i_4$ ; Βάσει του τύπου που αναφέρθηκε παραπάνω θα ισχύει:

```
>> i4=i1+i3;
>> i1rms=10/sqrt(2);
>> i3rms=1.5/sqrt(2);
>> i4rms=sqrt(i1rms^2+i3rms^2)
i4rms =
7.1502
```

(αριθμητική τιμή:  $(10/\sqrt{2})=7.0711$ )  
(αριθμητική τιμή:  $(1.5/\sqrt{2})=1.0607$ )



Ας επαληθεύσουμε την παραπάνω τιμή χρησιμοποιώντας τον γενικό τύπο που δίνει την ενεργό τιμή και ας δούμε πως θα μπορούσαμε να το κάνουμε στην περίπτωση που είχαμε την κυματομορφή του  $i4$  αλλά όχι τον μαθηματικό ορισμό του. Όπως γνωρίζουμε ο γενικός τύπος για την ενεργό τιμή είναι:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) \cdot dt}$$

Άρα απαιτείται ο υπολογισμός του εμβαδού της κυματομορφής του τετραγώνου του σήματος. Για τον υπολογισμό του εμβαδού θα χρησιμοποιηθεί πάλι η εντολή `trapz` όπως και στην προηγούμενη ενότητα.

Δείτε τον παρακάτω κώδικα:

```
>> whos i4
  Name      Size      Bytes Class  Attributes

   i4       1x200      1600 double

>> i4rms=sqrt(1/200*trapz(i4.^2))

i4rms =

    7.1501
```

Η παρατηρούμενη μικρή απόκλιση οφείλεται στις διαδοχικές προσεγγίσεις (ψηφιοποίηση, μέθοδος τραπεζίων, στρογγυλοποίηση κλπ)

**Παρατήρηση 1:** αυτός είναι και ο λόγος που τα μετρητικά όργανα συχνά διευκρινίζουν αν μετράνε RMS τιμή ή πραγματική RMS τιμή (**true RMS**). Με τον πρώτο όρο οι κατασκευαστές συχνά υπονοούν ότι απλά υπολογίζεται το πηλίκο της μέγιστης τιμής με το  $\sqrt{2}$  ως RMS τιμή ή ότι λαμβάνουν υπόψη μόνο την θεμελιώδη συνιστώσα, ενώ με τον δεύτερο υπογραμμίζουν ότι το όργανο υπολογίζει την πραγματική ενεργό τιμή. Προφανώς το πρώτο όργανο θα δώσει σωστή μέτρηση σε περίπτωση καθαρής ημιτονοειδής κυματομορφής αλλά όχι σε περίπτωση που υπάρχουν αρμονικές. Ο διαχωρισμός αυτός εξυπηρετεί περισσότερο εμπορικούς σκοπούς αλλά ενίοτε υπεισέρχεται και σε θεωρητικά συγγράμματα ή και σε προγράμματα εξομοίωσης (και στο SIMULINK).

## 2.5 Αρμονικές και ισχύς

Όπως έδειξε και το παραπάνω παράδειγμα η παρουσία αρμονικών αυξάνει την ενεργό τιμή του ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνει και την πραγματική ισχύ;

Ας εξετάσουμε την μαθηματική πλευρά:

Η πραγματική ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P = \frac{1}{T} \int_0^T (V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t - \varphi_{Vh})) \cdot (I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t - \varphi_{Ih})) dt$$

αλλά:

$$\int_0^T (V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \varphi_{Vn})) \cdot (I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t - \varphi_{Im})) = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_{Vn} - \varphi_{In}) & n = m \end{cases}$$

Αυτό σημαίνει ότι για να συνεισφέρει μία αρμονική στην πραγματική ισχύ τότε αυτή η ίδια αρμονική πρέπει να υπάρχει και στην τάση και στο ρεύμα.

**Παράδειγμα:**

Για το παραπάνω παράδειγμα όπου έχουμε δύο αρμονικές στο ρεύμα θα υπολογίσουμε την ισχύ που δίνει η καθεμία. Με p11 θα συμβολιστεί η ισχύς που προκύπτει από την 1<sup>η</sup> αρμονική τάσης και την 1<sup>η</sup> αρμονική ρεύματος, με p13 η ισχύς που προκύπτει από την 1<sup>η</sup> αρμονική τάσης και την 3<sup>η</sup> αρμονική ρεύματος και με p η ισχύς που προκύπτει από την τάση και το συνολικό ρεύμα. Ο χρόνος δειγματοληψίας θα αυξηθεί ελαφρώς ώστε να υπάρχει καλύτερη προσέγγιση στα αποτελέσματα.

```
>> Ts=0.000001;
>> t=0:Ts:0.02-Ts;
>> f=50;
>> w=2*pi*f;
>> Io=10;
>> Vo=230*sqrt(2);
>> v=Vo*sin(w*t);
>> i3=0.15*Io*sin(3*w*t);
>> i1=Io*sin(w*t);
>> i4=i1+i3;
>> p11=(1/length(v))*trapz(v.*i1)

p11 =
    1.6263e+003

>> p13=(1/length(v))*trapz(v.*i3)

p13 =
   -3.6116e-009

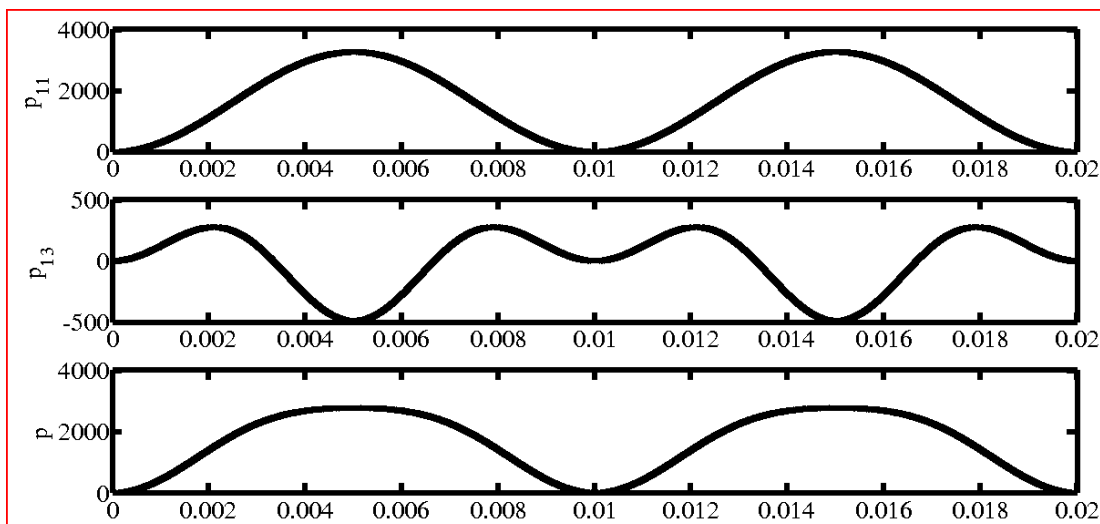
>> p=(1/length(v))*trapz(v.*i4)

p =
    1.6263e+003
```

Αν δούμε  $P_1 = V_{rms} \cdot I_{1rms} =$   
`>> disp(230*Io/sqrt(2))`  
 1.6263e+003

Μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή (0) λόγω δειγματοληψίας και προσεγγίσεων στον υπολογισμό του εμβαδού

Για να γίνει πιο κατανοητό στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα γραφήματα των p11, p13 και p.



**Παρατήρηση 1:** Υποθέτουμε ότι μία καθαρά ημιτονοειδής τάση (π.χ. 50 Hz) τροφοδοτεί ένα μη γραμμικό φορτίο (όπως αυτά που προκύπτουν με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος) το οποίο και εισάγει αρμονικές στο ρεύμα. Αν μετρηθεί η ενεργός τιμή τάσης και ρεύματος και χρησιμοποιηθεί ο γνωστός τύπος  $V \cdot I \cdot \cos\phi$  τότε το αποτέλεσμα που θα προκύψει **ΔΕΝ** θα είναι η πραγματική ισχύς που αποδίδει το κύκλωμα, αφού η ενεργός τιμή του ρεύματος θα είναι αυξημένη λόγω της παρουσίας των αρμονικών. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι πέρα από το γνωστό παράγοντα  $\cos\phi$  που περιορίζει την πραγματική ισχύ σε σχέση με την ονομαστική και σχετίζεται με την διαφορά φάσης τάσης-ρεύματος (ή αλλιώς την **μετατόπιση (displacement)** που υπάρχει μεταξύ τους), όταν υπάρχουν αρμονικές θα πρέπει να εισαχθεί και ένας νέος συντελεστής που να σχετίζεται με την παρουσία αρμονικών (ή αλλιώς την **παραμόρφωση (distortion)** των κυματομορφών). Έτσι παρουσία αρμονικών, ορίζεται ο **συντελεστής μετατόπισης ( $pf_{disp}$ )** και ο **συντελεστής παραμόρφωσης ( $pf_{dist}$ )** και ισχύει:

$$\begin{cases} pf_{disp} = \cos\phi_1 \\ pf_{dist} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \end{cases} \Rightarrow pf_{true} = pf_{disp} \cdot pf_{dist}$$

Ο παραπάνω τύπος μας δείχνει ότι παρουσία μη γραμμικών φορτίων όπως αυτά που σχετίζονται με τα ηλεκτρονικά ισχύος και άρα αρμονικών στο ρεύμα ο **πραγματικός συντελεστής ισχύος (true power factor ή  $pf_{true}$ )** προκύπτει ως το γινόμενο του συντελεστή μετατόπισης και του συντελεστή παραμόρφωσης. Σε περίπτωση γραμμικών φορτίων (απουσία αρμονικών), ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι προφανώς μονάδα και έτσι ο πραγματικός συντελεστής ισχύος ισούται με τον συντελεστή μετατόπισης, το οποίο οδηγεί και στην συνηθισμένη αναφορά του  $\cos\phi$  απλά σαν συντελεστή ισχύος. Η ευρεία χρήση αυτού του όρου για το  $\cos\phi$  εισάγει και την ανάγκη χρήσης του όρου «πραγματικός» για τον συνολικό συντελεστή ισχύος, ώστε να αποφεύγονται οι παρανοήσεις.

**Παρατήρηση 2:** οι συμβολισμοί των παραπάνω μεγεθών δεν χρησιμοποιούνται καθολικά και έτσι είναι πιθανό σε κάποιες πηγές να χρησιμοποιείται απλά ο όρος

«συντελεστής ισχύος» αντί του «πραγματικός συντελεστής ισχύος», ο συμβολισμός DPF ή  $PF_{disp}$  αντί του  $pf_{disp}$ , ο συμβολισμός DF ή  $PF_{dist}$  αντί για  $pf_{disp}$  κ.ο.κ.

**Παρατήρηση 3:** αν υποθεθεί ότι υπάρχουν ίδιες αρμονικές στην τάση και το ρεύμα, τότε αυτές μπορούν να συνεισφέρουν αρνητικά αλλά και θετικά στην πραγματική ισχύ

### 2.6 Λόγος αρμονικής παραμόρφωσης THD

Η παρουσία αρμονικών έχει αντίκτυπο στην τελική κυματομορφή παραμορφώνοντάς την. Ένα μέτρο της παραμόρφωσης αυτής είναι ο λόγος αρμονική παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion Ratio) γνωστότερος και ως THD. Λόγοι αρμονικής παραμόρφωσης μπορεί να οριστούν για την τάση και για το ρεύμα. Στην περίπτωση του ρεύματος, ο λόγος ορίζεται ως:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}}{I_{1rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Δηλαδή ο λόγος THD έχει σαν αριθμητή την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων όλων των αρμονικών εκτός της θεμελιώδους (πλάτους ή ενεργούς τιμής) και ως παρονομαστή το αντίστοιχο μέγεθος της θεμελιώδους. Έτσι δείχνει την «βαρύτητα» που έχουν οι υπόλοιπες αρμονικές σε σχέση με την θεμελιώδη. Προφανώς ένα καθαρό ημίτονο θα έχει μηδενική παραμόρφωση (THD=0). Ο THD συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό.

**Παρατήρηση 1:** αν ακολουθήσουμε την λογική της προηγούμενης παραγράφου (αρμονικές στο ρεύμα αλλά όχι στην τάση) τότε έχουμε:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}}{I_{1rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \Rightarrow \sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2 = I_1 \cdot THD_I^2$$

και

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2} \Rightarrow I_{rms} = I_{1rms} \sqrt{1 + (THD_I)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}}$$

#### Παράδειγμα:

Ας υποθέσουμε ότι η τάση είναι καθαρό ημίτονο ενώ το ρεύμα δίνεται από τον τύπο:  
 $I = 100 \cdot \sin(100\pi t) + 30 \cdot \sin(500\pi t) + 40 \cdot \sin(300\pi t)$

Να βρεθεί η RMS τιμή του, ο λόγος αρμονικής παραμόρφωσης και ο συντελεστής παραμόρφωσης

```

>> I1rms=100/sqrt(2);
>> I3rms=40/sqrt(2);
>> I5rms=30/sqrt(2);
>> Irms=sqrt(I1rms^2+I3rms^2+I5rms^2)
                                >> disp(I1rms)
                                70.7107

Irms =

    79.0569
>> thd=sqrt(I3rms^2+I5rms^2)/I1rms

thd =

    0.5000
>> pfdist=I1rms/Irms

pfdist =

    0.8944
>> pfdist=1/(sqrt(1+thd^2))

pfdist =

    0.8944

```

## 2.7 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την έννοια των αρμονικών και την επίδραση (παραμόρφωση) που έχουν στην συνολική κυματομορφή
- τις βασικές έννοιες της θεωρίας Fourier
- την υλοποίηση του μετασχηματισμού Fourier στην MATLAB μέσω της εντολής fft συμπεριλαμβανομένων όλων των βημάτων που απαιτούνται για την ορθή απεικόνιση των φασμάτων πλάτους και γωνίας.
- τις έννοιες και την σημασία του ρυθμού δειγματοληψίας, της συχνότητας δειγματοληψίας και της συχνότητας Nyquist
- την σχέση που έχει η παρουσία αρμονικών με την ενεργό τιμή καθώς και την σημασία του όρου «πραγματική ενεργός τιμή» (true RMS)
- την σχέση που έχει η παρουσία αρμονικών με την ισχύ και τους διαφορετικούς συντελεστές ισχύος που ορίζονται όταν υπάρχουν αρμονικές (συντελεστής μετατόπισης, συντελεστής παραμόρφωσης και πραγματικός συντελεστής ισχύος)
- την έννοια του Λόγου Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) και της σχέσης του με τον συντελεστή παραμόρφωσης σε περίπτωση τροφοδοσίας μη γραμμικών φορτίων

## ΕΝΟΤΗΤΑ 3: Βασικές γνώσεις SIMULINK (SimPowerSystems)

### 3.1.1 SIMULINK

Το λογισμικό SIMULINK είναι ένα γραφικό περιβάλλον εξομοίωσης κατασκευασμένο στην λογική block διαγραμμάτων. Το SIMULINK είναι ενσωματωμένο στην MATLAB από την έκδοση 6.5 (2002), και για να εκκινήσει χρειάζεται απλά να πληκτρολογηθεί η εντολή `simulink` ή να πιεστεί το αντίστοιχο κουμπί συντόμευσης στο περιβάλλον της MATLAB (το οποίο μπορεί να έχει διαφορετική εμφάνιση ανάλογα την έκδοση του λογισμικού). Προφανώς και υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας των δύο λογισμικών (MATLAB και SIMULINK) και μεταφορά δεδομένων αλλά και λειτουργιών από το ένα στο άλλο. Η γενική λογική του λογισμικού είναι ότι κατασκευάζεται ένα μοντέλο, στο οποίο τοποθετούνται τα ανάλογα blocks, συνδέονται κατάλληλα και αφού ρυθμιστούν διάφοροι γενικοί παράγοντες εξομοίωσης (ή αφεθούν οι προεπιλεγμένοι), τότε το μοντέλο μπορεί να ξεκινήσει την εξομοίωση πατώντας το πλήκτρο εκτέλεσης (**play**) (▶).

**Παρατήρηση 1:** Ενώ η βασική λειτουργία του λογισμικού δεν αλλάζει ιδιαίτερα, από έκδοση σε έκδοση μπορεί να αλλάξει η εμφάνιση ορισμένων στοιχείων (π.χ. τα εικονίδια αναζήτησης, εκτέλεσης, ιδιοτήτων κλπ).

**Παρατήρηση 2:** στο συγκεκριμένο εγχειρίδιο δεν επιθυμείται να ακολουθηθεί η λογική της περιγραφής μιας συγκεκριμένης έκδοσης του λογισμικού καθώς το ζητούμενο είναι να μπορεί να αξιοποιηθεί από εκπαιδευόμενους με διαφορετικές εκδόσεις ενώ συνίσταται και η εξοικείωση του κάθε εκπαιδευόμενου με το λογισμικό και την γενικότερη λογική του ώστε να είναι σε θέση να αξιοποιήσει οδηγίες/συγγράμματα που αφορούν άλλες εκδόσεις από αυτή που χρησιμοποιεί ο ίδιος.

**Παρατήρηση 3:** σημειώνεται ότι και για το SIMULINK (όπως και για την MATLAB) υπάρχει πλήθος συγγραμμάτων και στην ελληνική, ορισμένα και ανοικτά διαθέσιμα στο διαδίκτυο, που μπορούν να βοηθήσουν τον αρχάριο χρήστη να εξοικειωθεί ή/και να γνωρίσει επιπλέον λειτουργίες του λογισμικού.

### 3.1.2 Εργαλειοθήκες, αναζήτηση και επιλογή block

Το SIMULINK είναι εξοπλισμένο με πλήθος διαφορετικών λειτουργικών blocks τα οποία είναι ταξινομημένα σε διαφορετικά υποσύνολα (εργαλειοθήκες), ο τίτλος των οποίων περιγράφει και τον σκοπό/αποστολή/ειδίκευση τους.

**Παρατήρηση 1:** ανάλογα την έκδοση του λογισμικού, εργαλειοθήκες μπορεί να προστίθενται ή να αφαιρούνται, να συγχωνεύονται με άλλες κλπ.

**Παρατήρηση 2:** σημαντική είναι η δυνατότητα αναζήτησης που δίνει το SIMULINK η οποία επιτρέπει στον χρήστη να βρει το ή τα blocks που πιθανόν τον εξυπηρετούν χρησιμοποιώντας λέξεις κλειδιά. Ο εξοικειωμένος χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το search αναζητώντας συγκεκριμένο block του οποίου γνωρίζει την ονομασία.

**Παρατήρηση 3:** διπλό κλικ σε κάθε block θα εμφανίσει ένα παράθυρο με ιδιότητες, στο οποίο υπάρχει και το αντίστοιχο help του (παραπέμπει στο documentation του

block που συμπεριλαμβάνεται στο ίδιο γενικότερο help στο οποίο παραπέμπει και η εντολή doc της MATLAB).

**Παρατήρηση 4:** Σημειώνεται ότι όταν γίνεται αναζήτηση ενός block είναι πιθανόν να βρεθούν περισσότερα του ενός με την ίδια (ή σχεδόν ίδια ονομασία) τα οποία όμως να ανήκουν σε διαφορετικές εργαλειοθήκες. **Βασικός κανόνας για ορθή εξομοίωση είναι η επιλογή block από την πλέον κατάλληλη και εξειδικευμένη εργαλειοθήκη** η οποία θα πρέπει να είναι και η ίδια για το σύνολο των blocks (με εξαίρεση τα γενικά).

**Παρατήρηση 5:** Σε περίπτωση που δεν υπάρχει στην εξειδικευμένη εργαλειοθήκη το επιθυμητό block, τότε μεταξύ ενός block σε μια άλλη εξειδικευμένη βιβλιοθήκη και σε ένα άλλο block με το ίδιο όνομα σε μια γενικότερη βιβλιοθήκη, συνίσταται να χρησιμοποιείται αυτό της γενικότερης.

### 3.1.3 Αποθήκευση μοντέλων

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, **για να εκτελεσθεί σωστά μια εξομοίωση πρέπει προηγουμένως να έχει αποθηκευθεί το μοντέλο** στην πλέον πρόσφατη μορφή του. Το SIMULINK εμφανίζει στο πάνω μέρος του παραθύρου του κάθε μοντέλου, το όνομα αρχείου του. Αν έχουν γίνει αλλαγές οι οποίες δεν έχουν αποθηκευθεί, τότε συνοδεύει το όνομα με έναν αστερίσκο (\*).

**Παρατήρηση 1:** Οι εκπαιδευόμενοι πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί καθώς σύνθητες είναι να γίνονται αλλαγές/διορθώσεις και να εκτελείται η εξομοίωση χωρίς αυτές να έχουν αποθηκευθεί με αποτέλεσμα να συνεχίζει να εμφανίζεται το προηγούμενο λανθασμένο αποτέλεσμα.

**Παρατήρηση 2:** Σημειώνεται ότι **σαν όνομα μοντέλου (αρχείου) δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί λέξη που είναι δεσμευμένη από την MATLAB για άλλη εντολή/λειτουργία της**. Σε περίπτωση που επιχειρηθεί κάτι τέτοιο θα εμφανιστεί ανάλογο μήνυμα για να αποτρέψει τον χρήστη. Να σημειωθεί ότι η παράβλεψη του μηνύματος (και άρα η αποθήκευση του αρχείου με την ακατάλληλη ονομασία) μπορεί να έχει απρόβλεπτες συνέπειες (σε σημείο να απαιτηθεί η επανεγκατάσταση του λογισμικού).

**Παρατήρηση 3:** σαν πρόσθετη οδηγία, **να μην γίνεται χρήση ελληνικών χαρακτήρων σε οποιαδήποτε λειτουργία (ονομασία αρχείων, ονομασία block κλπ)** καθώς και αυτή μπορεί να έχει απρόβλεπτα αποτελέσματα (ειδικά όταν το αρχείο επιχειρηθεί να ανοίξει από διαφορετική έκδοση της MATLAB).

### 3.1.4 Τύπος αρχείων

Οι παλιότερες εκδόσεις του λογισμικού αποθήκευαν τα μοντέλα (δηλαδή τα αρχεία των block διαγραμμάτων) σε μορφή **mdl**. Ανάλογα την έκδοση του λογισμικού μπορεί να δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης σε mdl συμβατά με προηγούμενες εκδόσεις (Save as...) ή εξαγωγής σε τέτοια (Export). Οι νεώτερες εκδόσεις του λογισμικού χρησιμοποιούν ως προεπιλεγμένη την μορφή αρχείων **slx** η οποία προσφέρει το πλεονέκτημα μικρότερων αρχείων (καθώς και ορισμένα άλλα, όχι

ιδιαίτερα σημαντικά πλεονεκτήματα) αλλά ΔΕΝ μπορούν να ανοιχθούν από παλιότερες εκδόσεις.

**Παρατήρηση 1:** στον αρχάριο χρήστη/εκπαιδευόμενο συνίσταται να χρησιμοποιεί την mdl μορφή ανεξάρτητα της έκδοσης του SIMULINK που χρησιμοποιεί. Επίσης καλό θα είναι να αποθηκεύει τα αρχεία σε mdl μορφές συμβατές με παλιότερες εκδόσεις ώστε να μην αντιμετωπίζει προβλήματα μεταξύ διαφορετικών Η/Υ και εκδόσεων.

### 3.2.1 Η εργαλειοθήκη SimPowerSystems

Η βασική εργαλειοθήκη που αφορά τα ενεργειακά συστήματα είναι η **SimPowerSystems** η οποία σε παλιότερες εκδόσεις της MATLAB συμπεριλαμβάνεται στην βασική λίστα εργαλειοθηκών ενώ σε νεότερες βρίσκεται μέσα στην ευρύτερη εργαλειοθήκη **Simscape**. Η εργαλειοθήκη αυτή (όπως μαρτυρά και το όνομα της) είναι ειδικά κατασκευασμένη για την εξομοίωση ενεργειακών συστημάτων και περιλαμβάνει και υπό-εργαλειοθήκη για ηλεκτρονικά ισχύος (**Power Electronics**). Το βασικό πλεονέκτημα της είναι ότι χρησιμοποιεί γνωστά ηλεκτρολογικά στοιχεία σε μορφή blocks, καταστρώνοντας και επιλύοντας στην ουσία τις εξισώσεις που δίνουν τις τάσεις και τα ρεύματα στο κύκλωμα, χωρίς όμως να τις εμφανίζει στον χρήστη ή να απαιτεί από αυτόν να τις καταστρώσει. Στο απλούστερο παράδειγμα, για να εξομοιωθεί ένα κύκλωμα DC πηγής και αντίστασης (ώστε π.χ. να προκύψει η τιμή του ρεύματος) δεν είναι υποχρεωμένος ο χρήστης να γνωρίζει ή να εισάγει στο κύκλωμα τον νόμο του Ohm. Αρκεί απλά να προχωρήσει στην σωστή επιλογή blocks, διασύνδεσή και παραμετροποίηση τους. Προφανώς το πλεονέκτημα για τον απλό χρήστη είναι εντονότερο σε πολυπλοκότερα κυκλώματα. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι κάποια θεωρητική γνώση μπορεί να είναι απαραίτητη σε πολυπλοκότερα κυκλώματα για την ορθή επιλογή των παραμέτρων.

### 3.2.2 Το powergui block

Για να λειτουργήσει οποιοδήποτε μοντέλο έχει σχεδιασθεί με blocks από την βιβλιοθήκη **SimPowerSystems**, θα πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο και το block με την ονομασία **powergui**. Το block αυτό παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον (εξ ου και το gui στην ονομασία του το οποίο αποτελεί συντομογραφία του graphical user interface), το οποίο επιτρέπει την ρύθμιση παραμέτρων του μοντέλου αλλά και την εύκολη εκτέλεση πολύπλοκων αναλύσεων και λειτουργιών (όπως η ανάλυση Fourier). Σε παλιότερες εκδόσεις της MATLAB, η προσθήκη του block γινόταν αυτόματα κατά την εξομοίωση (το «τρέξιμο») του μοντέλου, ακόμα και αν ο χρήστης είχε ξεχάσει να το προσθέσει ο ίδιος νωρίτερα. Σε νεότερες εκδόσεις η απουσία του block θα έχει σαν συνέπεια μήνυμα σφάλματος. Περισσότερα για τις δυνατότητες του συγκεκριμένου block θα δοθούν στην συνέχεια. Στην παρούσα φάση, απλά υπογραμμίζεται η αναγκαιότητα προσθήκης του ώστε να μπορεί να εκτελεσθεί η όποια εξομοίωση.

## 3.3 Παράδειγματα

Για να αρχίσει η εξοικείωση του εκπαιδευόμενου θα εξομοιωθούν ορισμένα απλά κυκλώματα. Με κάθε παράδειγμα, ο εκπαιδευόμενος θα έρχεται σε επαφή με ορισμένες νέες έννοιες και δυνατότητες. Έτσι αυτό που αναλύεται στο πρώτο



παράδειγμα, θα θεωρείται γνωστό για το δεύτερο κ.ο.κ. Αντίστροφα, μια ρύθμιση που αναλύεται σε κάποιο παράδειγμα, πιθανόν θα «αγνοείται» στα προηγούμενα. Σε κάθε περίπτωση, σε αυτό το στάδιο ο σκοπός των παραδειγμάτων είναι να εισάγουν σταδιακά τον εκπαιδευόμενο σε δυνατότητες και έννοιες και όχι αυτή καθαυτή η εξομοίωση των συγκεκριμένων κυκλωμάτων, τα οποία και θα είναι κατά το δυνατόν στοιχειώδη.

### 3.3.1 DC πηγή και αντίσταση - αμπερόμετρο

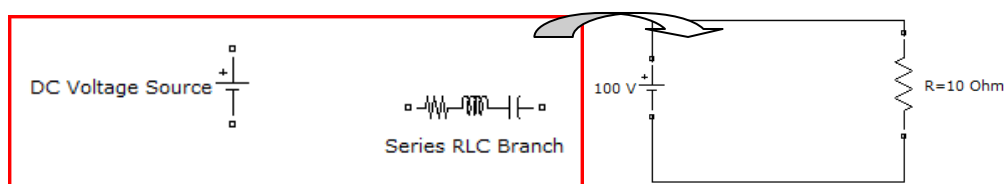
Ως πρώτο παράδειγμα, θα εξομοιωθεί ένα απλό κύκλωμα που να αποτελείται από μια DC πηγή 100 V και μία ωμική αντίσταση  $R=10\Omega$ .

Για το συγκεκριμένο κύκλωμα απαιτείται μια DC πηγή και μία ωμική αντίσταση.

**Παρατήρηση 1:** Η DC πηγή βρίσκεται «κάτω» από το **Electrical Sources** (όνομα block: **DC Voltage Source**) ενώ για την αντίσταση πρέπει να επιλεγεί το block **Series RLC Branch** που βρίσκεται στα **Elements** (προφανώς και τα 2 στην ειδική εργαλειοθήκη SimPowerSystems).

**Παρατήρηση 2:** κάθε block πρέπει να βρεθεί στην βιβλιοθήκη του Simulink και στην συνέχεια είτε να γίνει drag & drop στο παράθυρο του μοντέλου είτε να προστεθεί μέσω των επιλογών που εμφανίζονται όταν γίνεται δεξί κλικ επάνω του.

**Παρατήρηση 3:** αφού τοποθετηθούν τα blocks πρέπει να συνδεθούν και οριστούν οι παράμετροί τους. Το παράθυρο παραμετροποίησης του κάθε block ανοίγει όταν γίνει διπλό κλικ επάνω στο block. Έτσι δίνεται η τιμή πλάτους (**Amplitude**) της DC πηγής ενώ ανάλογα ορίζεται ότι το **Series RLC Branch** block θα απαρτίζεται μόνο από μια ωμική αντίσταση με τιμή 10 Ω. Τέλος, προαιρετική είναι η αλλαγή της ονομασίας κάθε στοιχείου.

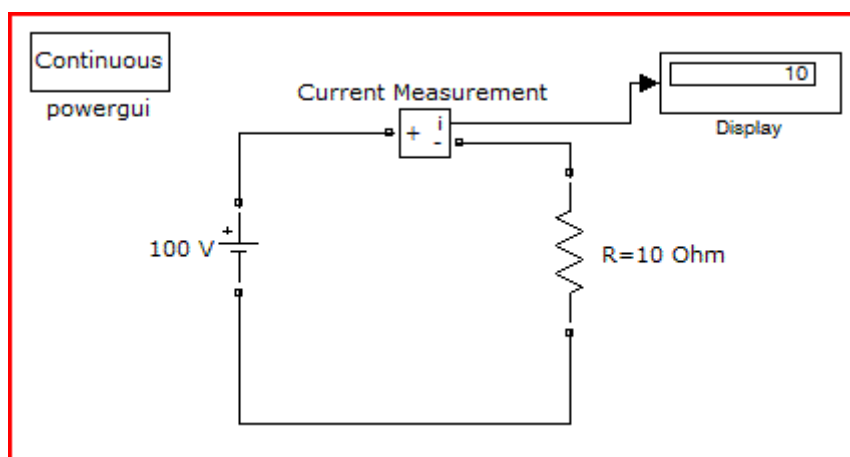


**Παρατήρηση 4:** Για να εξομοιωθεί η λειτουργία αυτού του μοντέλου αρκεί να πατηθεί το πλήκτρο με το σύμβολο του **play** (▶) (με την προσθήκη προφανώς του powergui block). Και πράγματι η εξομοίωση θα τρέξει όμως καμία πληροφορία δεν θα επιστραφεί στον χρήστη. Και λογικά, καθώς κανένα μετρητικό όργανο δεν έχει συνδεθεί.

**Παρατήρηση 5:** για την εισαγωγή αμπερομέτρου πρέπει να χρησιμοποιηθεί το block **Current Measurement** το οποίο βρίσκεται στον ευρύτερο κατάλογο με την ονομασία **Measurements** μέσα στο **SimPowerSystems**. Το block έχει τρεις ακροδέκτες, έναν (+) και έναν (-) στα οποία πρέπει να συνδεθούν οι ακροδέκτες του κλάδου (κυκλώματος) προφανώς σε σειρά. Ο τρίτος ακροδέκτης θα δώσει την μέτρηση (και έχει την σήμανση  $i$ ).

**Παρατήρηση 6:** για να εμφανισθεί η μέτρηση πρέπει να χρησιμοποιηθεί και κάποιο απεικονιστικό όργανο. Το απλούστερο είναι μια οθόνη για την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το block **Display**. Προτείνεται στον χρήστη να χρησιμοποιήσει την δυνατότητα αναζήτησης για να το εντοπίσει.

Αφού συνδεθούν λοιπόν όλα τα blocks κατάλληλα και «τρέξει» το μοντέλο, θα υπολογισθεί η τιμή του ρεύματος και στο **Display** block θα αναγραφεί η ανάλογη ένδειξη.



**Παρατήρηση 7:** ο προσανατολισμός των blocks αλλάζει με την επιλογή **Rotate Block** που μπορεί να βρεθεί στο αναδυόμενο μενού που εμφανίζεται με δεξί κλικ πάνω στο block

**Παρατήρηση 8:** η αλλαγή της τιμής ενός στοιχείου (π.χ. εδώ της αντίστασης R) δεν συνεπάγεται και την αυτόματα αλλαγή της ονομασίας του (π.χ. από Series RLC Branch σε R=10 Ohm). **Αντίστοιχα η αλλαγή του ονόματος του στοιχείου δεν σημαίνει και αλλαγή της τιμής του ή των παραμέτρων του.** Προφανώς μπορεί η τιμή της αντίστασης να είναι άλλη και το όνομα του στοιχείου άλλο, άλλος χωρίς να προκύψει μήνυμα σφάλματος. Η εξομοίωση βέβαια θα γίνει για τις τιμές παραμέτρων που έχουν εισαχθεί στο αντίστοιχο παράθυρο.

**Παρατήρηση 9:** όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα συνίσταται να ΜΗΝ χρησιμοποιούνται ελληνικοί χαρακτήρες σε οποιαδήποτε λειτουργία (ονομασία αρχείων, ονομασία blocks κλπ). Έτσι χρησιμοποιήθηκε το “R=10 Ohm” αντί του R=10Ω.

### 3.3.2 AC πηγή και αντίσταση – RMS τιμή

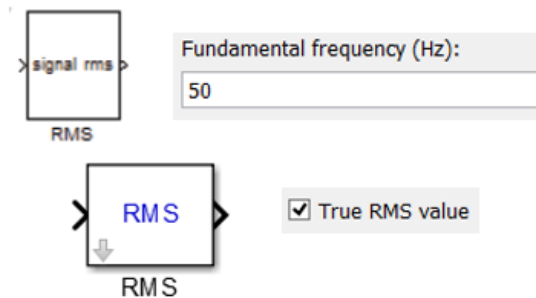
Για το δεύτερο παράδειγμα, θα εισαχθεί μια AC πηγή (**AC Voltage Source**) στην θέση της DC του προηγούμενου κυκλώματος. Στις παραμέτρους αυτού του block μπορεί να ρυθμιστεί η τιμή κορυφής (peak), η φάση (phase) και η συχνότητα (frequency). Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι ορίζουμε την τιμή κορυφής ίση με  $230 \cdot \sqrt{2}$ , την συχνότητα ίση με 50 Hz και την φάση ίση με 0.

**Παρατήρηση 1:** το Simulink αποτελεί κομμάτι της MATLAB και έτσι για να δοθεί η τιμή κορυφής π.χ.  $230 \cdot \sqrt{2}$  αρκεί στο συγκεκριμένο παράθυρο να γραφεί  $230 \cdot \text{sqrt}(2)$

**Παρατήρηση 2:** Αν τρέξει τώρα το μοντέλο θα δούμε ότι η ένδειξη που μας δίνει το display για το μετρούμενο ρεύμα δεν είναι η αναμενόμενη. Τι έχει συμβεί; Η μέτρηση αφορά την **στιγμιαία** τιμή και η εξομοίωση ένα **συγκεκριμένο** χρονικό διάστημα (σε δευτερόλεπτα) το οποίο εμφανίζεται στο παράθυρο δίπλα από το εικονίδιο εκτέλεσης (play). Η προκαθορισμένη διάρκεια είναι 10 δευτερόλεπτα. Έτσι η μέτρηση που δείχνει το display, είναι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος μετά από 10 δευτερόλεπτα.

**Παρατήρηση 3:** για να υπολογισθεί η **RMS τιμή** πρέπει να εισαχθεί το ανάλογο block. Το αποτέλεσμα πιθανόν να συνεχίσει να είναι λανθασμένο μέχρι να ρυθμιστούν τα παρακάτω: η συχνότητα να τεθεί ίση με 50Hz στις ρυθμίσεις του block και ο χρόνος εξομοίωσης (ή ο ρυθμός δειγματοληψίας και άρα ο συνολικός αριθμός σημείων) να είναι αρκετός ώστε να υπολογισθεί σωστά η ενεργός τιμή (άρα τουλάχιστον μία περίοδο). Σε αυτή την φάση ας περιορίσουμε το χρονικό διάστημα σε μία περίοδο (0.02 sec).

**Παρατήρηση 4:** Το σύμβολο για το RMS block πιθανώς να είναι διαφορετικό ανάμεσα σε διαφορετικές εκδόσεις του λογισμικού. Σε νεότερες εκδόσεις παρέχεται και η επιλογή μεταξύ true RMS ή απλού υπολογισμού της RMS τιμής της θεμελιώδους.

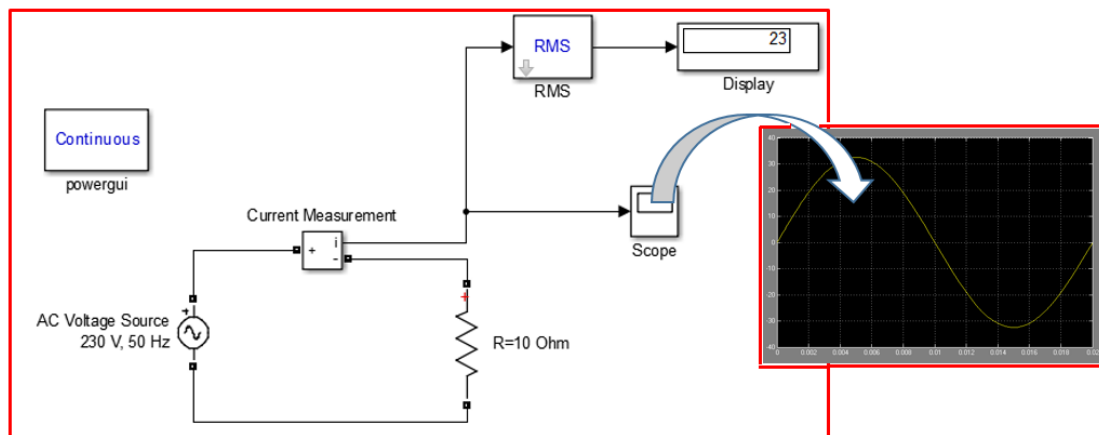


**Παρατήρηση 5:** Για να έχουμε εικόνα της κυματομορφής πρέπει το σήμα να κατευθυνθεί σε κατάλληλο απεικονιστικό όργανο (**Scope**).



**Παρατήρηση 6:** το **Scope** θα πρέπει προφανώς να συνδεθεί ώστε να λαμβάνει σαν είσοδο την στιγμιαία τιμή (και όχι την ενεργή).

**Παρατήρηση 7:** Για να εμφανιστεί η κυματομορφή, πρέπει μετά το «τρέξιμο» του μοντέλου να γίνει διπλό κλικ στο Scope.



### 3.3.3 AC πηγή και βολτόμετρο– βήμα και τύπος αλγορίθμων επίλυσης

Για το τρίτο παράδειγμα, θα εισαχθεί μια AC πηγή σε ένα νέο μοντέλο και θα συνδεθεί ένα βολτόμετρο στα άκρα της. Στην έξοδο του βολτομέτρου θα συνδεθεί ένα Scope ώστε να πάρουμε την κυματομορφή της τάσης στα άκρα της πηγής.

**Παρατήρηση 1:** αφού τρέξει η εξομοίωση (για τον default χρόνο των 10 sec), η γραφική που δίνει το Scope (και ανάλογα την έκδοση του λογισμικού και το επίπεδο ζουμαρίσματος) θα έχει είτε την μορφή μιας ευθείας γραμμής στο μηδέν (σε zoom out) είτε μιας ακανόνιστης γραφικής (zoom in) με πολύ μικρή απόκλιση γύρω από το μηδέν. Το πρόβλημα είναι ο μεγάλος χρόνος εξομοίωσης σε συνδυασμό με τον ρυθμό δειγματοληψίας. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων γίνεται στα **Configuration Parameters** του μοντέλου (πίσω από την επιλογή **Simulation** ή/και πίσω από το κουμπί που απεικονίζει ένα γρανάζι σε νεότερες εκδόσεις). Στην επιλογή **Solver** ο χρήστης μπορεί να ορίσει πλήθος παραμέτρων, οι πιο σημαντικές εκ των οποίων είναι:

- η χρονική στιγμή που θα ξεκινήσει (start time) και θα σταματήσει (stop time) η εξομοίωση
- ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν την λειτουργία του μοντέλου (π.χ. ode45)
- το αν ο αλγόριθμος είναι μεταβλητού βήματος (Variable-step) ή σταθερού βήματος (Fixed-step)

**Παρατήρηση 2:** στην παρούσα φάση δεν θα συζητηθούν οι διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς μια τέτοια συζήτηση πρέπει να συμπεριλάβει αριθμητικές μεθόδους επίλυσης διαφορικών εξισώσεων καθώς την έννοια της δυσκαμψίας.

**Παρατήρηση 3:** για την επίλυση των κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται επαναληπτικοί αλγόριθμοι όπου για την εξομοίωση του κυκλώματος κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που προκύπτουν από την επίλυση του κυκλώματος την ακριβώς προηγούμενη. Έτσι με τον όρο **βήμα** εννοείται ο χρόνος μεταξύ δύο διακριτών χρονικών στιγμών (έννοια τελικά ταυτόσημη με τον **χρόνο δειγματοληψίας**).

**Παρατήρηση 4:** Σε περίπτωση αλγορίθμου μεταβλητού βήματος πρέπει να δοθεί το αρχικό βήμα καθώς και το μεγαλύτερο και μικρότερο επιτρεπτό βήμα. Σε περίπτωση αλγορίθμου σταθερού βήματος πρέπει να δοθεί η τιμή του βήματος. Υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγούν αυτόματα οι τιμές αυτές (auto) αλλά μια τέτοια επιλογή μπορεί να επιφέρει λανθασμένα αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις.

**Παρατήρηση 5:** ένας αλγόριθμος μεταβλητού βήματος χρησιμοποιεί μεγαλύτερο βήμα όταν διαπιστώσει ότι η κατάσταση (οι μεταβλητές που υπολογίζει) αλλάζει αργά ενώ μικρότερο όταν η κατάσταση αλλάζει γρήγορα. Αντίθετα ένας αλγόριθμος σταθερού βήματος θα χρησιμοποιεί το ίδιο βήμα ανεξάρτητα του τι συμβαίνει με τις υπολογιζόμενες μεταβλητές. Συνεπώς ένας αλγόριθμος μεταβλητού βήματος θα έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ταχύτητας αλλά και το μειονέκτημα του μη σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας (ουσιαστικά) και άρα την δυσκολία χειρισμού/κατανόησης/ανασύνθεσης των σημάτων που καταγράφονται.

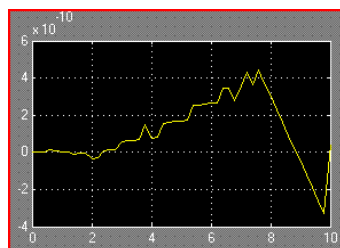
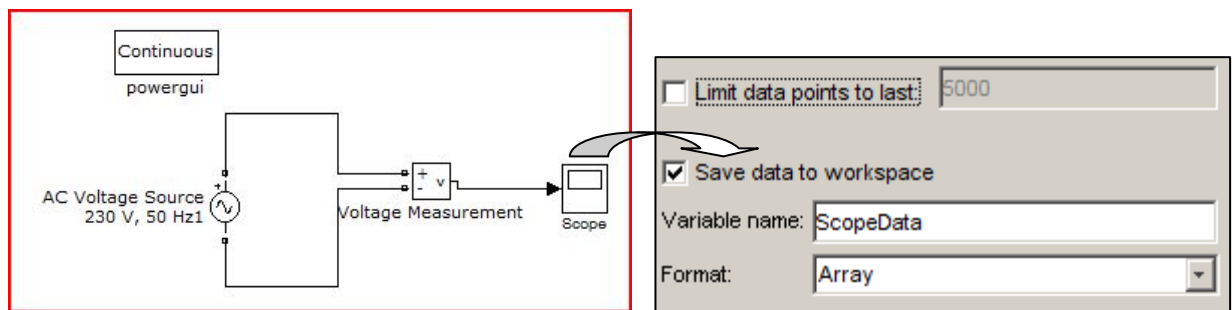
**Παρατήρηση 6:** στην περίπτωση που επιθυμείται η επεξεργασία κάποιων σημάτων από την εξομοίωση από άλλα λογισμικά (ή και την MATLAB) προτείνεται να επιλέγεται αλγόριθμος σταθερού βήματος

**Παρατήρηση 7:** για να λάβετε μια εικόνα του αριθμού των σημείων που καταγράφονται, στις ρυθμίσεις του **Scope**, στην καρτέλα **Data history** να από-επιλεγεί (ξετικαριστεί) η επιλογή **Limit data points to last ...** και να επιλεγθεί το **Save data to workspace**. Για ευκολία να χρησιμοποιηθεί η επιλογή **Array** για το **Format**. Με αυτές τις ρυθμίσεις οι μεταβλητές που απεικονίζει το Scope αποθηκεύονται σαν μεταβλητές (διανύσματα) στην επιφάνεια εργασίας της MATLAB.

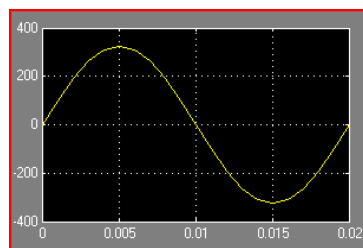
**Παρατήρηση 8:** στην προκειμένη περίπτωση η αυτόματη επιλογή βήματος σε συνδυασμό με την περιοδικότητα του σήματος, οδηγεί το λογισμικό στο να καταγράψει ελάχιστα σημεία για την χρονική διάρκεια των 10 δευτερολέπτων.

**Παρατήρηση 9:** για να εξορθολογιστεί η εξομοίωση, ο χρόνος εξομοίωσης να τεθεί ίσος με 1 περίοδο (0.02 sec). Χρησιμοποιώντας αλγόριθμο σταθερού βήματος και βήμα 0.001 (το 1/10 της διάρκειας) το σήμα που καταγράφει το Scope θα έχει 21 τιμές. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για να έχει 20 τιμές θα πρέπει είτε η εξομοίωση να αρχίσει από το βήμα 1 (και όχι το 0) είτε να τελειώσει ένα βήμα πριν το τέλος του χρόνου εξομοίωσης.

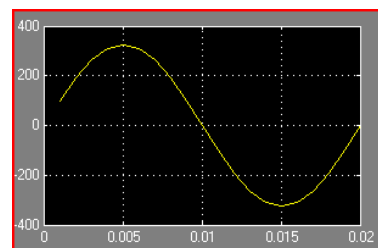
**Παρατήρηση 10:** προφανώς όσο μικρότερο τεθεί το βήμα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακρίβεια στην εξομοίωση όμως παράλληλα θα αυξηθεί και ο χρόνος που απαιτείται για να τρέξει το μοντέλο.



- χρόνος: 0~10 sec
- μεταβλητού βήματος
- βήμα=auto
- 51 σημεία



- χρόνος: 0~0.02 sec
- σταθερού βήματος
- βήμα=0.001
- 21 σημεία



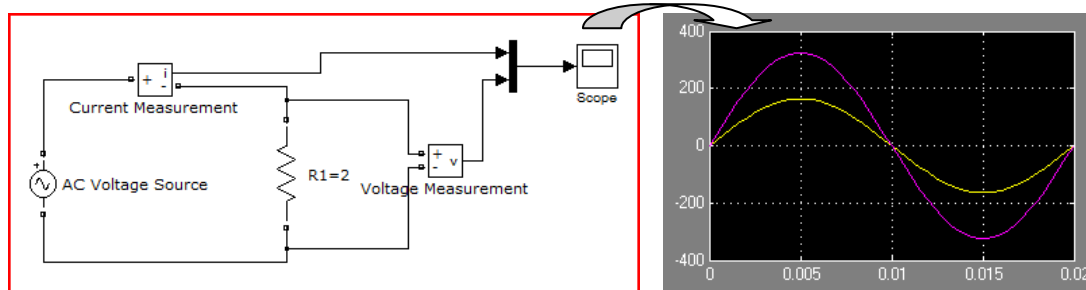
- χρόνος: 0.001~0.02 sec
- σταθερού βήματος
- βήμα=0.001
- 20 σημεία

### 3.3.4 Πολυπλέκτες (mux), αποπολυπλέκτες (demux) και πολύμετρο (multimeter)

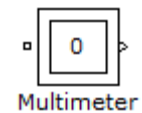
Ας υποθέσουμε ότι το ζητούμενο είναι να παρουσιαστούν στην ίδια γραφική παράσταση η τάση και το ρεύμα πάνω σε μια αντίσταση. Η πηγή τάσης είναι ίδια με το προηγούμενο παράδειγμα και η τιμή της αντίστασης τίθεται 2 Ω. Για να συνδυάσουμε τα δύο σήματα ώστε να παρουσιασθούν ταυτόχρονα στην ίδια γραφική παράσταση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το block **mux** ώστε να παραχθεί ένα πεπλεγμένο σήμα (ουσιαστικά ένας πίνακας) που περιέχει και τις δύο μετρήσεις. Στις επιλογές του mux μπορεί να καθοριστεί ο αριθμός εισόδων αλλά και η εμφάνισή του.

**Παρατήρηση 1:** τα διαφορετικά σήματα θα παρουσιαστούν με διαφορετικό χρώματα.

**Παρατήρηση 2:** δυνατότητα εμφάνισης υπομνήματος (**legend**) υπάρχει μόνο σε νεώτερες εκδόσεις της MATLAB.



Η σύνδεση αμπερομέτρων και πολυμέτρων σε πιο σύνθετα κυκλώματα μπορεί να δυσχεραίνει την εποπτική κατανόησή τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση πολυμέτρου (**multimeter**) μπορεί να διευκολύνει την κατάσταση. Το πολύμετρο μπορεί να δώσει μέτρηση τάσης και έντασης στα **άκρα των στοιχείων** χωρίς να χρειάζεται να συνδεθεί στα άκρα τους.

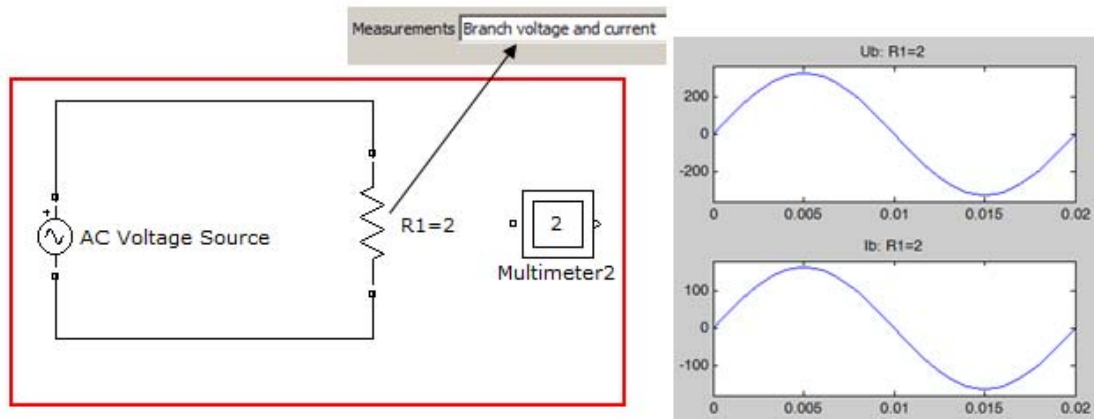


**Παρατήρηση 3:** για να λάβει μέτρηση το πολύμετρο από τα άκρα ενός στοιχείου, θα πρέπει στις ρυθμίσεις του στοιχείου να εισαχθεί η ανάλογη τιμή στην επιλογή **Measurements**. Έτσι η αντίστοιχη μέτρηση εμφανίζεται στις διαθέσιμες μετρήσεις του πολυμέτρου.

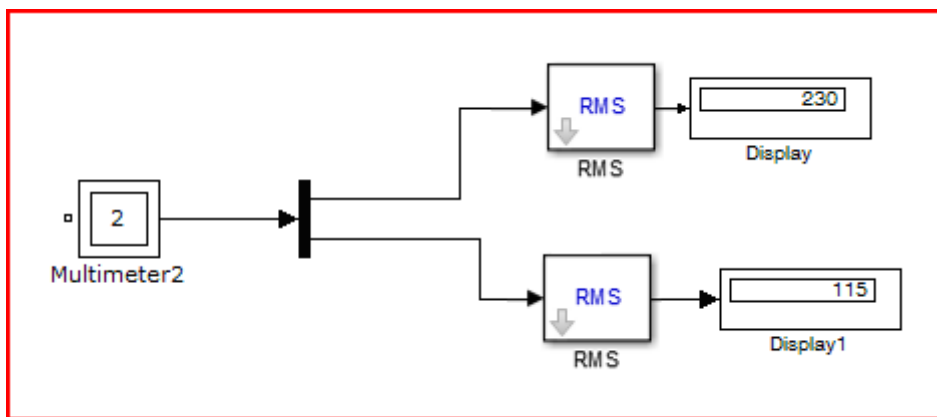
**Παρατήρηση 4:** οι διαθέσιμες μετρήσεις δεν χρησιμοποιούνται κατά ανάγκη από το πολύμετρο. Οι μετρήσεις που θα χρησιμοποιηθούν ορίζονται στις ιδιότητες του πολυμέτρου

**Παρατήρηση 5:** αν είναι επιθυμητή η σχεδιάσή των μετρήσεων του πολυμέτρου, αρκεί να επιλεγθεί η επιλογή **Plot selected measurements**.

**Παρατήρηση 6:** το εικονίδιο του πολυμέτρου εμφανίζει τον αριθμό των μετρήσεων που θα κάνει τελικά το πολύμετρο.



**Παρατήρηση 7:** Από την έξοδο του πολυμέτρου λαμβάνεται το πεπλεγμένο σήμα και για να πάρουμε κάθε σήμα ξεχωριστά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν αποπολυπλέκτη (demux)

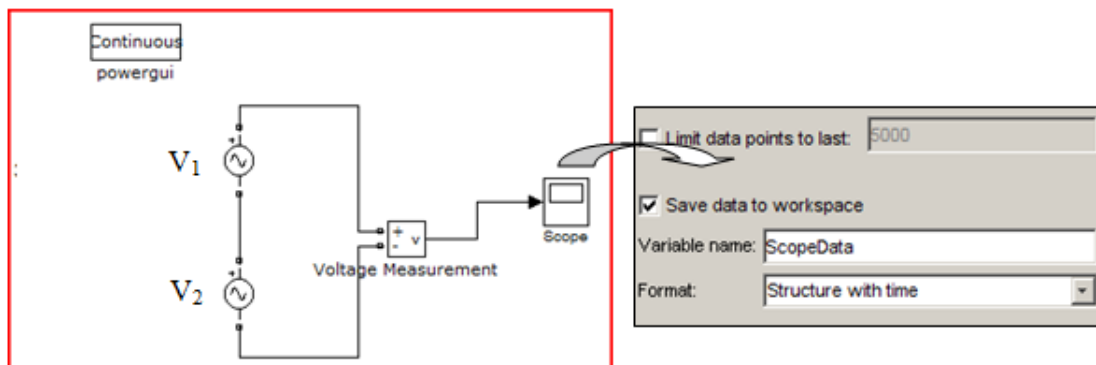


### 3.3.5 Διαφορετικές AC πηγές – Fourier ανάλυση

Για το επόμενο παράδειγμα, θα χρησιμοποιηθούν δύο AC πηγές με διαφορετικές τιμές (πλάτος, συχνότητας) ώστε να γίνει επίδειξη των δυνατοτήτων Fourier ανάλυσης μέσα από το powergui. Για να είναι ευκολότερα κατανοητή η ανάλυση, επιλέγεται μία πηγή με τιμή κορυφής 300 V και συχνότητα 50 Hz και μία πηγή με τιμή κορυφής 30 V, συχνότητα 150 Hz και διαφορά φάσης  $10^\circ$ . Ουσιαστικά η πρώτη δίνει την θεμελιώδη συνιστώσα και η δεύτερη την τρίτη αρμονική.

**Παρατήρηση 1:** για να γίνει η ανάλυση Fourier στο powergui πρέπει στις ρυθμίσεις του Scope να έχει ορισθεί η αποθήκευση των μεταβλητών στο workspace του MATLAB και μάλιστα με μορφή δομής που περιλαμβάνει τον χρόνο (**Structure with time**).





**Παρατήρηση 2:** για την ανάλυση Fourier αρκεί να επιλεγεί η **FFT Analysis** στο μενού των ιδιοτήτων του powergui. Στο παράθυρο που προκύπτει αφού γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις (ορισθεί ο χρόνος έναυσης, η θεμελιώδης συχνότητα, το σήμα που είναι προς μελέτη) μπορεί να επιλεγεί ο τρόπος εμφάνισης των αποτελεσμάτων της FFT ανάλυσης.

**Παρατήρηση 3:** για ορθότερη και ομαλότερη λειτουργία προτείνεται οι εξομοιώσεις να ξεκινούν από την χρονική στιγμή μηδέν. Αυτό πρέπει να θεωρηθεί και σαν γενικός κανόνας για το simulink εκτός και συντρέχουν ειδικοί λόγοι.

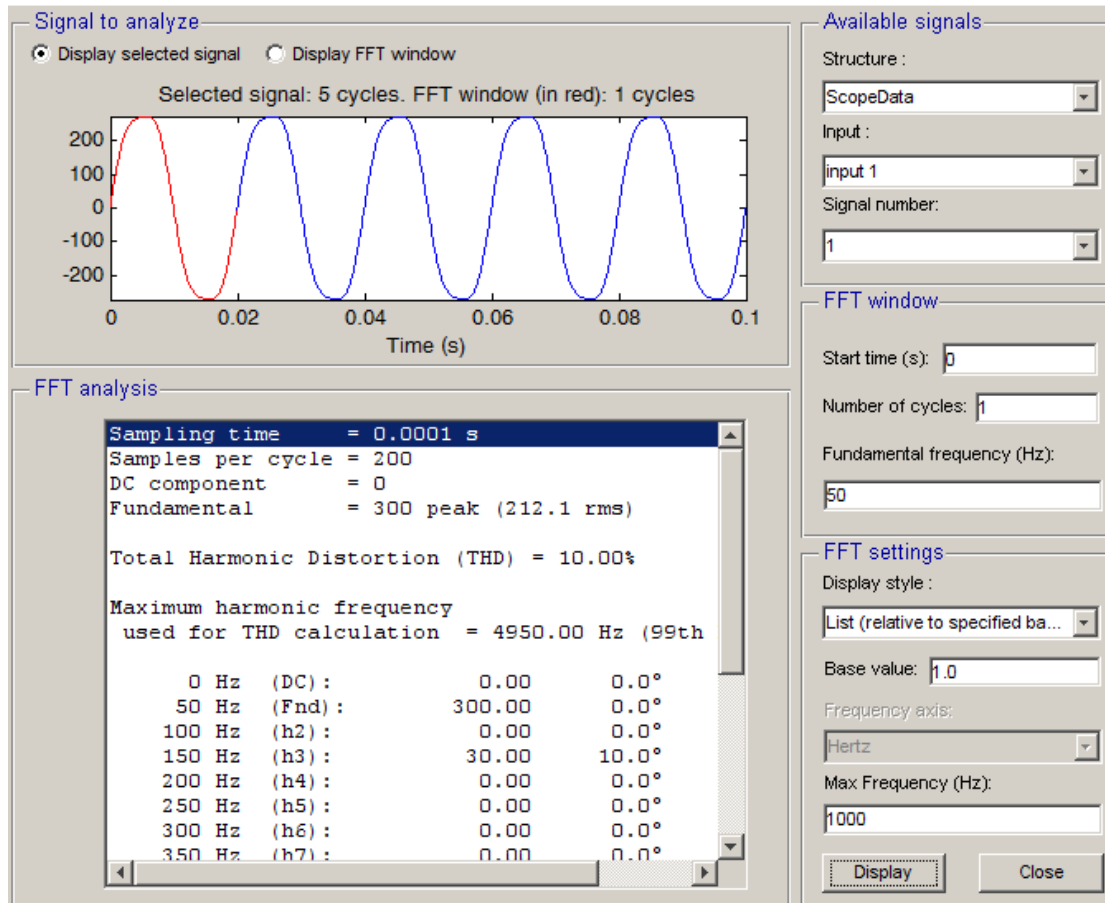
**Παρατήρηση 4:** Μεταξύ των διαφόρων επιλογών (λίστα ή μπάρες, % της θεμελιώδους ή σε σχέση με μονάδα βάσης) προτείνεται να επιλέγεται ως **Display style** το **List (relative to specified base)** με **Base value** την μονάδα.

**Παρατήρηση 5:** Στην συγκεκριμένη υλοποίηση έχει επιλεγεί μηδενικός χρόνος έναυσης για 5 περιόδους με σταθερό βήμα 0.0001. Στο παράθυρο της FFT ανάλυσης θα εμφανιστούν οι σχετικές πληροφορίες, όπως ο χρόνος δειγματοληψίας (0.0001 s), τα σημεία ανά περίοδο/κύκλο (200), η τιμή της DC συνιστώσας (0), το πλάτος της θεμελιώδους (300), ο λόγος αρμονικής παραμόρφωσης THD (10%), καθώς και το αρμονικό περιεχόμενο όπου εμφανίζεται η τιμή πλάτους της τρίτης αρμονικής (30) καθώς και η διαφορά φάσης της ( $10^\circ$ ).

**Παρατήρηση 6:** παρατηρήστε ότι το simulink αναφέρει τον ορθό αριθμό σημείων ανά κύκλο (περίοδο), καθώς ορίζει εσωτερικά ορθά την περίοδο αποφεύγοντας το σύνθητες ανθρώπινο λάθος με το επιπλέον σημείο.

**Παρατήρηση 7:** παρατηρήστε ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι  $1/0.0001=10000$  και για τον υπολογισμό του THD η ανάλυση Fourier γίνεται μέχρι το μέσο αυτής σε συμφωνία με το θεώρημα δειγματοληψίας που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Παράλληλα ο χρήστης δύναται να θέσει την μέγιστη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα ώστε να εμφανιστούν οι ανάλογες πληροφορίες και στην λίστα.





### 3.4 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- για την γενικότερη λογική λειτουργίας του simulink
- την έννοια των εργαλειοθηκών, των blocks, της αναζήτησής και ορθής επιλογής τους
- των χρησιμοποιούμενων τύπων αρχείων από το simulink
- τους βασικούς κανόνες ονοματοδοσίας αρχείων και blocks
- την εργαλειοθήκη SimPowerSystems
- την σημασία και τον ρόλο του powergui block
- την κατασκευή και εξομοίωση απλών κυκλωμάτων στο simulink
- την χρήση των μετρητικών οργάνων (αμπερόμετρο, βολτόμετρο, πολύμετρο)
- την χρήση του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη
- την χρήση του powergui block για την ανάλυση Fourier σημάτων, τον υπολογισμό αρμονικών φασμάτων πλάτους και γωνίας και του λόγου αρμονικής παραμόρφωσης (THD)



### 4.3 Παράμετροι

Πέρα από τον καθορισμό του snubber κυκλώματος, για τον πλήρη καθορισμό των χαρακτηριστικών μιας διόδου πρέπει να καθοριστούν: η εσωτερική αντίσταση ( $R_{on}$ ) και αυτεπαγωγή ( $L_{on}$ ) αγωγής της διόδου, η πτώση τάσης στα άκρα της ( $V_f$ ) και το αρχικό ρεύμα που διαρρέει την diόδο ( $I_c$ ).

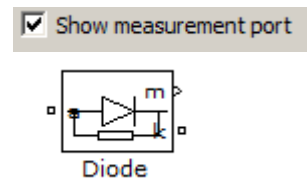
Resistance $R_{on}$ (Ohms) :	0.001
Inductance $L_{on}$ (H) :	0
Forward voltage $V_f$ (V) :	0.8
Initial current $I_c$ (A) :	0

**Παρατήρηση 1:** η diόδος δεν μπορεί να εξομοιωθεί με μηδενική εσωτερική αντίσταση και μηδενική εσωτερική αυτεπαγωγή ταυτόχρονα

**Παρατήρηση 2:** η παράμετρος  $I_c$  βρίσκει εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις όπου επιδιώκεται η αρχικοποίηση των συνθηκών εξομοίωσης. Ως γενική περίπτωση, η παράμετρος αυτή να τίθεται ίση με μηδέν.

### 4.4 Το measurement port (ακροδέκτης μετρήσεων)

Στις ρυθμίσεις του block της diόδου υπάρχει και η επιλογή **Show measurement port**. Αν επιλεγεί τότε στο block της diόδου θα εμφανιστεί μία πρόσθετη έξοδος από την οποία μπορεί να ληφθεί ένα πεπλεγμένο σήμα που θα μεταφέρει το ρεύμα που διέρχεται από την diόδο και την τάση στα άκρα της



### 4.5 Αλγόριθμοι επίλυσης

Η επιλογή αλγόριθμου επίλυσης σχετίζεται με την ταχύτητα αλλά και την ορθότητα της εξομοίωσης και η βέλτιστη επιλογή έχει να κάνει με το κάθε κύκλωμα και ουσιαστικά με την μορφή των διαφορικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν. Στην περίπτωση των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος, αν επιλέγεται συνεχής επίλυση (continuous), συνίσταται να επιλέγονται κάποιοι από τους δύσκαμπτους αλγόριθμους (π.χ. ode23t).

### 4.6 Ανορθωτές

Ανόρθωση ονομάζεται η μετατροπή εναλλασσόμενου σε συνεχούς (AC σε DC). Ανορθωτές μπορούν πραγματοποιηθούν με διαφορετικούς ημιαγωγούς. Για την αξιολόγηση των ανορθωτών χρησιμοποιούνται συνήθως τα παρακάτω μεγέθη:

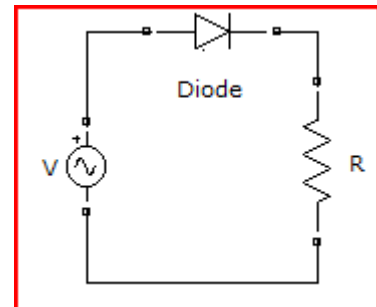
1. η μέση τιμή της τάσης εξόδου  $\overline{V_d}$  ή  $V_{avg}$  ή  $V_{dc}$
2. η RMS τιμή της τάσης εξόδου  $V_d$  ή  $V_{rms}$
3. η μέση τιμή του ρεύματος στην έξοδο (στο φορτίο)  $\overline{I_d}$  ή  $I_{avg}$  ή  $I_{dc}$
4. η RMS τιμή του ρεύματος στην έξοδο  $I_d$  ή  $I_{rms}$
5. η dc ισχύς εξόδου  $P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc} = \overline{V_d} \cdot \overline{I_d}$
6. η ac ισχύς εξόδου  $P_{ac} = V_{rms} \cdot I_{rms} = V_d \cdot I_d$
7. η απόδοση (efficiency)  $n = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$

8. ο συντελεστής μορφής (form factor)  $FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_d}{V_d}$
9. ο συντελεστής κυμάτωσης (ripple factor)  $RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1}$ ,  
 όπου  $V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2} = \sqrt{V_d^2 - \bar{V}_d^2}$
10. ο συντελεστής χρησιμοποίησης μετασχηματιστή (transformer utilization factor)  $TUF = \frac{P_{dc}}{V_s \cdot I_s}$ ,  
 όπου  $V_s$  και  $I_s$  οι RMS τιμές της τάσης και έντασης στο δευτερεύον του Μ/Σ που χρησιμοποιείται (αν χρησιμοποιείται) στην είσοδο του ανορθωτή
11. ο συντελεστής πλάτους (crest factor)  $CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s}$ ,  
 όπου  $I_s$  το ρεύμα εισόδου.
12. ο πραγματικός συντελεστής ισχύος  $pf_{true}$
13. ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης THD

**Παρατήρηση 1:** από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι δεν ακολουθείται από όλα τα εγχειρίδια και όλους τους συγγραφείς ο ίδιος συμβολισμός για τα διάφορα μεγέθη. Αναφέρονται τα συνηθέστερα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν είναι πιθανό να βρεθούν και άλλα σε άλλα συγγράμματα

#### 4.6.1 Ανόρθωση μισού κύματος (ημιανόρθωση), RMS και μέση τιμή

Με βάση όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να είναι σε θέση να κατασκευάσει ένα απλό κύκλωμα όπως αυτό του σχήματος και να εισάγει τα κατάλληλα όργανα για να μετρήσει την μέση και την ενεργό τιμή της τάσης στην αντίσταση R. Προτεινόμενες τιμές:  
 $V=100/\sqrt{2}$  V,  $V_f=0$ ,  $R_{on}=0.00001$  Ω,  $L_{on}=0$  H,  $I_c=0$  A,  $R_s=\text{inf}$  Ω,  $C_s=0$  F, διάρκεια εξομοίωσης: 0.02 s



**Παρατήρηση 1:** για την μέση τιμή αναζητήστε το block με την ονομασία **mean value** ή απλά **mean** (ανάλογα με την έκδοση του MATLAB). Στις ρυθμίσεις του block θα πρέπει να ορισθεί ορθά η συχνότητα (ή η περίοδος, ανάλογα με το block)

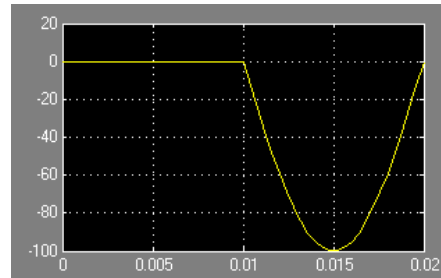
**Παρατήρηση 2:** θα πρέπει η ενεργός τιμή στην αντίσταση να είναι  $V_{Rms}=V_o/2$  ενώ η μέση τιμή να είναι ίση με  $V_o/\pi$ .

**Παρατήρηση 3:** αν έχουν χρησιμοποιηθεί οι προτεινόμενες τιμές τότε θα πρέπει να 50 V η RMS τάση και 31.83 η μέση τάση στο φορτίο

**Παρατήρηση 4:** δοκιμάστε να τρέξετε την ίδια εξομοίωση αυτή την φορά με την παρουσία snubber με τις τυπικές τιμές που δίνει το simulink ( $R=500$  Ω,  $C_s=250 \cdot 10^{-9}$  F)

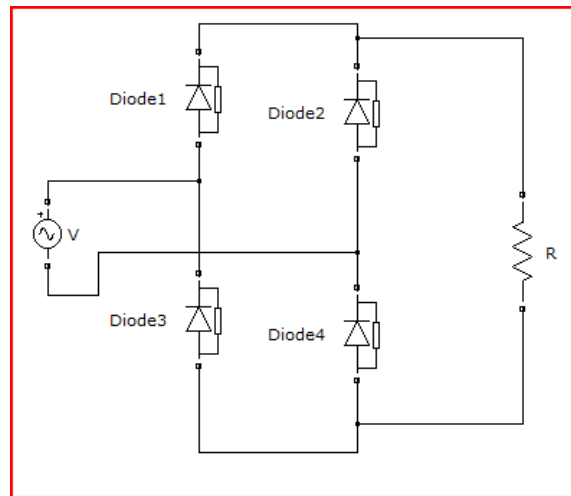
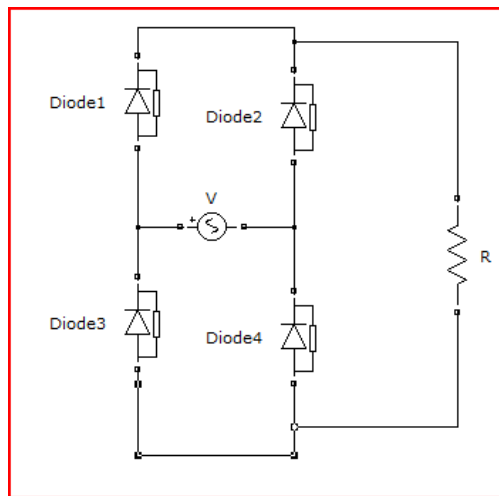
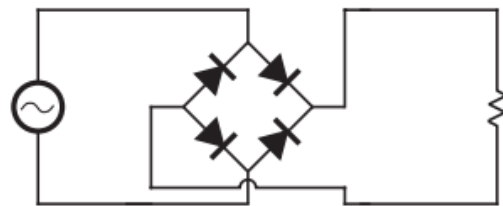
### 4.6.2 Ανόρθωση μισού κύματος (ημιανόρθωση), τάση στα άκρα της διόδου

Συνεχίζοντας το προηγούμενο παράδειγμα, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η τάση στα άκρα της διόδου. Στην περίπτωση που η διόδος άγει τότε ουσιαστικά υπάρχει βραχυκύκλωμα και η τάση στα άκρα της είναι μηδενική. Αντίθετα όταν η διόδος δεν άγει τότε η τάση της πηγής εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου.



### 4.6.3 Ανόρθωση πλήρους κύματος με γέφυρα

Στο σχήμα απεικονίζεται η γνωστή συνδεσμολογία πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα. Δεδομένου όμως ότι η εισαγωγή στοιχείων με κλίση όπως είναι εδώ οι διόδοι δεν είναι δυνατή στο simulink, θα πρέπει να ακολουθηθεί μία από τις δύο συνδεσμολογίες που απεικονίζονται παρακάτω:



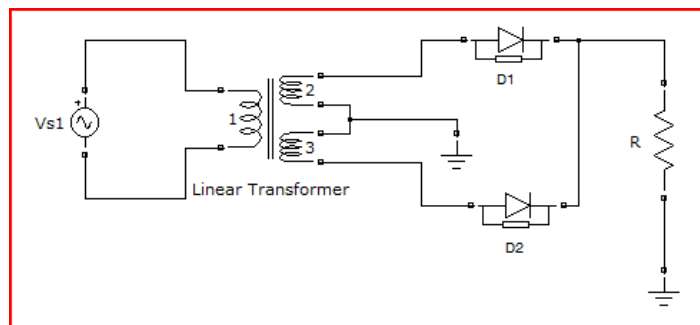
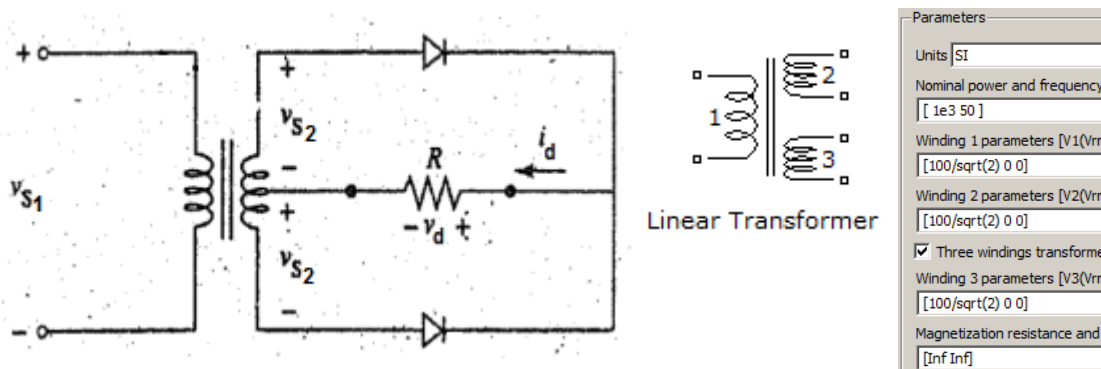
**Παρατήρηση 1:** να γίνει η υλοποίηση του ανορθωτή γέφυρας και να υπολογισθεί η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο. Να ελεγχθεί αν ισχύει ότι ισούται με  $2 \cdot V_0 / \pi$  (για τις προτεινόμενες τιμές θα δώσει  $V_{R_{mean}} = 63.66 \text{ V}$ )

**Παρατήρηση 2:** για να γίνει η εξομοίωση πρέπει να συμπεριληφθεί snubber κύκλωμα σε κάθε διόδο. Χρησιμοποιήστε τις default τιμές.

**Παρατήρηση 3:** προσπαθήστε να συμπεριλάβετε και το νέο κύκλωμα σε αυτό το μοντέλο (χωρίς να σβήσετε το προηγούμενο)

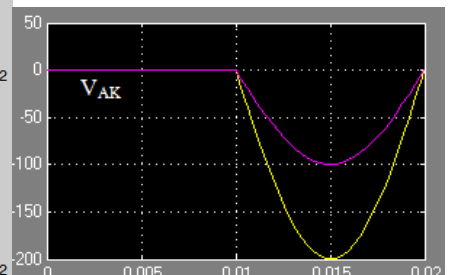
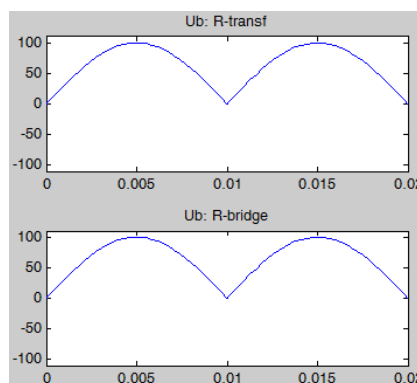
#### 4.6.4 Ανόρθωση πλήρους κύματος με χρήση M/Σ

Ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθεί η ανόρθωση πλήρους κύματος είναι με την χρήση M/Σ μεσαίας λήξης, όπως φαίνεται στο σχήμα. Για την μοντελοποίηση ενός ιδανικού M/Σ στο simulink συνιστάται η επιλογή του block **Linear Transformer** (γραμμικός M/Σ) ενώ για να προσεγγιστεί η ιδανική λειτουργία οι επαγωγές των πηνίων πρέπει να τεθούν ίσες με το μηδέν και μαγνητικές αντιστάσεις άπειρες (inf).



**Παρατήρηση 1:**  
Κατασκευάστε έναν τέτοιο ανορθωτή με ίδια στοιχεία με τον ανορθωτή γέφυρας. Τι τιμή πρέπει να έχει ο λόγος M/Σ ώστε να προκύψει ίδια τάση και στις δύο περιπτώσεις;

**Παρατήρηση 3:**  
Συγκρίνετε την μέγιστη ανάστροφη τάση που δέχεται μία διάοδος όταν είναι OFF στην μία και στην άλλη περίπτωση



#### 4.6.5 Ωμικό φορτίο με πηγή τάσης $E_d$

Αν στο φορτίο συνδεθεί μια DC πηγή με αντίθετη πολικότητα και τιμή  $E_d$  τότε ουσιαστικά γίνεται φόρτιση της μπαταρίας αυτής. Η τάση στα άκρα της διόδου

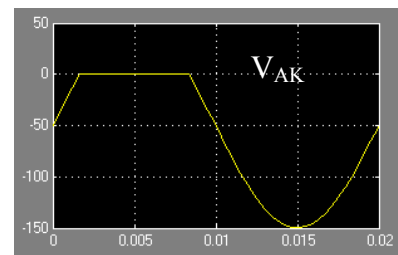
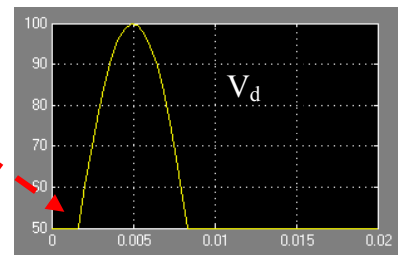
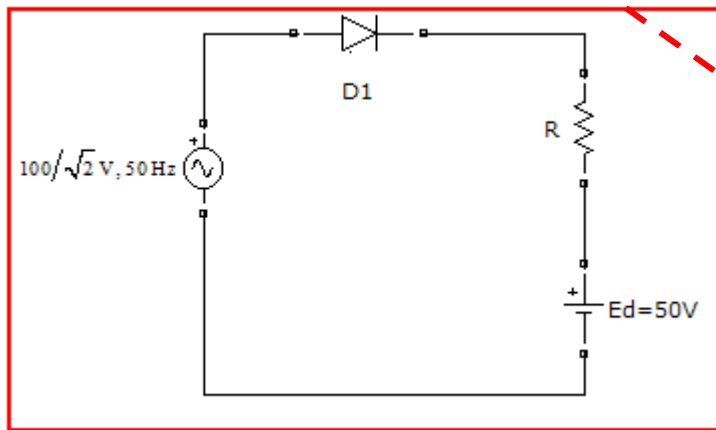
μετατοπίζεται κατά  $E_d$  ( $V_{AK}=v_s(t)-E_d$ ) προς τα κάτω και άρα για να άγει η διάδος πρέπει η τάση της AC πηγής να υπερβεί την τάση της DC πηγής, δηλαδή:

$$v_s(t) > E_d \Rightarrow V_{sm} \sin(\omega t) > E_d \Rightarrow \sin(\omega t) > \frac{E_d}{V_{sm}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin^{-1}\left(\frac{E_d}{V_{sm}}\right) \leq \omega t \leq 180 - \sin^{-1}\left(\frac{E_d}{V_{sm}}\right)$$

**Παρατήρηση 1:** Η μέγιστη ανάστροφη τάση (Peak Inverse Voltage ή PIV) που θα εφαρμοστεί στα άκρα της διόδου θα είναι  $PIV=-V_{sm}- E_d$ .

**Παρατήρηση 2:** Αν τεθούν οι αριθμητικές τιμές  $V_{sm}=100$  V και  $E_d=50$  V τότε η διάδος θα άγει από τις 30 μοίρες έως τις 180-30. Σε διαστήματα χρόνου οι 30 μοίρες αντιστοιχούν σε 0.0016666666666667 sec.



**Παρατήρηση 3:** Υπολογίστε την μέση τιμή του ρεύματος. Ελέγξτε αν ταυτίζεται με την αναμενόμενη  $I_{dc} = \frac{1}{2\pi R} (2V_m \cos a + 2 \cdot E \cdot a - \pi \cdot E)$  (η  $a$  προφανώς σε ακτίνια)

#### 4.6.6 Ωμικό επαγωγικό φορτίο

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό επαγωγικό, τότε το πηνίο θα δράσει σαν παθητικό στοιχείο για όσο το ρεύμα αυξάνεται. Μόλις το ρεύμα αρχίσει να μειώνεται τότε το πηνίο, αντιδρώντας στην μεταβολή σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, θα δρα σαν ενεργητικό στοιχείο παρέχοντας την αποθηκευμένη ενέργεια. Αυτό θα σημαίνει ότι η διάδος θα περάσει σε κατάσταση μη αγωγής σε αργότερο χρόνο (μέχρι να εκφορτιστεί το πηνίο). Το ρεύμα στην περίπτωση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$\Rightarrow i_d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_s}{|Z|} \cdot [\sin(\omega t - \phi) + \sin(\phi) \cdot e^{\frac{-R}{\omega L}\omega t}]$$

$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$

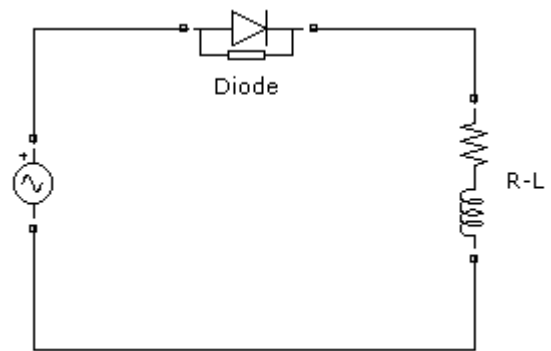
και συνεπώς η μορφή του ρεύματος (αλλά και η γωνία σβέσης) εξαρτώνται από τις τιμές των R, L

Αυτό επίσης σημαίνει ότι η επιλογή αλγορίθμου και βήματος θα έχει πολύ μεγαλύτερη σημασία σε αυτή την περίπτωση



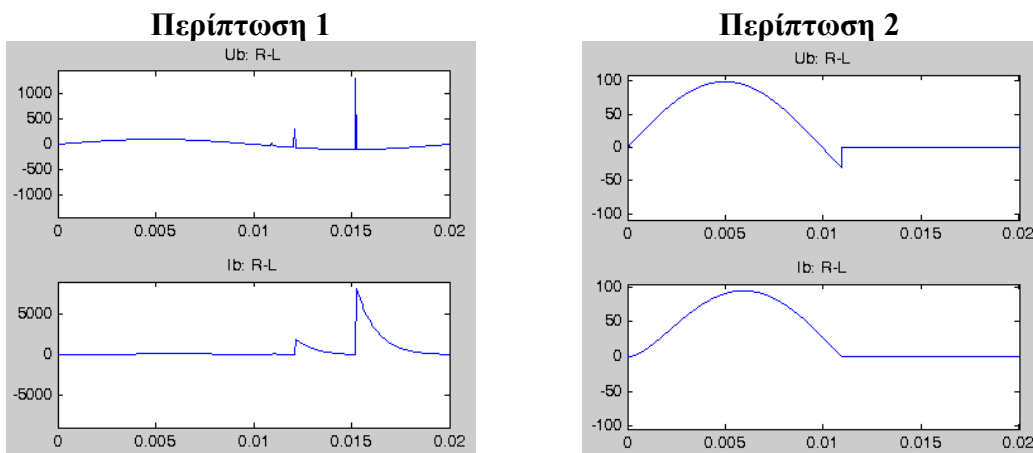
**Παράδειγμα**

Κατασκευάστε έναν απλό ανορθωτή μισού κύματος με τιμές φορτίου τις προκαθορισμένες από το simulink (R=1 Ω, L=0.001 H), και Vspeak=100 V (για το snubber επίσης χρησιμοποιήστε τις default τιμές). Συμπεριλάβετε κατάλληλα μετρητικά όργανα ώστε να πάρετε τις κυματομορφές τις τάσης και του ρεύματος στο φορτίο.



**Περίπτωση 1:** με σταθερό χρονικό βήμα ίσο με το αντίστοιχο μίας μοίρας (0.02/360)

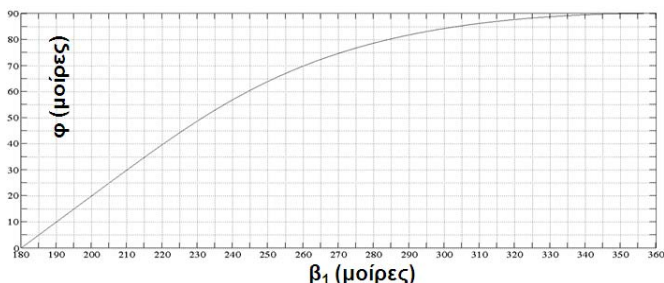
**Περίπτωση 2:** με σταθερό χρονικό βήμα ίσο με το 1/100 του προηγούμενου (0.0002/360)



**Παρατήρηση 1:** για τον υπολογισμό της γωνίας σβέσης χρησιμοποιούνται επαναληπτικοί αλγόριθμοι ώστε να επιλύσουν την:

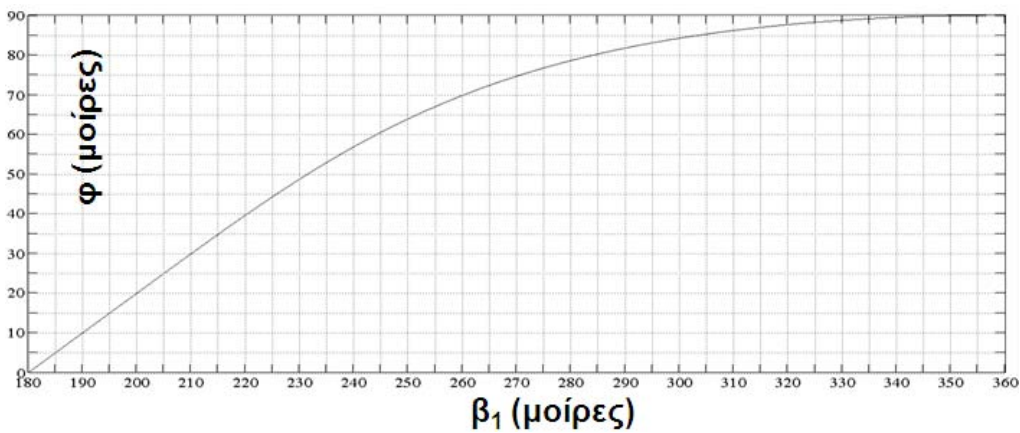
$$\sin(\beta_1 - \varphi) + \sin(\varphi) \cdot e^{-\frac{R}{\omega L} \beta_1} = 0$$

Εναλλακτικά (συνήθως) χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικά γραφήματα

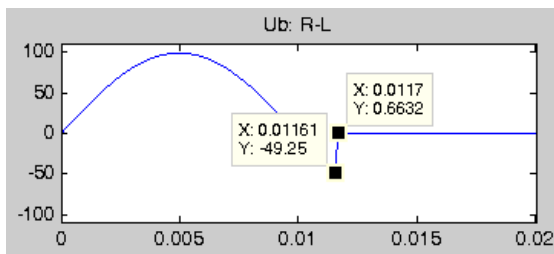


**Παρατήρηση 2:** ας εξετάσουμε το παρακάτω γράφημα και ας υποθέσουμε κύκλωμα με R=1 Ω, φ=30°=π/6, => tanφ= 0.5774 => ωL=0.5774R => L= 0.0018 H. Από το γράφημα περιμένω να βρω β<sub>1</sub>=210°.





Εκτελώ την εξομοίωση με αυτές τις τιμές και λαμβάνω:



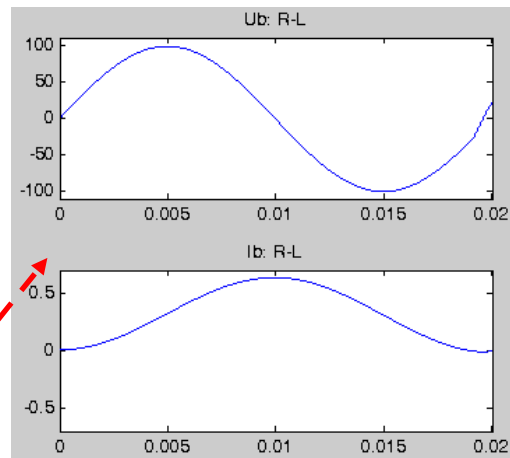
$$0.01161 \cdot 360 / 0.02 = 208.98 \approx 209^\circ$$

$$0.0117 \cdot 360 / 0.02 \approx 210.6^\circ$$

#### 4.6.7 Μεγάλη επαγωγή ( $\omega L \gg R$ ), άπειρο πηνίο

Σε περίπτωση που έχω μια πολύ μεγάλη επαγωγή (συγκριτικά με την αντίσταση) (δηλαδή η  $\phi$  προσεγγίζει τις  $90^\circ$ ) η γωνία σβέσης θα προσεγγίζει τις  $360^\circ$ , δηλαδή θα έχω **συνεχή αγωγή**.

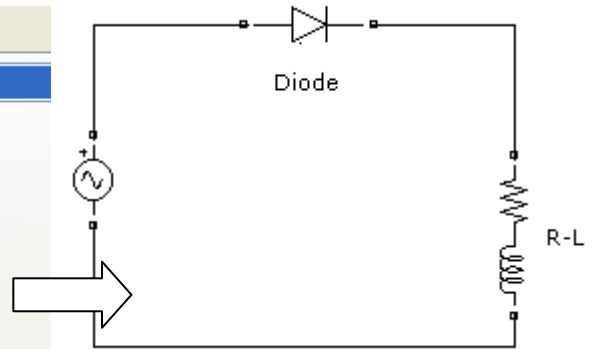
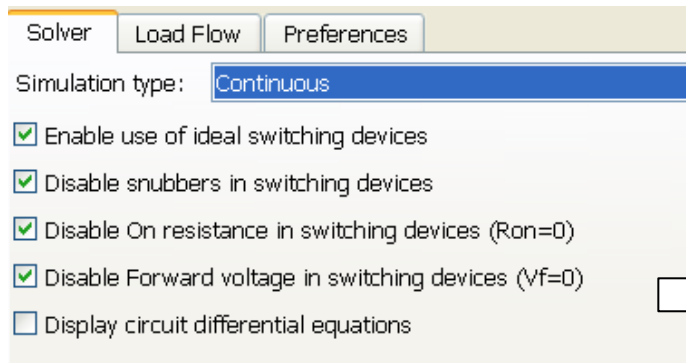
$$R=1 \Omega, L=1 \text{ H}$$



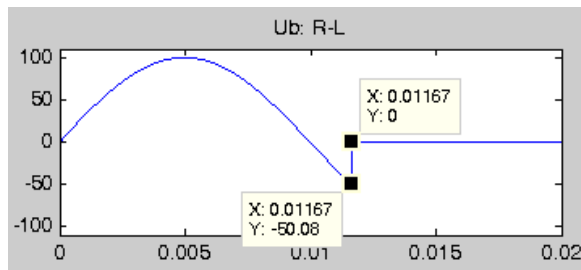
#### 4.6.8 Επίλυση με χρήση ιδανικών συνθηκών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε περίπτωση που πρέπει να συνδεθεί μία διάδος σε σειρά με μια επαγωγή τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί snubber για να εκτελεσθεί η εξομοίωση. Η χρήση όμως του snubber κυκλώματος αναπόφευκτα θα έχει κάποια επιρροή στην εξομοίωση. Πως θα εξομοιωθεί η ιδανική κατάσταση;

Το simulink είναι βέβαια κυρίως προσανατολισμένο σε ρεαλιστικά συστήματα (όχι ιδανικά). Προσφέρει όμως μέσα στο powergui την επιλογή να θεωρηθούν οι ηλεκτρονικοί διακόπτες ιδανικοί (**configure parameters**). Όταν χρησιμοποιηθούν τέτοιες ρυθμίσεις θα αλλάξει ανάλογα και το σύμβολο της διόδου



Ας επαναλάβουμε την περίπτωση που  $\varphi=30^\circ=\pi/6$  αλλά αυτή την φορά με μεγαλύτερη ακρίβεια:  $L=\tan(\pi/6)*1/(100*\pi)$  Η με **variable step solver** και μάλιστα τον ode23t και **max step size= 0.00002/360** και ιδανικές συνθήκες



$$\beta_1 = 0.01164 \cdot 360 / 0.02 = 210.06$$

#### 4.7 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- το block της διόδου στο SimPowerSystems και τις ιδιότητές του
- τα κυκλώματα προστασίας (snubber)
- την εξομοίωση κυκλωμάτων ανορθωτών μισού και πλήρους κύματος με χρήση διόδων
- τις κυματομορφές στα άκρα των φορτίων και των διόδων σε κάθε κύκλωμα
- την εξομοίωση κυκλωμάτων με DC πηγή στο φορτίο (φόρτιση μπαταριών)
- την περίπτωση ωμικών επαγωγικών φορτίων σε ανορθωτές
- την σημασία των αλγορίθμων επίλυσης και του χρονικού βήματος που χρησιμοποιούνται για την εξομοίωση
- την συνεχή αγωγή σε περίπτωση μεγάλης επαγωγής
- την επίλυση με χρήση ιδανικών συνθηκών μέσω του powergui

## ΕΝΟΤΗΤΑ 5: Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος (ενός παλμού)

### 5.1 Ελεγχόμενοι ανορθωτές (controlled rectifiers)

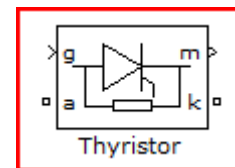
Με τον όρο αυτό εννοούνται οι ανορθωτικές διατάξεις που χρησιμοποιούν ελεγχόμενα (ή ημι-ελεγχόμενα) ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία. Στην παρούσα και στις επόμενες ενότητες θα χρησιμοποιηθούν θυρίστορ (Silicon Controlled Rectifier ή SCR) ως διακοπτικά στοιχεία.

### 5.2 Το θυρίστορ (thyristor) – Αρχή λειτουργίας

Ένα θυρίστορ έχει τρεις ακροδέκτες: την άνοδο (A), την κάθοδο (K) και την πύλη (G). Για να άγει ένα θυρίστορ πρέπει να είναι ορθά πολωμένο και να δεχθεί κατάλληλο παλμό στην πύλη. Το θυρίστορ θα συνεχίσει να άγει για όσο το ρεύμα είναι μεγαλύτερο από μια οριακή τιμή (**ρεύμα συγκράτησης**). Η κατάλληλη μορφή του παλμού έναυσης σχετίζεται με την μορφή του φορτίου. Όταν το θυρίστορ δεν άγει, διέρχεται κάποιο μικρό ρεύμα διαρροής (ορθό ή ανάστροφο ανάλογα την πολικότητα). Όταν άγει, υπάρχει μια πτώση τάσης στα άκρα του που σχετίζεται με την εσωτερική του αντίσταση. Άσκηση υπερβολικής τάσης (μεγαλύτερης της **τάσης κατάρρευσης**) στα άκρα του θυρίστορ (ορθή ή ανάστροφη) μπορεί να προκαλέσει λανθασμένη λειτουργία ή και καταστροφή του. Το ίδιο ισχύει για απότομη αύξηση του ρυθμού μεταβολής της τάσης και του ρεύματος. Προφανώς, αν υποθεθεί ιδανικό θυρίστορ τότε το ρεύμα διαρροής, η εσωτερική αντίσταση και το ρεύμα συγκράτησης θα είναι μηδέν, ενώ δεν υφίστανται τάσεις κατάρρευσης (άπειρες)

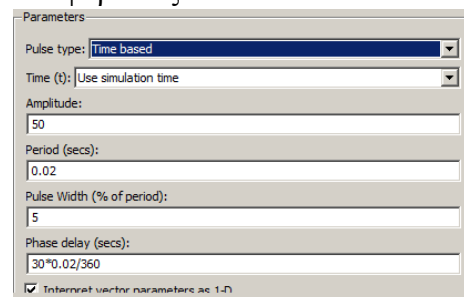
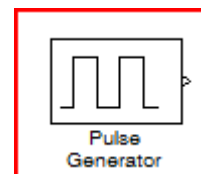
### 5.3 Το thyristor block στο simulink

Στο simulink συμπεριλαμβάνονται διάφορα thyristor blocks με διαφορετικό βαθμό ρεαλισμού στην εξομοίωση (π.χ. το detailed thyristor block παρέχει την δυνατότητα καθορισμού του ρεύματος συγκράτησης). Για τις εφαρμογές που θα εξεταστούν, αρκεί η χρήση του απλού thyristor block. Στο block φαίνονται οι 3 βασικοί ακροδέκτες: άνοδος (a), κάθοδος (k) και πύλη (g). Όπως και το block της διόδου που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, το block του θυρίστορ συμπεριλαμβάνει και αυτό ένα κύκλωμα προστασίας (snubber) και μια έξοδο μετρήσεων (m)



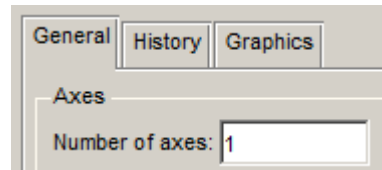
### 5.4 Εισαγωγή παλμού με χρήση του pulse generator block

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να παραχθεί ο παλμός πυροδότησης. Για λόγους ευκολίας, στα επόμενα μοντέλα θα χρησιμοποιηθεί απλά ένα block γεννήτριας παλμών (pulse generator). Όσον αφορά τις ρυθμίσεις του, αυτές είναι: το πλάτος του παλμού, η διάρκειά του και η γωνία έναυσης. Το πλάτος και η διάρκεια του παλμού έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την εξομοίωση ανορθωτών με μη ωμικό φορτίο. Σε κάθε περίπτωση η γωνία έναυσης θα δηλωθεί στο παράθυρο phase delay σε secs ( $\text{sec}=0.02 \cdot \text{deg}/360$ ). Ο παλμός να παράγεται με βάση τον χρόνο εξομοίωσης (επιλογή: **Use simulation time**).



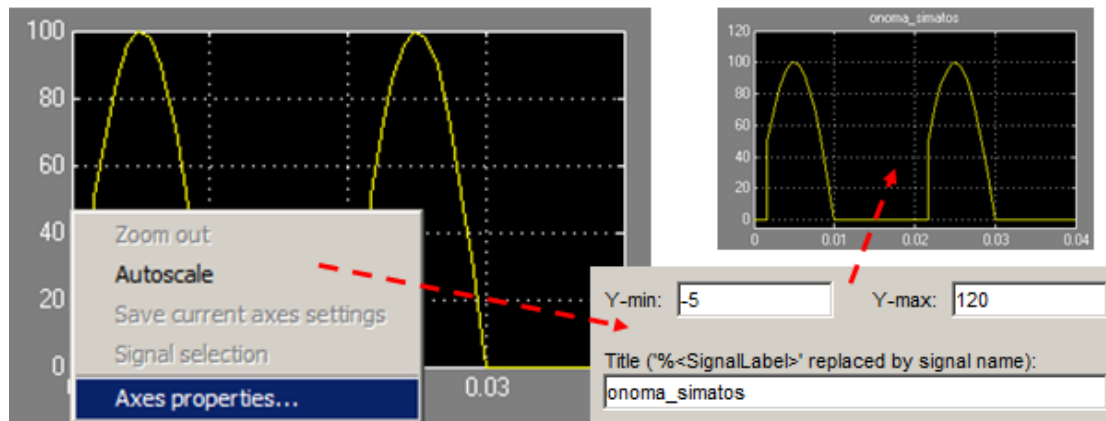
### 5.5 Απεικονίζοντας περισσότερα γραφήματα στο ίδιο scope

Στις ιδιότητες κάθε scope block υπάρχει η επιλογή **number of axes** η οποία έχει προκαθορισμένη τιμή (default) την μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι το scope θα δείξει ένα διάγραμμα (ένα σύστημα αξόνων). Στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι να κατευθυνθούν περισσότερα του ενός σήματα στο ίδιο scope, αλλά να σχεδιαστεί το καθένα στο δικό του σύστημα αξόνων (δλδ στο δικό του διάγραμμα) πρέπει να μεταβληθεί κατάλληλα η συγκεκριμένη επιλογή.

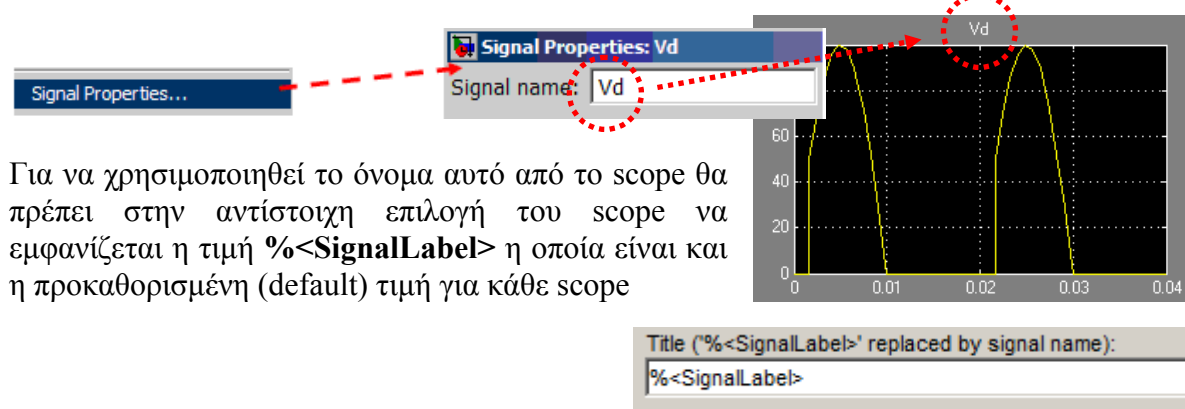


### 5.6 Δίνοντας ονόματα στα σήματα και προσαρμόζοντας τους άξονες στο scope

Για να προσαρμοστούν τα όρια των αξόνων στο scope αρκεί να γίνει δεξί κλικ στον άξονα που ενδιαφέρει και να τεθούν τα επιθυμητά όρια. Στο ίδιο παράθυρο μπορεί να τεθεί και η ονομασία του σήματος όπως αυτή θα εμφανίζεται πάνω από το γράφημά του.



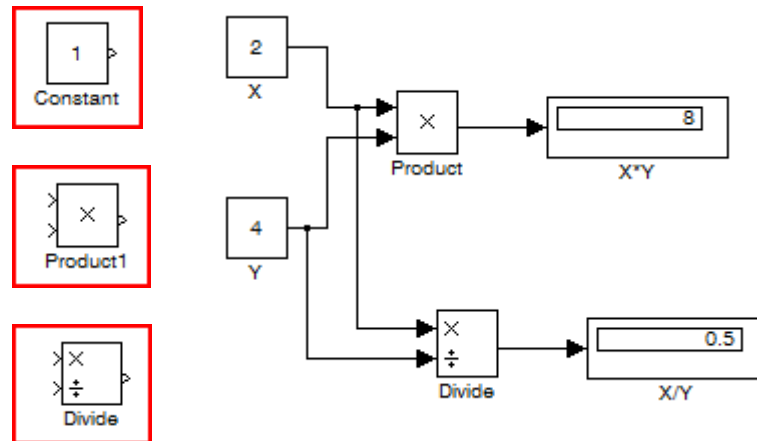
Αυτό θα πρέπει να επαναληφθεί σε κάθε scope που πιθανώς εμφανίζεται το συγκεκριμένο σήμα. Για να αποφευχθεί η επαναληπτική διαδικασία, είναι δυνατόν να δοθεί ονομασία στο σήμα αυτό καθαυτό η οποία θα μεταφέρεται σε κάθε scope. Για να γίνει αυτό αρκεί να γίνει **δεξί κλικ πάνω στην γραμμή που μεταφέρει το σήμα** στο κύκλωμά και να επιλεγεί η επιλογή **Signal Properties**. Στο παράθυρο ρυθμίσεων που θα εμφανιστεί μπορεί να τεθεί το όνομα του σήματος (Signal name)



Για να χρησιμοποιηθεί το όνομα αυτό από το scope θα πρέπει στην αντίστοιχη επιλογή του scope να εμφανίζεται η τιμή **%<SignalLabel>** η οποία είναι και η προκαθορισμένη (default) τιμή για κάθε scope

### 5.7 Μαθηματικές πράξεις

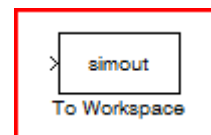
Σε προηγούμενη ενότητα έχει αναφερθεί πως με χρήση των ανάλογων blocks μπορεί να υπολογισθεί η RMS και η μέση τιμή ενός σήματος. Αν το ζητούμενο είναι π.χ. ο πολλαπλασιασμός δύο σημάτων (π.χ.  $P_{dc}=V_{dc} \cdot I_{dc}$ ,  $n=P_{dc}/P_{ac}$ ) τότε αυτό μπορεί να γίνει είτε μεταφέροντας τις τιμές/μεταβλητές στην MATLAB είτε προσθέτοντας τα αντίστοιχα blocks στο simulink. Για τον πολλαπλασιασμό χρησιμοποιείται το block **product** ενώ για την διαίρεση το block **Divide**. Στο παράδειγμα έχει χρησιμοποιηθεί και το block **constant** για να εισαχθούν οι τιμές των σταθερών.



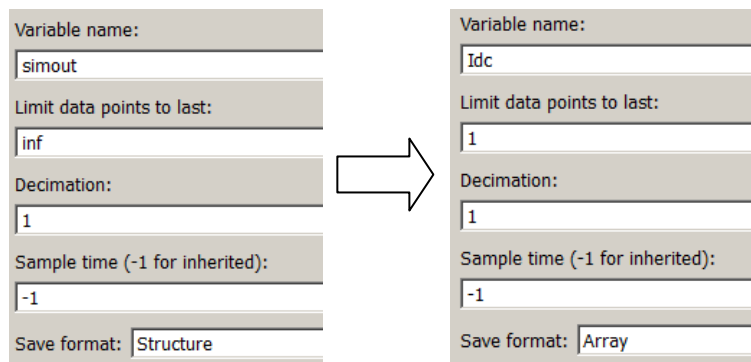
Για μεγαλύτερες μαθηματικές παραστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί το **Divide** block και να καθοριστεί ο αριθμός των εισόδων και το αν θα βρίσκονται στον αριθμητή ή στον παρανομαστή του κλάσματος.

### 5.8 Μεταφορά τιμών και σημάτων στην MATLAB

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι πιο εύχρηστη η μεταφορά των σημάτων στην MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιείται το **To Workspace** block.



Στις ιδιότητες του block είναι δυνατόν να καθοριστεί το όνομα της μεταβλητής, το πόσα από τα τελευταία σημεία θα αποθηκευθούν καθώς και ο τύπος της μεταβλητής. Χωρίς να αναλυθούν περισσότερο οι επιλογές, στην περίπτωση που η μεταβλητή είναι ένα μέγεθος όπως π.χ. η μέση ή η RMS τιμή προφανώς θα πρέπει να αποθηκευθεί ένα μόνο σημείο (το τελευταίο) ενώ ο τύπος θα πρέπει να είναι array

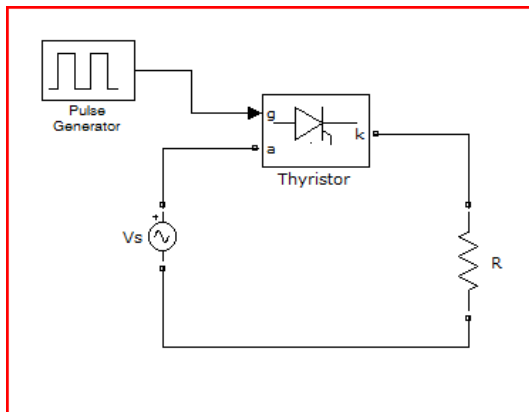


### 5.9.1 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο

Συχνά χρησιμοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων παλμών ανά περίοδο για να χαρακτηριστεί ένα ανορθωτικό κύκλωμα με θυρίστορ. Κάθε θυρίστορ απαιτεί και έναν παλμό έναυσης έτσι ο αριθμός των παλμών μας δίνει και τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων θυρίστορ. Συνεπώς και το κύκλωμα ανόρθωσης μισού κύματος (ή ημιανόρθωσης) με χρήση θυρίστορ, καλείται και ανορθωτής ενός παλμού. Σημειώνεται ότι η γωνία που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή που δίνεται ο παλμός έναυσης αποκαλείται **γωνία έναυσης** και συμβολίζεται συνήθως με  $\alpha$ .

#### Παράδειγμα

Να σχεδιαστεί ένας ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο και να απεικονισθούν: η τάση στα άκρα του φορτίου, η τάση στα άκρα του θυρίστορ, το ρεύμα στο φορτίο και ο παλμός πυροδότησης (έναυσης). Δίνεται  $V_{speak}=100\text{ V}$ ,  $f=50\text{ Hz}$ ,  $R=2\ \Omega$ , θυρίστορ ιδανικό, γωνία έναυσης  $30^\circ$ , πλάτος παλμού  $50\text{ V}$ . Ελέγξτε την ακρίβεια της εξομοίωσης με βάση τις γνωστές θεωρητικές τιμές τάσεων και ρεύματος.

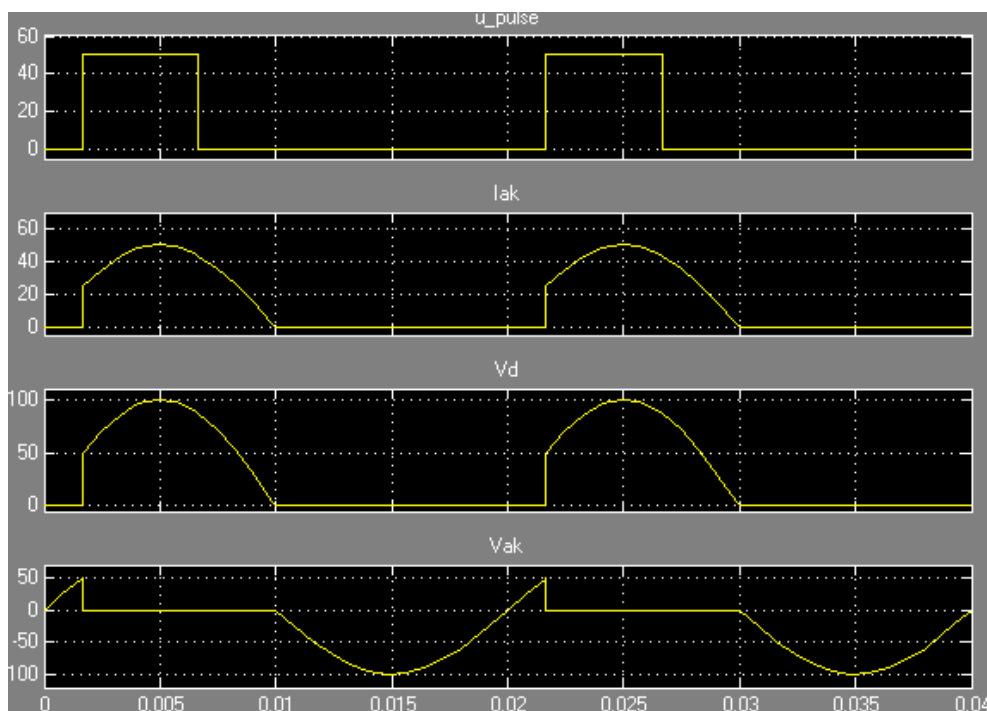


#### ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

$$V_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos \alpha + 1]$$

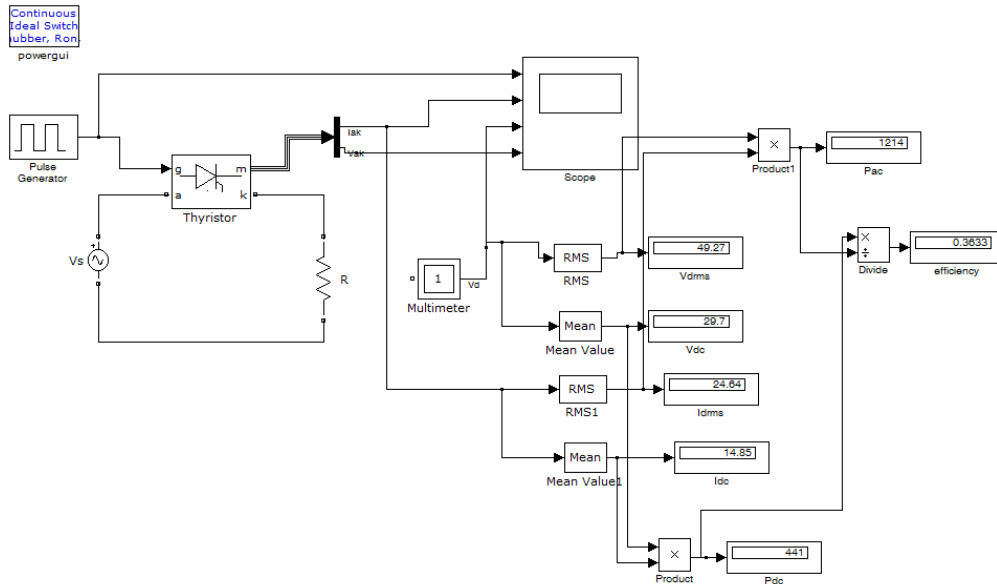
$$I_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1]$$

$$V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha)}{2\pi}}$$



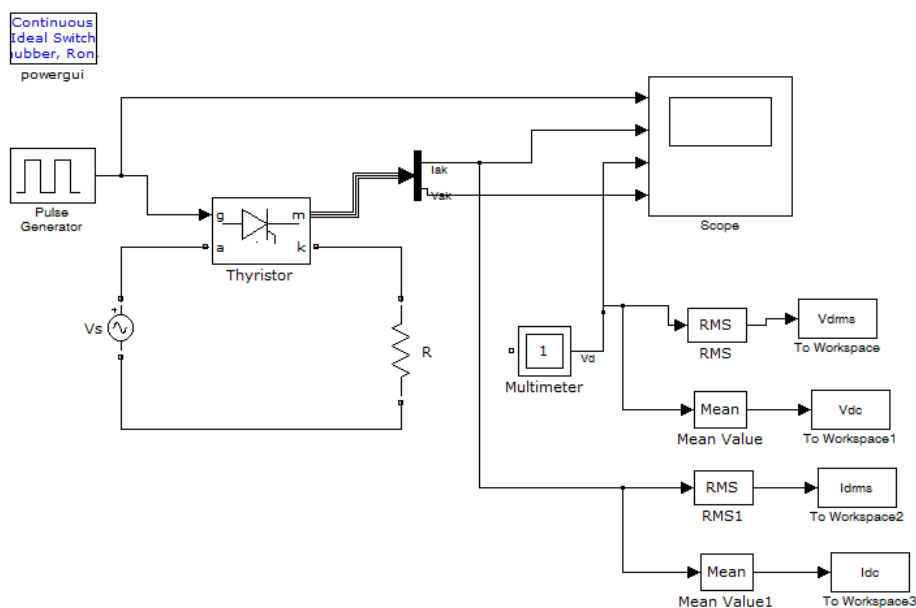
**Παρατήρηση 1:** με χρήση των  $V_{dc}$  και  $V_{ac}$  είναι δυνατή η εύρεση όλων των υπολοίπων μεγεθών ( $P_{dc}$ ,  $P_{ac}$ ,  $\eta$ ,  $FF$ ,  $R_F$  κλπ). Προσπαθήστε να κάνετε τις απαραίτητες μαθηματικές πράξεις στο μοντέλο σας (τουλάχιστον για να βρείτε την απόδοση)

**Παρατήρηση 2:** Ελέγξτε αν ισχύει  $V_{dc}=I_{dc} \cdot R$  και  $V_{rms}=I_{rms} \cdot R$



**Παρατήρηση 3:** στο παραπάνω κύκλωμα το  $I_{AK}$  ταυτίζεται με το  $I_d$  και έτσι έχει χρησιμοποιηθεί η μέτρηση από το measurement port του thyristor block.

**Παρατήρηση 4:** όπως προέκυψε από το προηγούμενο κύκλωμα ο υπολογισμός μαθηματικών πράξεων στο simulink μπορεί να δυσχεράνει αρκετά την κατανόηση του μοντέλου. Αντίθετα μεταφέροντας τις μεταβλητές στο workspace της MATLAB το μοντέλο μπορεί να παραμείνει μικρό και ευκολότερα εποπτεύσιμο.





### 5.9.2 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο

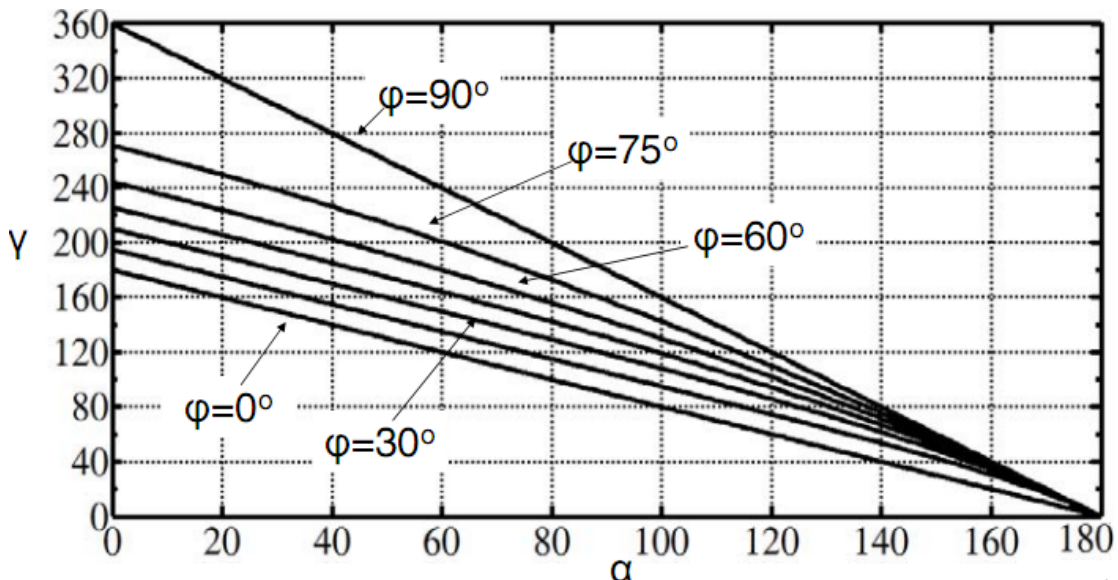
Στην περίπτωση που το φορτίο περιέχει και επαγωγή τότε θα καθυστερήσει η σβέση του θυρίστορ, παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για τους ανορθωτές με διόδους. Η **γωνία σβέσης** συμβολίζεται εδώ με  $\beta_1$ , ενώ ορίζεται και η γωνία  $\beta$  με  $\beta_1 = \pi + \beta$ . Αντίστοιχα ορίζεται και η **γωνία αγωγής**  $\gamma$  με  $\gamma = \beta_1 - \alpha$ . Το ρεύμα στο φορτίο δίνεται από τον τύπο:

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\frac{-R}{\omega L}(\omega t - \alpha)}]$$

και για να βρεθεί η γωνία σβέσης πρέπει να λυθεί (επαναληπτικά) η εξίσωση:

$$\sin(\beta_1 - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{-R}{\omega L}(\beta_1 - \alpha)}$$

Ένα γράφημα που συνδέει την γωνία φάσης με την γωνία αγωγής δίνεται παρακάτω:



**Παρατήρηση 1:** η γωνία αγωγής θα είναι μεγαλύτερη για μικρότερες γωνίες έναυσης και για μεγαλύτερες διαφορές φάσεις

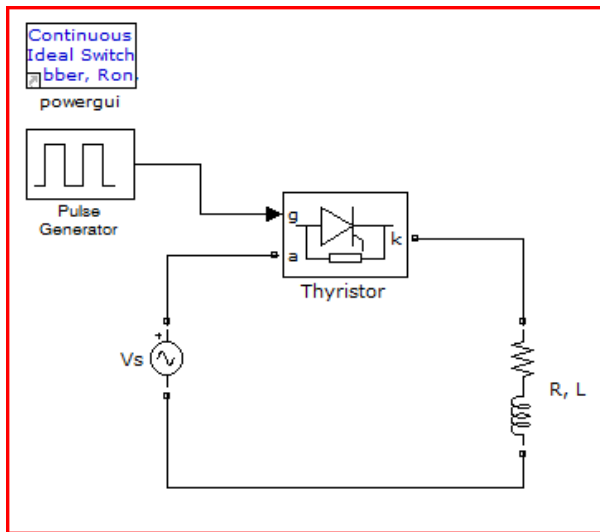
**Παρατήρηση 2:** παρατηρείστε ότι ο μόνος τρόπος για να έχω (οριακά) συνεχή αγωγή είναι να έχω  $\alpha = 0^\circ$  και  $\varphi = 90^\circ$ . Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς το πηνίο ακόμα και σε ιδανική κατάσταση, δεν μπορεί να επιστρέψει παραπάνω ενέργεια ως ενεργητικό στοιχείο, από εκείνη που έχει αποθηκεύσει κατά την χρονική περίοδο που δρούσε ως παθητικό στοιχείο.

#### Παράδειγμα

Να σχεδιαστεί ένας ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και να απεικονισθούν: η τάση στα άκρα του φορτίου, η τάση στα άκρα του θυρίστορ, το ρεύμα στο φορτίο και ο παλμός πυροδότησης (έναυσης). Δίνεται  $V_{speak} = 100$  V,  $f = 50$  Hz,  $R = 2$  Ω,  $L = 0.005$  H, θυρίστορ ιδανικό, γωνία έναυσης  $30^\circ$ , πλάτος παλμού



50 V. Ελέγξτε την ακρίβεια της εξομοίωσης με βάση τις γνωστές θεωρητικές τιμές τάσεων και ρεύματος. (Κρατήστε το προηγούμενο κύκλωμα και μεταβάλλετε απλά το φορτίο)

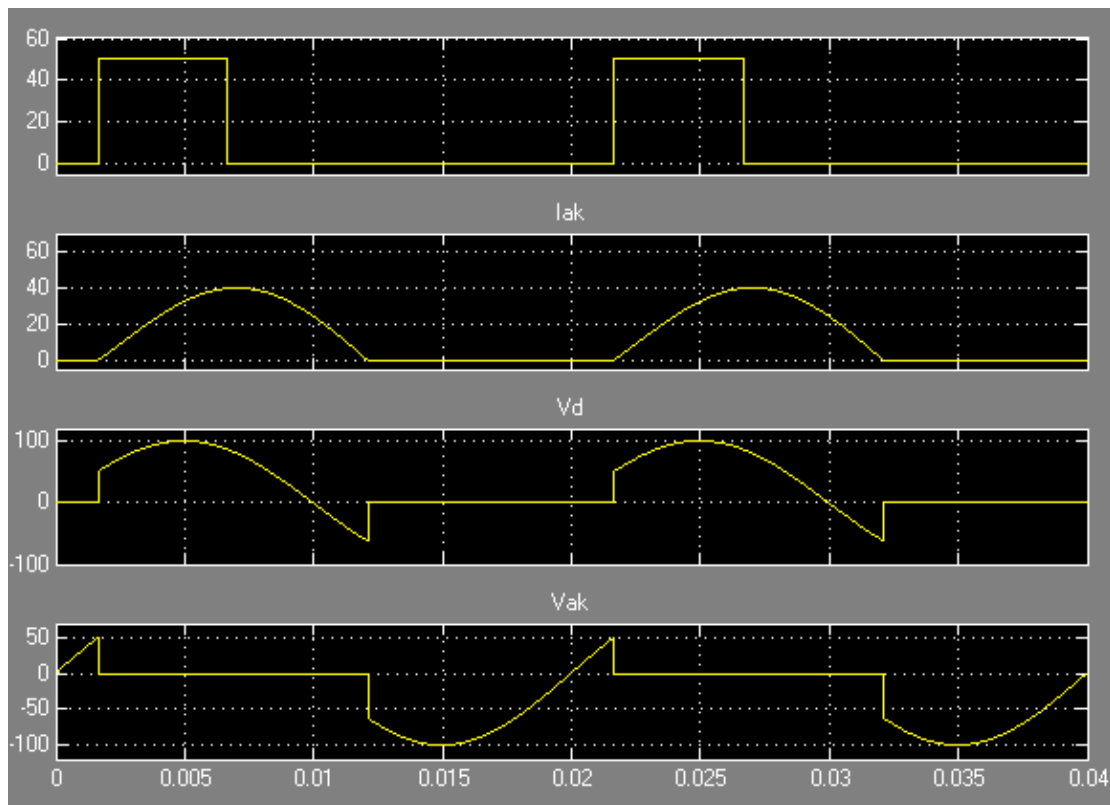


**ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ**

$$I_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} [\cos \alpha - \cos \beta_1]$$

$$V_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos \alpha - \cos \beta_1]$$

$$V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\beta_1 - \alpha + \frac{1}{2} [\sin(2\alpha) + \sin(2\beta_1)]}{2\pi}}$$



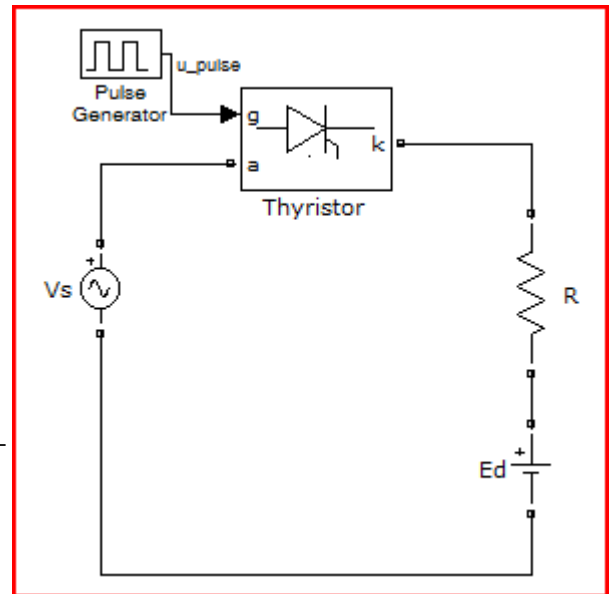
**Παρατήρηση 1:** Ελέγξτε αν ισχύει  $V_{dc} = I_{dc} \cdot R$  και  $V_{rms} = I_{rms} \cdot R$

### 5.9.3 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό φορτίο και DC πηγή

Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελεί ουσιαστικά έναν φορτιστή μπαταρίας. Γενικά ισχύει:  $v_s(t) = v_{AK}(t) + v_R(t) + E_d$ . Όταν το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα ισχύει  $v_{AK}(t) = v_s(t) - E_d$ . Συνεπώς για να ενεργοποιηθεί το θυρίστορ πρέπει:

$$\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 \Leftrightarrow \sin^{-1} \frac{E_d}{V_m} \leq a \leq \pi - \sin^{-1} \frac{E_d}{V_m}$$

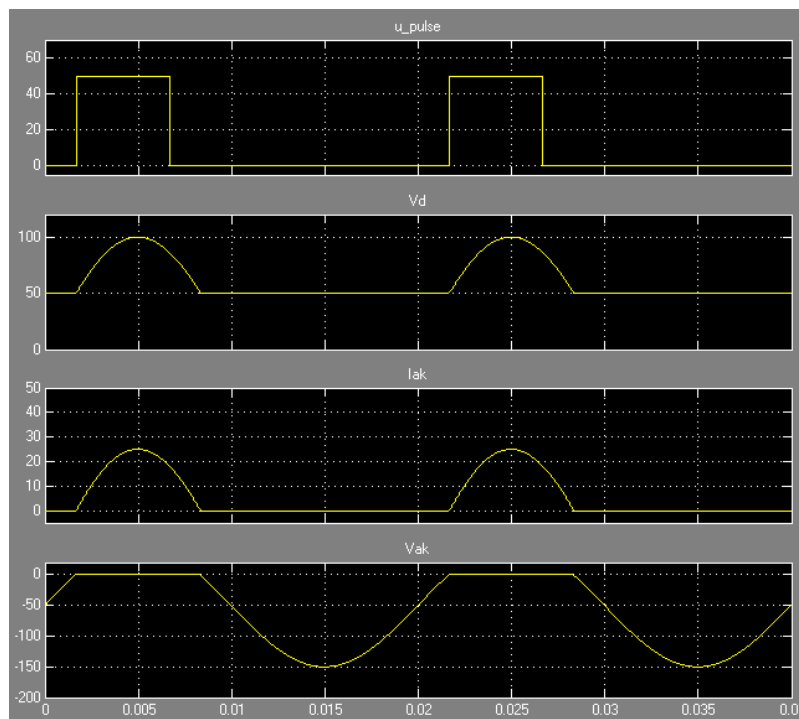
Όταν το θυρίστορ είναι σβηστό (OFF) τότε η τάση στο φορτίο θα είναι ίση με  $E_d$



#### Παράδειγμα

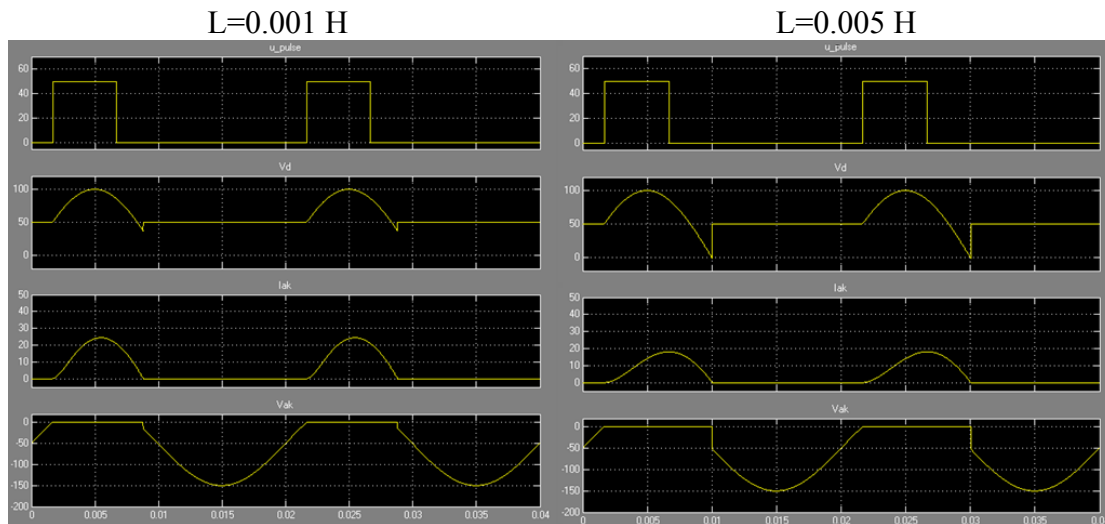
Να σχεδιαστεί ένας ανορθωτής ενός παλμού με φορτίο ωμική αντίσταση και πηγή τάσης και να απεικονισθούν: η τάση στα άκρα του φορτίου, η τάση στα άκρα του θυρίστορ, το ρεύμα στο φορτίο και ο παλμός πυροδότησης (έναυσης). Δίνεται  $V_{speak} = 100 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $R = 2 \ \Omega$ , θυρίστορ ιδανικό, γωνία έναυσης  $30^\circ$ , πλάτος παλμού  $50 \text{ V}$ ,  $E_d = 50 \text{ V}$ . Ελέγξτε την ακρίβεια της εξομοίωσης με βάση τις γνωστές θεωρητικές τιμές τάσεων και ρεύματος. (Κρατήστε το προηγούμενο κύκλωμα και μεταβάλλετε απλά το φορτίο)

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2 \cdot \pi} \cdot [\cos a + 1] + \left[ \frac{2\pi - (\beta_1 - \alpha)}{2\pi} \right] \cdot E_d, \quad I_{dc} = \frac{V_{dc} - E_d}{R}$$



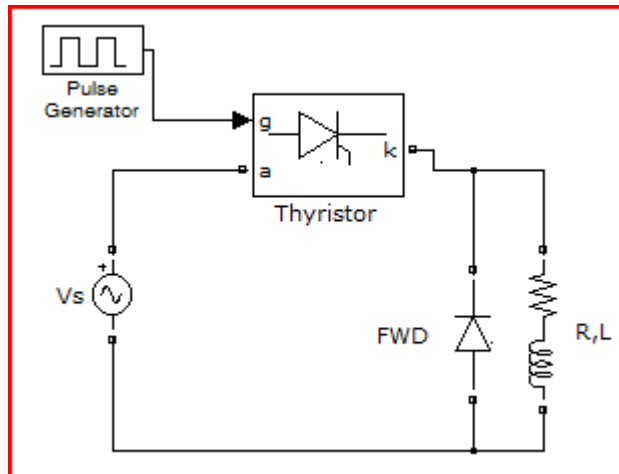
### 5.9.3 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και DC πηγή

Η λειτουργία αυτού του κυκλώματος πρέπει να είναι προφανής με τα όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα. Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του, απλά μεταβάλλετε το R block από το προηγούμενο μοντέλο ώστε να γίνει R-L και δώστε  $L=0.001$  H και  $L=0.005$  H



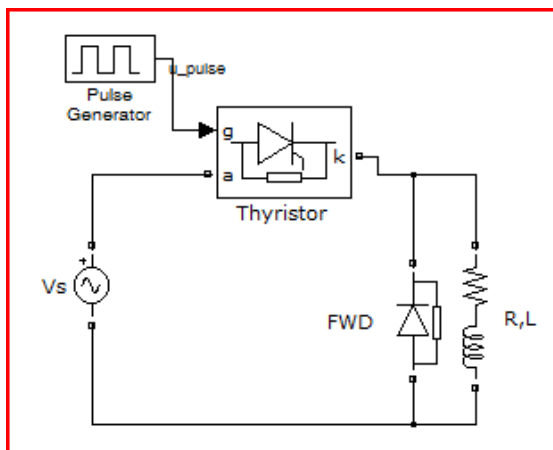
### 5.9.4 Ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης

Η δίοδος ελεύθερης διέλευσης (freewheeling diode ή FWD) συνδέεται γενικά αντιπαράλληλα στο φορτίο για να προστατεύσει τους ηλεκτρονικούς διακόπτες από υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά το άνοιγμα επαγωγικών φορτίων. Η δίοδος είναι ορθά πολωμένη κατά την αρνητική ημιπερίοδο, προσφέροντας έτσι έναν δρόμο εκφόρτισης για το ρεύμα. Αυτό έχει σαν συνέπεια το θυρίστορ να σβήσει στην γωνία  $\pi$  αλλά το ρεύμα στο φορτίο να μηδενίζεται πάλι στην γωνία  $\beta_1 = \pi + \beta$ , αφού για τον επιπλέον χρόνο που αντιστοιχεί στην γωνία  $\beta$ , το ρεύμα ρέει στο κύκλωμα που προσφέρει ο κλάδος της διόδου. Η τάση στο φορτίο θα είναι ίδια με την περίπτωση του ωμικού φορτίου αφού το θυρίστορ θα σβήσει την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην γωνία  $\pi$ .



**Παράδειγμα**

Να σχεδιαστεί ένας ανορθωτής ενός παλμού με ωμικό επαγωγικό φορτίο και να απεικονισθούν: η τάση στα άκρα του φορτίου, η τάση στα άκρα του θυρίστορ, το ρεύμα στο φορτίο και ο παλμός πυροδότησης (έναυσης). Δίνεται  $V_{speak}=100\text{ V}$ ,  $f=50\text{ Hz}$ ,  $R=2\ \Omega$ ,  $L=0.005\text{ H}$ , γωνία έναυσης  $30^\circ$ , πλάτος παλμού  $50\text{ V}$ . Επιλέξτε μη ιδανική επίλυση με  $V_f=0$  για τα ηλεκτρονικά στοιχεία και χαμηλή  $R_{on}$  (η διόδος μπορεί να είναι ιδανική). Ελέγξτε την ακρίβεια της εξομοίωσης με βάση τις γνωστές θεωρητικές τιμές τάσεων και ρεύματος. (Κρατήστε το προηγούμενο κύκλωμα, προσθέστε την διόδο, επιλέξτε επίλυση συνεχούς χρόνου (Continuous) με μη ιδανικούς ηλεκτρονικούς διακόπτες στο powergui, αλγόριθμο επίλυσης ode23t)

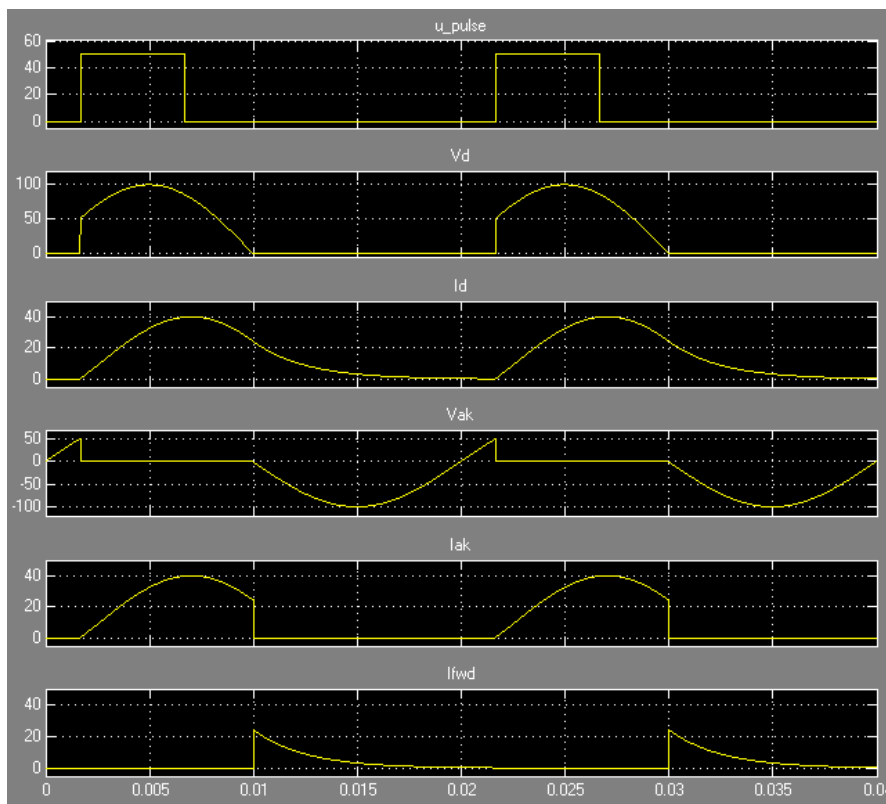


**ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ**

$$V_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos \alpha + 1]$$

$$I_{dc} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1]$$

$$V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha)}{2\pi}}$$



**Παρατήρηση 1:** ελέγξτε αν ισχύει  $V_{dc}=I_{dc} \cdot R$  και  $V_{rms}=I_{rms} \cdot R$

**Παρατήρηση 2:** η αλλαγή στον αλγόριθμο εξομοίωσης επέφερε και μικρές αλλαγές στις κυματομορφές ρεύματος σε σχέση με την ιδανική επίλυση. Παρόλα αυτά οι τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών δεν πρέπει να έχουν διαφοροποιηθεί.

### 5.10 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την εκτέλεση μαθηματικών πράξεων στο simulink
- την μεταφορά μεγεθών από το simulink στην matlab
- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων ελεγχόμενης ανόρθωσης ενός παλμού με διαφορετικά φορτία
- την λειτουργία της διόδου ελεύθερης διέλευσης
- την βασική αρχή λειτουργίας ενός απλού μοντέλου φορτιστή μπαταρίας
- τον υπολογισμό μεγεθών όπως η μέση και η RMS τιμή ρευμάτων και τάσεων στα μοντέλα
- τον υπολογισμό μεγεθών όπως η  $P_{dc}$  και η  $P_{ac}$

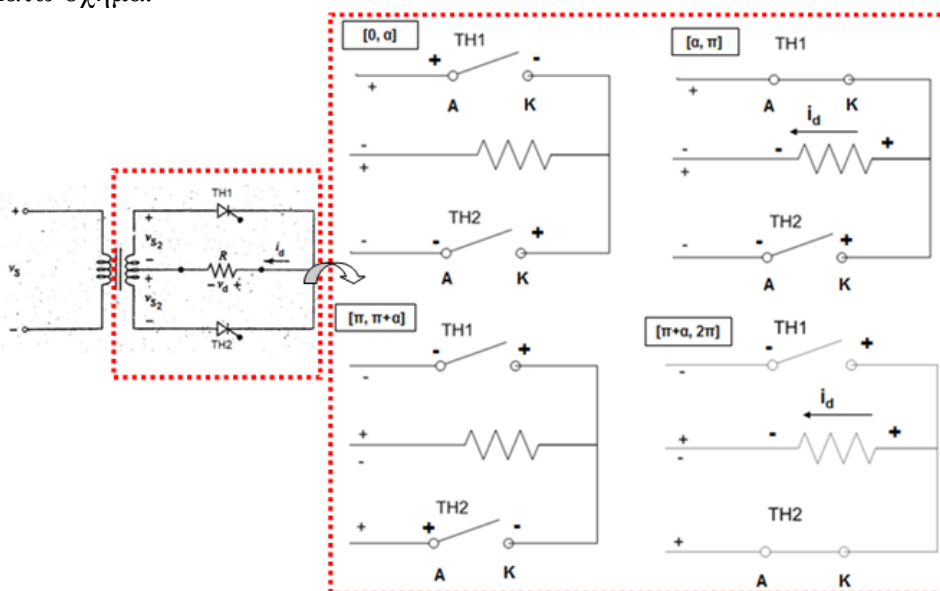
## ΕΝΟΤΗΤΑ 6: Ελεγχόμενος ανορθωτής πλήρους κύματος (δύο παλμών)

### 6.1.1 Ωμικό φορτίο

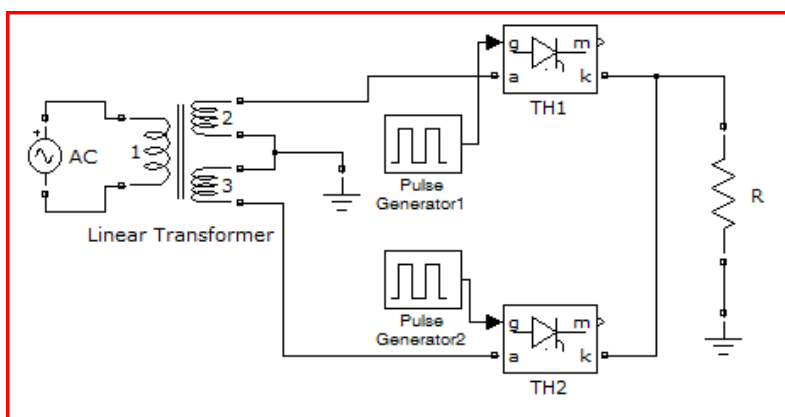
Με τους παραπάνω όρους (ελεγχόμενος ανορθωτής πλήρους κύματος ή δύο παλμών) εννοείται ο μετατροπέας πλήρους κύματος που χρησιμοποιεί δύο θυρίστωρ. Για την λειτουργία του απαιτείται και χρήση ενδιάμεσου Μ/Σ. Το κύκλωμα είναι παρόμοιο με αυτό που εξετάστηκε στην παράγραφο 4.6.4.

**Παρατήρηση 1:** αντικειμενικός σκοπός είναι να παραχθεί συμμετρική τάση/ρεύμα στο φορτίο. Έτσι ακολουθούνται δύο προϋποθέσεις: **α)** ο Μ/Σ είναι μεσαίας λήψης **β)** τα θυρίστωρ δέχονται παλμούς έναυσης με διαφορά  $180^\circ$ . Δηλαδή αν το TH1 δέχεται παλμό στις  $\alpha$ , το θυρίστωρ TH2 δέχεται στις  $(\pi+\alpha)$  μοίρες. Ως γωνία έναυσης όμως αναφέρεται απλά η γωνία  $\alpha$  (και εννοείται και η  $\pi+\alpha$  για το TH2)

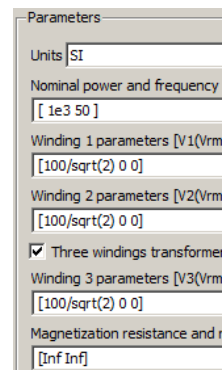
**Παρατήρηση 2:** Τυπική κυκλωματική αναπαράσταση καθώς και ανάλυση της επιμέρους λειτουργίας για το κομμάτι του κυκλώματος δεξιά του Μ/Σ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Παρατήρηση 3:** Για να αποφευχθούν λάθη στην συνδεσμολογία, συνίσταται να ακολουθηθεί ο παρακάτω σχεδιασμός στο simulink



**Παρατήρηση 4:** Τα επιμέρους στοιχεία/ρυθμίσεις που απαιτούνται για την εξομοίωση του κυκλώματος έχουν συζητηθεί κατά τις προηγούμενες ενότητες. Συνοπτικά αναφέρεται ότι για να εξομοιωθεί η ιδανική λειτουργία τα θυρίστορ συνίσταται να γίνουν ιδανικά μέσα από τις ρυθμίσεις του powergui ενώ για τον Μ/Σ μπορούν να εφαρμοσθούν οι ρυθμίσεις που δόθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο (και φαίνονται στο δίπλα σχήμα).



**Παρατήρηση 5:** Στην παραπάνω εξομοίωση έχει θεωρηθεί ότι η AC πηγή τάσης έχει peak τιμή 100 V και ότι ο συνολικός λόγος μετασχηματισμού του Μ/Σ είναι 1:2

**Παρατήρηση 6:** η λειτουργία του κυκλώματος παρουσιάζεται στον πίνακα δίπλα. Να παρατηρηθεί ότι όταν και τα δύο θυρίστορ είναι OFF τότε η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους είναι ίση με την  $v_{s2}$ . Όταν όμως το ένα είναι OFF και το άλλο ON, τότε η τάση που ασκείται στα άκρα του σβηστού θυρίστορ είναι  $2 \cdot v_{s2}$

γωνία	TH1	TH2	$v_{AK1}$	$v_{AK2}$	$v_d$	$i_d$
[0,α]	OFF	OFF	$v_{s2} (>0)$	$v_{s2} (<0)$	0	0
[α,π]	ON	OFF	0	$2 \cdot v_{s2} (<0)$	$v_{s2} (>0)$	$i_d (>0)$
[π,π+α]	OFF	OFF	$v_{s2} (<0)$	$v_{s2} (>0)$	0	0
[π+α, 2π]	OFF	ON	$2 \cdot v_{s2} (<0)$	0	$v_{s2} (>0)$	$i_d (>0)$

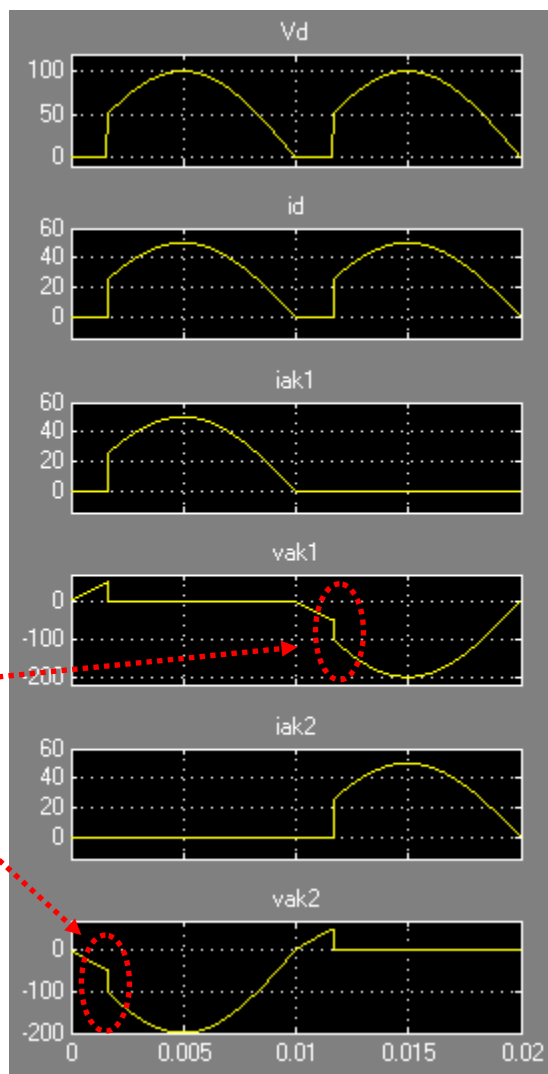
### 6.1.2 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στο φορτίο και στα θυρίστορ

#### Παράδειγμα

Να σχεδιασθούν οι κυματομορφές τάσεις και ρεύματος στο φορτίο για ανορθωτή 2 παλμών με  $V_{s,peak}=V_{s2,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ ,  $R=2 \Omega$  και  $\alpha=30^\circ$ .

**Παρατήρηση 1:** η μελέτη των κυματομορφών (απεικονίζονται δίπλα) θα πρέπει να βοηθήσει τον εκπαιδευόμενο και στην κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος

**Παρατήρηση 2:** να δοθεί σημασία στο «άλμα» που εντοπίζεται στις κυματομορφές της τάσης στα άκρα των θυρίστορ όταν το υπό μελέτη θυρίστορ είναι σβηστό (OFF) και το έτερο θυρίστορ περνάει σε αγωγή (ON)



### 6.1.3 RMS και dc τιμές

#### Παράδειγμα

Ανορθωτής 2 παλμών με  $V_{s,peak}=V_{s2,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ , και αντίσταση  $2 \Omega$  και γωνία έναυσης  $30^\circ$  (δηλαδή ακριβώς το προηγούμενο κύκλωμα). Να εξετασθεί αν ισχύουν οι γνωστοί από την θεωρία τύποι:

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [\cos a + 1]$$

$$V_{d,rms} = V_{s2} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha)}{\pi}}$$

(θα πρέπει να βρεθούν οι τιμές  $V_{dc} \simeq 59.4$  και  $V_{d,rms} \simeq 69.68$ )

### 6.2.1 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – ασυνεχής αγωγή

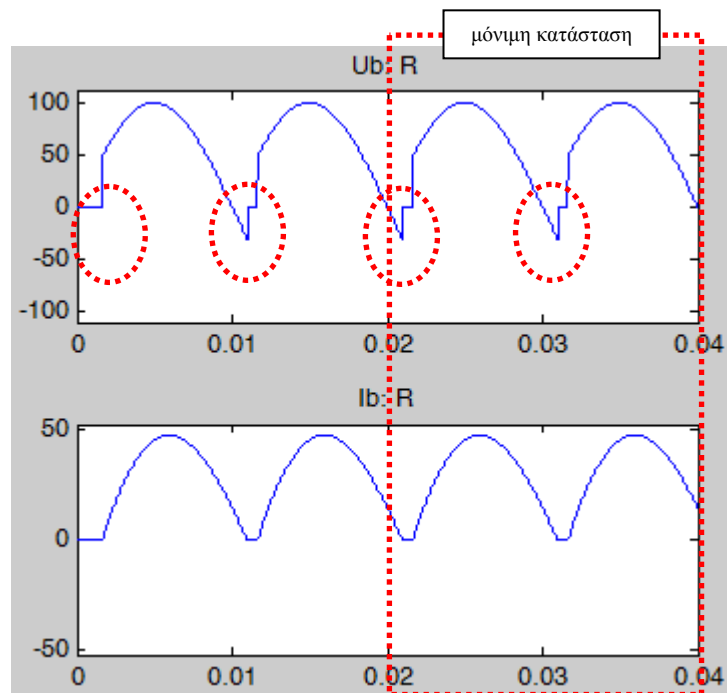
#### Παράδειγμα

Να σχεδιασθούν οι κυματομορφές τάσεις και ρεύματος στο φορτίο και στα θυρίστορ για ανορθωτή 2 παλμών με  $V_{s,peak}=V_{s2,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ ,  $R=1 \Omega$ ,  $L=0.001 H$  και  $\alpha=30^\circ$  (ουσιαστικά να διατηρηθεί το προηγούμενο κύκλωμα και απλά να μεταβληθεί κατάλληλα το φορτίο). Η εξομοίωση να γίνει για δύο περιόδους τουλάχιστον.

**Παρατήρηση 1:** για να υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα συγκέντρωσης στην λεπτομέρεια οι κυματομορφές στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αποσπασματικά και όχι συνολικά.

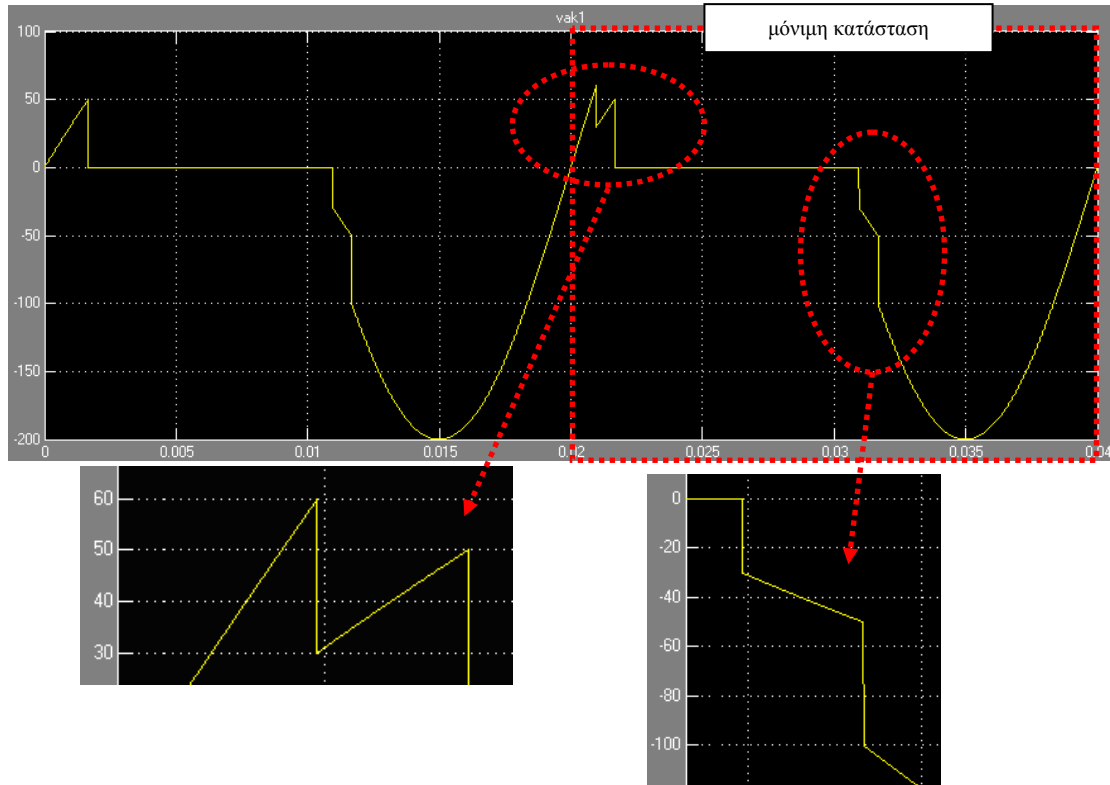
**Παρατήρηση 2:** οι βασικές αλλαγές που επιφέρει στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος στο φορτίο το ωμικό-επαγωγικό φορτίο (όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα) θα ισχύουν και εδώ για κάθε **ημιπερίοδο** όμως πλέον.

**Παρατήρηση 3:** δεδομένου ότι το simulink εξομοιώνει την λειτουργία του κυκλώματος από την χρονική στιγμή 0 κατά την οποία το κύκλωμα μπαίνει σε λειτουργία, είναι προφανές ότι οι κυματομορφές της μόνιμης κατάστασης **δεν** είναι αυτές που αντιστοιχούν στην πρώτη περίοδο. Η μόνιμη κατάσταση αντιπροσωπεύεται από την δεύτερη περίοδο στο σχήμα





**Παρατήρηση 4:** όσον αφορά τις κυματομορφές στα άκρα των θυρίστωρ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κυματομορφές των τάσεων. Ενδεικτικά εδώ παρουσιάζεται και συζητείται η κυματομορφή της τάσης που ασκείται στα άκρα του TH1. Όπως και προηγουμένως, η μόνιμη κατάσταση είναι αυτή που εμφανίζεται στην δεύτερη περίοδο (για χρόνο 0.02 έως 0.04). Το ενδιαφέρον στρέφεται στα τμήματα που έχουν σημειωθεί στο παρακάτω σχήμα.



**Όσον αφορά το πρώτο:** αυτό που συμβαίνει είναι ότι το μέρος της κυματομορφής που ανήκει στο  $\pi+\beta$  αντιστοιχεί σε λειτουργία κατά την οποία το TH2 είναι ακόμα ON ενώ το TH1 είναι OFF. Συνεπώς η τάση που ασκείται στα άκρα του TH1 είναι  $2 \cdot v_{s2}$ . Την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο  $\beta$  το TH2 γίνεται OFF οπότε η τάση στα άκρα του TH1 γίνεται  $v_{s2}$ . Ως εκ τούτου υπάρχει η απότομη πτώση από τα 60 V στα 30 V

**Όσον αφορά το δεύτερο:** το TH1 άγει και πέρα από τις  $180^\circ$  (μέχρι τις  $180+\beta$ ). Όταν γίνει OFF, στα άκρα του θα ασκηθεί μια τάση  $v_{s2} \neq 0$  (και μάλιστα  $v_{s2} = V_{s2\text{peak}} \cdot \sin(\beta_1)$ ) η οποία ευθύνεται για το πρώτο «άλμα». Σε χρόνο  $180+\alpha$  θα γίνει ON το TH2 οπότε στα άκρα του TH1 θα ασκηθεί τάση  $2 \cdot v_{s2}$  και αυτό ευθύνεται για το δεύτερο άλμα (από τα -50 V στα -100V)

Αντίστοιχη είναι η κυματομορφή της  $v_{ak2}$

**Παρατήρηση 5:** όπως φαίνεται και από τις σχετικές κυματομορφές υπάρχουν διαστήματα μη αγωγής (διαστήματα στα οποία δεν άγει κάποιο θυρίστωρ και το ρεύμα στο φορτίο είναι μηδέν). Αυτό σημαίνει ότι  $\beta < \alpha$  ( $\beta_1 < \pi + \alpha$ ). Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία χαρακτηρίζεται ως **ασυνεχής αγωγή**.

### 6.2.2 RMS και dc τιμές

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το εξής πρόβλημα όσον αφορά τις RMS και dc τιμές: το simulink θα υπολογίσει τις τιμές βάσει των κυματομορφών της προηγούμενης περιόδου. Δηλαδή η τιμή που θα εμφανίσει ένα display συνδεδεμένο με ένα RMS block θα αφορά την RMS τιμή που υπολογίστηκε κατά την τελευταία περίοδο. Συνεπώς αν η εξομοίωση γίνει μόνο για μία περίοδο, τότε το αποτέλεσμα θα είναι λανθασμένο.

#### Παράδειγμα

Ανορθωτής 2 παλμών με  $V_{s,peak}=V_{s2,peak}=100V$ ,  $f=50$  Hz,  $R=2$  Ω,  $L=0.002$  H και  $\alpha=30^\circ$ . Συνδέστε κατάλληλα blocks ώστε να υπολογίσετε την RMS και μέση (dc) τιμή της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο. Τρέξτε την εξομοίωση για χρόνους μίας και δύο περιόδων και ελέγξτε αν μεταβάλλονται τα αποτελέσματα.

**Παρατήρηση 1:** Να εξετασθεί αν ισχύει  $V_{dc} = I_{dc} \cdot R$  και  $V_{d,rms} = I_{d,rms} \cdot R$

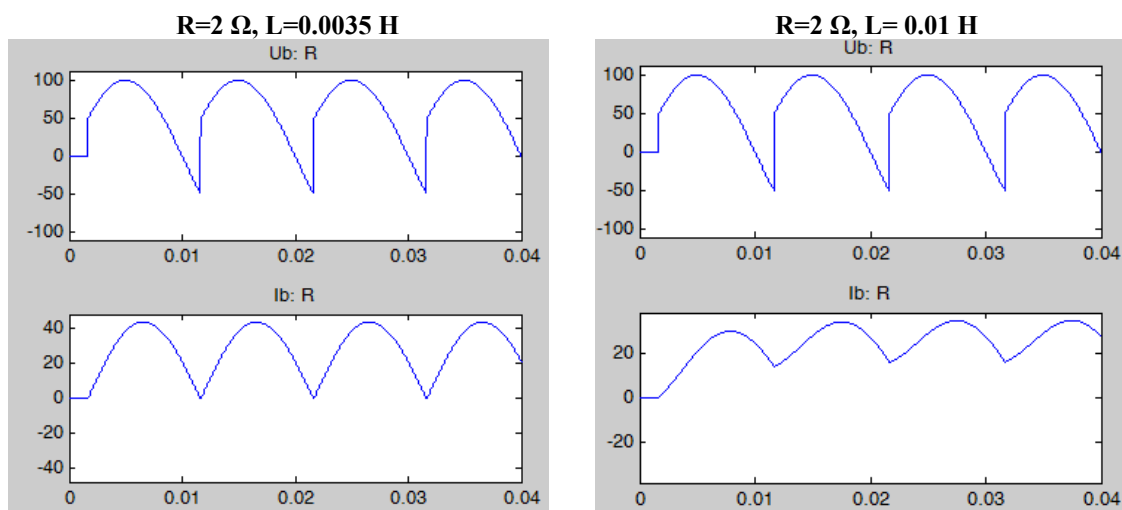
### 6.2.3 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – συνεχής αγωγή

Προφανώς όσο ο χαρακτήρας του πηνίου γίνεται πιο επαγωγικός, η γωνία  $\beta$  θα αυξάνεται και κάποια στιγμή θα γίνει  $\beta=\alpha \Rightarrow \beta_1=\pi+\alpha$  και το TH2 θα γίνει ON ακριβώς την χρονική στιγμή που το TH1 γίνεται OFF (και αντιστρόφως). Αυτό είναι μια κατάσταση που ουσιαστικά αποτελεί το όριο μεταξύ **ασυνεχής** και **συνεχής αγωγής** (συμβαίνει για  $\alpha=\phi$ ).

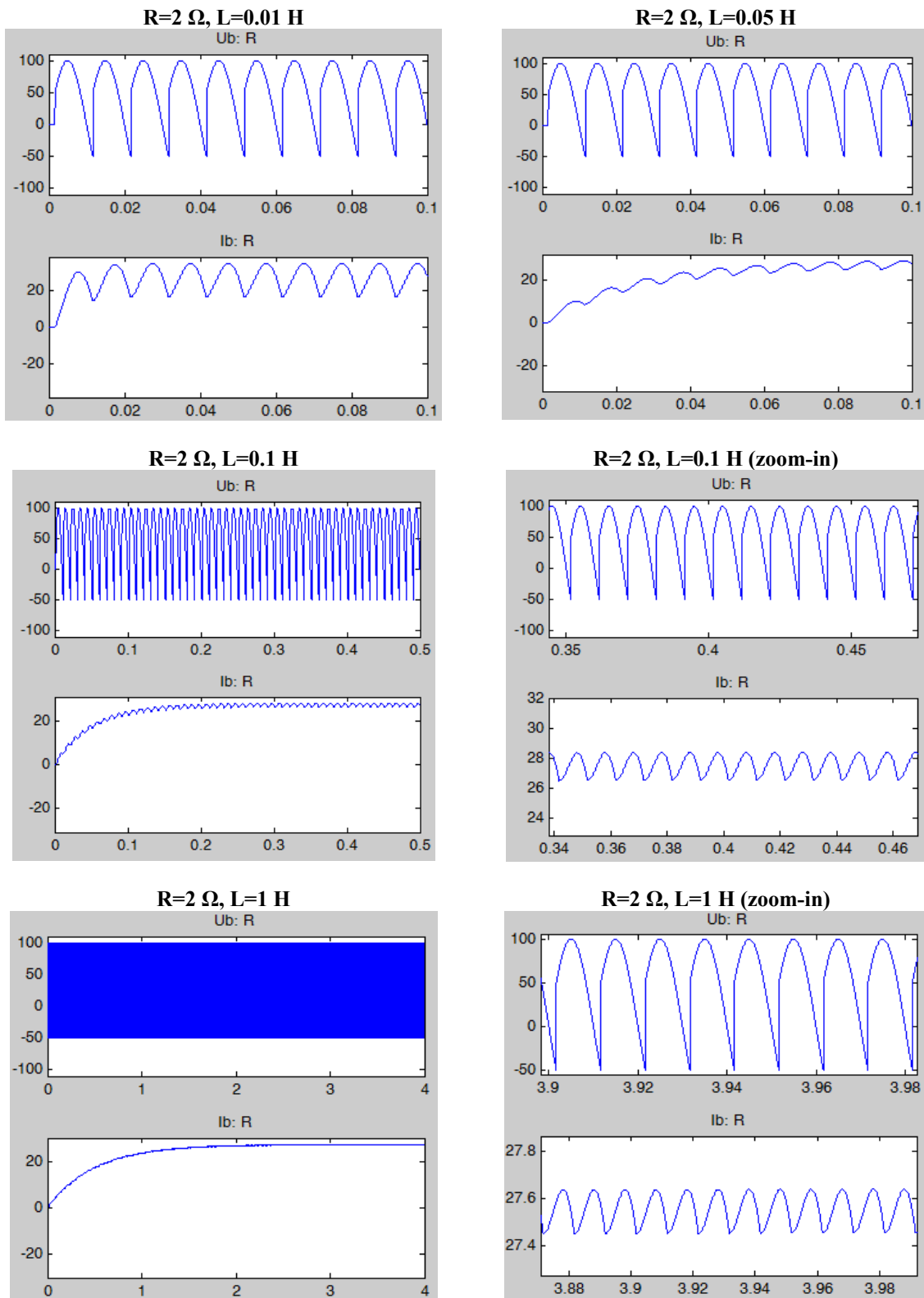
**Παρατήρηση 1:** Η αγωγή χαρακτηρίζεται ως συνεχής όταν κάποιο από τα δύο θυρίστορ είναι ON κάθε χρονική στιγμή (δηλαδή υπάρχει συνεχώς ρεύμα στο φορτίο).

**Παρατήρηση 2:** Προφανώς δεν είναι η οριακή κατάσταση αυτή που ενδιαφέρει

**Παρατήρηση 3:** Καθώς το φορτίο γίνεται πιο ισχυρά επαγωγικό, το ρεύμα θα παρουσιάζει μικρότερη κυμάτωση και θα ανυψώνεται πάνω από τον οριζόντιο άξονα (θα υπάρχει μία ταλάντωση γύρω από μια σταθερή μη μηδενική τιμή)



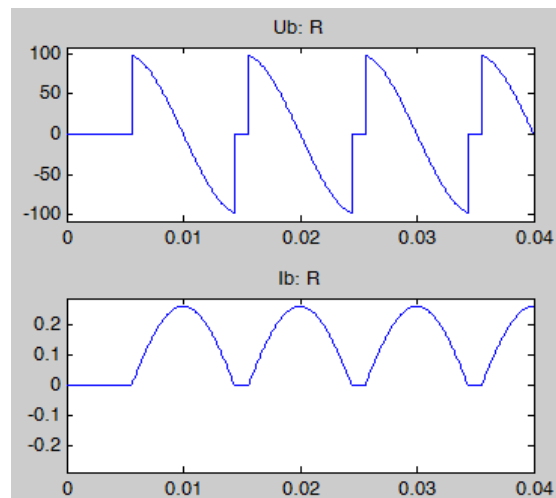
**Παρατήρηση 4:** Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, υπάρχει μια μεταβατική περίοδος κατά την οποία το ρεύμα στο φορτίο ξεκινά από το μηδέν και φτάνει να ταλαντωθεί γύρω από την μη σταθερή τιμή. Η μεταβατική περίοδος έχει διάρκεια που αυξάνει όσο αυξάνεται και η τιμή της επαγωγής



**Παρατήρηση 5:** Όσο αυξάνεται ο επαγωγικός χαρακτήρας του πηνίου, ελαττώνεται η κυμάτωση του ρεύματος. Θεωρητικά για ένα «άπειρο» πηνίο το ρεύμα θα είναι σταθερό DC

**Παρατήρηση 6:** Οι προϋποθέσεις για να υπάρξει συνεχή αγωγή είναι: α) να έχει ισχυρό επαγωγικό χαρακτήρα το φορτίο ( $\omega L \gg R$ ) και β) για την γωνία έναυσης να ισχύει  $\alpha < 90^\circ$  (και μάλιστα  $\alpha < \varphi$ )

**Παρατήρηση 7:** Να τεθεί γωνία έναυσης  $\alpha > 90^\circ$  (π.χ.  $\alpha = 100$ ) και να γίνει εξομοίωση για δύο περιόδους για  $R=2 \Omega$ ,  $L=1 \text{ H}$ . Παρόλο που το φορτίο είναι ισχυρά επαγωγικό, η αγωγή είναι ασυνεχής. Ελέγξτε για άλλες τιμές σε σχέση με το  $\varphi$  (ικανή ακρίβεια απαιτεί κανό βήμα)



### 6.3 R-L-Ed φορτίο, FWD

Η συμπεριφορά κυκλωμάτων με DC πηγή στο φορτίο ή/και δίοδο ελεύθερης διέλευσης έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα (ανορθωτής ενός παλμού). Προφανώς αντίστοιχη συμπεριφορά υπάρχει και στον ανορθωτή δύο παλμών. Δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση εδώ, αλλά ο εκπαιδευόμενος καλείται να πειραματιστεί εξομοιώνοντας τα αντίστοιχα κυκλώματα.

### 6.4 Βασικά σημεία

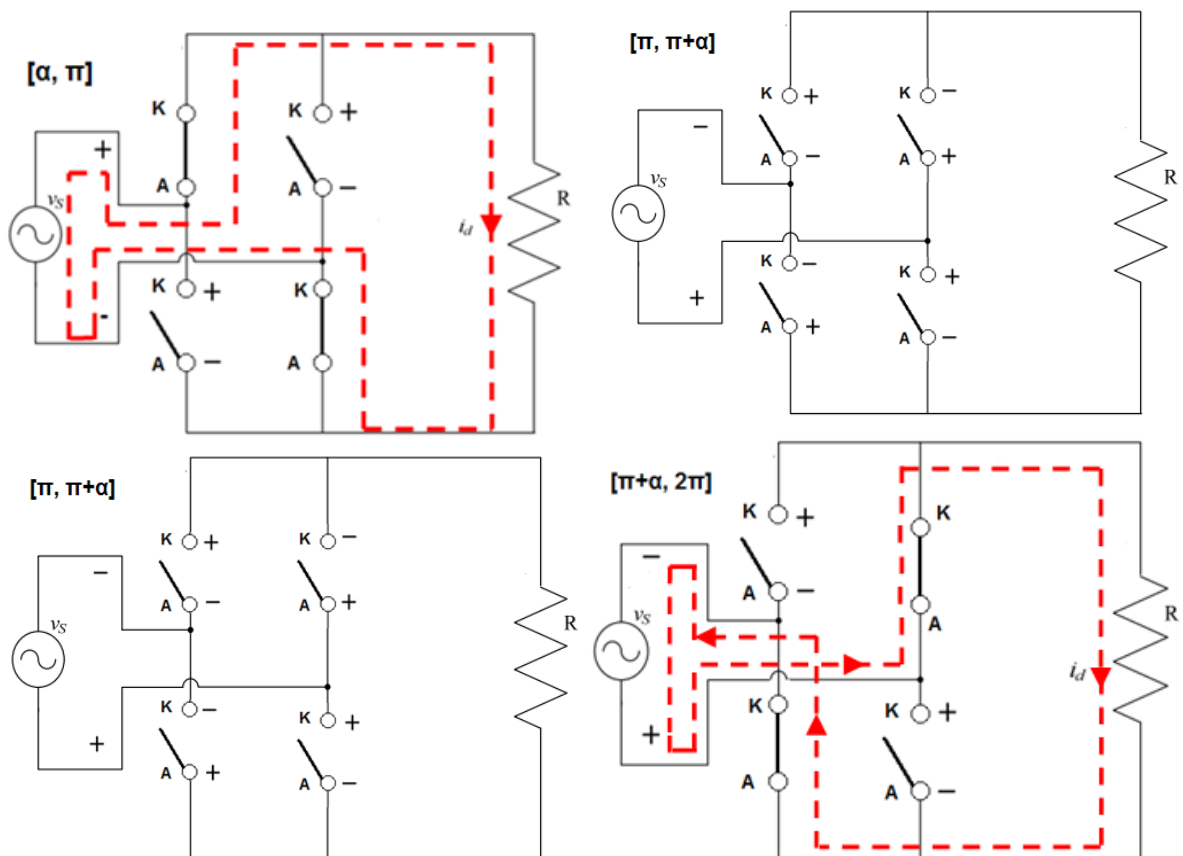
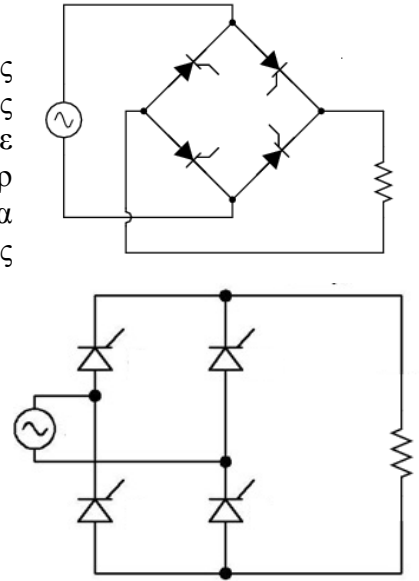
Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων ελεγχόμενης ανόρθωσης δύο παλμών με ωμικό και ωμικό-επαγωγικό φορτίο
- τις έννοιες της συνεχής και της ασυνεχής αγωγής
- τις προϋποθέσεις για να επιτευχθεί συνεχή αγωγή
- τις κυματομορφές τάσεις και ρεύματος που αφορούν τον ελεγχόμενο ανορθωτή δύο παλμών και την γενικότερη λειτουργία του

**ΕΝΟΤΗΤΑ 7: Ελεγχόμενος ανορθωτής τεσσάρων παλμών**

**7.1 Γενικά (ωμικό φορτίο)**

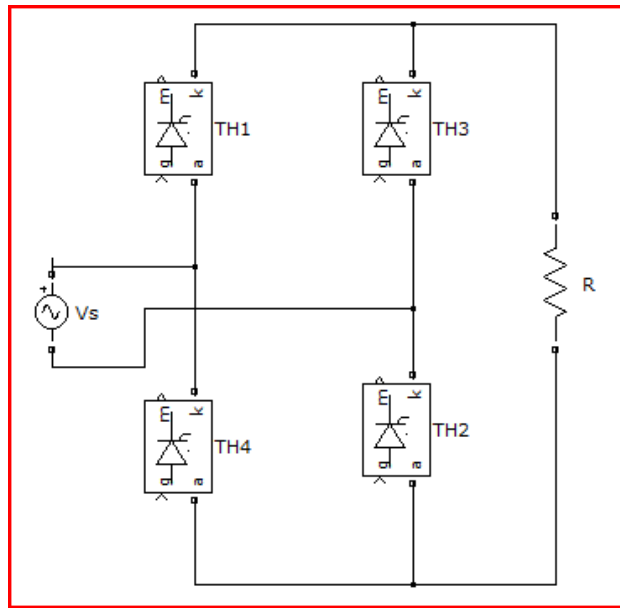
Ανορθωτής τεσσάρων παλμών ή ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας ονομάζεται το αντίστοιχο της πλήρους ανόρθωσης γέφυρας με διόδους κύκλωμα (βλέπε παράγραφο 4.6.3) στο οποίο χρησιμοποιούνται θυρίστορ αντί για διόδους. Όπως είναι γνωστό, για την λειτουργία της γέφυρας ενεργοποιούνται 2 ηλεκτρονικοί διακόπτες σε κάθε ημιπερίοδο. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η δημιουργία 2 παλμών έναυσης και μάλιστα με διαφορά  $\pi$  ακτινίων ( $180^\circ$ ) για λόγους συμμετρίας. Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος, παρατίθενται τα παρακάτω επιμέρους σχήματα για διαφορετικά διαστήματα λειτουργίας όπου τα θυρίστορ έχουν αντικατασταθεί από διακόπτες στην ανάλογη κατάσταση, με την πολικότητα να σημειώνεται στα άκρα της πηγής και των ανοικτών διακοπών, όπως και η φορά του ρεύματος.



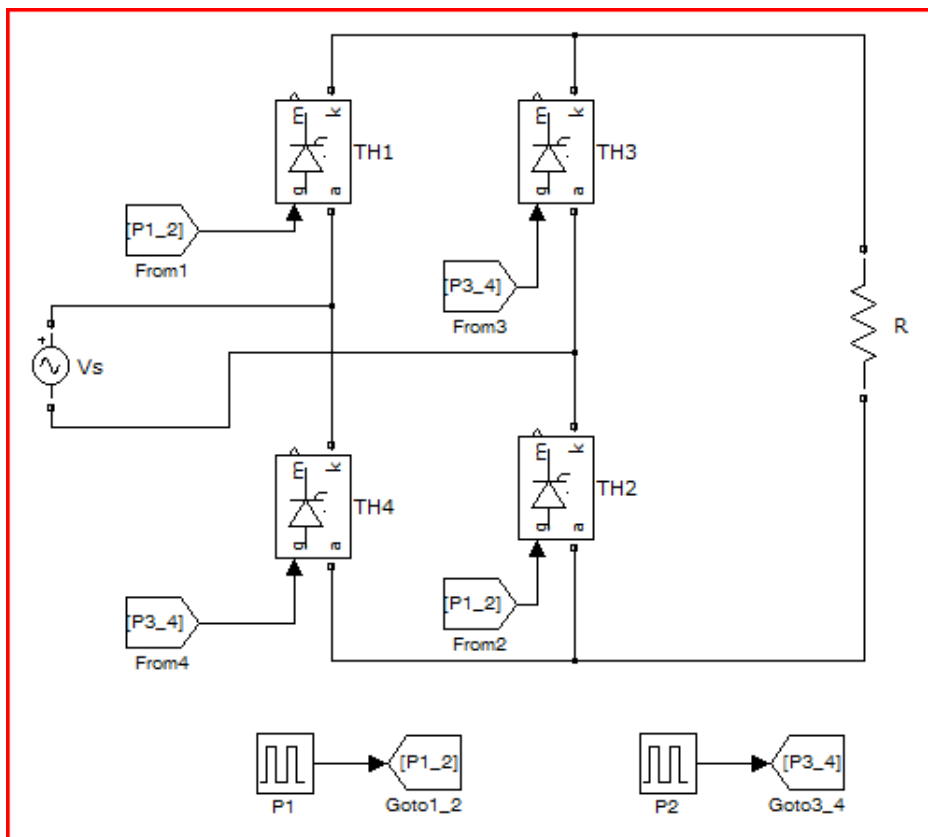
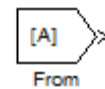
**Παρατήρηση 1:** όταν όλα τα θυρίστορ είναι OFF τότε σε κάθε θυρίστορ ασκείται ανάστροφη τάση ίση με  $v_s/2$ . Όταν το ένα ζεύγος είναι ON τότε στα άκρα των σβηστών θυρίστορ ασκείται ανάστροφη τάση ίση με  $v_s$ .

### 7.2 Τα Goto και From blocks

Το κύκλωμα στο simulink φαίνεται στο δίπλα σχήμα, όπου τα θυρίστορ έχουν ονομασθεί έτσι ώστε να δηλώνεται και η σχέση μεταξύ τους. Τα θυρίστορ 1 και 2 θα δεχθούν παλμό στην γωνία  $\alpha$  ενώ τα 3 και 4 στην γωνία  $\pi+\alpha$ . Για να γίνει αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν 4 ή 2 διαφορετικά pulse generator blocks. Το πλεονέκτημα της χρήσης 2 είναι η συντομότερη/ευκολότερη αλλαγή παλμού έναυσης από τον χρήστη, ενώ των 4 είναι η αποφυγή των επιπλέον καλωδιώσεων που προκαλούν σύγχυση και δυσκολία κατανόησης του κυκλώματος.



Μία τρίτη δυνατότητα δίνεται από το simulink με την χρήση των **Goto** και **From** blocks. Με την χρήση των blocks αυτών ένα σήμα μπορεί να μεταφερθεί από το Goto block στο From block χωρίς την σύνδεσή τους αρκεί να ταυτίζονται οι ετικέτες τους (tags). Στην περίπτωση του υπόψη κυκλώματος, το κύκλωμα που προκύπτει θα είναι αυτό του παρακάτω σχήματος.



### 7.3 Κυματομορφές για ωμικό φορτίο

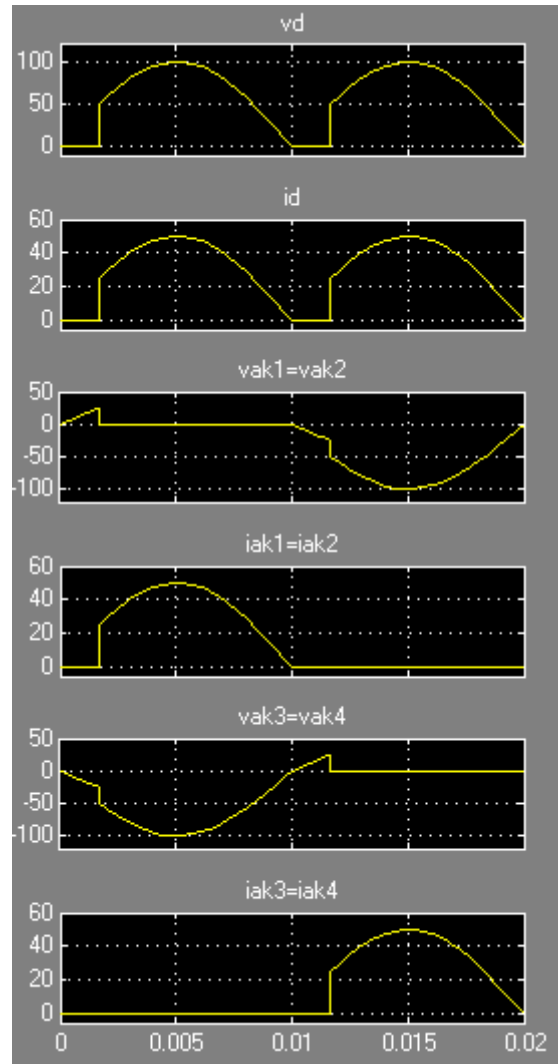
#### Παράδειγμα

Να σχεδιασθούν οι κυματομορφές τάσεις και ρεύματος στο φορτίο και στα άκρα των θυρίστορ για ανορθωτή 4 παλμών με  $V_{s,peak}=V_{s2,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ ,  $R=2 \Omega$  και  $\alpha=30^\circ$ .

**Παρατήρηση 1:** η μελέτη των κυματομορφών (απεικονίζονται δίπλα) θα πρέπει να βοηθήσει τον εκπαιδευόμενο και στην κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος

**Παρατήρηση 2:** η να δοθεί σημασία στο «άλμα» που εντοπίζεται στις κυματομορφές της τάσης στα άκρα των θυρίστορ όταν το ένα ζεύγος είναι σβηστό (OFF) και το άλλο περνάει σε αγωγή (ON)

**Παρατήρηση 3:** να παρατηρηθεί ότι οι κυματομορφές έχουν ίδια μορφή με τις αντίστοιχες για τον ανορθωτή 2 παλμών, πλην όμως εδώ η αναστροφή τάσης στα άκρα των θυρίστορ είναι ίση με  $V_{s,peak}$



### 7.4 RMS και dc τιμές

#### Παράδειγμα

Ανορθωτής 4 παλμών με  $V_{s,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ , και αντίσταση  $2 \Omega$  και γωνία έναυσης  $30^\circ$  (δηλαδή ακριβώς το προηγούμενο κύκλωμα). Να εξετασθεί αν ισχύουν οι γνωστοί από την θεωρία τύποι:

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos \alpha + 1]$$

$$V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha)}{\pi}}$$

(θα πρέπει να βρεθούν οι τιμές  $V_{dc} \simeq 59.4$  και  $V_{d,rms} \simeq 69.68$ )

### 7.5 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Σε αναλογία με αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και στον ανορθωτή 4 παλμών ορίζονται δύο καταστάσεις λειτουργίας: ασυνεχούς ( $\alpha > \varphi$ ) και συνεχούς ( $\alpha < \varphi$ ) αγωγής.

### 7.5.1 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – ασυνεχής αγωγή

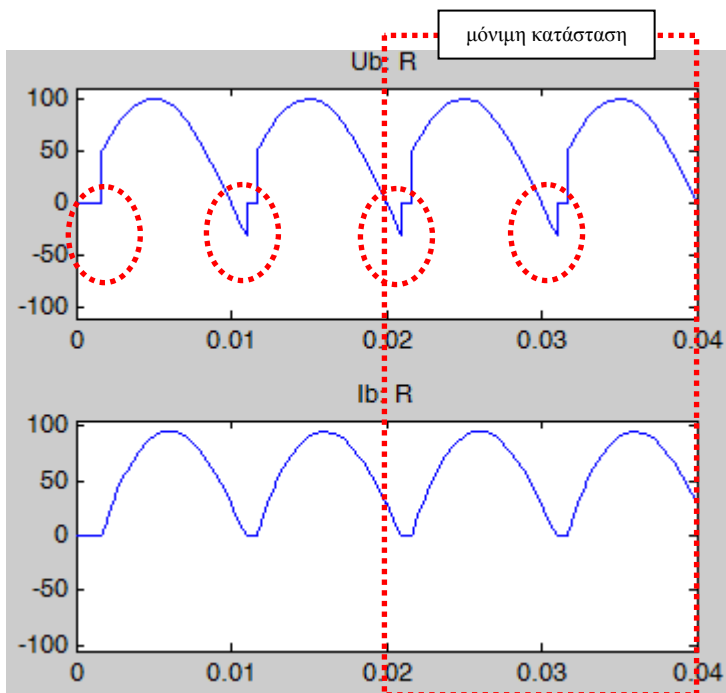
#### Παράδειγμα

Να σχεδιασθούν οι κυματομορφές τάσεις και ρεύματος στο φορτίο και στα θυρίστορ για ανορθωτή 4 παλμών με  $V_{s,peak}=100V$ ,  $f=50Hz$ ,  $R=1 \Omega$ ,  $L=0.001 H$  και  $\alpha=30^\circ$  (ουσιαστικά να διατηρηθεί το προηγούμενο κύκλωμα και απλά να μεταβληθεί κατάλληλα το φορτίο). Η εξομοίωση να γίνει για δύο περιόδους.

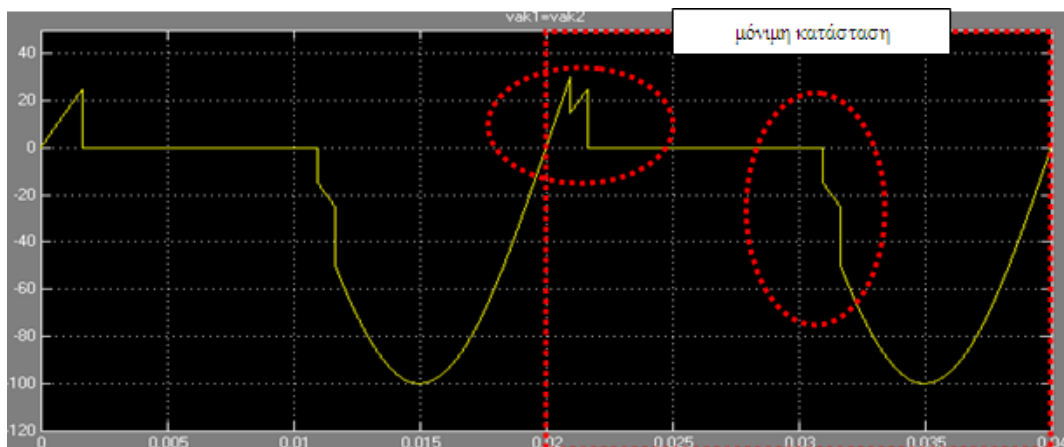
**Παρατήρηση 1:** για να υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα συγκέντρωσης στην λεπτομέρεια οι κυματομορφές στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αποσπασματικά και όχι συνολικά.

**Παρατήρηση 2:** οι βασικές αλλαγές που επιφέρει στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος στο φορτίο το ωμικό-επαγωγικό φορτίο θα ισχύουν και εδώ (κατά τα γνωστά).

**Παρατήρηση 3:** δεδομένου ότι το simulink εξομοιώνει την λειτουργία του κυκλώματος από την χρονική στιγμή 0 κατά την οποία το κύκλωμα μπαίνει σε λειτουργία, είναι προφανές ότι οι κυματομορφές της μόνιμης κατάστασης δεν είναι αυτές που αντιστοιχούν στην πρώτη περίοδο. Η μόνιμη κατάσταση αντιπροσωπεύεται από την δεύτερη περίοδο στο σχήμα.



**Παρατήρηση 4:** Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται και συζητείται η κυματομορφή της τάσης που ασκείται στα άκρα των TH1 και TH2. Να γίνει σύγκριση αυτού του σχήματος με το αντίστοιχο για τους 2 παλμούς. Το «άλμα» στις τιμές τώρα αφορά την αλλαγή από παράγοντα 0.5 σε παράγοντα 1.





**Παρατήρηση 5:** όπως είναι φανερό από τις κυματομορφές το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς  $\phi=17.4406^\circ$  και άρα  $\alpha > \phi$ .

**Παρατήρηση 6:** να τεθεί  $\alpha=10$  και να γίνει ξανά η εξομοίωση. Παρατηρείστε ότι τώρα η αγωγή είναι συνεχής.

### 7.5.2 Κυματομορφές για ωμικό-επαγωγικό φορτίο – συνεχής αγωγή

#### Παράδειγμα

Να εξομοιωθεί ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας με R-L φορτίο και  $V_{s,peak}=100\text{ V}$ ,  $R=1\ \Omega$ ,  $L=0.1\text{ H}$ ,  $\alpha=30^\circ$  και να εξετασθούν οι κυματομορφές στην μόνιμη κατάσταση

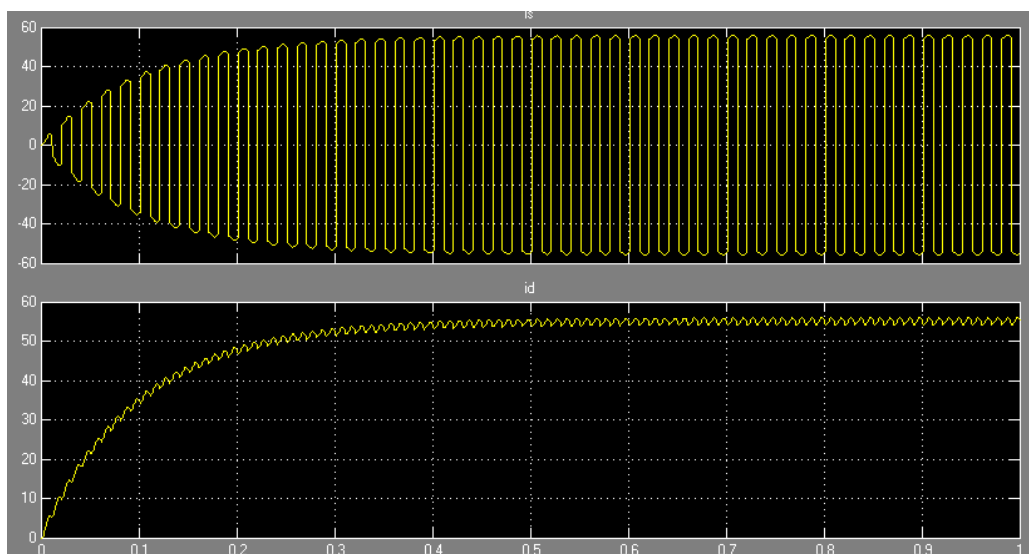
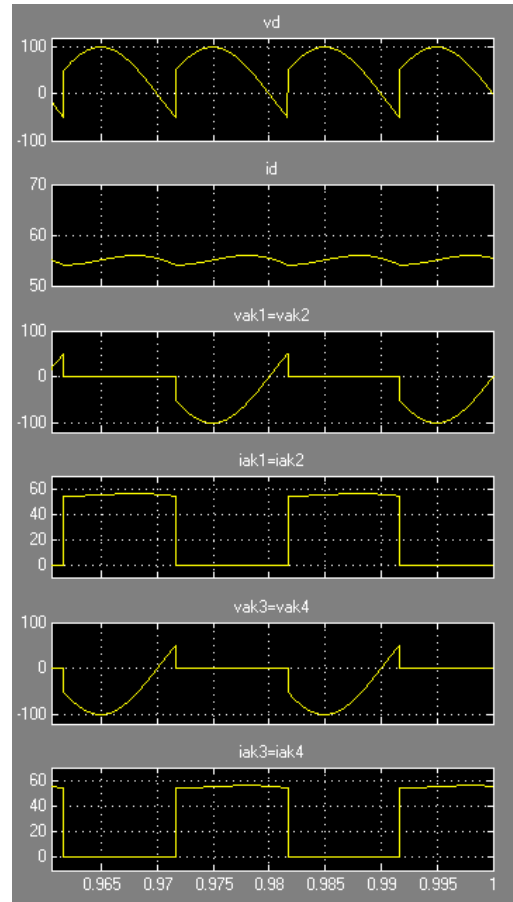
**Παρατήρηση 1:** ελέγξτε αν ισχύει ο γνωστός από την θεωρία τύπος:

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot (\cos \alpha)$$

(θα πρέπει να είναι  $V_{dc}=55.132$ )

### 7.6 Μετάβαση

Η μετάβαση είναι ένα υπαρκτό φαινόμενο το οποίο στα μέχρι τώρα κυκλώματα έχει αγνοηθεί. Σχετίζεται με την εσωτερική επαγωγή που παρουσιάζει η πηγή τάσης. Για να γίνει αντιληπτό το φαινόμενο, ως πρώτο βήμα να συνδεθεί κατάλληλα αμπερόμετρο ώστε να καταγράφεται και το ρεύμα  $i_s$  που περνάει από την πηγή.



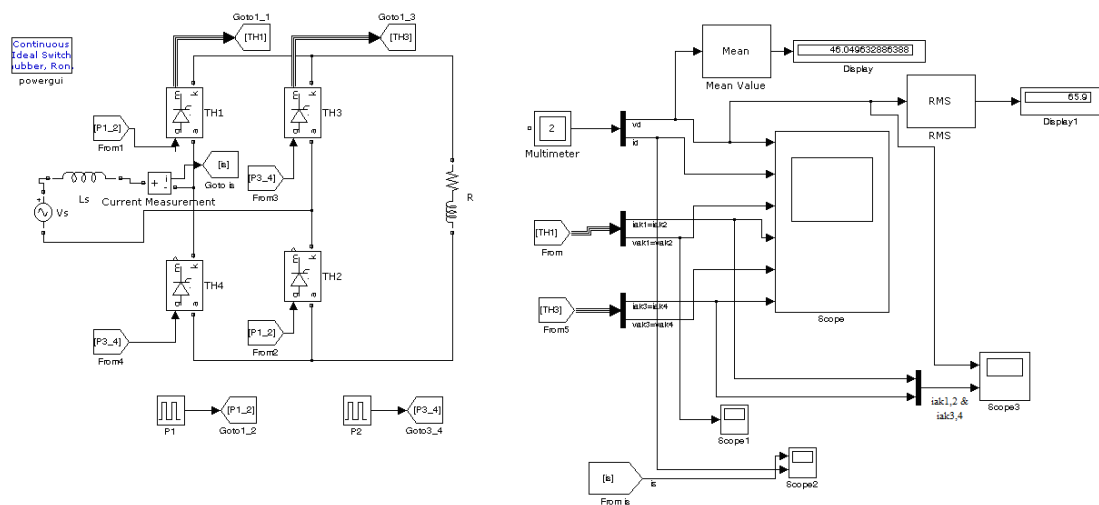


### 7.7 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων ελεγχόμενης ανόρθωσης τεσσάρων παλμών με ωμικό και ωμικό-επαγωγικό φορτίο
- την χρήση των Goto και From blocks στο simulink
- τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος που αφορούν τον ελεγχόμενο ανορθωτή τεσσάρων παλμών και την γενικότερη λειτουργία του
- την έννοια της μετάβασης και το πώς αυτή επιδρά στην λειτουργία του κυκλώματος

Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την τελική μορφή του κυκλώματος



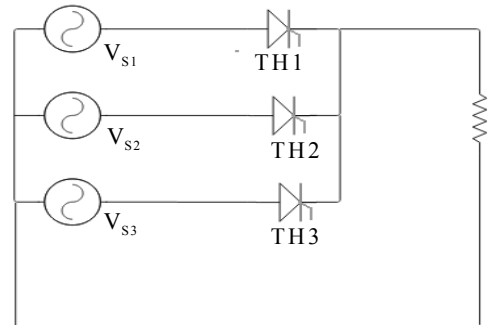
## ΕΝΟΤΗΤΑ 8: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών

### 8.1 Γενικά

Ακολουθώντας παρόμοια λογική με αυτή που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, είναι προφανές ότι θυρίστρος μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για την υλοποίηση τριφασικών ανορθωτών. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί ο ανορθωτής **τριών παλμών** ή τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος.

### 8.2 Ελεγχόμενος ανορθωτής τριών παλμών

Το κύκλωμα του τριφασικού ανορθωτή τριών παλμών φαίνεται στο σχήμα. Ουσιαστικά είναι το αντίστοιχο του ανορθωτή ενός παλμού αλλά για τριφασική πηγή.



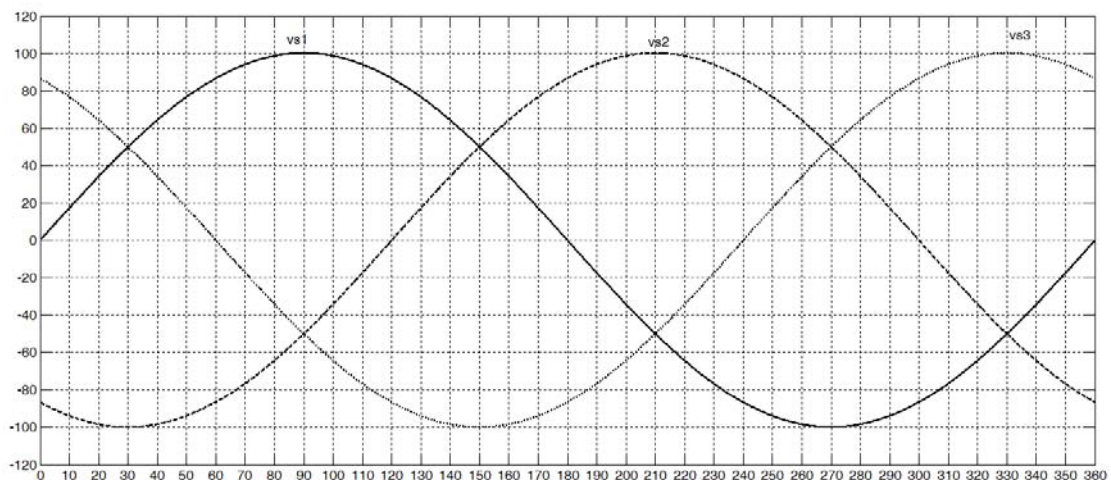
Οι εξισώσεις των τάσεων είναι:

$$\begin{cases} V_{S1} = V_{\text{peak}} \sin(\omega t) \\ V_{S2} = V_{\text{peak}} \sin(\omega t - 120) \\ V_{S3} = V_{\text{peak}} \sin(\omega t - 240) = V_{\text{peak}} \sin(\omega t + 120) \end{cases}$$

Για να σχεδιαστούν στο MATLAB αρκεί ο παρακάτω απλός κώδικας:

```
>> f=50;
>> w=2*pi*f;
>> t=0:0.00001:0.02;
>> gonia=t*360/0.02;
>> Vs1=100*sin(w*t);
>> Vs2=100*sin(w*t-deg2rad(120));
>> Vs3=100*sin(w*t-deg2rad(240));
>> plot(gonia, Vs1); hold on; plot(gonia, Vs2); hold on; plot (gonia, Vs3)
```

ενώ με βασική επεξεργασία του διαγράμματος προκύπτει το παρακάτω σχήμα:



### 8.3 Συνεχή και ασυνεχή αγωγή

Το ζητούμενο συνήθως είναι η βέλτιστη λειτουργία του ανορθωτή δηλαδή η λειτουργία του σε συνεχή αγωγή. Εφόσον υπάρχουν τρεις φάσεις τότε αυτή μπορεί να επιτευχθεί και με ωμικό φορτίο αρκεί κάθε θυρίστορ να άγει για  $120^\circ$ .

**Παρατήρηση 1:** για λόγους συμμετρίας αναμένεται κάθε παλμός να έχει διαφορά  $120^\circ$  από τον επόμενο και σειρά αγωγής  $\dots \rightarrow TH1 \rightarrow TH2 \rightarrow TH3 \rightarrow \dots$

**Παρατήρηση 2:** αν υποθεθεί ότι όλα τα θυρίστορ είναι OFF τότε το κάθε θυρίστορ βλέπει στα άκρα του μόνο την τάση της αντίστοιχης πηγής

**Παρατήρηση 3:** άρα όταν έρθει η σειρά του TH1 να γίνει ON, πριν από αυτό θα είναι ON το TH3 άρα το TH1 θα έχει τάση στα άκρα του  $v_{s1}-v_{s3}$  και συνεπώς για να είναι θετικά πολωμένο θα πρέπει  $v_{s1} > v_{s3}$  το οποίο συμβαίνει στις  $30^\circ$ . Ομοίως για το TH2 στις  $150^\circ$  και για το TH3 στις  $270^\circ$

**Παρατήρηση 4:** ο παλμός έναυσης στο TH1 θα πρέπει να δοθεί μετά τις  $30^\circ$ , στο TH2 μετά τις  $150^\circ$  και στο vs3 μετά τις  $270^\circ$

**Παρατήρηση 5:** στους τριφασικούς ανορθωτές η γωνία  $\alpha$  μετριέται μετά τις  $30^\circ$

**Παρατήρηση 6:** συνοψίζοντας αν  $\alpha=20^\circ$  τότε:

- το TH1 παίρνει παλμό στις  $30+20=50^\circ$  ( $\alpha_1=\alpha=20^\circ$ )
- το TH2 στις  $30+120+20=170^\circ$  ( $\alpha_2=120^\circ+\alpha$ )
- το TH3 στις  $30+240+20=290^\circ$  ( $\alpha_2=240^\circ+\alpha$ )

**Παρατήρηση 7:** στις  $150^\circ+\alpha$  πολώνεται ορθά το TH2 οπότε η τάση στα άκρα του θυρίστορ 1 γίνεται  $v_{ak1}=v_1-v_2 < 0$  και συνεπώς το TH1 σβήνει. Το αντίστοιχο συμβαίνει και για τα άλλα θυρίστορ. Άρα σε καμία χρονική στιγμή δεν άγουν ταυτόχρονα

**Παρατήρηση 8:** όταν όλα τα θυρίστορ είναι OFF τότε στα άκρα καθένα από αυτά ασκείται τάση ίση με την τάση της αντίστοιχης πηγής. Όταν ένα θυρίστορ είναι ON τότε στα άκρα των άλλων δύο ασκείται η αντίστοιχη πολική τάση. Για παράδειγμα: TH1 OFF και TH2 ON  $\rightarrow v_{ak1}=v_{s1}-v_{s2}$

**Παρατήρηση 9:** αν δοθεί παλμός πριν τις  $30^\circ$  τότε προφανώς θα έχω ασυνεχή αγωγή και το κάθε θυρίστορ δεν θα επηρεάζει τα άλλα δύο

**Παρατήρηση 10:** αν  $\alpha > 30^\circ$  τότε ο παλμός στο TH2 θα δοθεί στις  $150+\alpha > 180^\circ$  άρα προφανώς θα υπάρχει **ασυνεχή** αγωγή (δεν θα υπάρχει αγωγή από  $180$  έως  $150+\alpha$  εφόσον το TH1 θα έχει γίνει OFF στις  $180^\circ$ )

**Παρατήρηση 11:** προφανώς η γωνία  $\alpha$  πρέπει να είναι μικρότερη των  $150^\circ$  (π.χ. αν  $\alpha=150^\circ$  αυτό σημαίνει ότι το TH1 δέχεται παλμό έναυσης στις  $180^\circ$  οπότε και είναι ανάστροφα πολωμένο)

**Παρατήρηση 12:** σε **συνεχή** αγωγή ( $\alpha < 30^\circ$ ) η λειτουργία του κυκλώματος συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα καταστάσεων:

	$0 \sim 30 + \alpha$	$30 + \alpha \sim 150 + \alpha$	$150 + \alpha \sim 270 + \alpha$	$270 + \alpha \sim 360$
TH1	OFF	ON	OFF	OFF
TH2	OFF	OFF	ON	OFF
TH3	ON	OFF	OFF	ON

**Παρατήρηση 13:** όπως φαίνεται και από τον πίνακα κάθε κάθε thyristor άγει για  $120^\circ$ .

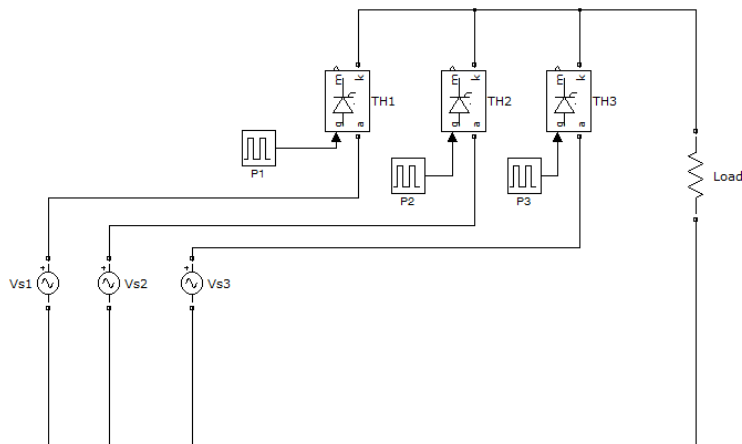
**Παρατήρηση 14:** σε **ασυνεχή** αγωγή ( $\alpha > 30^\circ$ ) η λειτουργία του κυκλώματος συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα καταστάσεων:

	$0 \sim 60$	$60 \sim 30 + \alpha$	$30 + \alpha \sim 180$	$180 \sim 150 + \alpha$	$150 + \alpha \sim 300$	$300 \sim 270 + \alpha$	$270 + \alpha \sim 360$
TH1	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
TH2	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
TH3	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

#### 8.4 Μοντελοποίηση στο simulink

##### Παράδειγμα

Να μοντελοποιηθεί ένας ανορθωτής τριών παλμών με ρυθμίσεις σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται στην παραπάνω παράγραφο. Το φορτίο είναι ωμικό με  $R=2 \Omega$ . Να τεθεί  $V_{S1peak} = V_{S2peak} = V_{S3peak} = 100 \text{ V}$  και  $f=50\text{Hz}$ . Δίνεται  $\alpha=20^\circ$



#### 8.5 Υπολογισμός crest factor (συντελεστής πλάτους ή συντελεστής κορυφής)

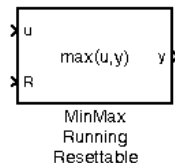
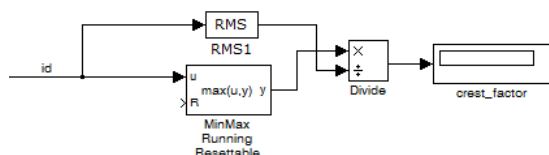
Στην ενότητα 4 έχουν αναφερθεί τα μεγέθη που κυρίως χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ανορθωτών. Σε προηγούμενες ενότητες έχει παρουσιαστεί επαρκώς ο τρόπος υπολογισμού μέσω και ενεργών τιμών τάσης και ρεύματος στο φορτίο, με χρήση των οποίων μπορεί να υπολογισθεί η πλειοψηφία των μεγεθών αξιολόγησης. Για λόγους πληρότητας θα παρουσιαστεί εδώ και ο τρόπος υπολογισμού της peak τιμής ενός σήματος, μέγεθος που είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό του crest factor.

**Παρατήρηση 1:** υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής αυτός (πλάτους ή κορυφής - crest factor) ορίστηκε στην ενότητα 4 ως:

$$CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s} \text{ , όπου } I_s \text{ το ρεύμα εισόδου.}$$

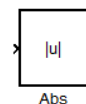
**Παρατήρηση 2:** προφανώς αντίστοιχα ορίζεται ο συντελεστής κορυφής για οποιοδήποτε σήμα (η peak προς την rms τιμή).

Για να υπολογιστεί η peak τιμή ενός DC σήματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί το **MinMax Running Resettable** block. Ένα παράδειγμα υπολογισμού του συντελεστή κορυφής για το ρεύμα εξόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



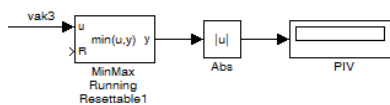
**Παρατήρηση 3:** πρέπει να οριστεί στους παραμέτρους του **MinMax Running Resettable** block ότι ζητείται η μέγιστη (max) τιμή

**Παρατήρηση 4:** αν το ζητούμενο ήταν η εύρεση της peak τιμής ενός AC σήματος τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το **Abs** block το οποίο δίνει την απόλυτη τιμή ενός σήματος



### 8.6 Υπολογισμός μέγιστης ανάστροφης τάσης (Peak Inverse Voltage ή PIV)

Με χρήση του MinMax Running Resettable σε λειτουργία εύρεσης ελαχίστου (min) μπορεί να βρεθεί και η μέγιστη ανάστροφη τάση στα άκρα ενός θυρίστορ. Συνήθως αυτή δίνεται άνευ προσήμου καθώς αυτό εννοείται από το «ανάστροφη».



#### Παράδειγμα

Βρείτε την PIV στα άκρα ενός θυρίστορ σε ανορθωτή τριών παλμών με ωμικό φορτίο σε συνεχή αγωγή και ελέγξτε αν ισχύει  $PIV = V_{peak,πολικό} = \sqrt{3} \times V_{peak,φασικό}$  (στο συγκεκριμένο παράδειγμα με  $V_{speak} = 100 \text{ V}$ , θα είναι  $PIV = 173.2 \text{ V}$ )

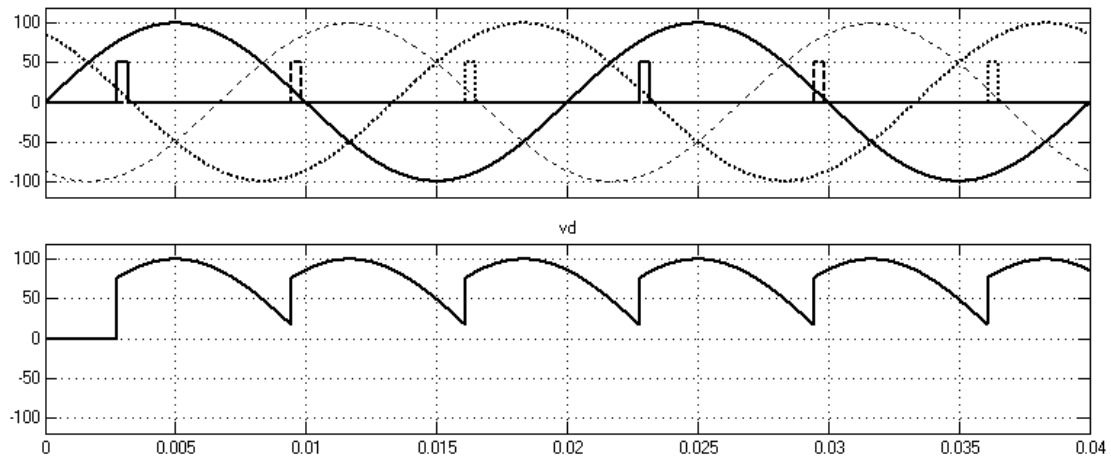
### 8.7 Κυματομορφή τάσης στο φορτίο – ωμικό φορτίο

Προσαρμόστε στο κύκλωμα κατάλληλα όργανα ώστε να απεικονίσετε σε ένα score δύο γραφήματα: το πρώτο να περιέχει τις κυματομορφές των τάσεων των τριών φάσεων και τους τρεις παλμούς ενώ το δεύτερο να απεικονίζει την τάση στο φορτίο.

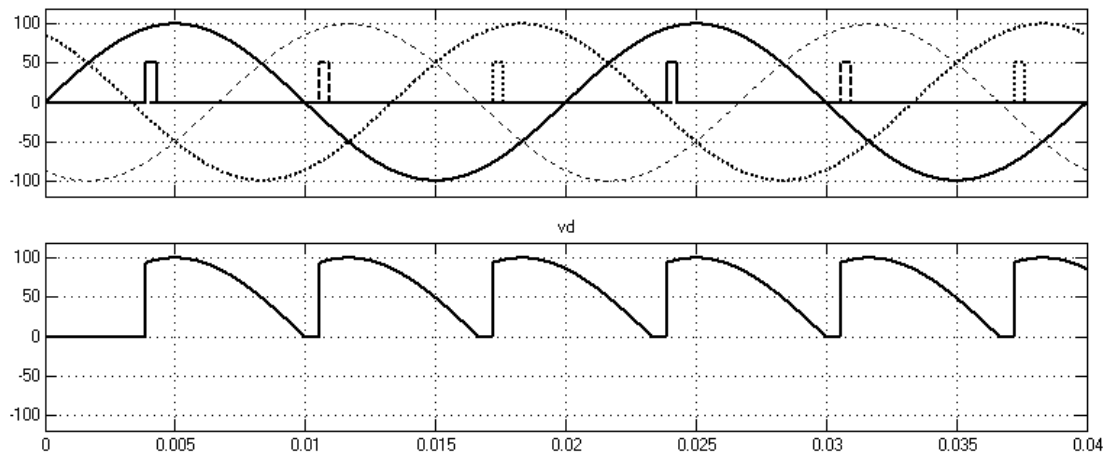
Δείτε τα γραφήματα που προκύπτουν για διαφορετικά α.

**Παρατήρηση 1:** ενδεικτικά παρατίθενται τα παρακάτω σχήματα. Για διευκόλυνση της κατανόησης υπάρχει αντιστοιχία στον τρόπο σχεδίασης φάσης και αντίστοιχου παλμού ενώ έχει χρησιμοποιηθεί ασπρόμαυρη σχεδίαση.

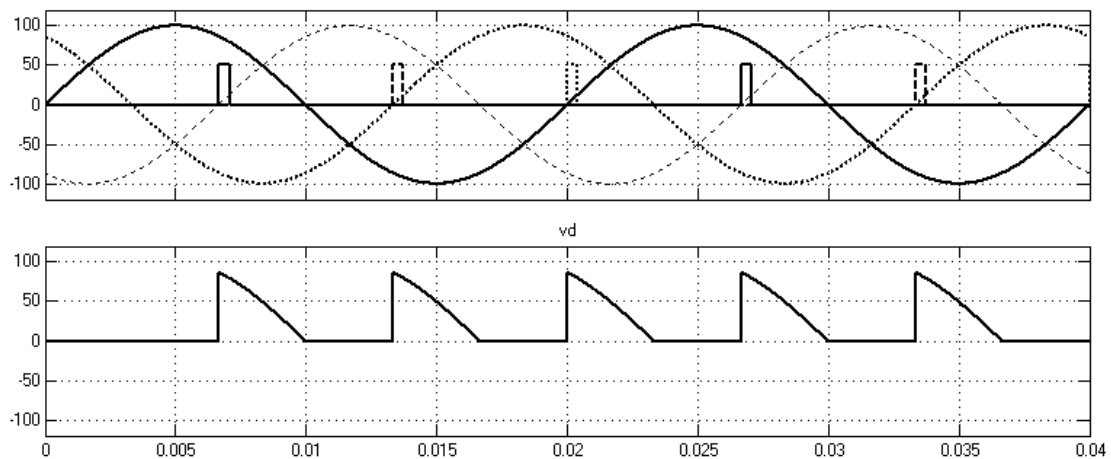
$\alpha=20^\circ$  ( $\alpha < 30^\circ$  άρα συνεχή αγωγή)



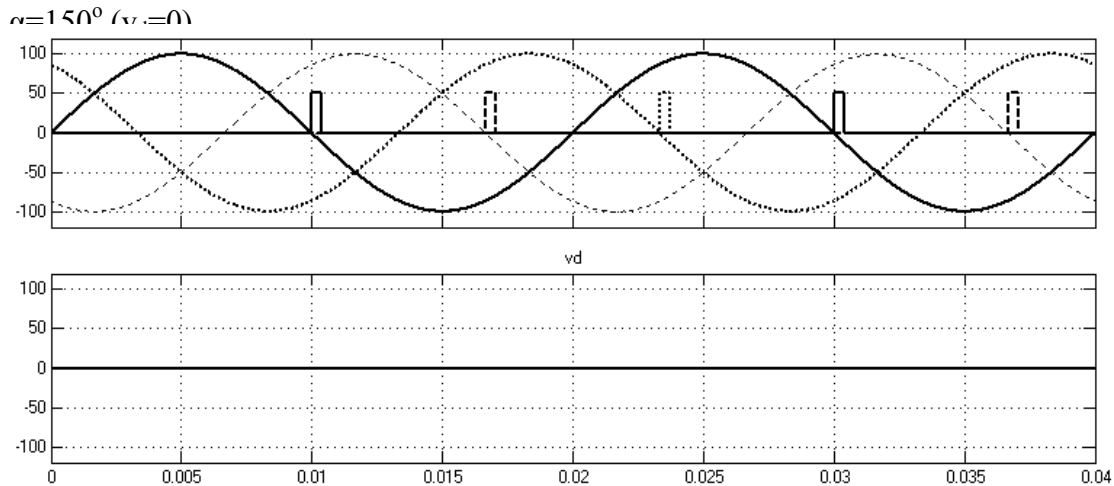
$\alpha=40^\circ$  ( $\alpha > 30^\circ$  άρα ασυνεχή αγωγή)



$\alpha=90^\circ$  ( $\alpha > 30^\circ$  άρα ασυνεχή αγωγή)







### 8.8 Μέση και RMS τιμή της τάσης στο φορτίο

Ελέγξτε αν ισχύουν οι γνωστοί από την θεωρία τύποι  $V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_s}{2\pi} \cos\alpha$  και

$$V_{d,rms} = \sqrt{6}V_s \sqrt{\left[\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos(2\alpha)\right]} \text{ για συνεχή αγωγή.}$$

(θα πρέπει  $V_{dc} = 77.71 \text{ V}$  και  $V_{d,rms} = 81.14 \text{ V}$ )

Για ασυνεχή να τεθεί  $\alpha = 40$  και να ελέγξετε αν ισχύει ο γνωστός από την θεωρία

$$\text{τύπος } V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}V_s}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]$$

(θα πρέπει  $V_{dc} = 64.07 \text{ V}$ )

### 8.9 Τάση στα άκρα των θυρίστρον

Ενδεικτικά θα μελετηθεί η τάση στα άκρα του TH1 για συνεχή αγωγή. Οι κυματομορφές των τριών φάσεων καθώς και της τάσης στα άκρα του TH1 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Απεικονίζονται ακόμα τα διαστήματα αγωγής των θυρίστρον.

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

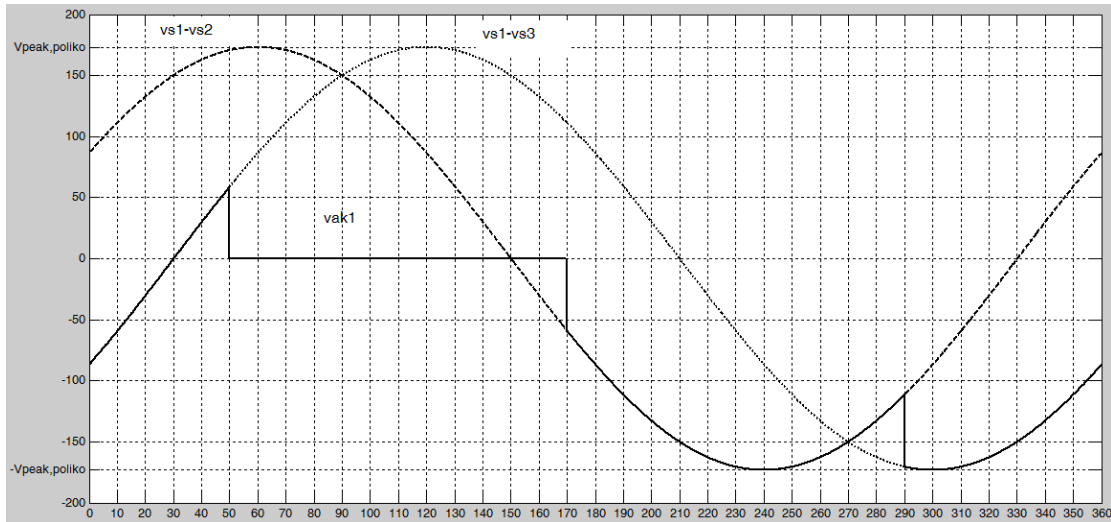
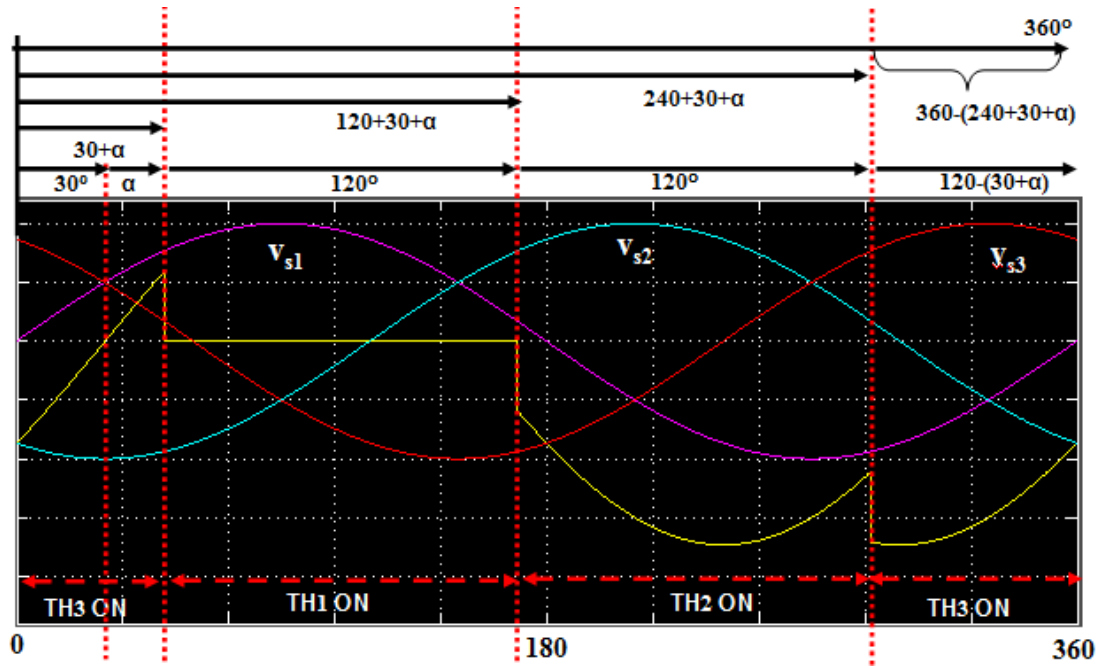
Όταν το TH1 είναι ON προφανώς η τάση στα άκρα του είναι μηδέν.

Όταν το TH1 είναι OFF και το TH3 είναι ON [από 0 έως  $(30 + \alpha)$  και από  $(240 + 30 + \alpha)$  έως 360] η τάση στα άκρα του TH1 είναι  $v_{ak1} = v_{s1} - v_{s3}$ .

Όταν το TH1 είναι OFF και το TH2 είναι ON [από  $(120 + 30 + \alpha)$  έως  $(240 + 30 + \alpha)$ ] τότε η τάση στα άκρα του TH1 είναι  $v_{ak1} = v_{s1} - v_{s2}$

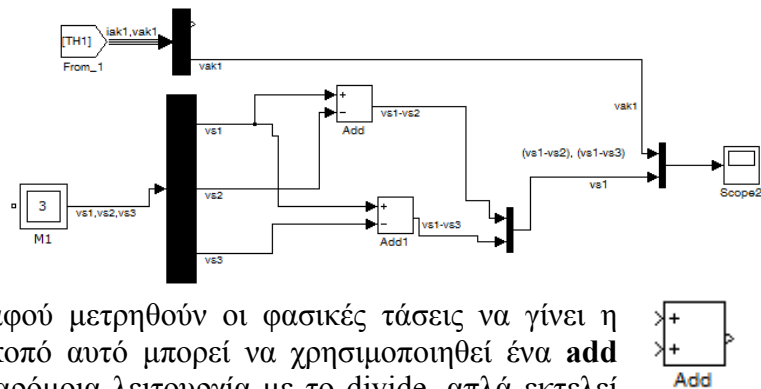
**Παρατήρηση 1:** συνεπώς σε κάθε περίπτωση στα άκρα του TH1 ασκείται πολική τάση. Άρα η μέγιστη ανάστροφη τάση θα είναι  $PIV = V_{\text{peak,πολικό}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{peak,φασικό}}$

**Παρατήρηση 2:** προφανώς τα παραπάνω αναφερόμενα σήματα μπορούν να δοθούν και σε ένα scope ώστε να είναι πιο εύκολη η κατανόηση της διαδικασίας.



### 8.10 To add block

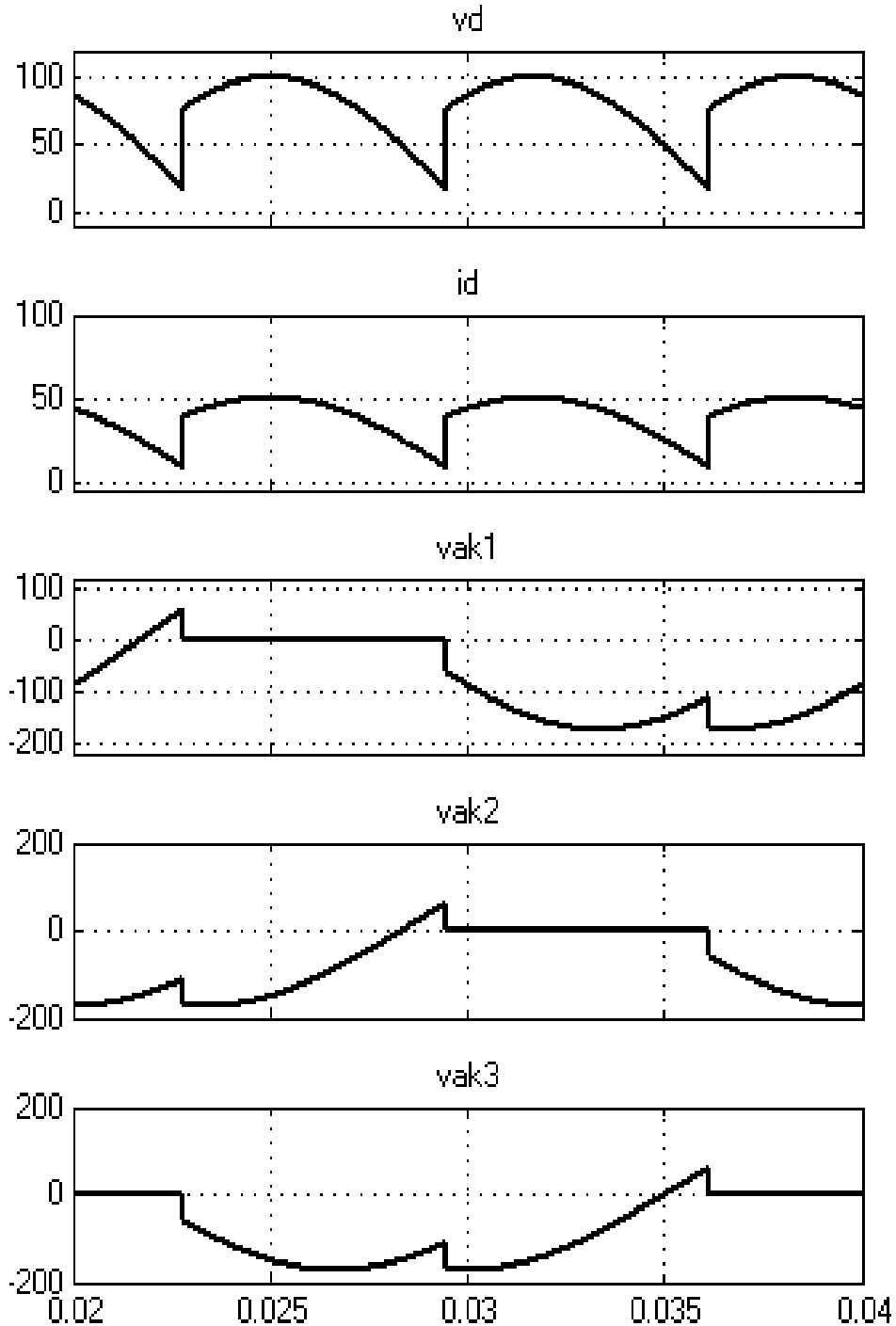
Για να μετρηθούν οι πολικές τάσεις μπορεί είτε να τοποθετηθεί κατάλληλα ένα βολτόμετρο (π.χ. μεταξύ  $v_{s1}$  και  $v_{s2}$  ώστε να μετρηθεί η  $v_{s1}-v_{s2}$ ) είτε αφού μετρηθούν οι φασικές τάσεις να γίνει η αφαίρεσή τους. Για τον σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα **add** block. Το add block έχει παρόμοια λειτουργία με το divide, αλλά εκτελεί προσθαιρέσεις αντί για πολλαπλασιασμούς και διαιρέσεις. Η κάθε είσοδος προστίθεται ή αφαιρείται ανάλογα με το αντίστοιχο πρόσημο. Ο αριθμός των εισόδων καθώς και οι μαθηματικοί τελεστές (+ ή -) ορίζονται στις παραμέτρους του block



### 8.11 Κυματομορφές συνολικά

#### Παράδειγμα

Για το προηγούμενο κύκλωμα, να συνδεθούν κατάλληλα όργανα ώστε να καταγραφούν στο ίδιο score όλες οι κυματομορφές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Η παρουσίαση να αφορά μόνο την μόνιμη κατάσταση. Να εξετασθούν οι πρόσθετες δυνατότητες που δίνει το score για την γραφική απεικόνιση ( $\alpha=20^\circ$ )

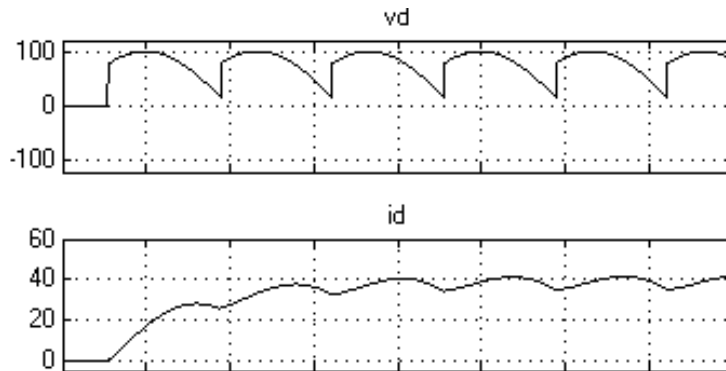


### 8.12.1 Ωμικό επαγωγικό φορτίο – συνεχή αγωγή

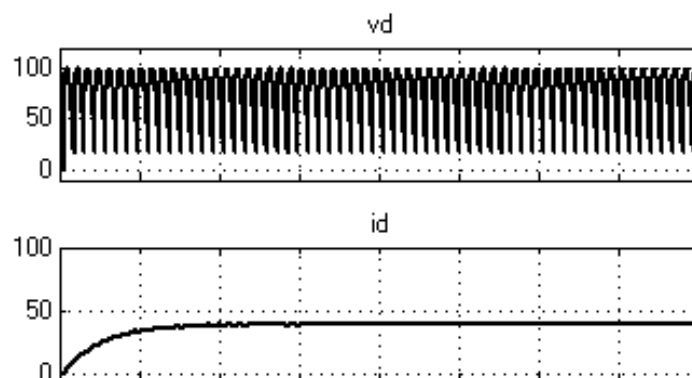
Σε συνεχή αγωγή δεν θα υπάρξει διαφοροποίηση στις κυματομορφές της τάσης παρά μόνο σε αυτήν του ρεύματος. Όσο το  $L$  αυξάνει, η κυματομορφή του ρεύματος θα αποκτά και μικρότερη κυμάτωση (μικρότερο συντελεστή κορυφής)

#### Παράδειγμα

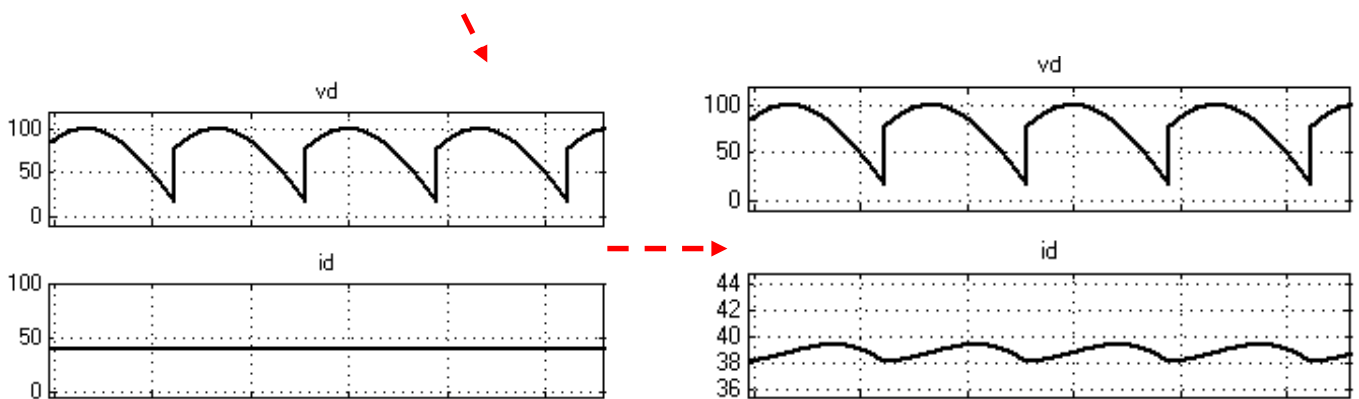
Να τεθεί το φορτίο  $R=2 \Omega$ ,  $L=0.01 \text{ H}$  και να εξετασθούν οι νέες γραφικές που προκύπτουν ( $\alpha=20^\circ$ ). Δείτε την τιμή του συντελεστή κορυφής.



Επαναλάβετε για  $R=2 \Omega$ ,  $L=0.05 \text{ H}$  και χρόνο εξομοίωσης 0.4 sec (δείτε την νέα τιμή του συντελεστή κορυφής)



Ζουμάροντας στην μόνιμη κατάσταση:

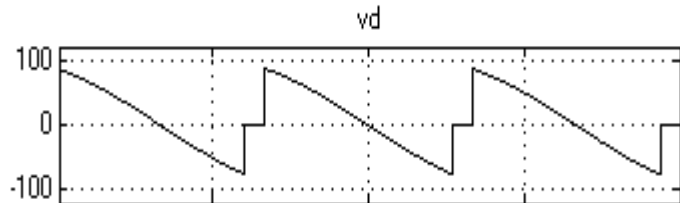


### 8.12.2 Ωμικό επαγωγικό φορτίο – ασυνεχή αγωγή

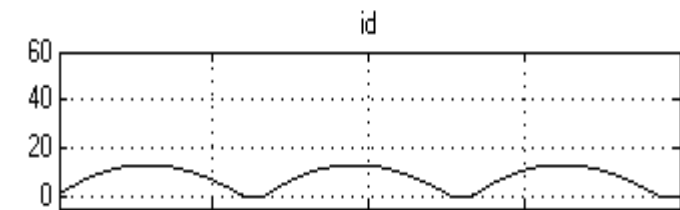
Στην ασυνεχή αγωγή θα υπάρξει διαφοροποίηση και στην κυματομορφή της τάσης στο φορτίο κατά τα ήδη γνωστά από τις προηγούμενες ενότητες αλλά και στις κυματομορφές των τάσεων στα άκρα των θυρίστωρ.

#### Παράδειγμα

Να τεθεί  $\alpha=90^\circ$ ,  $R=1 \Omega$ ,  $L=0.01$  H και να εξετασθούν οι κυματομορφές του κυκλώματος.

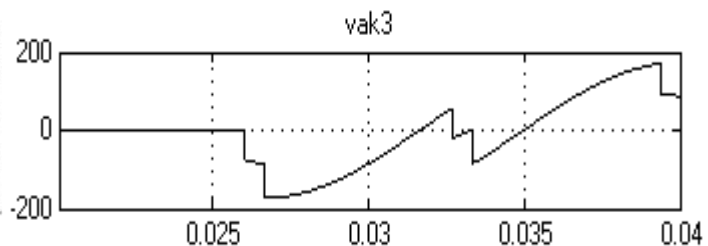
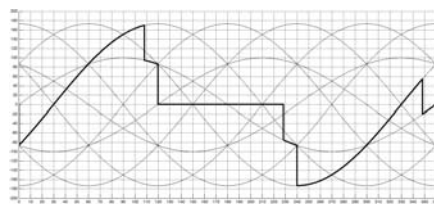
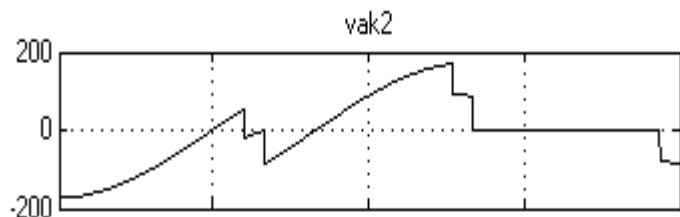
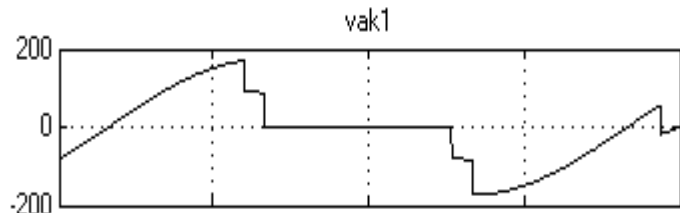


**Παρατήρηση 1:** όσον τις κυματομορφές των τάσεων στα άκρα των θυρίστωρ, τα άλματα δικαιολογούνται από το εξής: όταν κάποιο θυρίστος είναι ON τότε στα άκρα των θυρίστωρ που είναι OFF ασκείται πολική τάση, ενώ όταν όλα τα θυρίστωρ είναι OFF τότε στα άκρα τους ασκείται φασική τάση



#### Παράδειγμα:

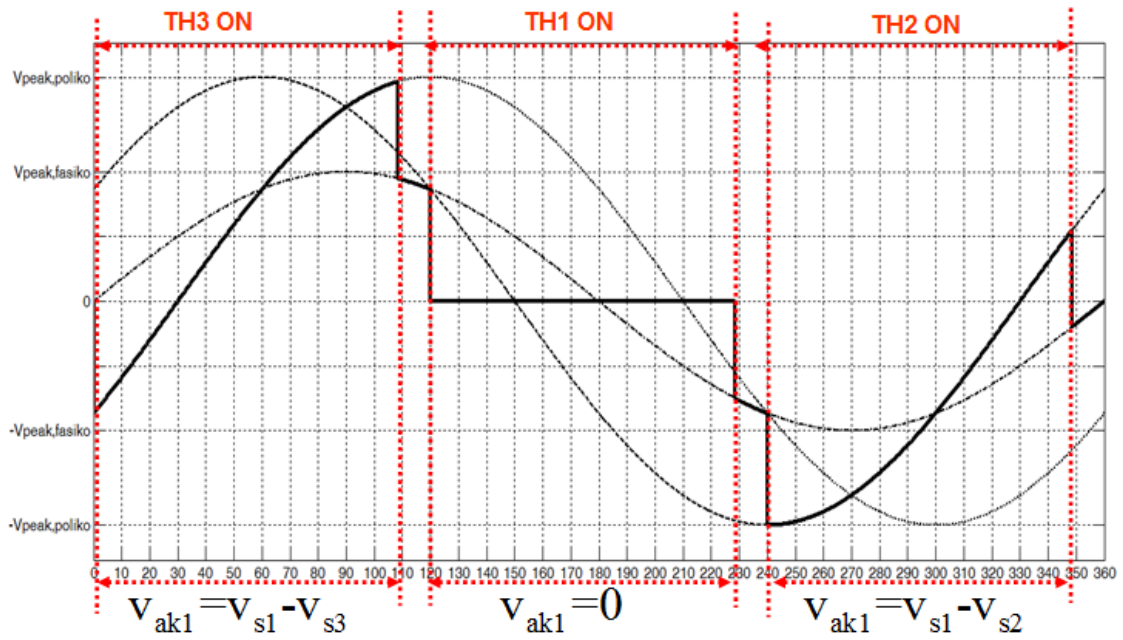
Η  $v_{ak1}$  του προηγούμενου παραδείγματος ( $\alpha=90^\circ$ ) απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα μαζί με όλες τις πολικές και φασικές τάσεις.



Το πρώτο και προφανές είναι ότι στις  $90+30=120^\circ$  το TH1 γίνεται ON και μένει ON μέχρι λίγο πριν τις  $230^\circ$ . Οπότε σε αυτό το διάστημα  $v_{ak1}=0$

Το TH2 γίνεται ON στις  $120+90+30=240^\circ$  και μένει ON μέχρι λίγο πριν τις  $350^\circ$   
Το TH3 γίνεται ON στις  $240+90+30=360^\circ=0^\circ$  και μένει ON μέχρι λίγο πριν τις  $110^\circ$ .

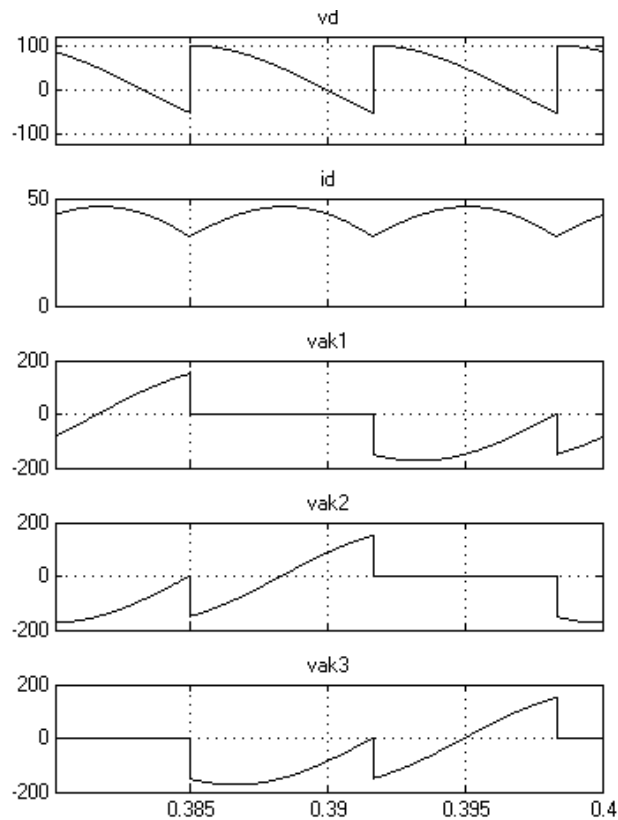
Σε αυτά τα διαστήματα η τάση στα άκρα του TH1 προέρχεται από τις αντίστοιχες πολικές ενώ στα υπόλοιπα από την φασική  $v_{s1}$



**Παρατήρηση 2:** προφανώς είναι δυνατόν να υπάρχει συνεχή αγωγή ακόμα και για  $\alpha > 30^\circ$  αν η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο κατά την περίοδο που δρα ως παθητικό στοιχείο είναι ικανή να γεφυρώσει το κενό που προκαλεί η τιμή της γωνίας.

**Παράδειγμα**

Να τεθεί  $\alpha = 60^\circ$ ,  $R = 1 \Omega$ ,  $L = 0.01 \text{ H}$  και να εξετασθούν οι κυματομορφές του κυκλώματος στην μόνιμη κατάσταση

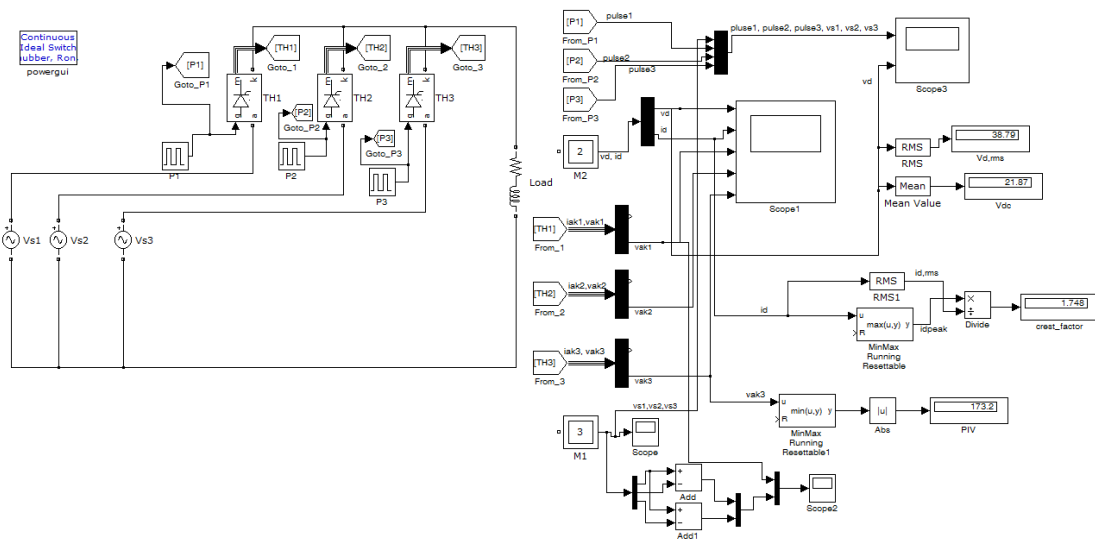


### 8.13 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων ελεγχόμενης ανόρθωσης τριών παλμών
- την χρήση του MinMax Running Resettable block για την εύρεση της peak τιμής ενός σήματος και τον υπολογισμό του συντελεστή κορυφής
- την χρήση του MinMax Running Resettable block για την εύρεση της μέγιστης ανάστροφης τάσης PIV
- τις κυματομορφές που αφορούν τον ελεγχόμενο ανορθωτή τριών παλμών παλμών και την γενικότερη λειτουργία του

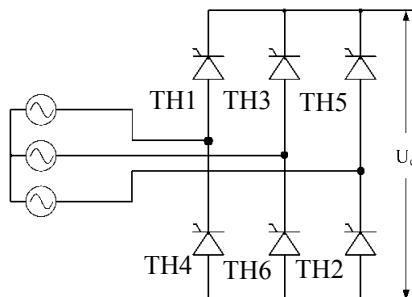
Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την τελική μορφή του κυκλώματος



## ΕΝΟΤΗΤΑ 9: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής έξι παλμών

### 9.1 Γενικά (ωμικό φορτίο)

Ονομάζεται και ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής γέφυρας ή ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής πλήρους κύματος ή πλήρως ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής και ουσιαστικά είναι το τριφασικό αντίστοιχο του ανορθωτή 4 παλμών. Χρησιμοποιεί 6 θυρίστρος σε συνδεσμολογία γέφυρας όπως φαίνεται στο σχήμα.



Ουσιαστικά ομοιάζει με δύο ανορθωτές τριών παλμών συνδεδεμένων αντίρροπα, αποτελούμενους από την άνω τριάδα (TH1, TH3, TH5) και την κάτω τριάδα (TH4, TH6, TH2). Εφόσον η κάτω τριάδα είναι ανάστροφα συνδεδεμένη θα πρέπει να παίρνει παλμό σε  $+180^\circ$  σε σχέση με την άνω. Υπενθυμίζεται ότι η γωνία  $\alpha$  στους τριφασικούς ανορθωτές μετριέται **μετά** τις  $30^\circ$ .

Η ονομασία των θυρίστρος σχετίζεται με την σειρά που τα θυρίστρος δέχονται παλμό και συγκεκριμένα

	γωνία έναυσης		γωνία έναυσης
TH1	$\alpha$	TH4	$\alpha+180$
TH3	$\alpha+120$	TH6	$\alpha+120+180$
TH5	$\alpha+240$	TH2	$\alpha+240+180=\alpha+60$

δηλαδή ουσιαστικά:

	Παλμός έναυσης στις:		Παλμός έναυσης στις:
TH1	$30+\alpha$	TH4	$30+\alpha+180=210+\alpha$
TH3	$30+\alpha+120=150+\alpha$	TH6	$30+\alpha+20+180=330+\alpha$
TH5	$30+\alpha+240=270+\alpha$	TH2	$30+\alpha+240+180=90+\alpha$

Ο πίνακας καταστάσεων για ωμικό φορτίο είναι:

$30+\rightarrow$	$\alpha\sim\alpha+60$	$\alpha+60\sim\alpha+120$	$\alpha+120\sim\alpha+180$	$\alpha+180\sim\alpha+240$	$\alpha+240\sim\alpha+300$	$\alpha+300\sim\alpha+360$ $=\alpha+300-0+\alpha$
TH1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
TH2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
TH3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
TH4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
TH5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
TH6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

**Παρατήρηση 1:** Το κάθε θυρίστρος άγει για  $120^\circ$  και υπάρχει εναλλαγή κάθε  $60^\circ$  (δηλαδή το κάθε συγκεκριμένο ζεύγος άγει για  $60^\circ$ )

**Παρατήρηση 2:** απαιτούνται 6 διαφορετικοί παλμοί. Συνεπώς η αλλαγή στην γωνία  $\alpha$  θα προσθέτει σημαντικό φόρτο εργασίας σε κάθε εξομοίωση με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.



**Παρατήρηση 3:** σε συνεχή αγωγή, για την τάση στο φορτίο θα ισχύει:

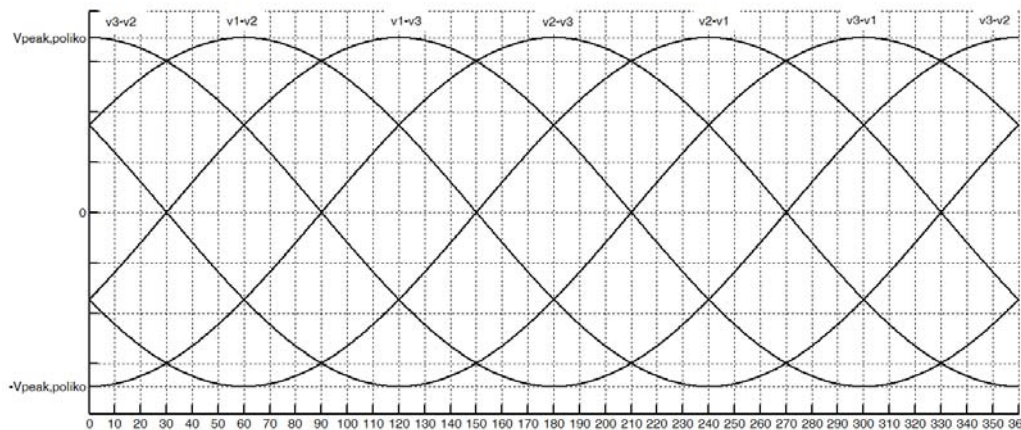
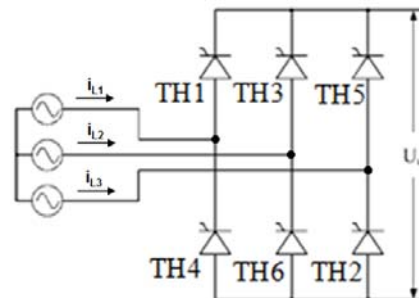
30+→	$\alpha\sim\alpha+60$	$\alpha+60\sim\alpha+120$	$\alpha+120\sim\alpha+180$	$\alpha+180\sim\alpha+240$	$\alpha+240\sim\alpha+300$	$\alpha+300\sim\alpha+360$ $=\alpha+300\sim 0+\alpha$
TH1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
TH2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
TH3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
TH4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
TH5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
TH6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
$v_d$	$v1-v2$	$v1-v3$	$v2-v3$	$v2-v1$	$v3-v1$	$v3-v2$

**Παρατήρηση 4:** αν θεωρηθεί ως θετική φορά για τα ρεύματα των φάσεων αυτή που αναχωρεί από τις πηγές, τότε για τα ρεύματα των φάσεων (σε συνεχή αγωγή) θα ισχύει:

$$i_{L1}(t) = \begin{cases} i_d(t) = i_{AK1}(t), & \text{όταν άγει το TH1} \\ -i_d(t) = -i_{AK4}(t), & \text{όταν άγει το TH4} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH1 ούτε το TH4} \end{cases}$$

$$i_{L2}(t) = \begin{cases} i_d(t) = i_{AK3}(t), & \text{όταν άγει το TH3} \\ -i_d(t) = -i_{AK6}(t), & \text{όταν άγει το TH6} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH3 ούτε το TH6} \end{cases}$$

$$i_{L3}(t) = \begin{cases} i_d(t) = i_{AK5}(t), & \text{όταν άγει το TH5} \\ -i_d(t) = -i_{AK2}(t), & \text{όταν άγει το TH2} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH5 ούτε το TH2} \end{cases}$$



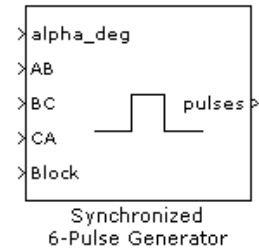
**Παρατήρηση 5:** Το όριο συνεχής αγωγής για ωμικό φορτίο θα είναι  $\alpha=60^\circ$

**Παρατήρηση 6:** Το όριο αγωγής για ωμικό φορτίο θα είναι  $\alpha=120^\circ$

**Παρατήρηση 7:** Για ωμικό επαγωγικό φορτίο το όριο συνεχής αγωγής είναι οι  $90^\circ$  (το αν θα υπάρχει συνεχή αγωγή για  $60 < \alpha < 90$  εξαρτάται από την τιμή της επαγωγής ή, ορθότερα, από την τιμή της διαφοράς φάσης  $\phi$ )

## 9.2 Συνολική δημιουργία παλμών – Synchronized 6-Pulse Generator block

Ο ανορθωτής 6 παλμών έχει μεγάλη πρακτική εφαρμογή (σε αντίθεση με τον τριών παλμών). Έτσι στο Simulink έχει συμπεριληφθεί ένα ειδικό block για την εύκολη δημιουργία των αναγκαίων παλμών, το **Synchronized 6-Pulse Generator** block.

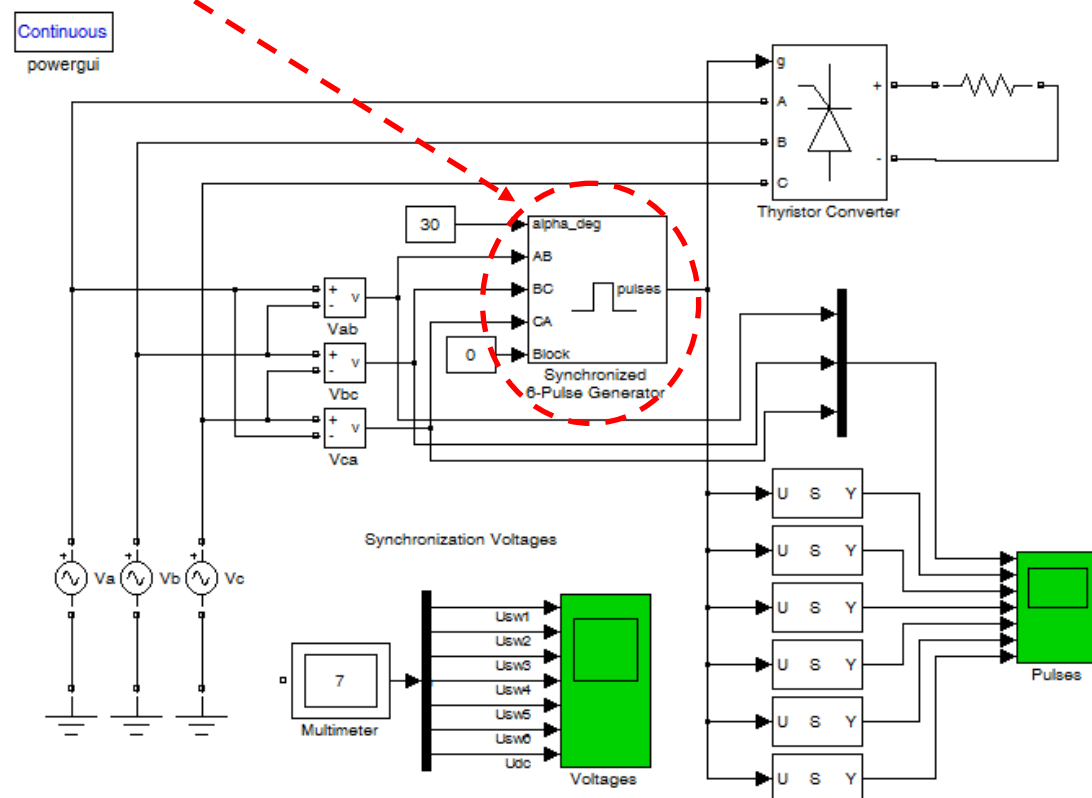


**Παρατήρηση 1:** σε νεότερες εκδόσεις της MATLAB έχει προστεθεί το Pulse Generator (Thyristor, 6-Pulse) block ως βελτίωση. Η λειτουργία του όμως είναι περισσότερο πολύπλοκη από ότι χρειάζεται για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

**Παρατήρηση 2:** ένας έμμεσος τρόπος να βρεθεί το block σε νεότερες εκδόσεις MATLAB που φαινομενικά δεν το υποστηρίζουν είναι ο εξής: στο workspace της MATLAB δώστε την εντολή:

```
>> power_sixpulses
```

Η MATLAB θα ανοίξει ένα έτοιμο μοντέλο (παράδειγμα), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, από το οποίο μπορεί να αντιγραφεί το **Synchronized 6-Pulse Generator**.

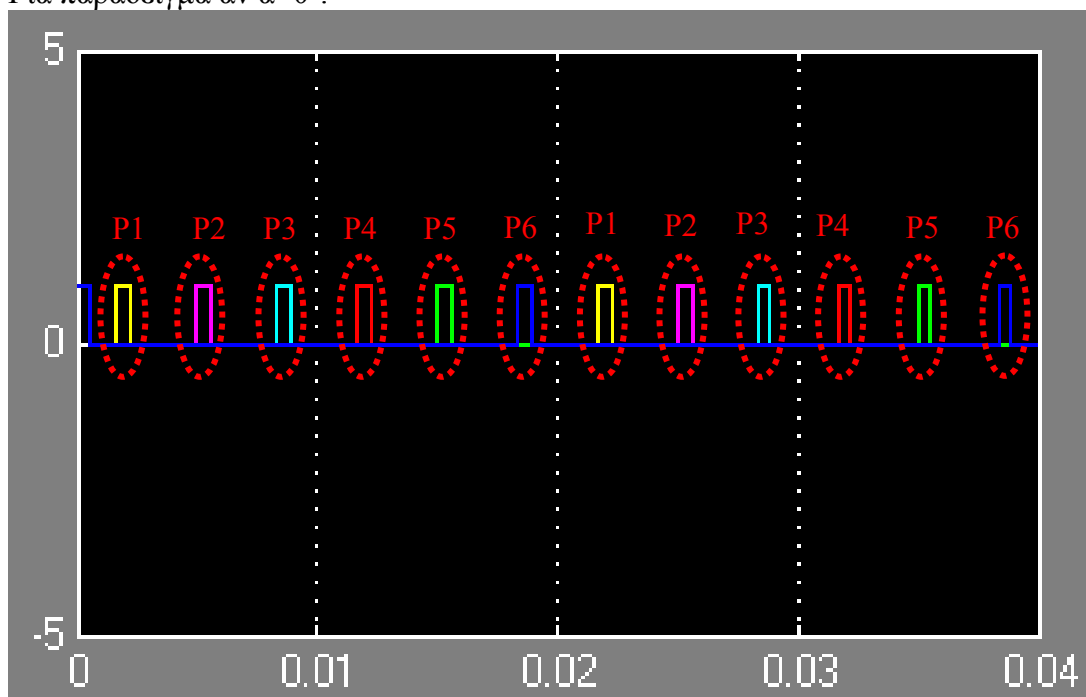


**Παρατήρηση 3:** αφού γίνει αντιγραφή και επικόλληση του Synchronized 6-Pulse Generator θα πρέπει να οριστεί η συχνότητα ως 50 Hz στις παραμέτρους του

**Παρατήρηση 4:** Στο **Synchronized 6-Pulse Generator** block δίνονται σαν εισοδοι οι πολικές τάσεις και η γωνία  $\alpha$  και το block δίνει σαν έξοδο 6 διαφορετικές

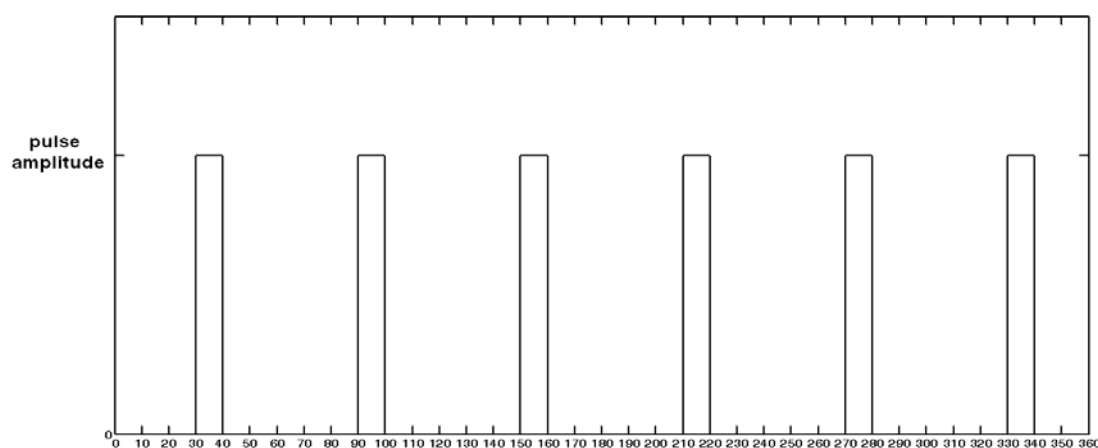
ακολουθίες παλμών, με την πρώτη έξοδο να αντιστοιχεί στο TH1, την δεύτερη στο TH2 κ.ο.κ.

Για παράδειγμα αν  $\alpha=0^\circ$ :



**Παρατήρηση 5:** Να σημειωθεί ότι κατά την πρώτη ενεργοποίηση (δηλαδή μόνο στην πρώτη περίοδο) το block δημιουργεί παλμό και στην γωνία 0, αλλά αυτό δεν διατηρείται στις επόμενες περιόδους.

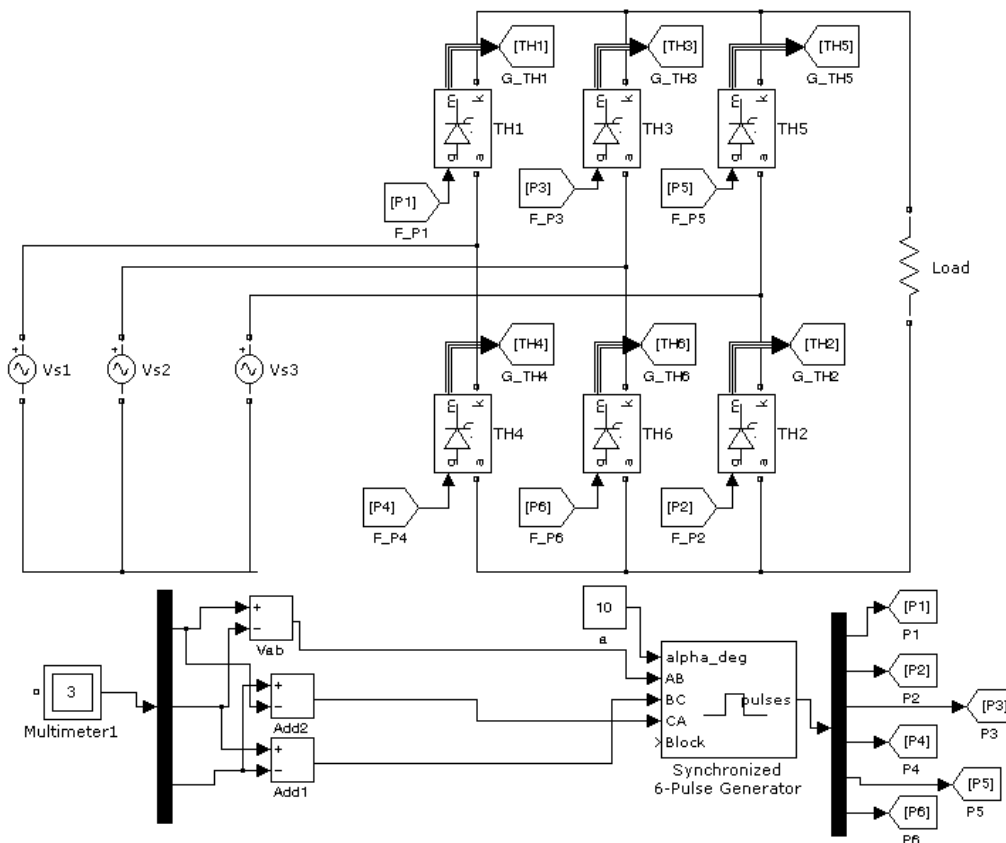
**Παρατήρηση 6:** αν το σήμα σταλεί στην MATLAB ώστε να σχεδιαστεί ως προς τις γωνίες (εδώ  $\alpha=0^\circ$  και διάρκεια παλμού ίση με  $10^\circ$ ) θα προκύψει το παρακάτω σχήμα (στην μόνιμη κατάσταση)



**Παρατήρηση 7:** στο έτοιμο παράδειγμα `power_sixpulses` για να αποκτηθούν οι πολικές τάσεις έχουν συνδεθεί κατάλληλα βολτόμετρα. Εναλλακτικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πολύμετρο και `add` blocks όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα των τριών παλμών

### 9.3 Μοντελοποίηση στο simulink - Αναλυτικά

Για την αναλυτική μοντελοποίηση απαιτούνται έξι thyristor και οι ανάλογοι παλμοί. Ένα ενδεικτικό σχήμα παρουσιάζεται παρακάτω.



### 9.4 Μοντελοποίηση στο simulink – Το Universal Bridge block

Το simulink παρέχει επίσης την δυνατότητα για αυτοματοποιημένη εξομοίωση κυκλωμάτων γέφυρας μέσω του **Universal Bridge** block. Στο block αυτό εισάγονται οι τρεις φάσεις και το σήμα που περιέχει τους παλμούς οδήγησης (η έξοδος από το αντίστοιχο συνολικό pulse generator)

**Παρατήρηση 1:** στις παραμέτρους του block μπορεί να οριστεί το είδος του ηλεκτρονικού στοιχείου που χρησιμοποιείται, τα χαρακτηριστικά του και οι ζητούμενες μετρήσεις. Στις μετρήσεις πέρα από τις πολικές τάσεις μπορούν να επιλεγούν οι σχετικές τάσεις και ρεύματα για τα ηλεκτρονικά στοιχεία που απαρτίζουν την γέφυρα.

**Παρατήρηση 2:** αν οι ηλεκτρονικοί διακόπτες γίνουν συνολικά ιδανικοί από το Configure Parameters του powergui, τότε οι σχετικές ρυθμίσεις θα μεταφερθούν και στο **Universal Bridge** block.

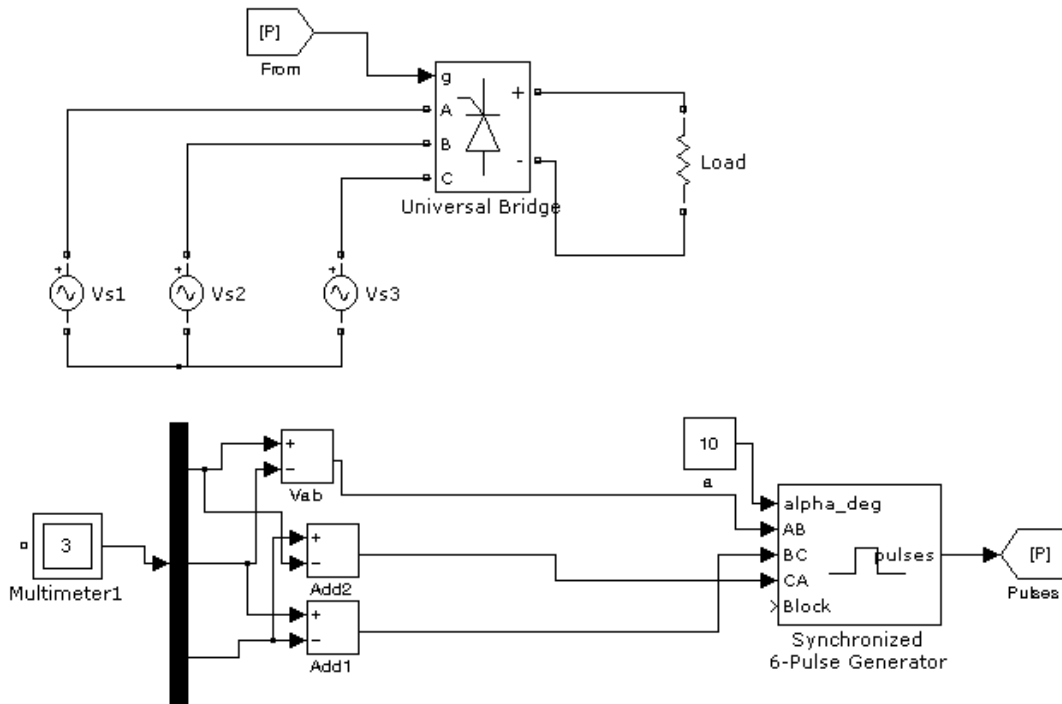
**Universal Bridge**

Parameters

- Number of bridge arms: 3
- Snubber resistance Rs (Ohms): 1e5
- Snubber capacitance Cs (F): inf
- Power Electronic device: Thyristors
- Ron (Ohms): 1e-3
- Lon (H): 0
- Forward voltage Vf (V): 0

Measurements

- None
- None
- Device voltages
- Device currents
- UAB UBC UCA UDC voltages
- All voltages and currents

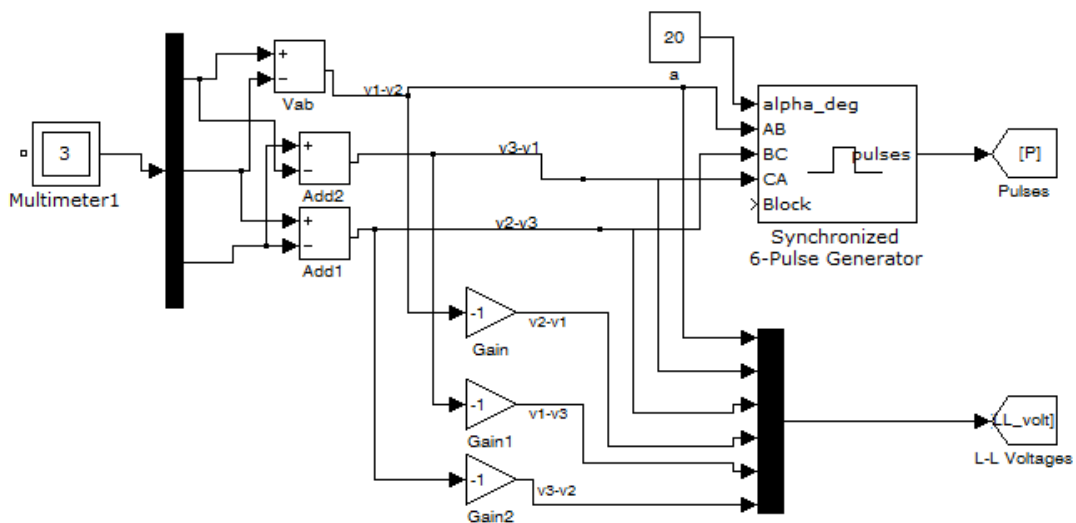


### 9.5 To Gain block

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, χρήσιμο για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος είναι να μοντελοποιηθούν όλες οι πολικές τάσεις. Συνεπώς πέρα από τις  $AB=v_{s1}-v_{s2}$ ,  $BC=v_{s2}-v_{s3}$  και  $CA=v_{s3}-v_{s1}$  θα χρειαστούν και οι:

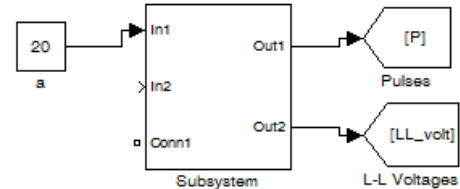
- $BA=v_{s2}-v_{s1}=-(v_{s1}-v_{s2})=-AB$
- $CB=v_{s3}-v_{s2}=-(v_{s2}-v_{s3})=-BC$
- $AC=v_{s1}-v_{s3}=-(v_{s3}-v_{s1})=-CA$

Ο πλέον εύκολος τρόπος για να γίνει αυτό είναι με χρήση του **Gain** block, το οποίο ενισχύει (πολλαπλασιάζει) το σήμα κατά ένα παράγοντα κέρδους (Gain) ο οποίος απεικονίζεται στο εσωτερικό του.

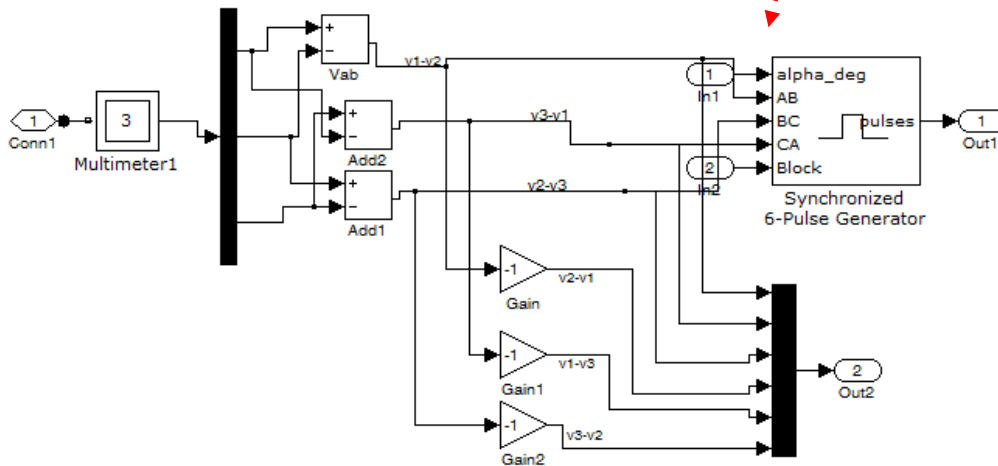


### 9.6 Δημιουργία Υποσυστημάτων (Subsystems)

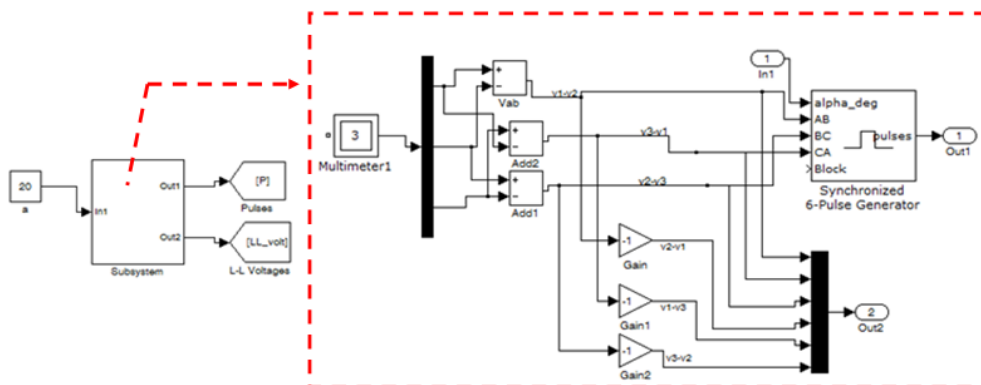
Το SIMULINK δίνει την δυνατότητα δημιουργίας υποσυστημάτων, δηλαδή την δυνατότητα δημιουργίας ενός ευρύτερου block το οποίο περιέχει μέρος του συνολικού μοντέλου και έχει και αυτό (όπως κάθε block) εισόδους και εξόδους. Για παράδειγμα, το κομμάτι που αφορά την δημιουργία παλμών και πολικών τάσεων θα μπορούσε να είναι ένα block με είσοδο την γωνία  $\alpha$  και δύο εξόδους: μία που να περιέχει τους παλμούς και μία που να περιέχει το σήμα των πολικών τάσεων. Για να γίνει αυτό αρκεί να επιλεγθεί το μέρος του μοντέλου που επιθυμείται να συμπεριληφθεί στο υποσύστημα, να γίνει δεξί κλικ και να επιλεγθεί το **Create Subsystem**.



**Παρατήρηση 1:** Για να δείτε τι περιέχει το υποσύστημα αρκεί να γίνει διπλό κλικ επάνω του.



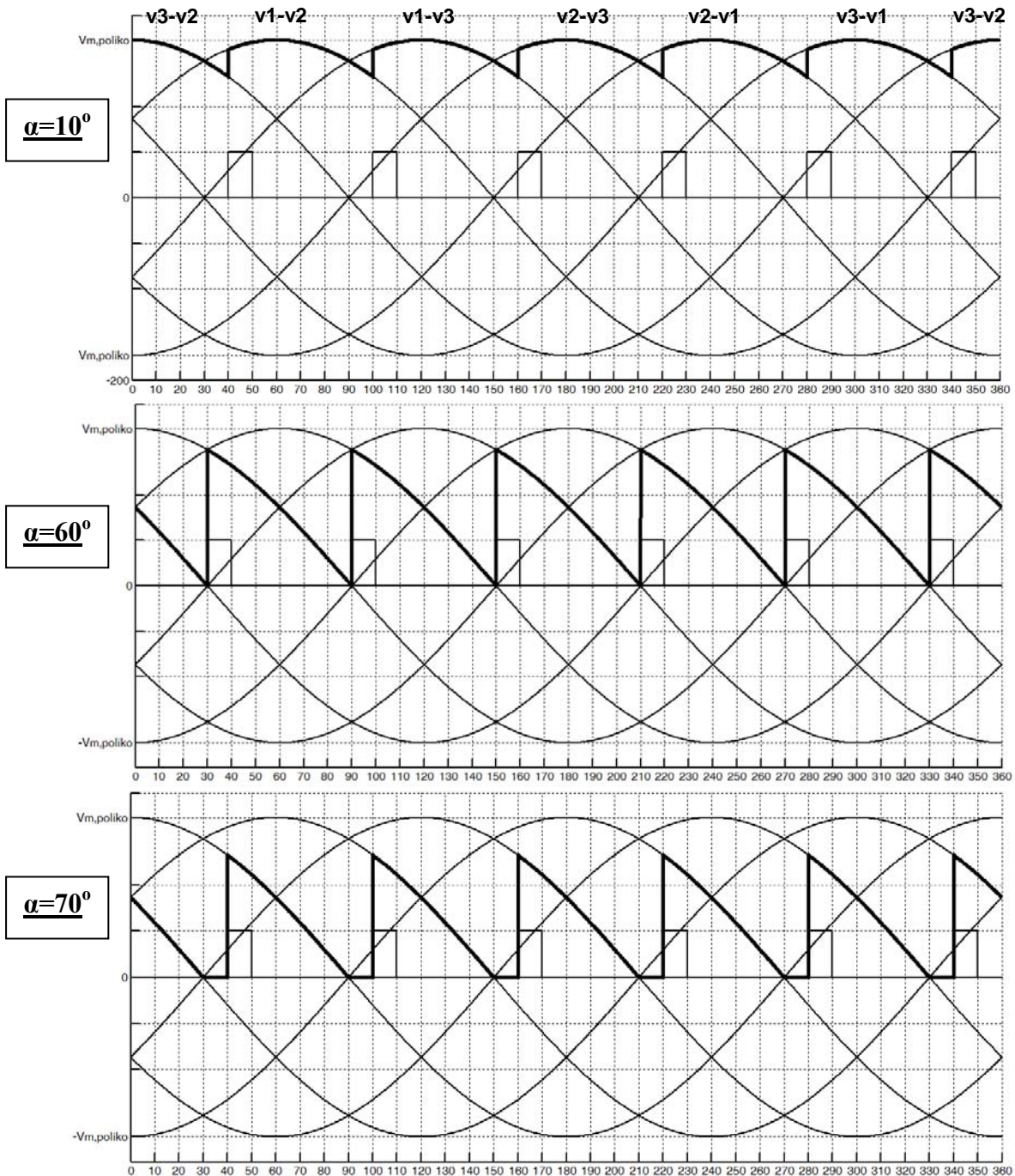
**Παρατήρηση 2:** οι εισόδοι και οι εξόδοι του υποσυστήματος σηματοδοτούνται στο εσωτερικό του με τα **in** και **out blocks** ενώ οι ακροδέκτες διασύνδεσης με το **Conn block**. Το SIMULINK αυτόματα θα αναθέσει εισόδους και εξόδους στους αρχικούς ακροδέκτες. Αν δεν επιθυμείται να χρησιμοποιούνται κάποιες από αυτές (όπως εδώ η In2 και η Conn1) αρκεί απλά να αφαιρεθούν από το εσωτερικό του υποσυστήματος.





### 9.7.1 Ωμικό φορτίο - Τάση στο φορτίο

Σύμφωνα με την λειτουργία του κυκλώματος, η τάση στο φορτίο για διαφορετικές γωνίες έναυσης φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Για ευκολότερη κατανόηση έχουν συμπεριληφθεί οι πολικές τάσεις και οι παλμοί, ενώ έχει γίνει εξαγωγή και επεξεργασία του διαγράμματος στην MATLAB ώστε να φαίνονται οι αντίστοιχες γωνίες (αντί για δευτερόλεπτα).

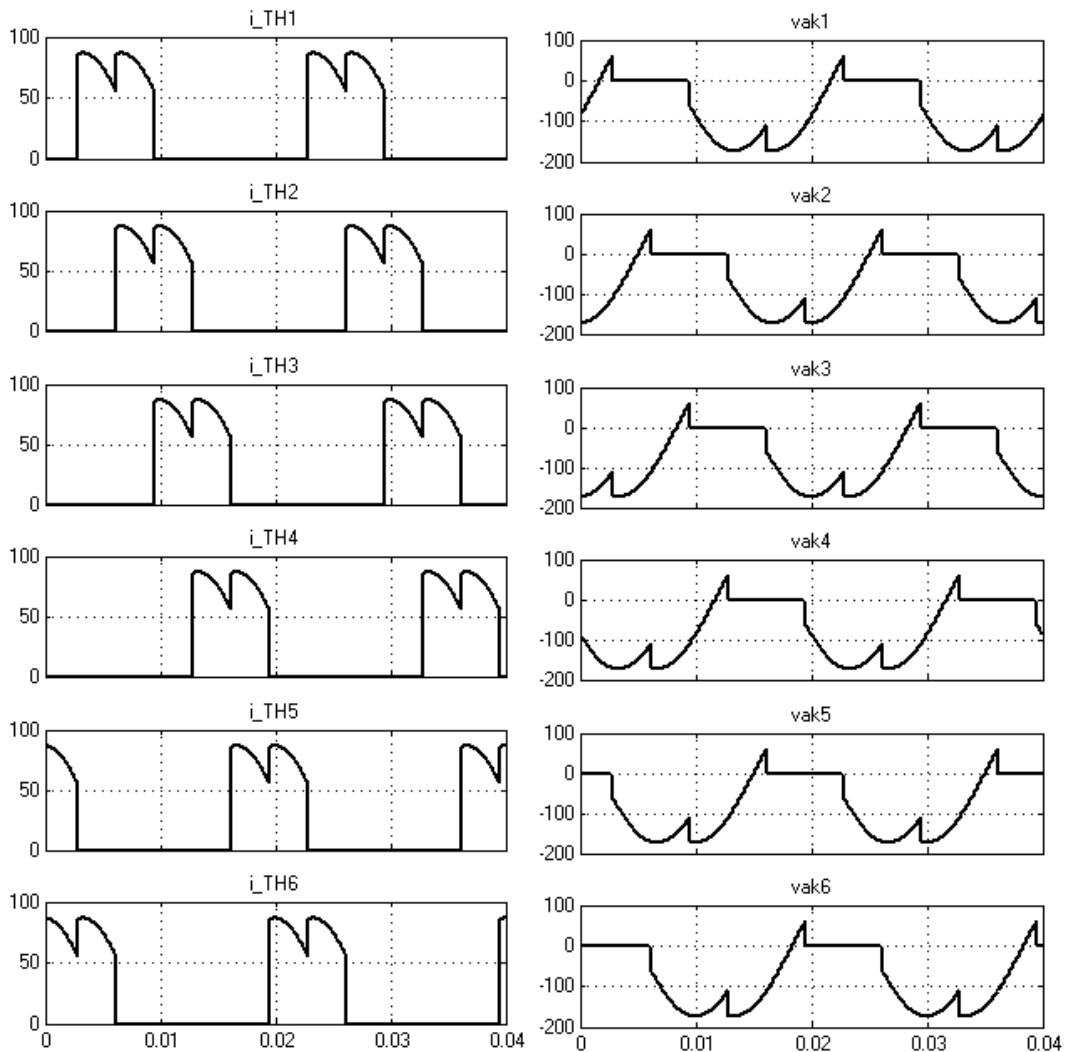


### 9.7.2 Ωμικό φορτίο - Ρεύματα και τάσεις στα άκρα των θυρίστορ

Στις μετρήσεις που μπορεί να στείλει το Universal Bridge Block συμπεριλαμβάνονται οι τάσεις και τα ρεύματα που αφορούν τα θυρίστορ αλλά και οι πολικές τάσεις. Με την ένδειξη **sw** εννοείται ο αντίστοιχος ηλεκτρονικός διακόπτης (**switch**) ο οποίος στην γέφυρα με θυρίστορ υλοποιείται από τα αντίστοιχα θυρίστορ. Έτσι το Isw1 είναι το ρεύμα που διαρρέει το θυρίστορ 1, το Isw2 είναι το ρεύμα που διαρρέει το θυρίστορ 2 κ.ο.κ. Αντίστοιχα ισχύουν για τις τάσεις (Usw1 η τάση στα άκρα του θυρίστορ 1, Usw2 η τάση στα άκρα του θυρίστορ 2 κ.ο.κ.). Επίσης δίνει την δυνατότητα για μέτρηση της τάσης μεταξύ των φάσεων (Uab, Ubc, Uca).

Available Measurements	
Usw1:	Universal Bridge
Usw2:	Universal Bridge
Usw3:	Universal Bridge
Usw4:	Universal Bridge
Usw5:	Universal Bridge
Usw6:	Universal Bridge
Uab:	Universal Bridge
Ubc:	Universal Bridge
Uca:	Universal Bridge
Udc:	Universal Bridge
Usrc:	Vs3
Usrc:	Vs2
Usrc:	Vs1
Isw1:	Universal Bridge
Isw2:	Universal Bridge
Isw3:	Universal Bridge
Isw4:	Universal Bridge
Isw5:	Universal Bridge
Isw6:	Universal Bridge

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα ρεύματα και οι τάσεις στα άκρα των θυρίστορ για  $\alpha=20^\circ$ ,  $R=2 \Omega$  και  $V_{\text{peak,φασικό}}=100 \text{ V}$





### 9.7.3 Ωμικό φορτίο - Ρεύματα στις φάσεις

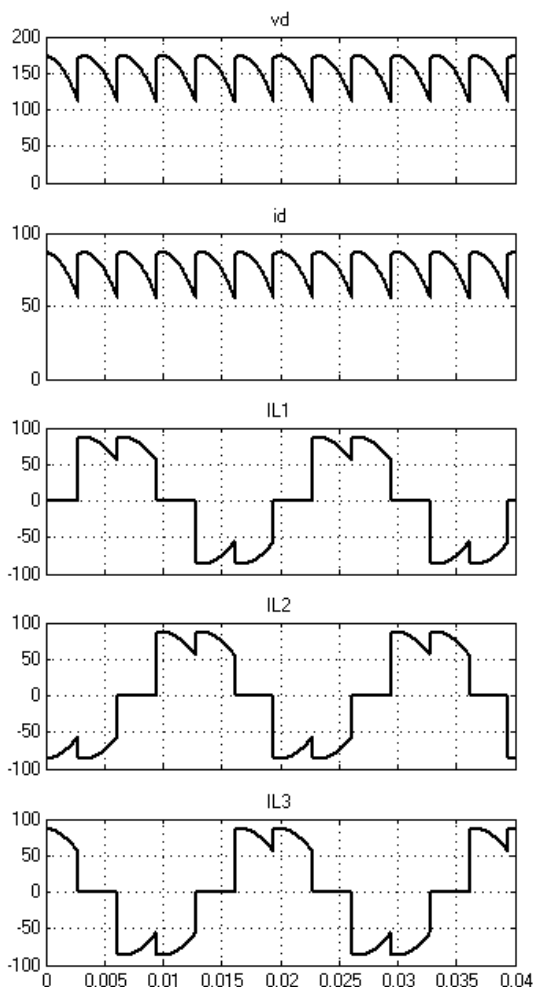
Για να μετρηθούν τα ρεύματα στις φάσεις θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αμπερόμετρα σε σειρά με τις πηγές. Όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες κυματομορφές και όπως αναλύθηκε νωρίτερα, τα ρεύματα στις φάσεις είναι AC. ( $\alpha=20^\circ, R=2 \Omega, V_{\text{peak,φασικό}}=100 \text{ V}$ )

$$i_{L1}(t) = \begin{cases} i_d(t)=i_{AK1}(t), & \text{όταν άγει το TH1} \\ -i_d(t)=-i_{AK4}(t), & \text{όταν άγει το TH4} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH1 ούτε το TH4} \end{cases}$$

$$i_{L2}(t) = \begin{cases} i_d(t)=i_{AK3}(t), & \text{όταν άγει το TH3} \\ -i_d(t)=-i_{AK6}(t), & \text{όταν άγει το TH6} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH3 ούτε το TH6} \end{cases}$$

$$i_{L3}(t) = \begin{cases} i_d(t)=i_{AK5}(t), & \text{όταν άγει το TH5} \\ -i_d(t)=-i_{AK2}(t), & \text{όταν άγει το TH2} \\ 0, & \text{όταν δεν άγει ούτε το TH5 ούτε το TH2} \end{cases}$$

30°+	20° έως 80°	80° έως 140°	140° έως 200°	200° έως 260°	260° έως 320°	320° έως 380° (20°)
TH1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
TH2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
TH3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
TH4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
TH5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
TH6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
$i_{L1}$	$i_d$	$i_d$	0	$-i_d$	$-i_d$	0
$i_{L2}$	$-i_d$	0	$i_d$	$i_d$	0	$-i_d$
$i_{L3}$	0	$-i_d$	$-i_d$	0	$i_d$	$i_d$



### 9.8.1 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο

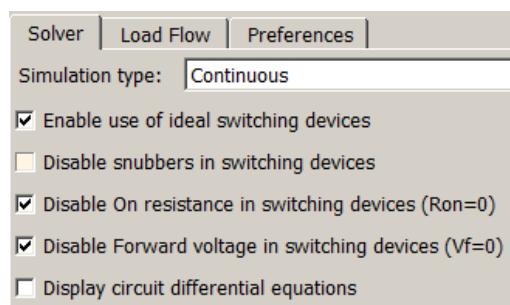
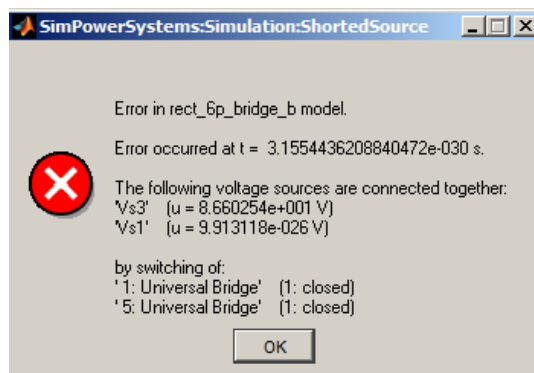
Για την εξομοίωση κυκλωμάτων τριφασικής ανόρθωσης γέφυρας με ωμικό επαγωγικό φορτίο είναι πιθανόν να χρειαστεί να ενεργοποιηθούν τα snubber κυκλώματα. Αν κατά την εξομοίωση προκύψει μήνυμα σφάλματος βραχυκύκλωσης των πηγών, τότε μια απλή λύση είναι στο **Configure parameters** του **powergui** block να ενεργοποιηθούν τα snubber κυκλώματα. Αυτή η επιλογή θα επιτρέψει τον ορισμό των R,C τιμών του snubber στις παραμέτρους του **Universal Bridge** block

Number of bridge arms:

Snubber resistance Rs (Ohms)

Snubber capacitance Cs (F)

Power Electronic device

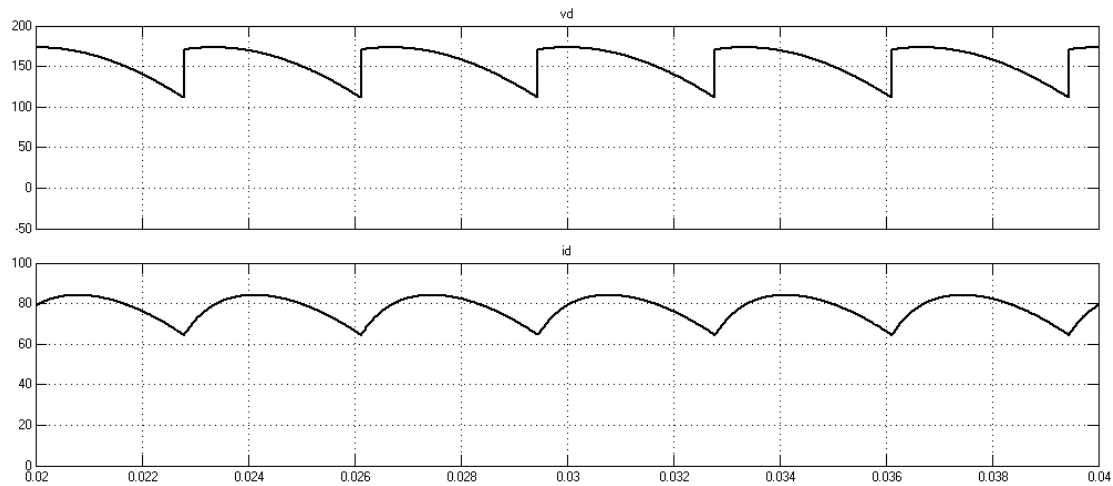


### 9.8.2 Συνεχή-ασυνεχή αγωγή (ωμικό-επαγωγικό φορτίο)

Σε περίπτωση συνεχούς αγωγής δεν θα υπάρχει μεταβολή στην κυματομορφή της τάσης στο φορτίο αλλά μόνο σε αυτή του ρεύματος.

#### Παράδειγμα

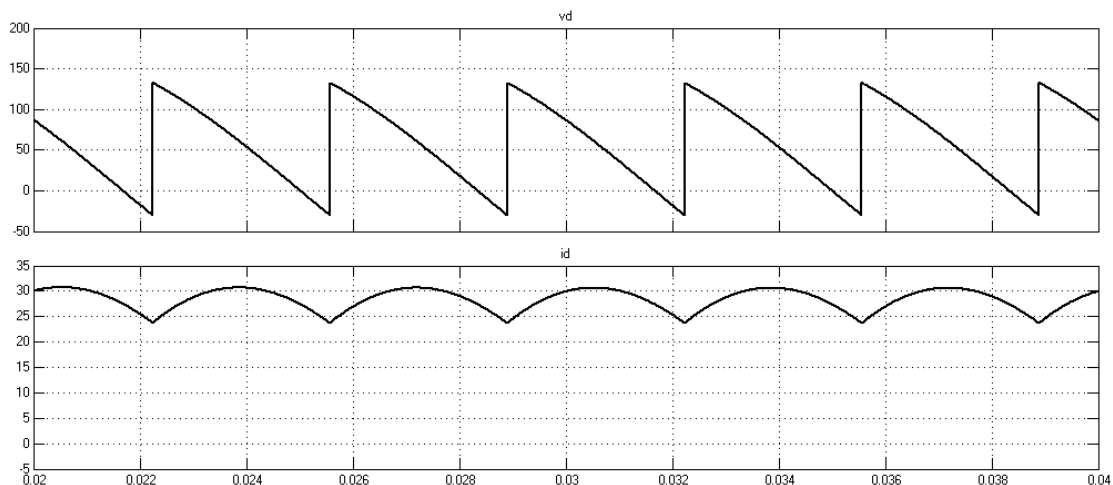
Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για  $\alpha=20^\circ$ ,  $V_{\text{peak,φασικό}}=100\text{ V}$ ,  $R=2\ \Omega$  και  $L=0.001\text{ H}$  για την μόνιμη κατάσταση



**Παρατήρηση 1:** συνεχή αγωγή μπορεί να υπάρχει και για γωνίες μεγαλύτερες των  $60^\circ$  όταν υπάρχει ωμικό επαγωγικό φορτίο.

#### Παράδειγμα

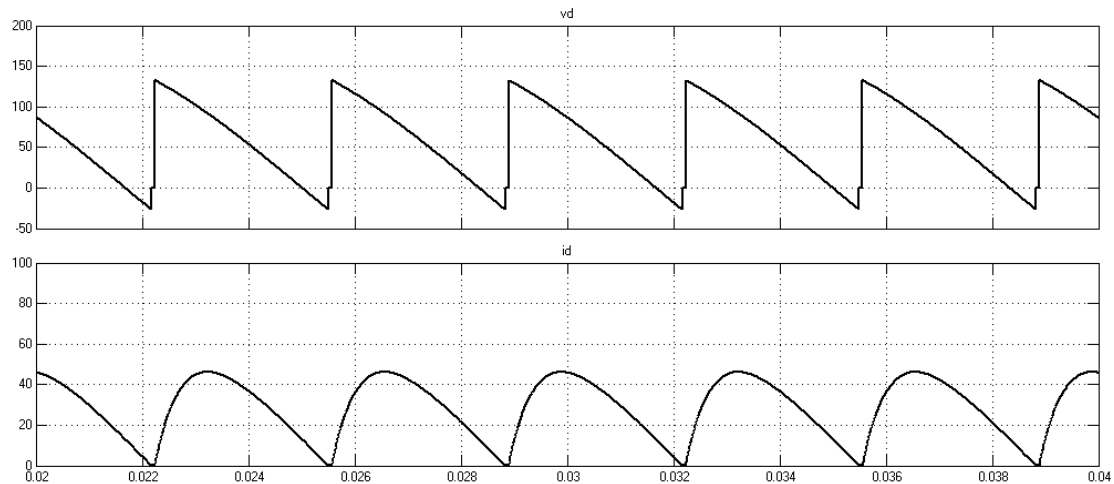
Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για  $\alpha=70^\circ$ ,  $V_{\text{peak,φασικό}}=100\text{ V}$ ,  $R=2\ \Omega$  και  $L=0.01\text{ H}$  για την μόνιμη κατάσταση



**Παρατήρηση 2:** προφανώς υπάρχει περίπτωση το πηνίο να μην είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μετατρέψει την ασυνεχή αγωγή σε συνεχή

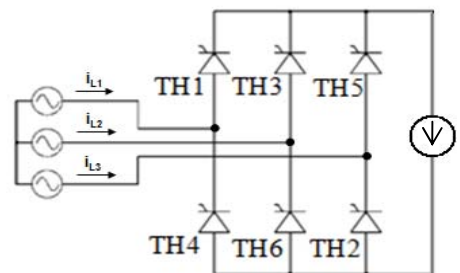
**Παράδειγμα**

Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για  $\alpha=70^\circ$ ,  $V_{\text{peak,φασικό}}=100 \text{ V}$ ,  $R=2 \Omega$  και  $L=0.001 \text{ H}$  για την μόνιμη κατάσταση

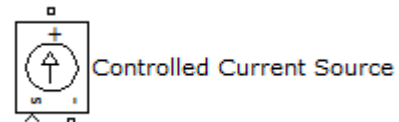


**9.9.1 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – το Controlled Current Source block**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου στο φορτίο είναι συνδεδεμένη μια πηγή ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση προφανώς θα υπάρχει συνεχής αγωγή. Για την μοντελοποίηση της πηγής ρεύματος θα χρησιμοποιηθεί το **Controlled Current Source** block.

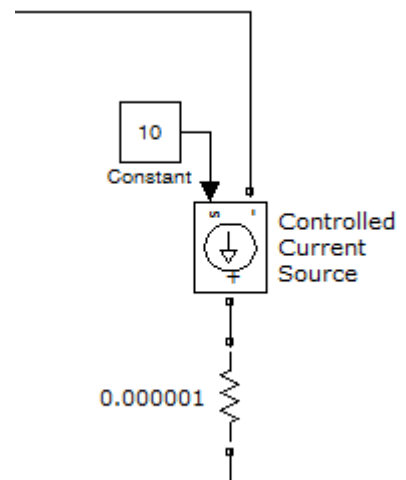


**Παρατήρηση 1:** Το block αυτό μοντελοποιεί μια πηγή ρεύματος που παράγει ρεύμα σύμφωνα με το σήμα ελέγχου που δέχεται στην είσοδο που σηματοδοτείται με το γράμμα *s*.



**Παρατήρηση 2:** για ορθή λειτουργία θα πρέπει να συνδεθεί και μία κατανάλωση σε σειρά με την πηγή ρεύματος (π.χ. μια μικρή ωμική αντίσταση)

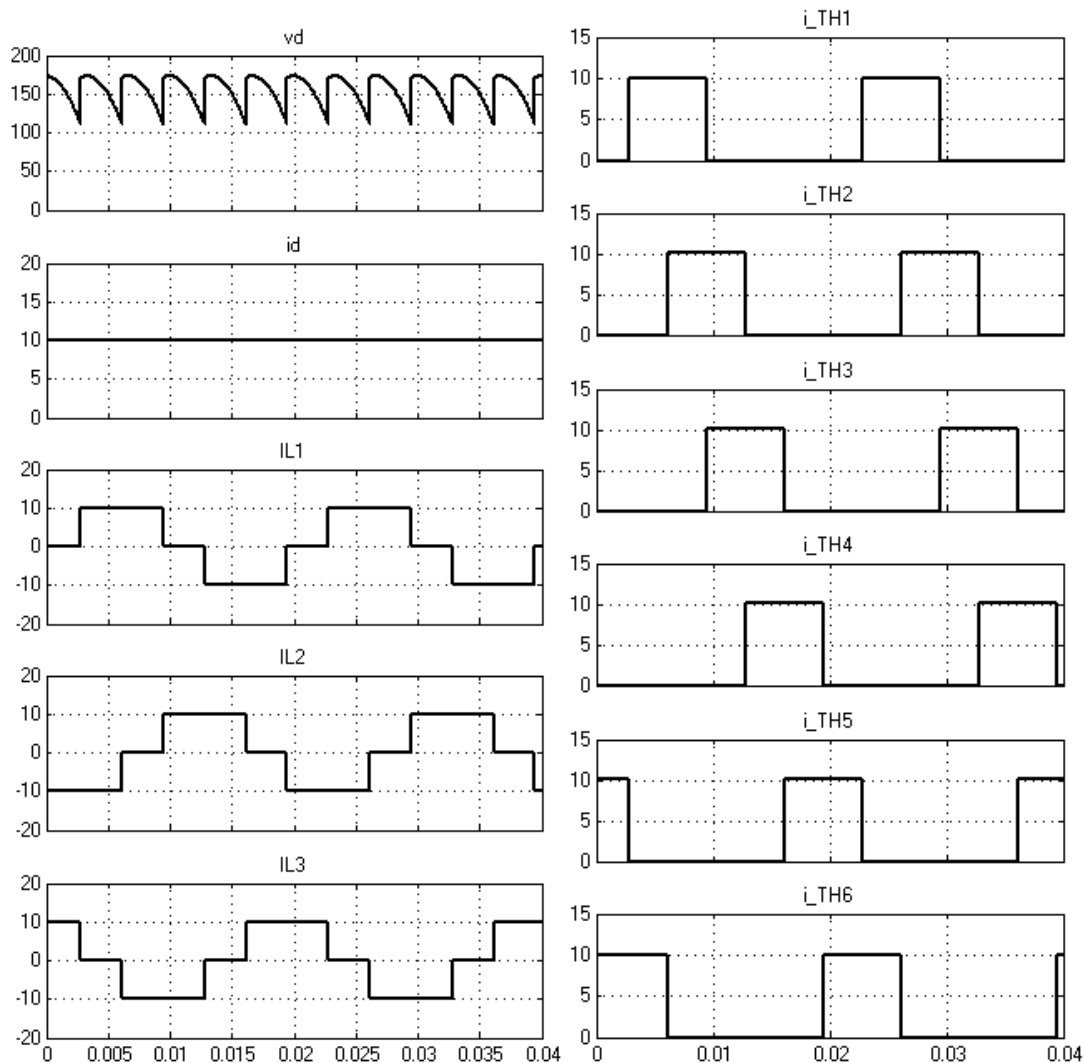
**Παρατήρηση 3:** Για την μοντελοποίηση της πηγής ρεύματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένα **AC Current Source** block όπου θα ρυθμίζονταν η συχνότητα ίση με 0. Αυτός ο τρόπος όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην έκδοση R14SP2 της MATLAB ή σε νεότερη αφού τότε διορθώθηκε σχετικό bug.



### 9.9.2 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – Κυματομορφές

#### Παράδειγμα

Να εξεταστούν οι κυματομορφές του κυκλώματος για  $\alpha=20^\circ$ ,  $V_{\text{peak,φασικό}}=100\text{ V}$ ,  $I_d=10\text{ A}$ ,  $R=0.000001\ \Omega$



**Παρατήρηση 1:** η περίπτωση που έχει ειδικό ενδιαφέρον είναι για γωνίες μεγαλύτερες των  $90^\circ$

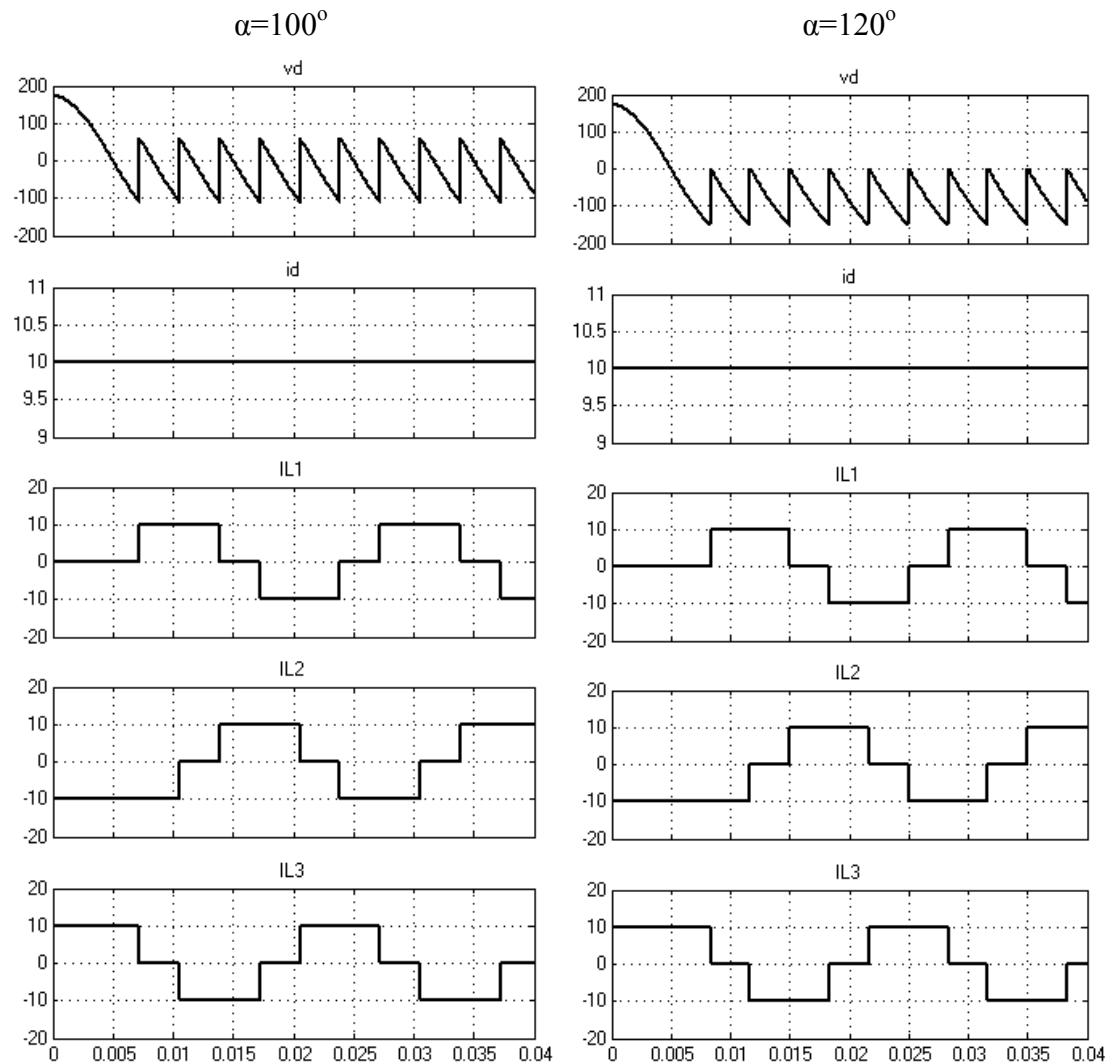
**Παρατήρηση 2:** η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο δίνεται από τον τύπο:

$$V_{dc} = \frac{3V_{\text{peak,πολικό}}}{\pi} \cos\alpha$$

Οπότε βάσει του τύπου για  $\cos\alpha < 0 \Rightarrow \alpha > 90^\circ$  θα ισχύει  $V_{dc} < 0$  και το κύκλωμα θα λειτουργεί σαν αντιστροφέας μεταφέροντας ενέργεια από το φορτίο στο δίκτυο. Όμως με παθητικό φορτίο (π.χ. ωμικό-επαγωγικό) δεν μπορεί να υπάρξει συνεχή αγωγή για  $\alpha > 90^\circ$ . Όταν όμως στο φορτίο υπάρχει ενεργητικό φορτίο (π.χ. πηγή ρεύματος) τότε είναι δυνατή η λειτουργία αντιστροφέα.

**Παράδειγμα**

Να εξεταστούν οι κυματομορφές του κυκλώματος για  $V_{\text{peak,φασικό}}=100 \text{ V}$ ,  $I_d=10 \text{ A}$ ,  $R=0.000001 \Omega$  και διαφορετικά  $\alpha$  ( $\alpha>90^\circ$ )

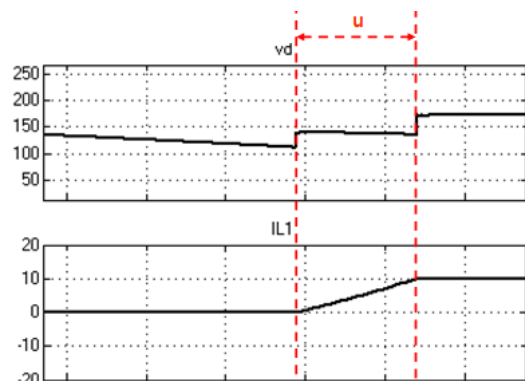


**9.9.3 Πηγή ρεύματος στο φορτίο – Μετάβαση**

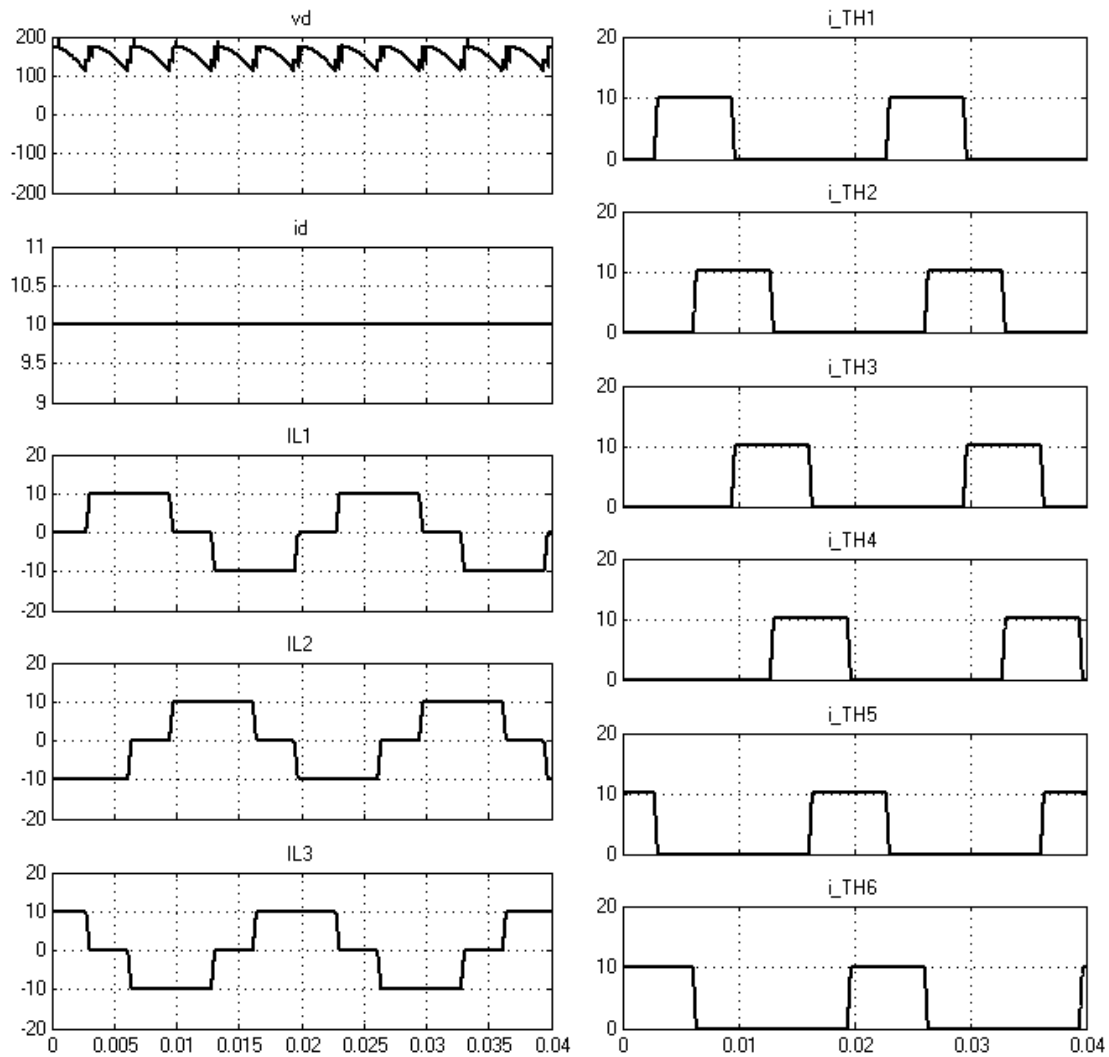
Για να μελετηθεί η επίδραση της εσωτερικής επαγωγής του δικτύου να συνδεθεί μια επαγωγή  $L_s$  σε σειρά με κάθε πηγή τάσης.

**Παρατήρηση 1:** για όσο διαρκεί η μετάβαση η τάση στο φορτίο θα είναι μειωμένη λόγω του βραχυκυκλώματος (αλλά όχι μηδέν)

**Παρατήρηση 2:** συνεπώς η μέση τιμή της τάσης θα είναι μειωμένη κατά έναν παράγοντα που σχετίζεται με την μετάβαση και είναι ανάλογος της εσωτερικής επαγωγής των πηγών



**Παρατήρηση 3:**  $u$  η γωνία μετάβασης



**Παρατήρηση 2:** ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η πολική τάση κατά την διάρκεια της μετάβασης. Για όσο διαρκεί η μετάβαση παρατηρούνται υπερυψώσεις και βυθίσεις στις κυματομορφές των πολικών τάσεων.

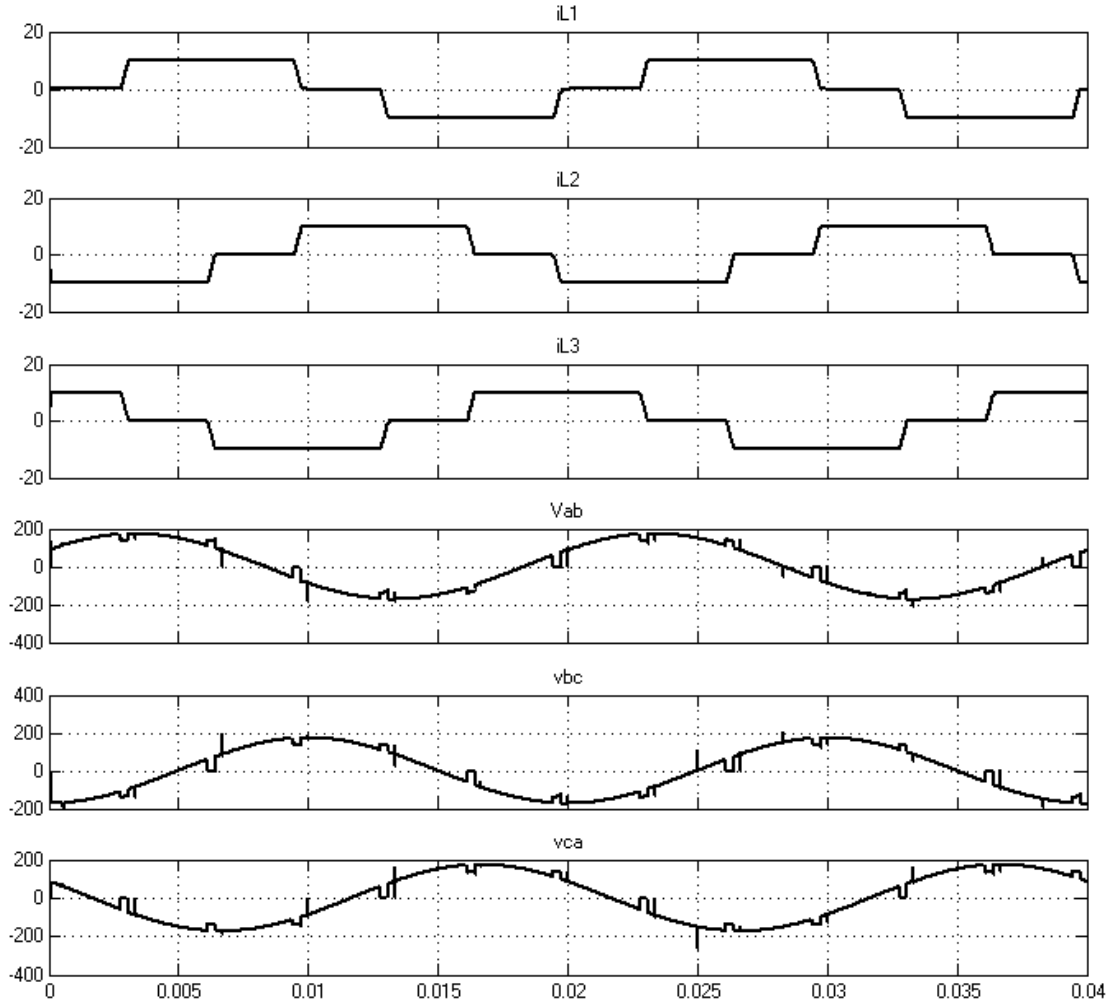
**Παρατήρηση 3:** προφανώς για να γίνουν αντιληπτές δεν αρκεί να ληφθούν οι τάσεις στα άκρα κάθε πηγής τάσης και να αφαιρεθούν. Πρέπει είτε να χρησιμοποιηθεί ένα πολύμετρο ανάμεσα στις φάσεις είτε να επιλεγούν τα αντίστοιχα μεγέθη ( $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$ ,  $v_{ca}$ ) από τις μετρήσεις που στέλνει στο multimeter το Universal Bridge block.

**9.10 Βασικά σημεία**

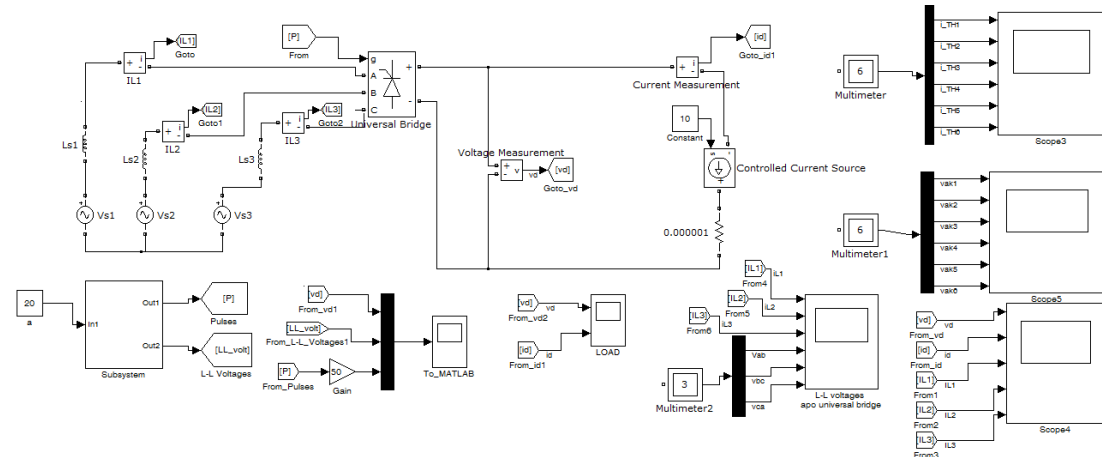
Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων ελεγχόμενης ανόρθωσης έξι παλμών
- την χρήση του Universal Bridge block
- την χρήση του Gain block
- την δημιουργία υποσυστημάτων (subsystems)

- την χρήση του Controlled Current Source block για την εξομίωση DC γεννήτριας ρεύματος
- την επίδραση που έχει η εσωτερική επαγωγή του δικτύου στο κύκλωμα κατά την διάρκεια της μετάβασης



Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την τελική μορφή του κυκλώματος



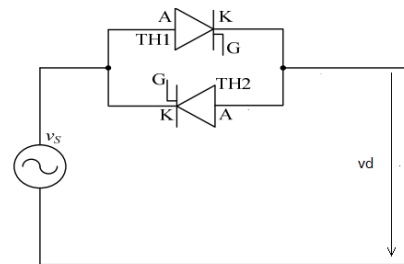
## ΕΝΟΤΗΤΑ 10: AC Μετατροπείς

### 10.1 Γενικά

**Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση** ονομάζονται τα κυκλώματα που μετατρέπουν μία AC τάση σε μια άλλη AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά (πλάτος, συχνότητα). Μπορεί να είναι τριφασικοί και μονοφασικοί. Εδώ θα εξεταστούν οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργούς τιμής της τάσης εξόδου χωρίς να μεταβάλλουν την συχνότητα. Αυτοί ονομάζονται και **ελεγκτές εναλλασσόμενης τάσης** ή **ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης**.

**Παρατήρηση 1:** στους AC μετατροπείς δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της μετάβασης γι' αυτό και καλούνται και μετατροπείς χωρίς μετάβαση.

**Παρατήρηση 2:** η απλούστερη υλοποίηση είναι να χρησιμοποιηθούν δύο **αντιπαράλληλα** θυρίστωρ όπως φαίνεται στο σχήμα.

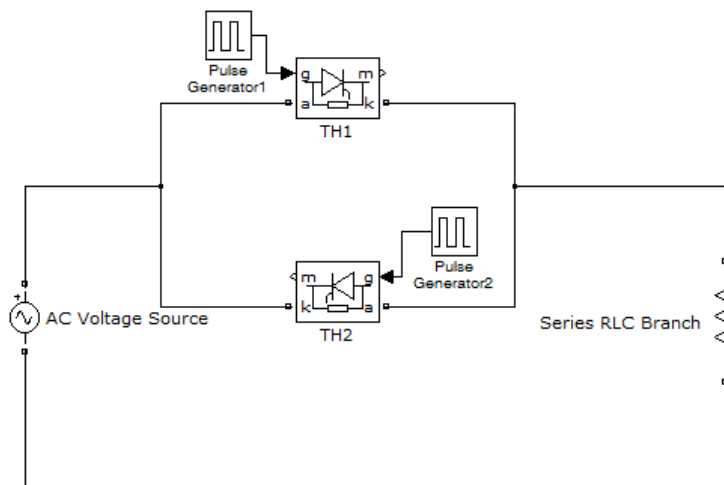
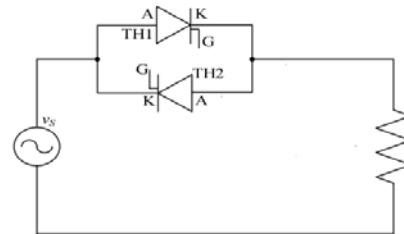


**Παρατήρηση 3:** προφανώς τα δύο θυρίστωρ θα δέχονται παλμό με διαφορά  $180^\circ$  (TH1:α και TH2:π+α).

**Παρατήρηση 4:** τα δύο θυρίστωρ θα άγουν στις δύο διαφορετικές ημιπεριόδους και η ενεργή τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι μεγαλύτερη για μικρότερες γωνίες έναυσης.

### 10.2 Υλοποίηση στο SIMULINK – Κυματομορφές (ωμικό φορτίο)

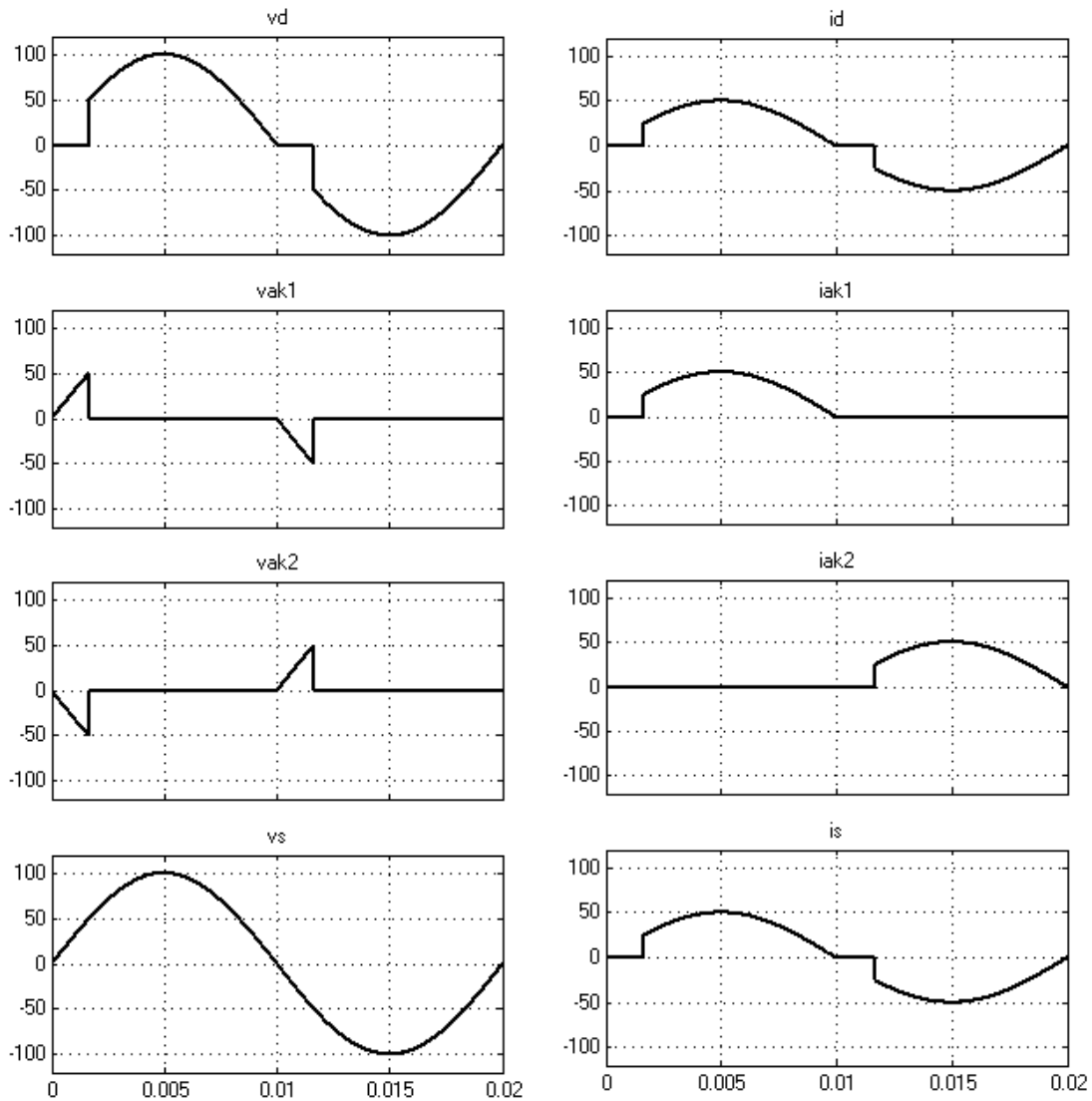
Το βασικό κύκλωμα σε SIMULINK για έναν μονοφασικό ρυθμιστή AC τάσης με αντιπαράλληλα θυρίστωρ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.





**Παράδειγμα**

AC μονοφασικός ρυθμιστής τάσης με  $V_{s,peak}=100\text{ V}$ ,  $R=2\ \Omega$  και  $\alpha=30^\circ$ . Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.



**Παράδειγμα**

Για το προηγούμενο κύκλωμα να υπολογίσετε την ενεργό τιμή της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο καθώς και την ισχύ στο φορτίο. Ελέγξτε αν ισχύουν οι γνωστοί από την θεωρία τύποι:

$$V_{d,rms} = V_s \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{\pi}} \quad \text{και} \quad I_{d,rms} = \frac{V_{d,rms}}{R}$$

Υπολογίστε την ισχύ στην είσοδο και στην έξοδο και τον συντελεστή ισχύος

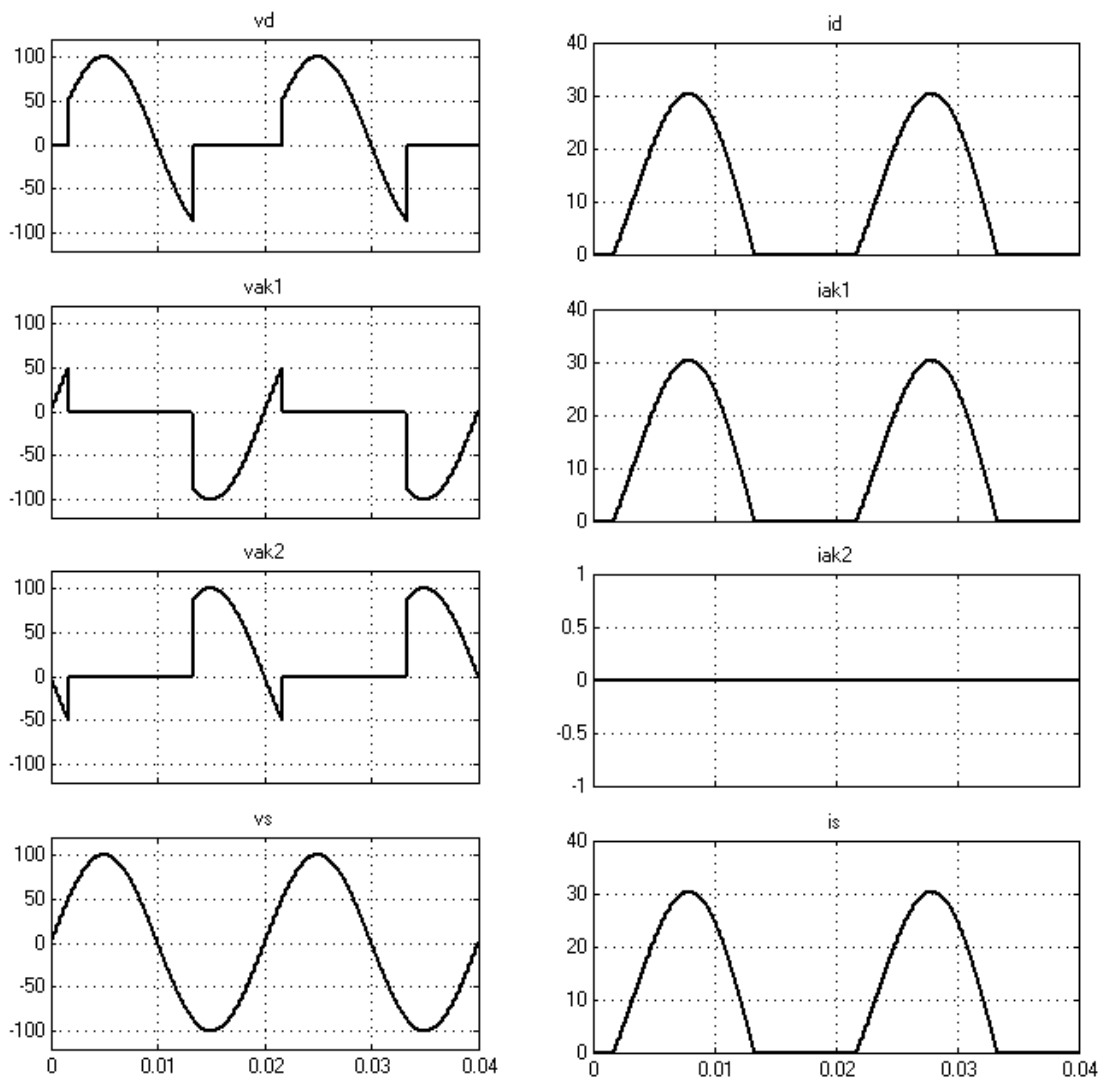
(θα πρέπει  $V_{d,rms}=69,68\text{ V}$  και  $I_d=34.84\text{ A}$ ,  $P_{in}=2464\text{ W}$  και  $P_{out}=P_d=2428\text{ W}$  και  $pf=P_{out}/P_{in}=0.9855$ )

### 10.3 Ωμικό επαγωγικό φορτίο

Η λειτουργία του κυκλώματος με ωμικό-επαγωγικό φορτίο θα είναι παρόμοια με αυτή των ανορθωτών με μία σημαντική διαφορά: για να υπάρχει ορθή λειτουργία σε περίπτωση ωμικού-επαγωγικού φορτίου θα πρέπει να ισχύει  $\alpha > \varphi$ . Στην περίπτωση που ισχύει  $\alpha < \varphi$  τότε το TH2 θα δεχτεί παλμό κατά την διάρκεια αγωγής του TH1. Όταν όμως άγει το TH1 το TH2 είναι ανάστροφα πολωμένο βάσει συνδεσμολογίας. Οπότε αν λάβει τότε παλμό, δεν θα ενεργοποιηθεί και ουσιαστικά θα έχω λειτουργία ανορθωτής ενός παλμού (θα γίνεται ON μόνο το TH1).

#### Παράδειγμα

AC ελεγκτής με  $R=2 \ \Omega$ ,  $L=0.01 \ \text{H}$  ( $\varphi \approx 57,5^\circ$ ) και  $\alpha=30^\circ$ . Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.

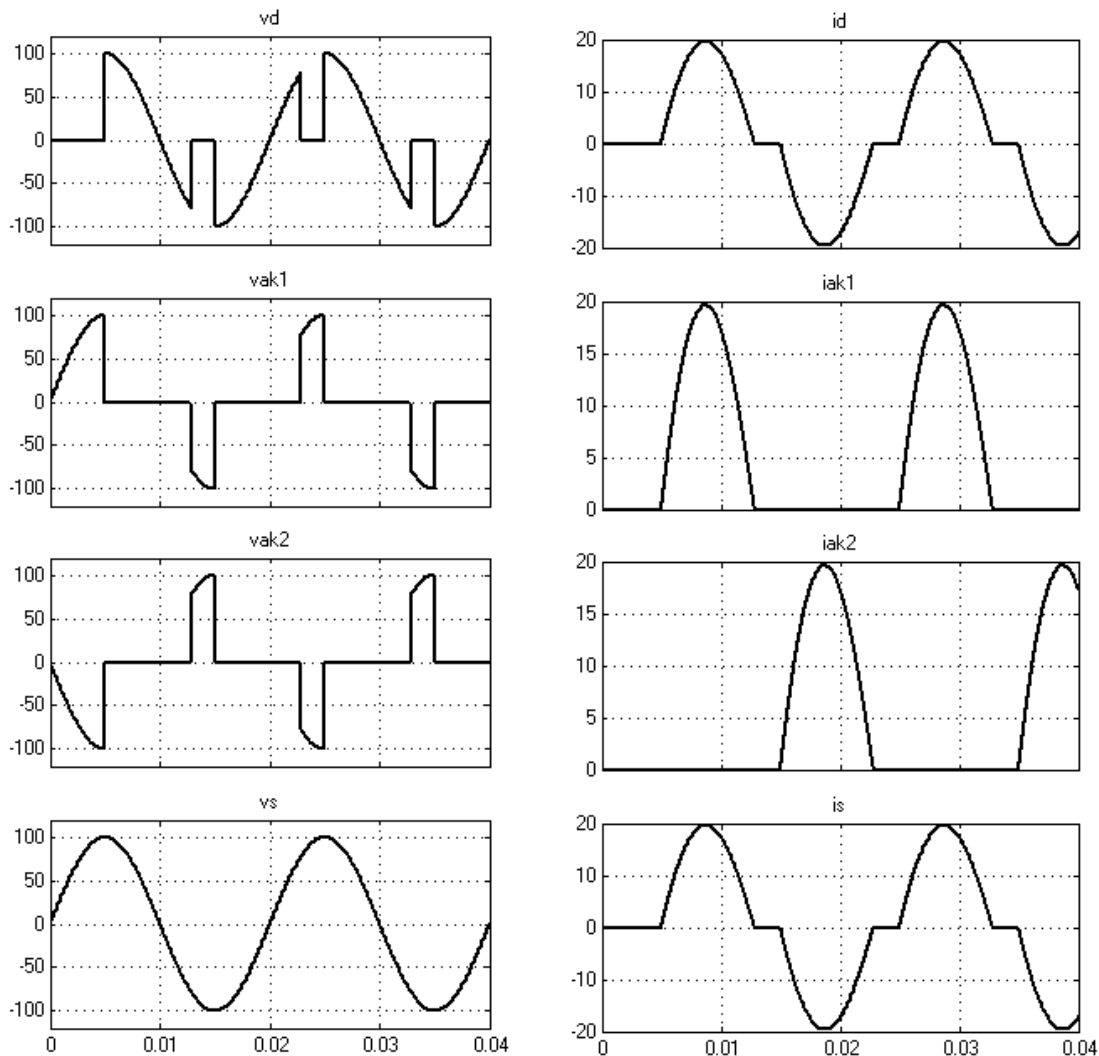


**Παρατήρηση 1:** προφανώς αν  $\alpha = \varphi$  τότε θα έχω συνεχή αγωγή και θα δίνεται η μέγιστη ισχύς στην έξοδο (ειδική περίπτωση)

**Παρατήρηση 2:** κανονική λειτουργία θεωρείται για  $\alpha > \phi$

**Παράδειγμα**

AC ελεγκτής με  $R=2 \ \Omega$ ,  $L=0.01 \ \text{H}$  ( $\phi \approx 57,5^\circ$ ) και  $\alpha=90^\circ$ . Να εξεταστούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.

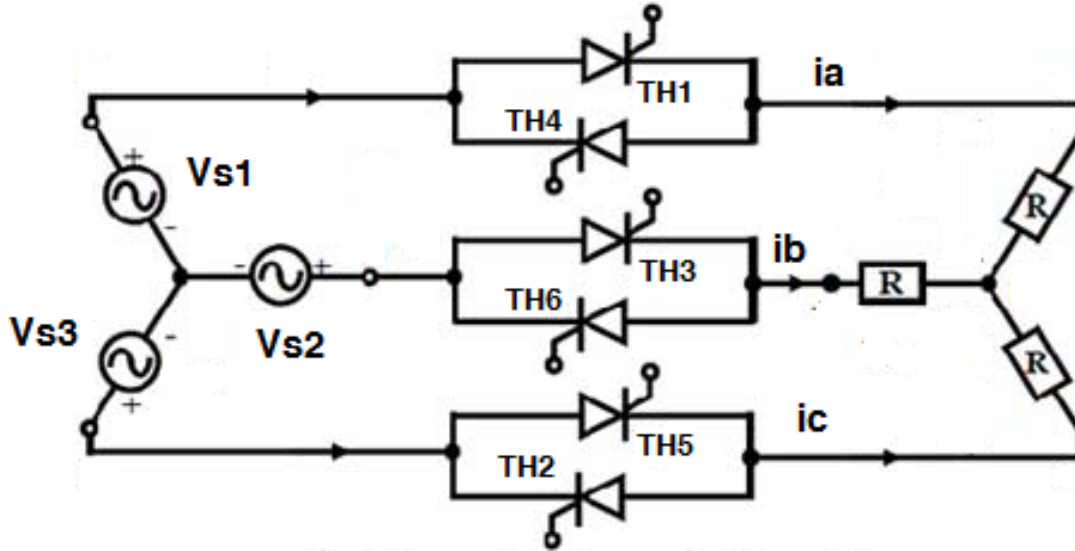


**Παρατήρηση 1:** . Ελέγξτε αν ισχύει ο γνωστός από την θεωρία τύπος:

$$V_{d,rms} = V_s \sqrt{\frac{\beta_1 - \alpha + \frac{1}{2} [\sin(2\alpha) - \sin(2\beta_1)]}{\pi}}, \text{ όπου } \beta_1 \text{ η γωνία σβέσης}$$

**10.4.1 Τριφασικοί AC μετατροπείς - Γενικά**

Ονομάζονται και τριφασικοί AC ρυθμιστές ή τριφασικοί ρυθμιστές διπλής κατεύθυνσης. Το βασικό κύκλωμα σε σύνδεση Y-Y φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Παρατήρηση 1:** αν τα φορτία είναι προσβάσιμα τότε μπορεί να γίνει και συνδεσμολογία τριγώνου στο φορτίο με κάθε συστοιχία θυρίστορ να συνδέεται σε σειρά με το φορτίο εντός του τριγώνου. Εδώ θα εξεταστεί η συνδεσμολογία Y-Y ως πιο συνηθισμένη

**Παρατήρηση 2:** όπως και στον 3Φ ανορθωτή 6 παλμών, η ονομασία των θυρίστορ δηλώνει την σειρά πυροδότησης. Πράγματι τα TH1, TH3 και TH5 θα λάβουν παλμό στις  $\alpha$ ,  $120+\alpha$  και  $240+\alpha$  ενώ τα αντίστοιχα αντίστροφα συνδεδεμένα θα πάρουν παλμό με καθυστέρηση  $180^\circ$  το καθένα δηλαδή τα TH4, TH6, TH2 θα πάρουν στις  $180+\alpha$ ,  $300+\alpha$ ,  $420+\alpha=60+\alpha$

	γωνία έναυσης		γωνία έναυσης
TH1	$\alpha$	TH4	$\alpha+180$
TH3	$\alpha+120$	TH6	$\alpha+120+180$
TH5	$\alpha+240$	TH2	$\alpha+240+180=\alpha+60$

**Παρατήρηση 3:** σε Y-Y συνδεσμολογία είναι σαν να υπάρχουν 3 μονοφασικοί ρυθμιστές. Ενίστε τα θυρίστορ μπορεί να σηματοδοτούνται χρησιμοποιώντας τα νούμερα 1, 2, 3 και με την προσθήκη τόνου (´) για τα αντίστροφα συνδεδεμένα. Δηλαδή:

TH1	1	TH4	1´
TH3	2	TH6	2´
TH5	3	TH2	3´

**10.4.2 Τριφασικοί AC μετατροπείς – Φάσεις λειτουργίας**

Ανάλογα την γωνία έναυσης υπάρχουν 4 φάσεις λειτουργίας:

**Φάση 1:** για  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  άγουν 2 ή και οι 3 ρυθμιστές σε κάθε ημιπερίοδο (ένα θυρίστορ σε κάθε ρυθμιστή). Το κάθε θυρίστορ άγει για  $(180-\alpha)^\circ$

Δλδ

το TH1 από  $\alpha$  έως 180

το TH2 από  $60+\alpha$  έως 240

το TH3 από  $120+\alpha$  έως 300

το TH4 από  $180+\alpha$  έως 360

το TH5 από  $240+\alpha$  έως 420 δλδ από 240 έως 360 και από 0 έως 60

το TH6 από  $300+\alpha$  έως 480 δλδ από  $300+\alpha$  έως 360 και από 0 έως 120

	0 ~ $\alpha$	$\alpha$ ~ 60	60 ~ $60+\alpha$	$60+\alpha$ ~ 120	120 ~ $120+\alpha$	$120+\alpha$ ~ 180	180 ~ $180+\alpha$	$180+\alpha$ ~ 240	240 ~ $240+\alpha$	$240+\alpha$ ~ 300	300 ~ $300+\alpha$	$300+\alpha$ ~ 360 (0)
TH1		ON	ON	ON	ON	ON						
TH2				ON	ON	ON	ON	ON				
TH3						ON	ON	ON	ON	ON		
TH4								ON	ON	ON	ON	ON
TH5	ON	ON								ON	ON	ON
TH6	ON	ON	ON	ON								ON

**Φάση 2:** για  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  άγουν 2 θυρίστορ κάθε φορά (ένα από τα ορθά και ένα από τα αντίστροφα συνδεδεμένα). Κάθε θυρίστορ άγει για  $120^\circ$

Για την **Φάση 2:** κάθε θυρίστορ θα άγει για 120o

το TH1 από  $\alpha$  έως  $120+\alpha$

το TH2 από  $60+\alpha$  έως  $180+\alpha$

το TH3 από  $120+\alpha$  έως  $240+\alpha$

το TH4 από  $180+\alpha$  έως  $300+\alpha$

το TH5 από  $240+\alpha$  έως  $360+\alpha$

το TH6 από  $300+\alpha$  έως  $420+\alpha$  δλδ από  $300+\alpha$  έως  $60+\alpha$

	$360+\alpha$ ~ $60+\alpha$	$60+\alpha$ ~ $120+\alpha$	$120+\alpha$ ~ $180+\alpha$	$180+\alpha$ ~ $240+\alpha$	$240+\alpha$ ~ $300+\alpha$	$300+\alpha$ ~ $360+\alpha$
TH1	ON	ON				
TH2		ON	ON			
TH3			ON	ON		
TH4				ON	ON	
TH5					ON	ON
TH6	ON					ON

**Φάση 3:** για  $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$  άγουν 2 ή κανένα thyristor κάθε φορά θα πολωθεί ανάστροφα σύμφωνα με τις  $0.5 \cdot V_{\text{πολ}}$

Για την **Φάση 3:** κάθε thyristor θα άγει για ένα κομμάτι των  $0.5 \cdot V_{\text{πολ}}$   
 το TH1 από  $\alpha$  έως 150 και από  $60+\alpha$  έως  $150+60=210$   
 το TH2 από  $60+\alpha$  έως 210 και από  $120+\alpha$  έως 270  
 το TH3 από  $120+\alpha$  έως 270 και από  $180+\alpha$  έως 330  
 το TH4 από  $180+\alpha$  έως 330 και από  $240+\alpha$  έως  $390=30$   
 το TH5 από  $240+\alpha$  έως  $390=30$  και από  $300+\alpha$  έως 90  
 το TH6 από  $300+\alpha$  έως 90 και από  $360+\alpha$  έως 150

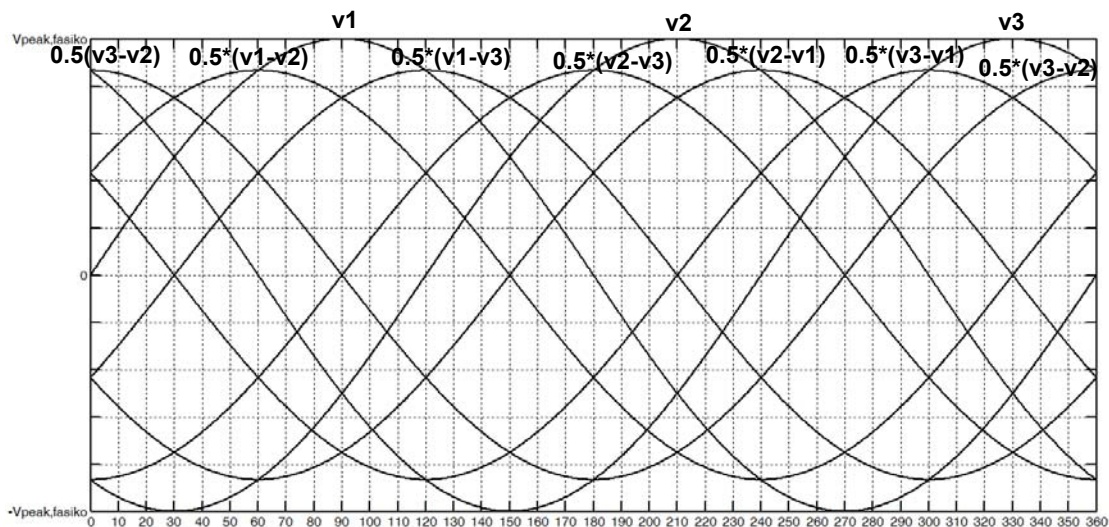
	$240+\alpha$ ~ 30	30 ~ $300+\alpha$	$300+\alpha$ ~ 90	90 ~ $360+\alpha$	$360+\alpha$ ~ 150	150 ~ $60+\alpha$	$60+\alpha$ ~ 210	210 ~ $120+\alpha$	$120+\alpha$ ~ 270	270 ~ $180+\alpha$	$180+\alpha$ ~ 330	330 ~ $240+\alpha$
TH1					ON		ON					
TH2							ON		ON			
TH3									ON		ON	
TH4	ON										ON	
TH5	ON		ON									
TH6			ON		ON							

Σε κάθε περίπτωση η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου θα μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία έναυσης

**Παρατήρηση 1:** αν άγουν δύο ρυθμιστές τότε η τάση σε κάθε φάση (μετά τους ρυθμιστές) ακολουθεί το μισό της πολικής τάσης μεταξύ των δύο φάσεων που συμμετέχουν

**Παρατήρηση 2:** αν άγουν και οι τρεις ρυθμιστές τότε η τάση σε κάθε φάση (μετά τους ρυθμιστές) ακολουθεί την φασική τάση

**Παρατήρηση 3:** εφόσον είναι ωμικό το φορτίο τότε και το ρεύμα σε κάθε φάση θα έχει την ίδια μορφή με την τάση μετά τους ρυθμιστές (κάθε στιγμή ισχύει ο νόμος του  $\Omega\mu$ )



### 10.5 To Transport Delay block

Για την ορθή λειτουργία του τριφασικού AC ρυθμιστή απαιτούνται έξι διαφορετικοί παλμοί. Για την εύκολη κατασκευή τους συνίσταται η χρήση του **Transport Delay** block. Το block αυτό εισάγει μια χρονική καθυστέρηση στην είσοδο και δίνει το νέο σήμα σαν έξοδο.



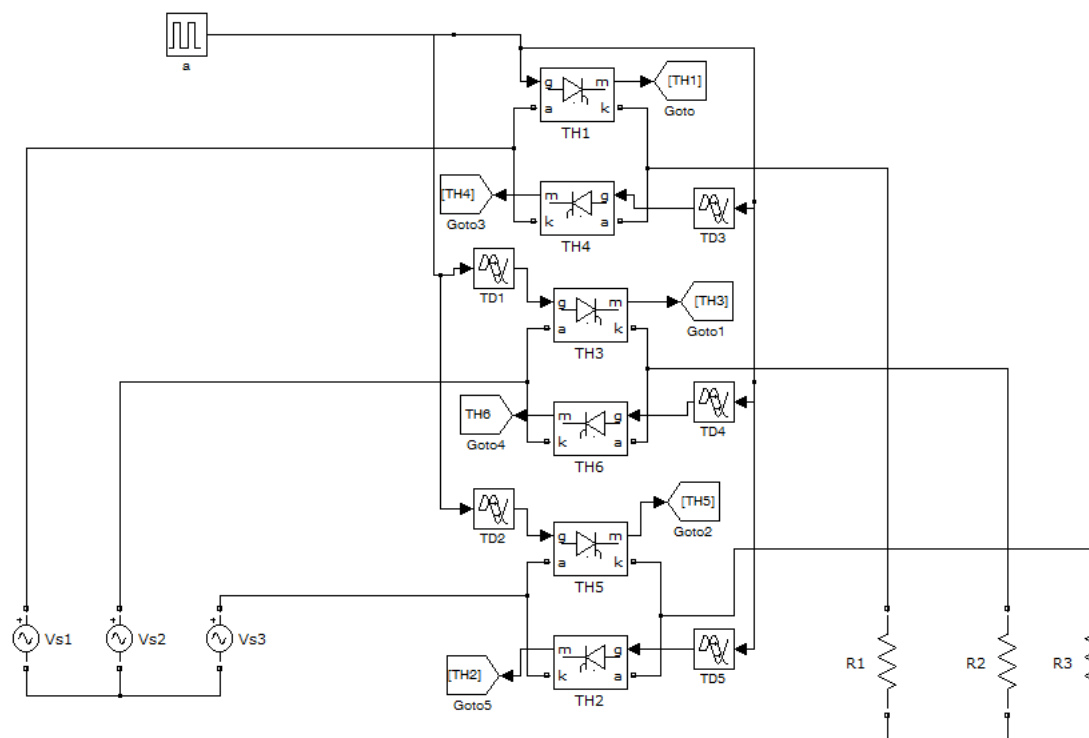
**Παρατήρηση 1:** η καθυστέρηση δίνεται σε sec. Για παράδειγμα για καθυστέρηση  $120^\circ$  θα πρέπει να δοθεί η ρύθμιση  $120 \cdot 0.02/360$

**Παρατήρηση 2:** δεδομένου ότι στην περίπτωση των τριφασικών AC ρυθμιστών οι γωνίες έναυσης μετρούνται από το μηδέν (και όχι από τις  $30^\circ$  όπως στην περίπτωση των τριφασικών ανορθωτών), η χρήση του **Synchronized 6-Pulse Generator** δεν ενδείκνυται.

**Παρατήρηση 3:** προφανώς το Transport Delay μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτική και σε όλα τα προηγούμενα κυκλώματα.

### 10.6 Υλοποίηση στο SIMULINK

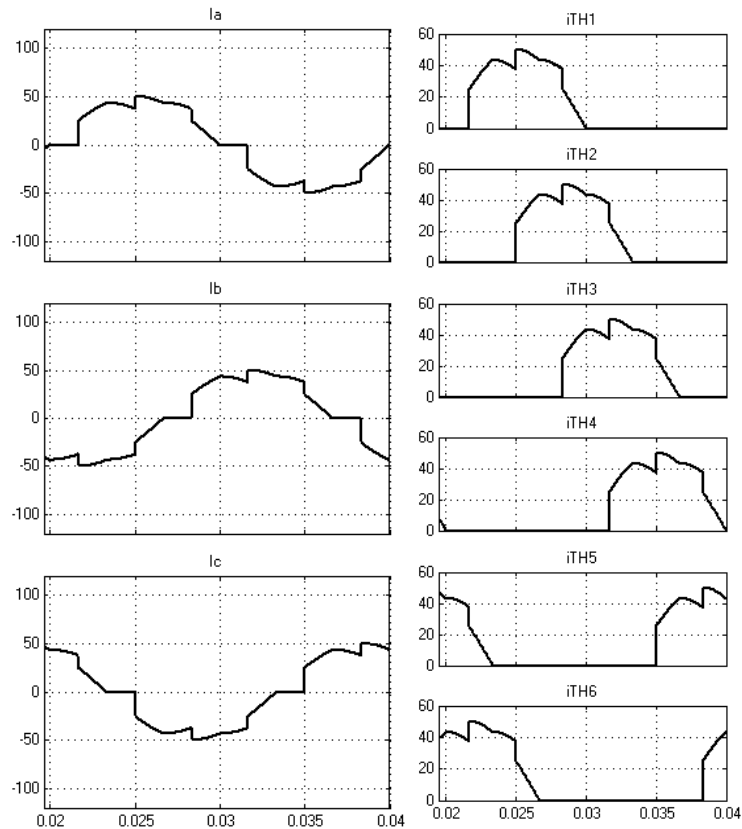
Χρησιμοποιώντας το Transport Delay block είναι σχετικά εύκολο να μοντελοποιηθεί το κύκλωμα ώστε να χρησιμοποιηθεί μόνο μια γεννήτρια παλμών. Έτσι αν αλλάξει η γωνία έναυσης της γεννήτριας αυτής, αυτόματα θα μεταβάλλονται οι γωνίες έναυσης όλων των θυρίστρον.



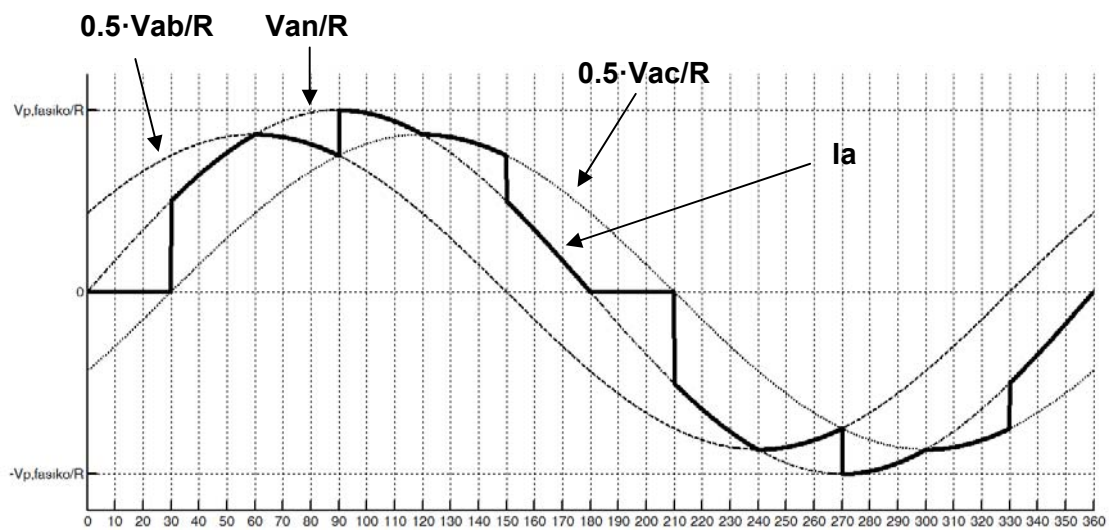
### 10.6.1 Κυματομορφές – Φάση 1

#### Παράδειγμα

Τριφασικός AC ελεγκτής με  $R=2 \Omega$ ,  $V_{s,peak}=100 \text{ V}$  και  $\alpha=30^\circ$ . Να εξετασθούν οι κυματομορφές των ρευμάτων των φάσεων και των ρευμάτων που διέρχονται από τα θυρίστρος



**Παρατήρηση 1:** όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 10.4 αν άγουν τρεις ρυθμιστές τότε το ρεύμα σε κάθε φάση θα ακολουθεί την αντίστοιχη φασική τάση ενώ αν άγουν δύο τότε θα ακολουθεί το μισό της αντίστοιχης πολικής (προς την αντίσταση)

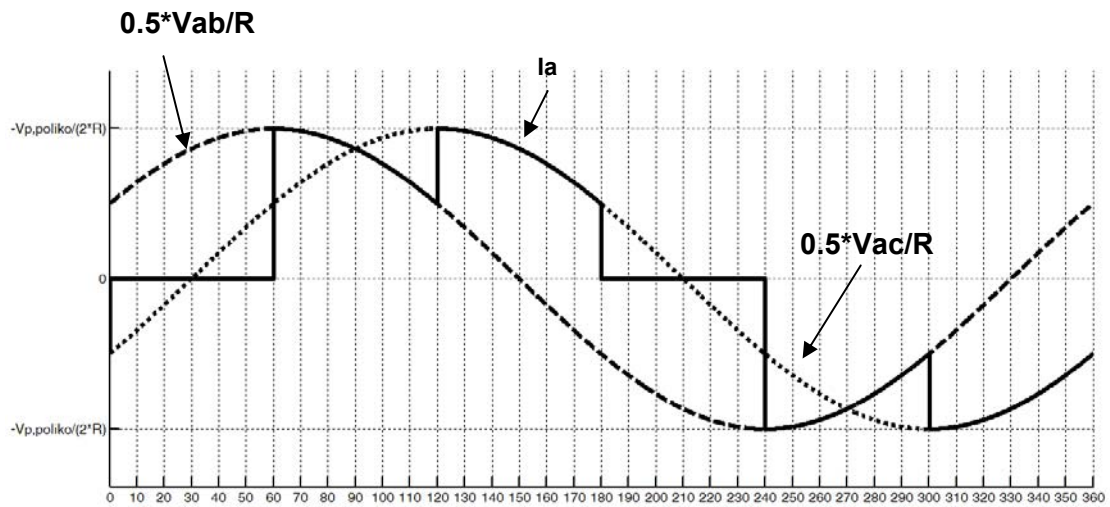
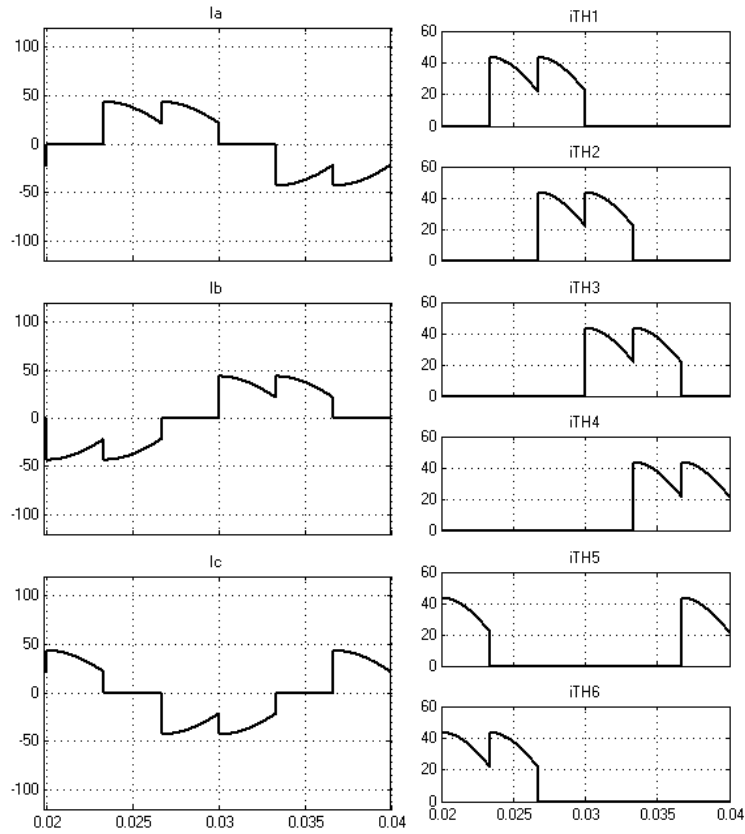




### 10.6.2 Κυματομορφές – Φάση 2

#### Παράδειγμα

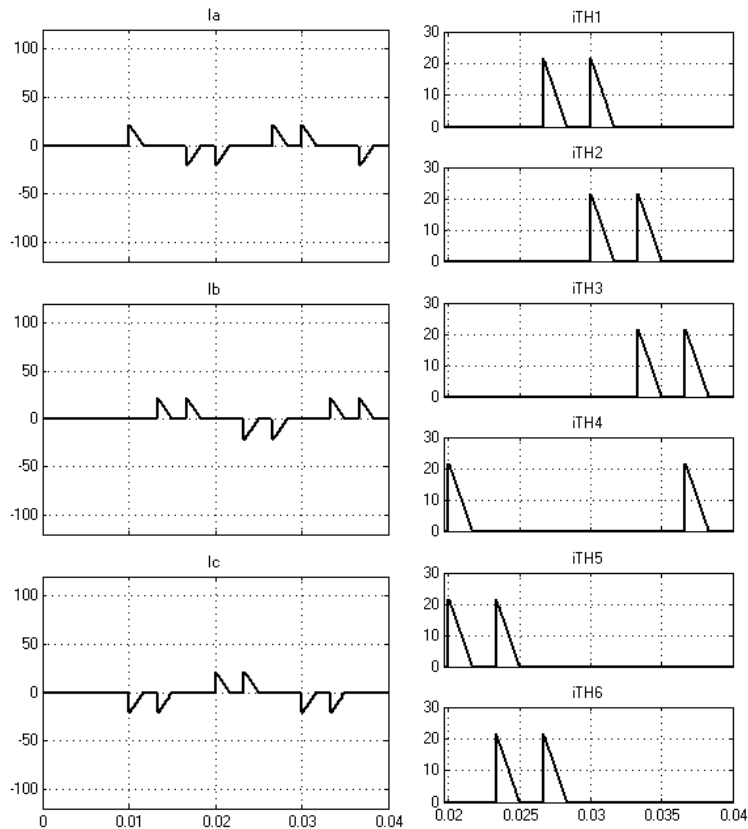
Τριφασικός AC ελεγκτής με  $R=2 \Omega$ ,  $V_{s,peak}=100 \text{ V}$  και  $\alpha=60^\circ$ . Να εξετασθούν οι κυματομορφές των ρευμάτων των φάσεων και των ρευμάτων που διέρχονται από τα θυρίστρος.



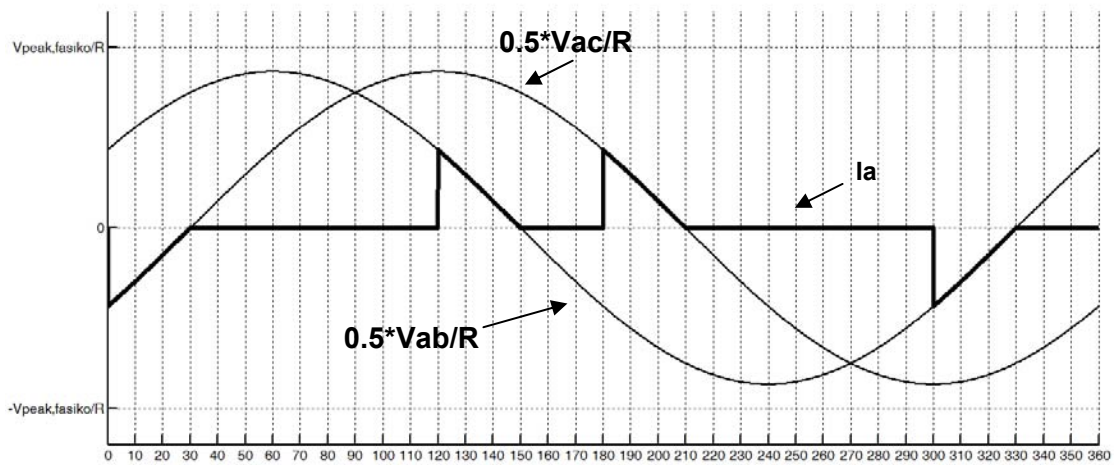
### 10.6.3 Κυματομορφές – Φάση 3

#### Παράδειγμα

Τριφασικός AC ελεγκτής με  $R=2 \Omega$ ,  $V_{s,peak}=100 \text{ V}$  και  $\alpha=120^\circ$ . Να εξετασθούν οι κυματομορφές των ρευμάτων των φάσεων και των ρευμάτων που διέρχονται από τα θυρίστρος



**Παρατήρηση 1:** προφανώς για να δουλέψει ορθά το κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει ο παλμός να έχει ικανή διάρκεια.

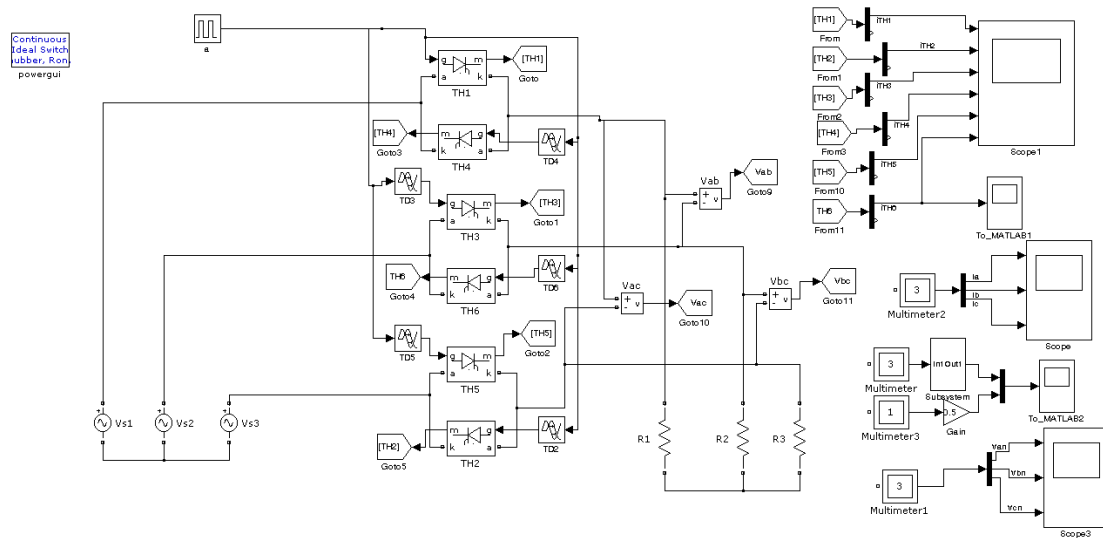


### 10.7 Βασικά σημεία

Με το τέλος της συγκεκριμένης εργαστηριακής ενότητας, ο εκπαιδευόμενος θα πρέπει να έχει αποκτήσει οικειότητα με τα παρακάτω:

- την μοντελοποίηση κυκλωμάτων AC ρυθμιστών (μονοφασικών και τριφασικών)
- την χρήση του Transport Delay block

Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την τελική μορφή του κυκλώματος:



## A MATLAB/SIMULINK Approach for a First Course in Power Electronics

D. Pylarinos<sup>1</sup>, I. Androulidakis<sup>2</sup>, K. Siderakis<sup>1</sup> and E. Drakakis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Technological Educational Institute of Crete, Greece

<sup>2</sup>University of Ioannina, Greece

---

### Abstract

This paper describes an education scenario for a first course in power electronics based on a MATLAB/SIMULINK approach. This scenario was followed in the Electrical Engineering Department of the TEI of Crete in 2014 and students were asked to fill in a questionnaire after completing the class. The scenario was based on thyristor-based rectification and AC control, as prior approaches were based on the use of hardware and/or the simulation of such circuits in OrCAD/PSpice. Fourier/harmonic analysis through the use of MATLAB was added and students were encouraged to undertake projects focused on simulating other types of converters in SIMULINK to receive a passing grade. The course's syllabus, the general teaching approach and the questionnaire's results are briefly presented and discussed in the paper.

*Keywords:* MATLAB, SIMULINK, SimPowerSystems, power electronics, thyristor, rectifier, controller, harmonics, education.

---

### 1. Introduction

Modern energy conversion is a field that combines theoretical and practical knowledge from various fields that were not that interacting in the past. Further, power electronics are employed in a huge variety of applications and thus, such a course needs to balance between different and often contradicting needs in a limited time-period. In Greece, Technological Education Institutes are part of higher Education and their Electrical Engineering departments generally aim to offer a more application oriented high standard technological education and training in the field. Therefore, providing basic theoretical knowledge along with promoting the use of multi-objective engineering software is a basic goal. This paper describes an education scenario for a first course in power electronics based on the use of MATLAB/SIMULINK. This scenario was followed in the Electrical Engineering Department of the TEI of Crete in 2014 and students were asked to fill in a questionnaire after completing the class. Results are also presented as a tool to evaluate the course

There are several software in the market of power electronics simulation. Probably the most usual case is the use of PSpice, usually via the OrCAD suite [1], and PSIM [2]. Further, several other software are available with a variety of characteristics (e.g. listings in [3-5] with the addition of newer software such as GeckoCircuits [6] and PLECS [7]).

MATLAB/SIMULINK provides an alternative through the use of the SimPowerSystems toolbox [8] for SIMULINK. However, it has not managed yet to achieve an extended spread in the power electronics/circuit design&simulation community. The limited literature available is usually focused in solving the differential equations deriving from circuits using MATLAB (e.g. [9]) whereas the extended use of SIMULINK only recently started gaining further interest (e.g. [10-11]). This should probably be attributed to the fact that MATLAB/SIMULINK is a general-purpose software whereas the alternatives are usually specially designed for circuit simulation (e.g.

PSpice), and circuit designers/electronic engineers are more familiar with this approach.

However, the situation is exactly the opposite for an electrical engineer as the variety of applications makes MATLAB/SIMULINK a rather useful and powerful tool in his profession. Therefore, in 2014, it was decided to employ MATLAB/SIMULINK for the laboratory part of this course. Prior approaches included the use of hardware to perform one-phase and three-phase thyristor-based rectification and AC control (see Fig. 1) and/or the simulation of such circuits in OrCAD. Therefore, it was decided to keep the same basic schedule (focused on thyristor based rectifiers and AC controllers), in order to ease the transition (as failed students are allowed to repeat the course), with the addition of Fourier/harmonic analysis. Students were however encouraged to undertake projects focused on simulating other types of converters in SIMULINK to receive a passing grade. Further, a 60 question questionnaire was handed out to students that completed the course in order to gain an insight to the course and audience. The course is described in this paper along with some of the results of the questionnaire.



Fig. 1. Some of the hardware used in the past

### 2. The course's syllabus and teaching approach

The course included 10 different laboratory exercises, each exercise consisting of two teaching hours (45 minutes

for each hour). At week 11, students were asked to fill a 60 questions questionnaire and a free discussion upon the syllabus and the approach followed. At week 12, the exam was held and the course was completed. As this was a course in the winter semester, projects were assigned on a voluntary basis before Christmas so that students would have enough time to work on them during their break. These projects were focused on the simulation of other converters (DC/DC and DC/AC) and indeed several students managed to complete their projects in a satisfactory manner before the exams were held. This clearly shows that the software knowledge provided to them during the course, allowed them to simulate other circuits.

The basic goal set during the planning of the course was to ease the student learning process. Instead of a syllabus based on lengthy get-to-know-the-software hours and then repetitive application, it was decided to keep the software learning in a need-to-know basis and focus on an object-oriented approach trying to maintain a high level of interest for the students. This means that students were instructed to use the software to familiarize with complex issues (such as harmonic analysis) and then turn to circuit simulation as fast as possible. In circuit simulation, new blocks were gradually discussed and used by the students each week.

The course's syllabus is mapped as follows:

**Week 1: Matlab fundamentals:** introduction to MATLAB, numeric operators, variables, arrays and tables, dot operator, sampling, plotting, constructing sinusoids, area in a graph, RMS value of non-sinusoid graphs (half-wave diode rectification example).

**Week 2: harmonics and Fourier analysis:** use of fft to compute the amplitude and angle spectrums (including scaling), RMS value of a current that carries harmonics, mean (real) power when only the current carries harmonics, distortion power factor and real power factor, THD

**Week 3: Simulink fundamentals:** introduction to Simulink, toolboxes and libraries, file types and names, SimPowerSystems, the powergui block, simulation of basic DC circuits, the current measurement block, the voltage measurement block, the display block, simulation of basic AC circuits, the Scope block, the RMS block, simulation configuration parameters, send data to MATLAB, the mux block, the demux block, the multimeter block, fft analysis using the powergui block

**Week 4: Diode rectifiers:** the diode block, snubbers, the measurement port, stiff solvers, important values for

rectifiers (DC and RMS values of load current-voltage-power, efficiency, form factor, ripple factor, TUF, crest factor), diode rectifier, the linear transformer block, the mean block, setting the switches as ideal from powergui

**Week 5: 1-pulse rectifier:** the thyristor block, the pulse generator block, signal labels, multiple axes in a graph, thyristor voltages, the product block, the divide block, calculate RMS and mean values in SIMULINK, calculate Pdc and Pac in SIMULINK, calculate efficiency, R load, R-L load, R-L-Ed load, free wheel diode,

**Week 6: 2-pulse rectifier:** R load, R-L load, continuous and non-continuous conduction, RMS and DC values in SIMULINK, load current waveform in the continuous conduction mode as inductance increases, thyristor voltages, calculate TUF

**Week 7: 4-pulse rectifier:** the GoTo block, the From block, R load, R-L load, continuous and non-continuous conduction, load current waveform in the continuous conduction mode as inductance increases, form factor, ripple factor, thyristor voltages, commutation

**Week 8: 3-pulse rectifier:** the 3-phase system, plotting the three phases, the 3-pulse rectifier with R load, continuous and non-continuous conduction, the MinMax Running Resettable block, the Abs block, calculating the crest factor in SIMULINK, calculating the Peak Inverse Voltage in SIMULINK, RMS and mean values, the Add block, thyristor voltages, portraying polar voltages, phase voltages and thyristor voltages in the same graph, R-L load

**Week 9: 6-pulse rectifier:** plotting all polar phases, the Synchronized 6-Pulse Generator block, the Universal Bridge block, the Gain block, creating Subsystems, R load, R-L load, continuous and non-continuous conduction, the Controlled Current Source block, snubber activation, current source load, commutation

**Week 10: AC controllers:** single phase with different loads, the Transport Delay block, three phase AC controller with R load, plotting all polar phases with a 0.5 gain and all phases in the same graph to explain the waveforms of phase currents

Students were asked in each Simulink exercise to simulate the circuit, calculate certain values (usually different in each exercise) and produce certain graphs. An image of the circuit for the 10th exercise is shown in Fig. 2. The instructor used a projector to illustrate the circuit, each new block, the parameters etc. These notes were available to the students after each exercise.

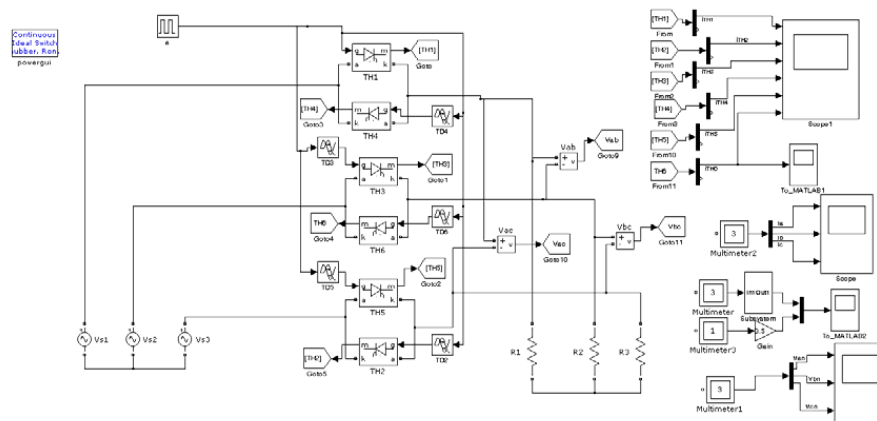
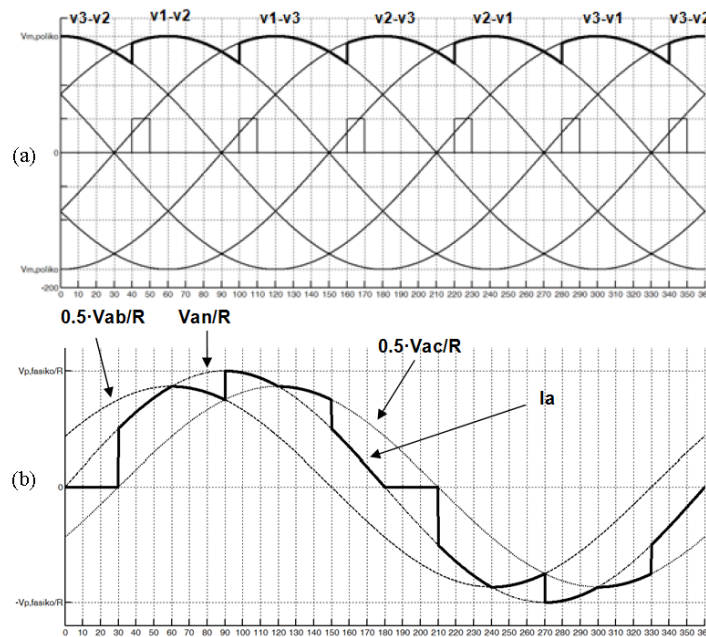


Fig. 2. An example circuit for a three phase AC controller including added graphs (e.g. phase-polar voltages)

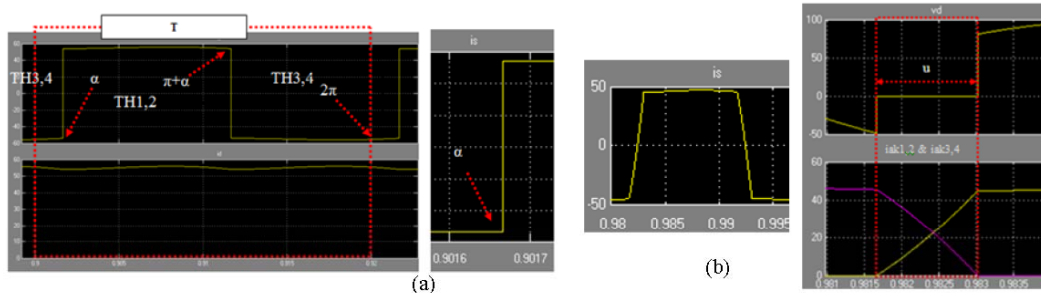


Some signals were moved to MATLAB and plotted versus the angle in degrees (instead of seconds that simulink uses as a default), as shown in Fig. 3, so as to be more easily

understood. In other cases, multiple waveforms were plotted in one scope and images were denoted, in order to better demonstrate certain phenomena (e.g. Fig. 4).



**Fig. 3.** Waveforms moved to MATLAB to illustrate them versus degrees. Multiple waveforms used for an improved visual representation: (a) load voltage of a 6-pulse rectifier with an R load and a firing angle of  $10^\circ$  and (b) phase "a" current for a three phase AC controller with R load and a firing angle of  $30^\circ$  (circuit shown in Fig. 2).



**Fig 4.** Graphs used to demonstrate the commutation phenomenon in a 4-pulse rectifier (a) waveforms of source current and load current if the source is considered ideal (no commutation) (b) waveforms of source current, thyristors' currents and load voltage if a source inductance of  $L_s=0.001$  H is considered

### 3. Questionnaire results

A questionnaire of 60 questions was handed to the students that took this course. They were asked to answer each question by selecting a Likert-based scale from 1 to 5, with 1 being the minimum and 5 being the maximum. Extended analysis is rather lengthy (and under publication) but some of the main results are mentioned below.

Results show that students consider that they have significantly improved their knowledge of MATLAB (answers 3-5: from 38% to 98.33%), SIMULINK (answers 3-5: from 11.67% to 96.67%) and SimPowerSystems (answers 3-5: 3.33% to 96.67%) (Fig. 5). These answers also show that students were less comfortable with PSpice

(answers 3-5: 10%) compared to MATLAB/SIMULINK, so the decision to move to MATLAB/SIMULINK is further justified.

Regarding the comprehension of basic EE topics (RMS & mean values, power, three phase system, behavior of different loads, harmonic analysis, power factors, sampling, ODE solvers etc) results show that they were significantly enhanced (answers 3-5: from 46.67% to 95%). The interest towards power electronics was also significantly enhanced (answers 3-5: from 30% to 88.33%). The course judged as satisfyingly interesting in general (answers 3-5: 90%). It should also be noted that most students had zero or very limited knowledge/experience with power electronics (answers 3-5: 15%). Details are shown in Fig. 6.

Other results show that the interest towards the software used was also significantly increased (answers 3-5: jumped from 33.3% to 86.6% for MATLAB and from 16.6% to 88.3% for SIMULINK), that students considered this course to be helpful for other courses (answers 3-5: 71.56%), their diploma thesis (answers 3-5: 65%) and for simulating other circuits in the future (answers 3-5: 95%). Further, students

declared that they would be interested to take a course focused on the application of such circuits (answers 3-5: 71.67%) but even more interested to take a course focused on other types of converters (DC/DC and DC/AC) (answers 3-5: 83.33%). An improvement on their level of English (technical terms) was also evident from the results (answers 3-5 jumped from 73.33% to 86.67%).

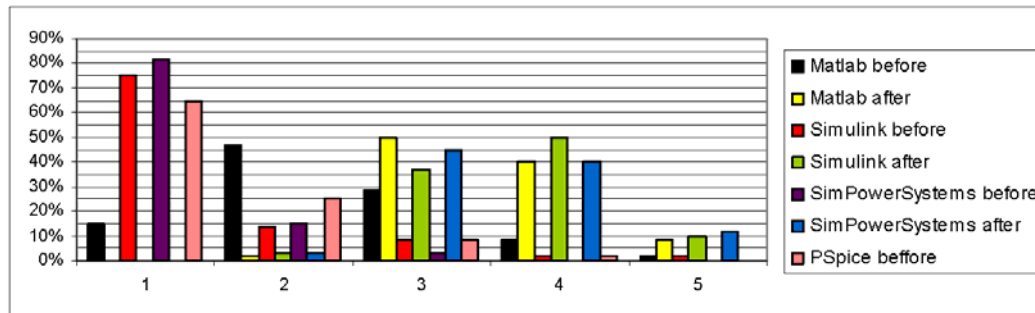


Fig 5. Questionnaire results regarding the knowledge/experience with MATLAB, SIMULINK, SimPowerSystems before and after the course (and also with PSpice before the course)

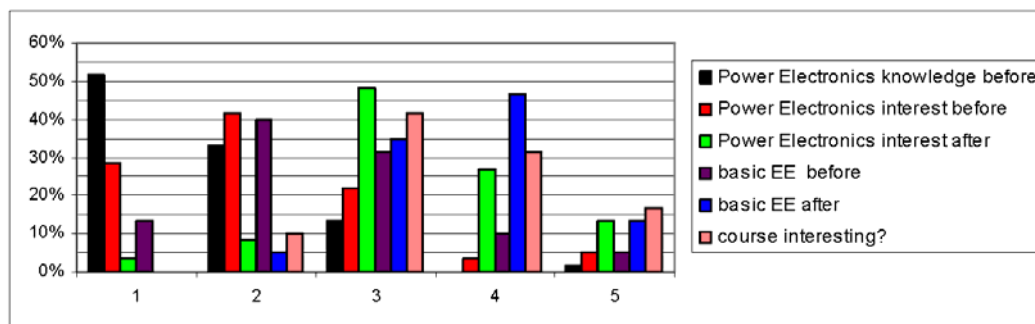


Fig 5. Questionnaire results regarding the students' interest in power electronics and their comprehension of basic Electrical Engineering (EE) topics before and after the course (and the general level of interest of the course as well)

#### 4. Conclusion

This paper describes the education scenario followed in the Electrical Engineering Department of the Technological Educational Institute for Crete in 2014 for teaching a first course in power electronics, based on a MATLAB/SIMULINK approach. The syllabus and general

teaching approach for the course is briefly described. A 60 questions questionnaire was handed to the students after the completion of the course and results are also briefly described in this paper.

#### References

1. OrCAD, <http://www.orcad.com/>
2. PowerSim, <http://powersimtech.com/products/psim/>
3. J. Jos Rodriguez, A. Weinstein, P. Lezana, "A Comparison of Power-Electronics Simulation Tools", EE Times, available at: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1275977](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275977)
4. PowerGuru, "Power Electronics Design, Simulation, and Analysis Tools", available at <http://www.powerguru.org/power-electronics-design-simulation-analysis-tools>
5. Circuits Today, "List of Circuit design / analysis / simulation software" available at: <http://www.circuitstoday.com/circuit-design-and-simulation-softwares>
6. GeckoSimulation, GeckoCircuits software, available at: <http://www.gecko-simulations.com/geckocircuits.html>
7. Plexim, PLECS Simulation Software for Power Electronics, <http://www.plexim.com/>
8. MathWorks, SimPowerSystems, <http://www.mathworks.com/products/simpower/>
9. R. Shaffer, Fundamentals of Power Electronics with MATLAB, Charles River Media, USA, 2006
10. A. K. Tyagi, "MATLAB and SIMULINK for Engineers", Oxford University Press, India, 2012
11. S. Jain, "Modeling & Simulation using MATLAB-SIMULINK", Wiley India, 2014

**ISBN 978-618-82223-0-4**