

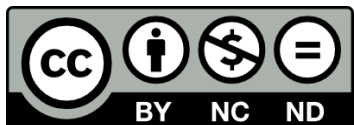


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ

## Ενότητα 5: Ηλεκτρονικά ελέγχου ισχύος

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Σχεδίαση τελεστικών ενισχυτών
- 2. Κυκλώματα ανόρθωσης - δίοδοι zener
- 3. Κυκλώματα αναφοράς
- 4. Ενισχυτές ισχύος
- **5. Ηλεκτρονικά ελέγχου ισχύος**
- 6. 1η εργαστηριακή άσκηση και προσομοίωση με το SPICE
- 7. 2η εργαστηριακή άσκηση και προσομοίωση με το SPICE





# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή – εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (διαφ. 7- 17)
2. Θυρίστορ – ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR (διαφ. 18- 27)
3. Άλλοι τύποι θυρίστορ (DIAC, TRIAC, GTO, IGCT, LTT) (διαφ. 28 - 39)
4. Κυκλώματα με θυρίστορ SCR (διαφ. 40 – 47)

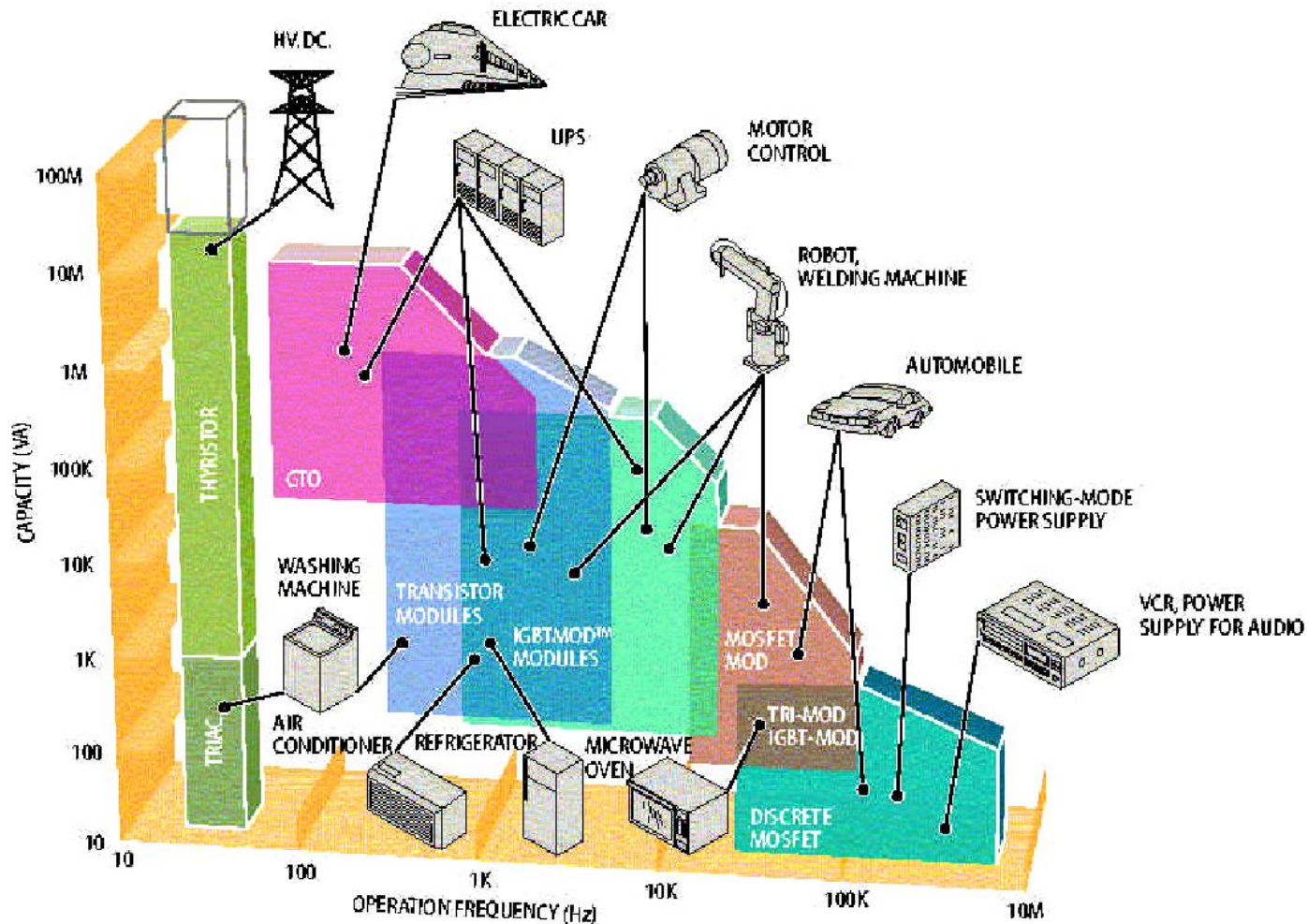


# Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος

- Διακοπτικά τροφοδοτικά (dc) σε υπολογιστές, και συσκευές γραφείου.
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής (UPS).
- Συστήματα ελέγχου κινητήρων dc, επαγωγικών, σύγχρονων, κλπ.
- Εργαλειομηχανές και κινητήρια συστήματα ακριβείας στην βιομηχανία.
- Φωτισμός (ηλεκτρονικά ballasts).
- Επαγωγική θέρμανση στην βιομηχανία.
- Συγκολλήσεις, επιμεταλλώσεις.
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (μετατροπείς ac-dc και dc-ac).
- Έλεγχος άεργης ισχύος σε ac συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά, αιολικά συστήματα).
- Φόρτιση μπαταριών (από mW μέχρι kW).
- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα, Ηλεκτρικά τρένα, Τράμ, Τρόλεϋ.
- Τροφοδοσία τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, δορυφορικών συστημάτων και αεροσκαφών.



# Χρήση των διακοπών



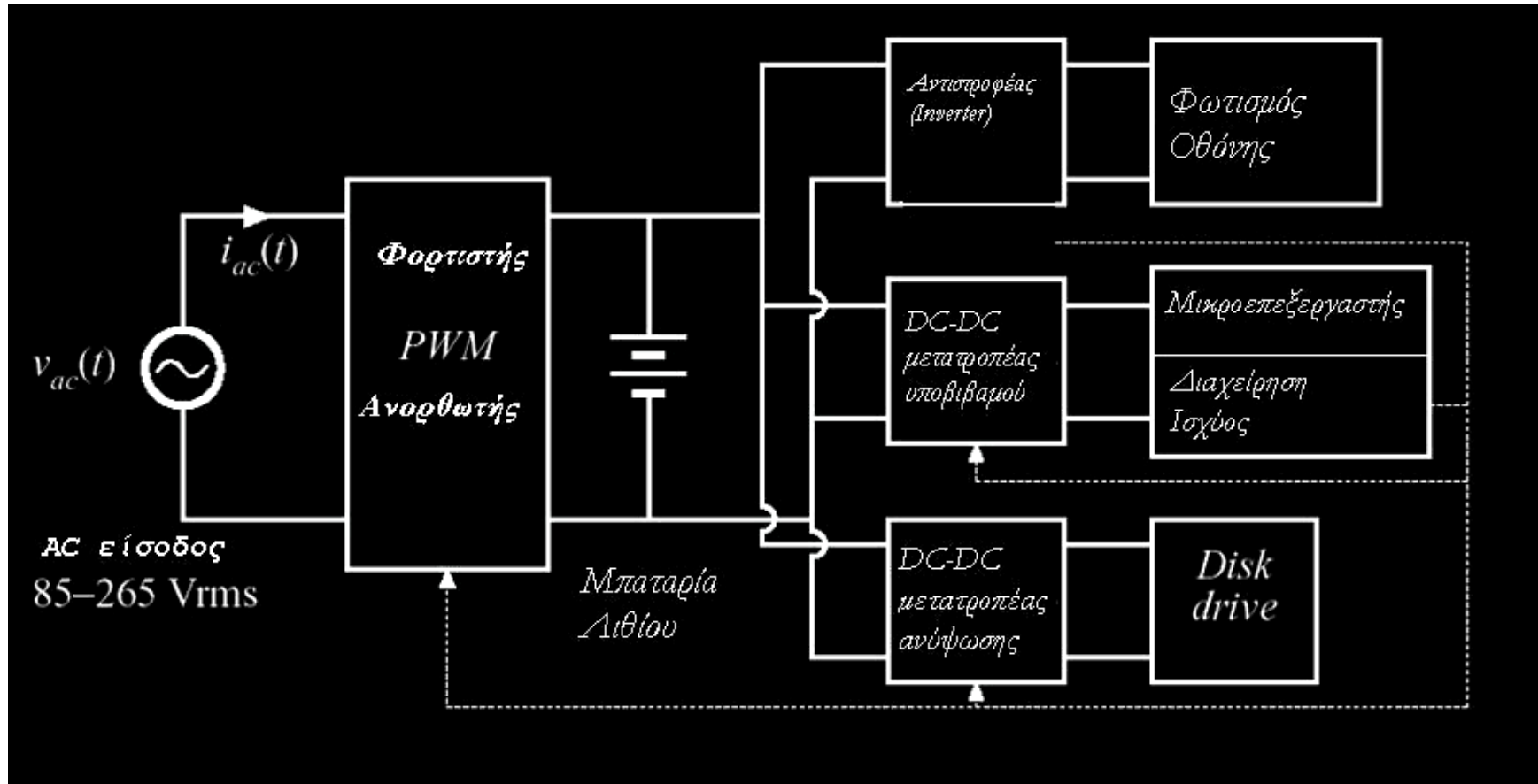


# Προοπτικές των ηλεκτρονικών ισχύος

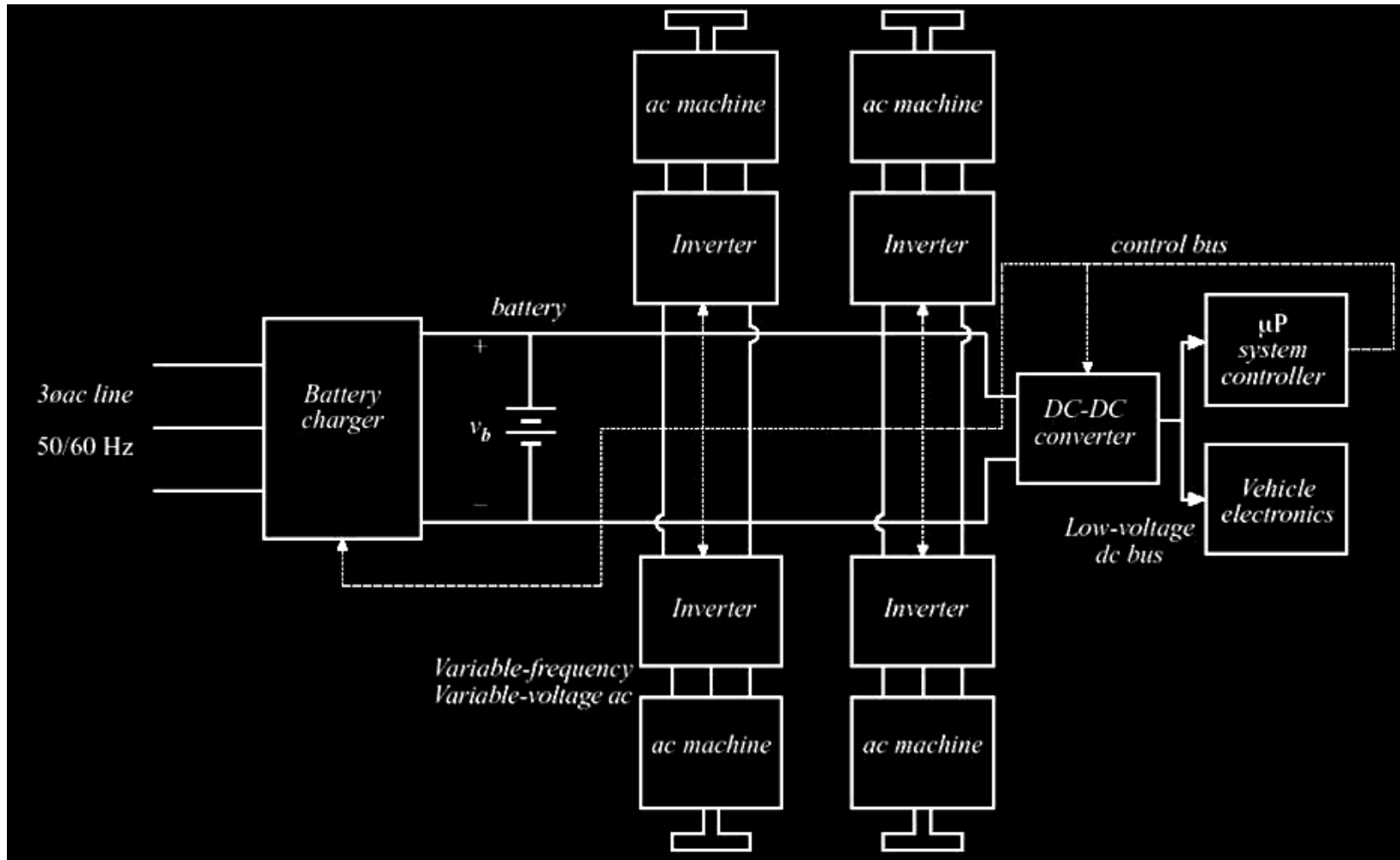
- Τα ηλεκτρονικά ισχύος υλοποιούν τον έλεγχο της ροής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σήμερα μόνο το 25% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχεται αποτελεσματικά.
- Η σωστή διαχείριση της ενέργειας εκτιμάται ότι μπορεί να αποφέρει οικονομικά οφέλη >€400 δισ. ετησίως.



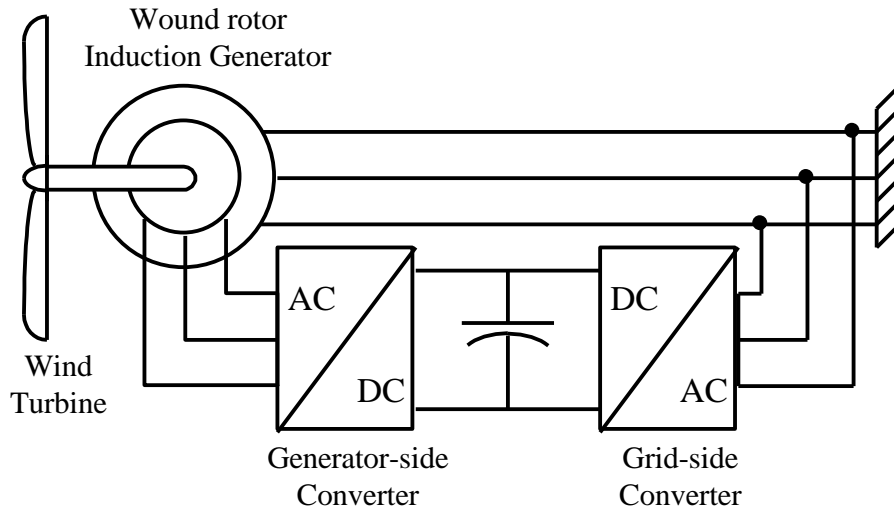
# Ηλεκτρονικά Ισχύος σε Laptop



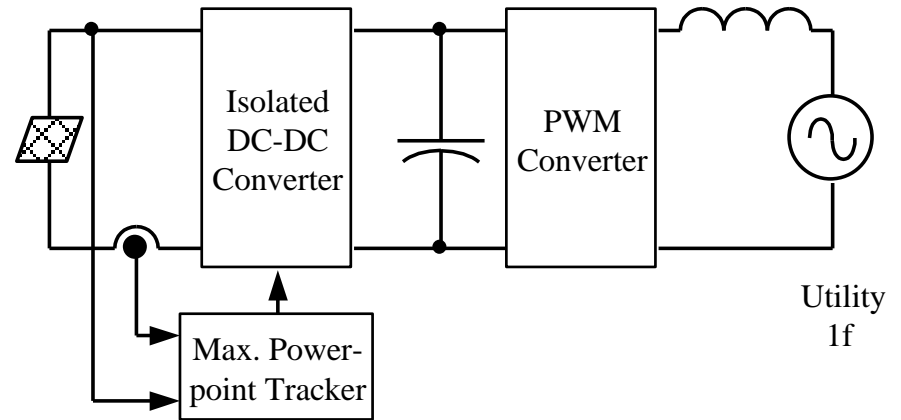
# Ηλεκτρονικά Ισχύος σε Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο



# Ηλεκτρονικά Ισχύος στην παραγωγή ενέργειας



Ανεμογεννήτριες



Φωτοβολταϊκά



# Μετατροπή ισχύος

- Η μετατροπή ισχύος περιλαμβάνει μετατροπή των παρακάτω:
  - Είδος τάσης (ac ή dc).
  - Επίπεδο τάσης (πλάτος).
  - Συχνότητα τάσης.
  - Μορφή τάσης (ημιτονοειδή σε τετραγωνική, τριγωνική ή πριονωτή).
  - Πλήθος φάσεων (μονο/τρι-φασικό).
- Κατηγορίες:
  - Rectification (ac-to-dc).
  - Inversion (dc-to-ac).
  - Cyclo-conversion (ac-to-ac, different frequencies) or ac controllers (ac-to-ac, same frequency).
  - Conversion (dc-to-dc).



# Τυπικές εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (1/4)

Conversion Function	Applications
<b>Uncontrolled ac-dc converters (diode circuits)</b>	Front-end off-line regulated dc-to-ac power supplies and dc-ac inverters Battery charges Welding Dc motor drives
<b>Phase-controlled converters (thyristor circuits)</b>	Regulated dc power supplies ac and dc variable-speed motor control Battery chargers Flexible ac transmission system (FACTS) Utility interface of photovoltaic systems Regulated ac inverters Solid-state circuit breakers Dc motor drives Induction heating Electromechanical processing (electroplating, anodizing, metal refining) HVDC systems Light dimmers Active power line conditioning (APLC)



# Τυπικές εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (2/4)

Conversion Function	Applications
<b>dc-dc converters</b>	<p>High-frequency regulated dc power supplies using both isolated and non-isolated switch-mode and soft-switching resonant topologies</p> <p>Digital and analog electronics</p> <p>Solar energy conversion</p> <p>High-frequency quasi-resonant converters</p> <p>Electric vehicles and trams</p> <p>dc-fed forklifts</p> <p>Fuel cell conversion</p> <p>dc traction drives</p> <p>Distributed power systems</p> <p>Power factor correction</p> <p>Solid-state relays</p> <p>Capacitor chargers</p>



# Τυπικές εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (3/4)

Conversion Function	Applications
<b>Linear-mode dc-dc converters</b>	Low-power linear dc regulators Audio amplifiers RF amplifiers
<b>Cycloconverters and ac controllers (ac-ac)</b>	ac motor drives Rolling mill drives Static Scherbius drives Aircraft Frequency changers Solid-state power line conditioners Variable-speed constant-frequency (VSCF) systems Fluorescent lighting Light dimmers Induction heating





# Τυπικές εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (4/4)

Conversion Function	Applications
<b>dc-to-ac inverters</b>	Aircraft and space power supply systems Ac variable-speed motor devices (lifts) Uninterruptible power supplies (UPS) Power factor correction Light dimmers Electric railroad systems Magnetically levitated (maglev) high-speed transportation systems Electric vehicles ac and dc circuit breakers Circuit protection
<b>Static switching</b>	Solid-state relays Home and office automation Automobiles
<b>Power ICs</b>	Telecommunications ac and dc drives dc power supplies



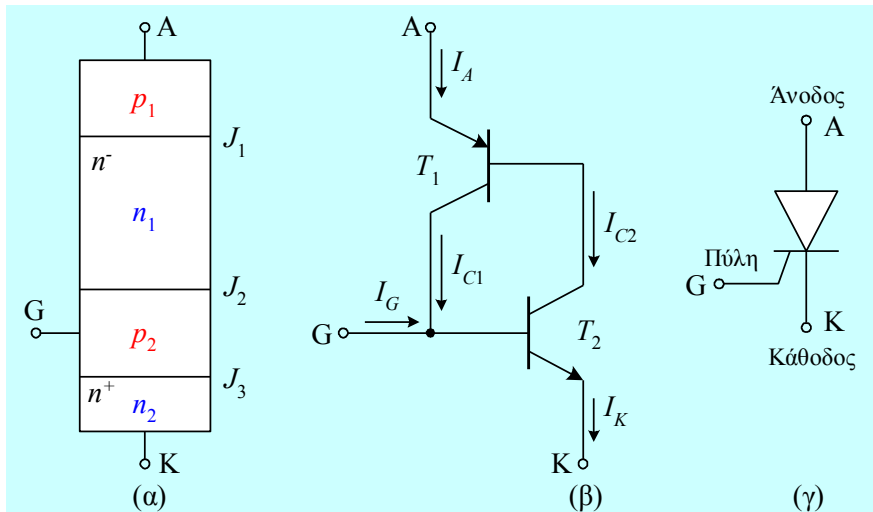
# Τα thyristors

- ❑ Ο όρος thyristor αναφέρεται σε μια πολυμελή οικογένεια ημιαγωγών διακοπών, οι οποίοι αποτελούνται από τέσσερα ή περισσότερα στρώματα ημιαγωγών τύπου n και p.
- ❑ Όλα τα μέλη της οικογένειας των thyristors έχουν δύο ευσταθείς καταστάσεις λειτουργίας, την κατάσταση αγωγιμότητας και την κατάσταση αποκοπής.
- ❑ Στα thyristors ανήκουν η δίοδος Shockley ή δίοδος τεσσάρων στρωμάτων pnpn, ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR (Silicon Controlled Rectifier), το GTO (Gate Turn–Off), το DIAC (Diode Alternating Current) και το TRIAC (TRIode Alternating Current).
- ❑ Νεότερα μέλη των thyristors είναι ο αμφίδρομος SCR (Bi–Directional Control Thyristor, BCT), ο MOS ελεγχόμενος SCR ο οποίος είναι γνωστός και ως MCT (MOS Controlled Thyristor) και το Integrated Gate Commutated Thyristor IGCT.



# Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) (1/2)

- Ο SCR έχει μια δομή τεσσάρων στρωμάτων p-n-p-n, με τρεις ακροδέκτες: Την άνοδο, την κάθοδο και την πύλη.
- Ο SCR οδηγείται στην αγωγιμότητα με την εφαρμογή ενός στιγμιαίου παλμού στην πύλη και παραμένει στην κατάσταση αγωγιμότητας μέχρι το ρεύμα της ανόδου να γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$  (holding current). Επομένως, η πύλη χρησιμοποιείται μόνο για την έναυση του SCR, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως διακόπτης μανδάλωσης.



$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

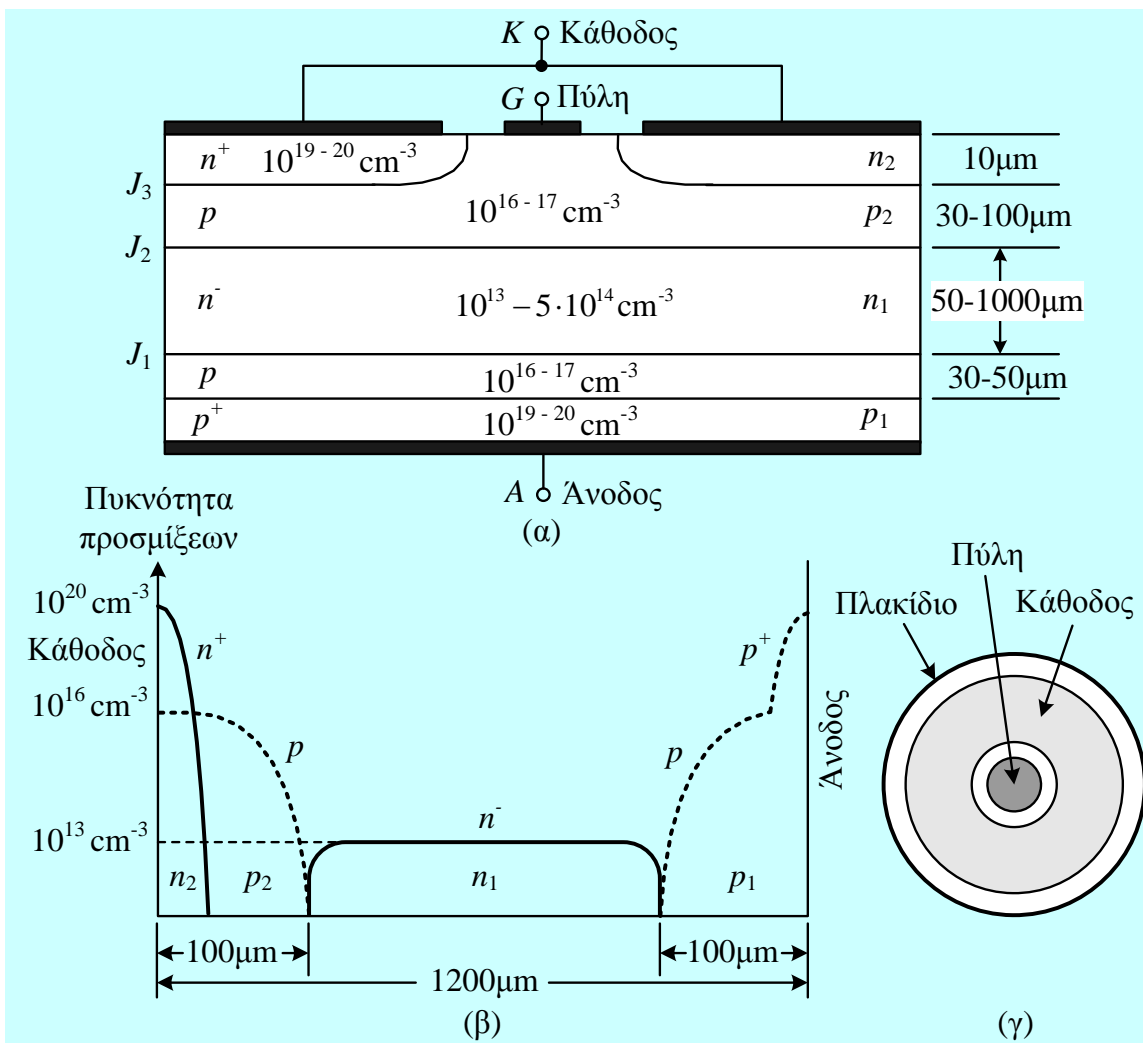
$$I_K = I_A + I_G$$

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Απλοποιημένη κατασκευαστική δομή (α), ισοδύναμο κύκλωμα (β) και κυκλωματικό σύμβολο του SCR (γ)



# Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) (2/2)

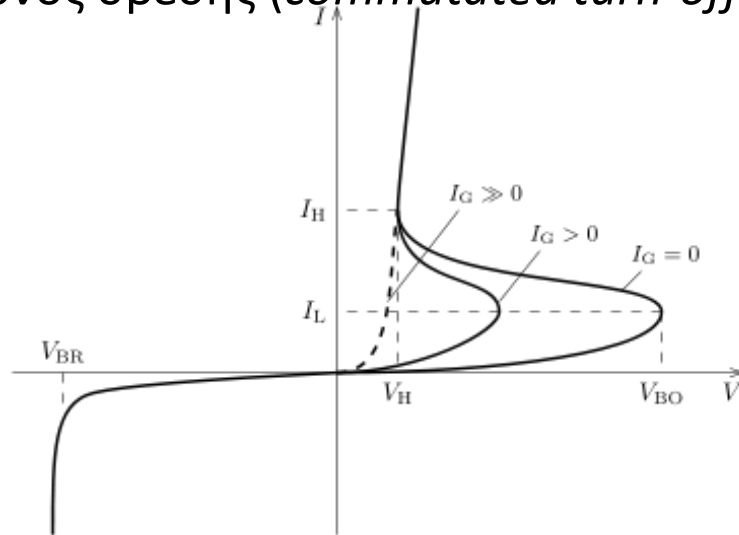


Κατασκευαστική  
δομή του SCR



# Χαρακτηριστικά μεγέθη του SCR

- Τάση διάσπασης  $V_{BD}$ , μέχρι 8000V.
- Τάση αποκοπής (*breakover*)  $V_{BO}$  και ρεύμα αποκοπής  $I_{BO}$ .
- Ρεύμα ανόδου, μέχρι αρκετές χιλιάδες ampere.
- Ρεύμα συγκράτησης (*holding current*)  $I_H$ .
- Μέγιστη ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος κατά την έναυση  $(di_F/dt)_{max}$ .
- Μέγιστη ταχύτητα μεταβολής της τάσης ορθής φοράς  $(du_F/dt)_{max}$ .
- Χρόνος σβέσης (*commutated turn-off time*)  $t_q$ .



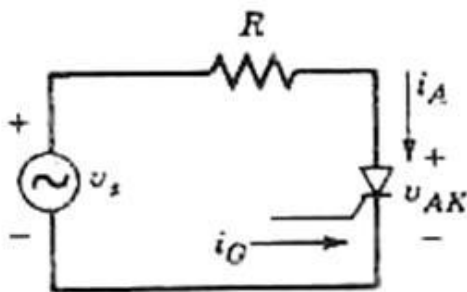
Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης του SCR



Εικόνα 1: High vorlage thyristor - 12kV / 1500A

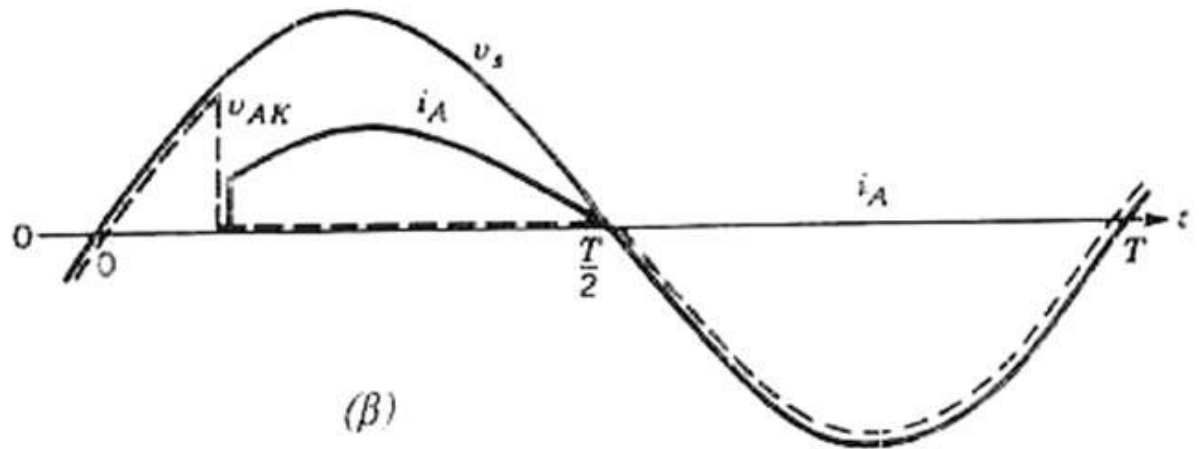


# Ανόρθωση ρεύματος με SCR



(α)

Κύκλωμα

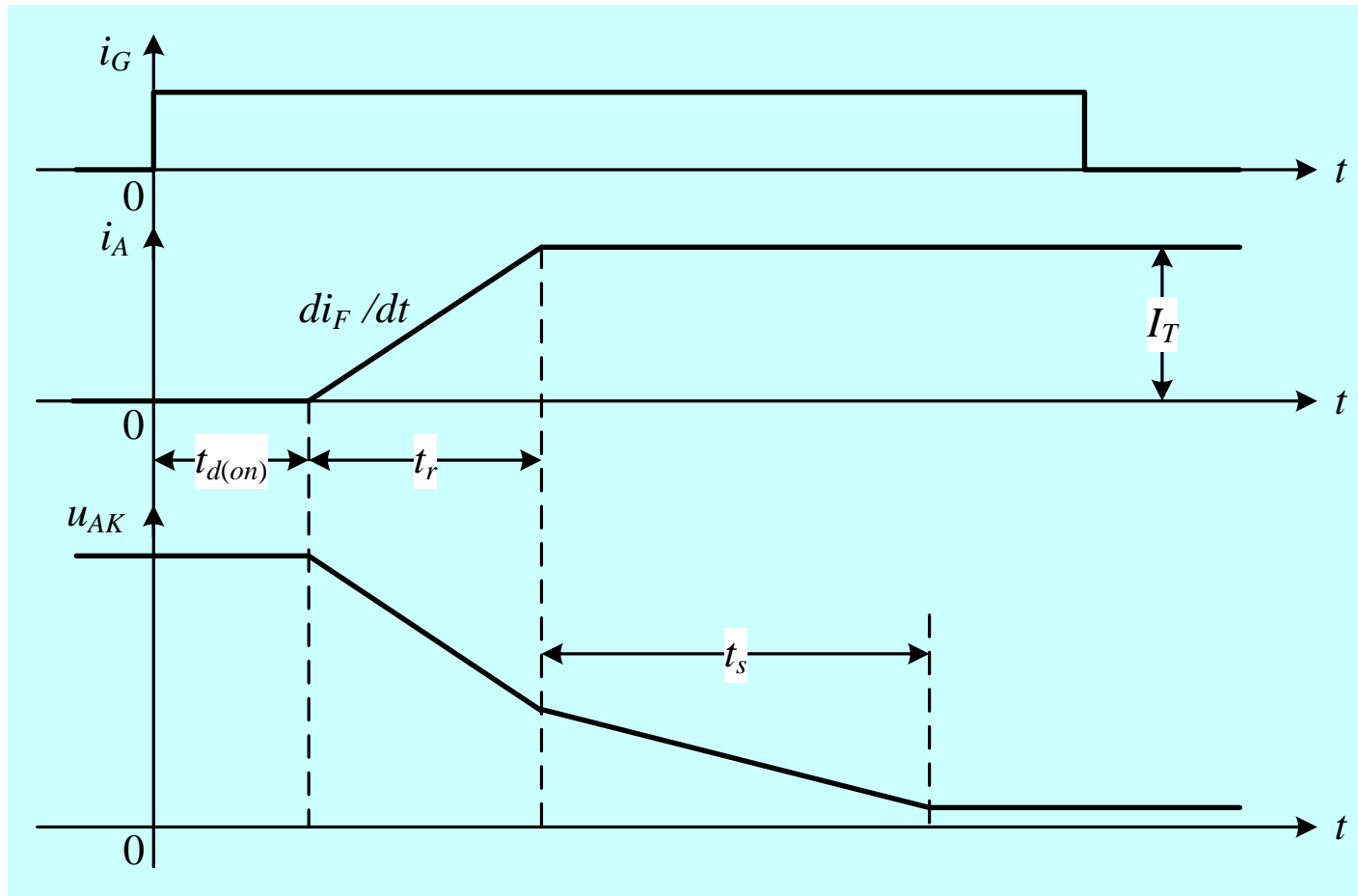


(β)

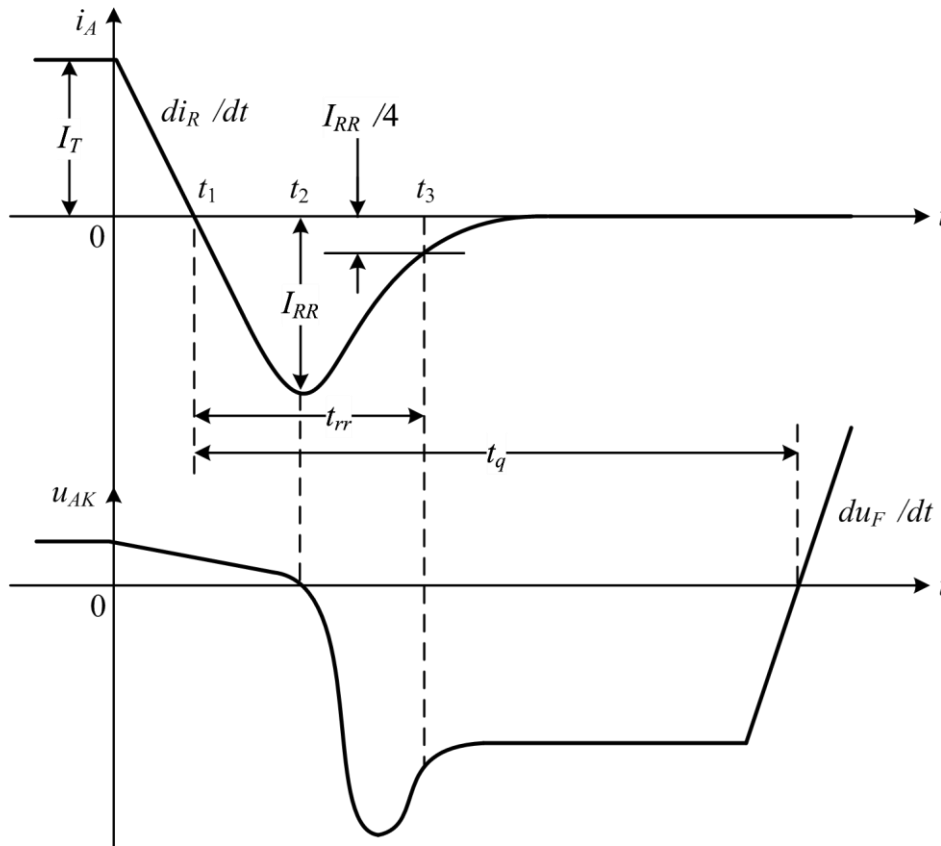
Κυματομορφές ανόρθωσης



# Χρονικό διάστημα έναυσης του SCR



# Χρονικό διάστημα σβέσης $t_q$ του SCR



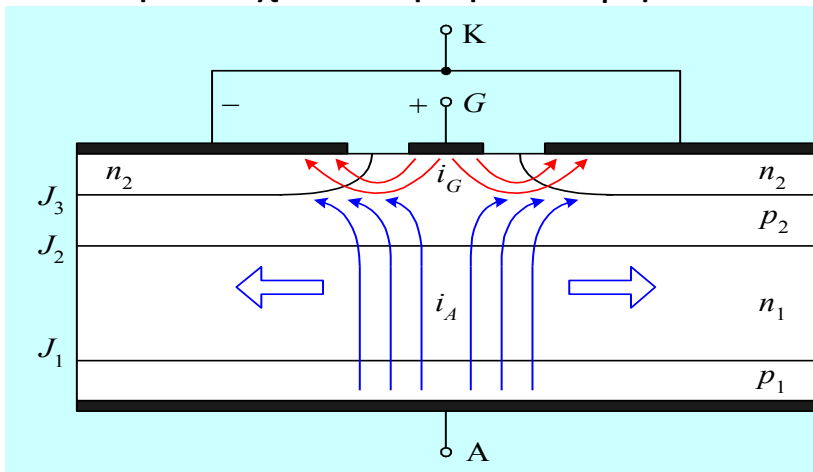
Κυματομορφές μετάβασης





# Τρόποι έναυσης του SCR

- Με την εφαρμογή παλμού ρεύματος στην πύλη.
- Με την υπέρβαση της τάσης αποκοπής.
- Όταν η ταχύτητα μεταβολής της τάσης μεταξύ ανόδου και καθόδου υπερβεί την τιμή  $(du_F/dt)_{\max}$ .
- Από τους τρεις τρόπους έναυσης μόνο ο πρώτος είναι έγκυρος, ενώ οι άλλοι δύο πρέπει να αποφεύγονται.
- Ο περιορισμός  $(di_F/dt)_{\max}$  οφείλεται στη ροή του ρεύματος ανόδου κατά την έναυση του SCR σε μια περιορισμένη επιφάνεια του στοιχείου γύρω από την πύλη και όχι σ' όλη τη διατομή του όπως συμβαίνει στη συνέχεια.



Εξάπλωση του ρεύματος ανόδου, από την κεντρική περιοχή γύρω από την πύλη κατά την έναυση, σ' ολόκληρη τη διατομή του στοιχείου.



# Thyristor για φασικό έλεγχο ισχύος (phase-control thyristors)

- ❖ Για ανόρθωση στη συχνότητα του δικτύου (50 Hz).
- ❖ AC και DC κινητήρια συστήματα.
- ❖ Μετατροπείς σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- ❖ Πρέπει να έχουν μεγάλες ανάστροφες τάσεις διάσπασης, μεγάλα ρεύματα και μικρή πτώση τάσης κατά την αγωγή.
- ❖  $\sim 4000$  A, για 5-7 kV.
- ❖ Πτώση τάσης  $\sim 1,5$  V για ανάστροφη τάση 1000V.
- ❖ Πτώση τάσης  $\sim 3$  V για ανάστροφη τάση 5-7 kV.



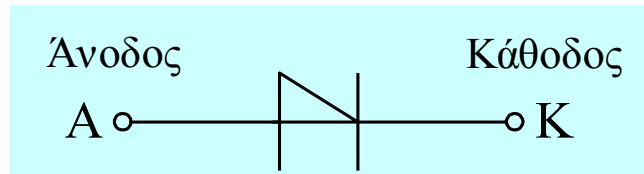
# Thyristor αντιστροφών (inverter-grade thyristors)

- Πρέπει να έχουν μικρό  $t_q$ , και μικρή πτώση τάσης κατά την αγωγή.
- Κατασκευάζονται για 2500 V, και 1500 A.
- $t_q < 100 \mu\text{s}$ .
- Όσο πιο μικρό είναι το  $t_q$  τόσο πιο μικρή είναι και η ανάστροφη τάση διάσπασης.



# Δίοδος τεσσάρων στρωμάτων

Η δίοδος τεσσάρων στρωμάτων ή δίοδος *Shockley*, είναι ένας *SCR* χωρίς το ηλεκτρόδιο της πύλης.

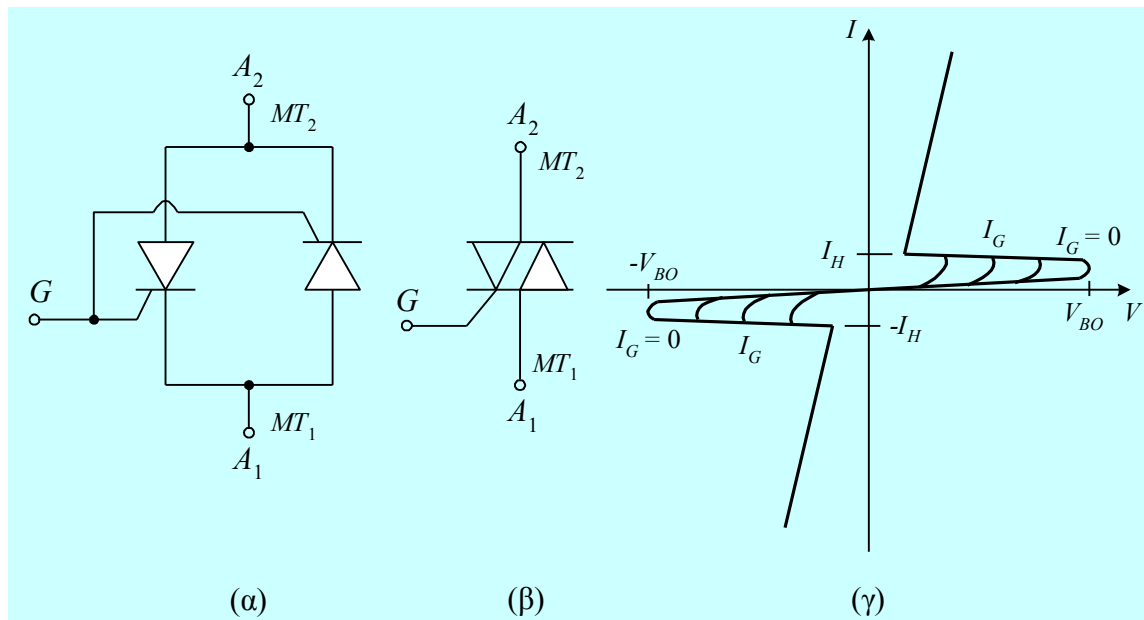


Κυκλωματικό σύμβολο της διόδου *Shockley*.



# To TRIAC

Το *TRIAC* είναι ένας αμφίδρομος *SCR*. Επομένως, το *TRIAC* επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα *TRIAC* χρησιμοποιούνται συνήθως στο φασικό έλεγχο της ισχύος σε ωμικά φορτία, σε συχνότητες 50 έως 400Hz, καθώς και ως ηλεκτρονόμοι στερεάς κατάστασης (*solid state relay*).

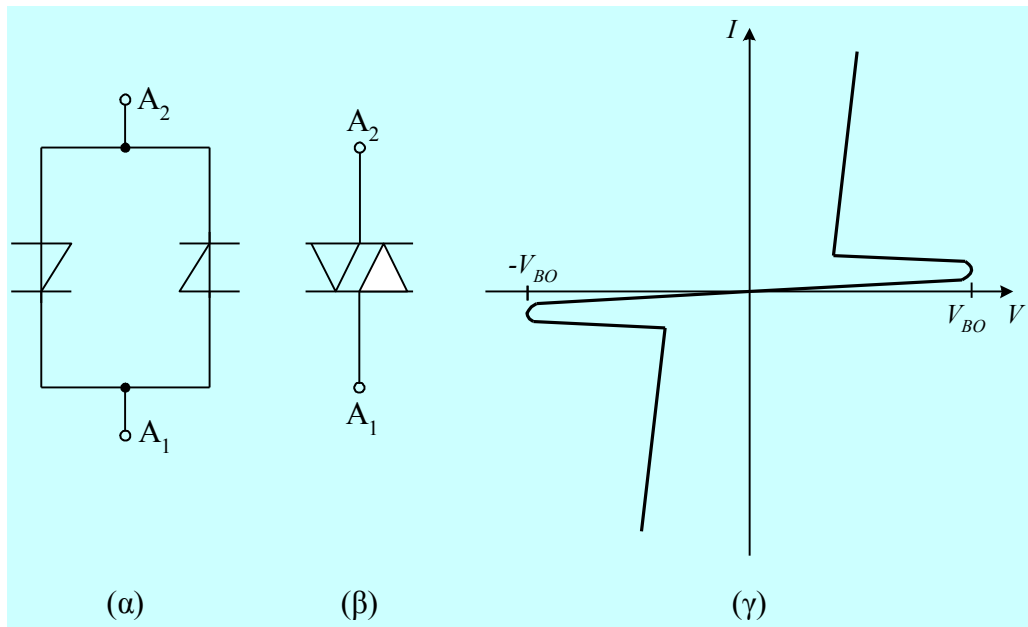


Ισοδύναμο κύκλωμα του *TRIAC* (α), σύμβολο (β) και χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (γ)



# To DIAC

Το *DIAC* είναι μια αμφίδρομη δίοδος τεσσάρων στρωμάτων, ή ισοδύναμα ένα *TRIAC* χωρίς πύλη. Το *DIAC* χρησιμοποιείται για την παραγωγή παλμών έναυσης στο *TRIAC*.

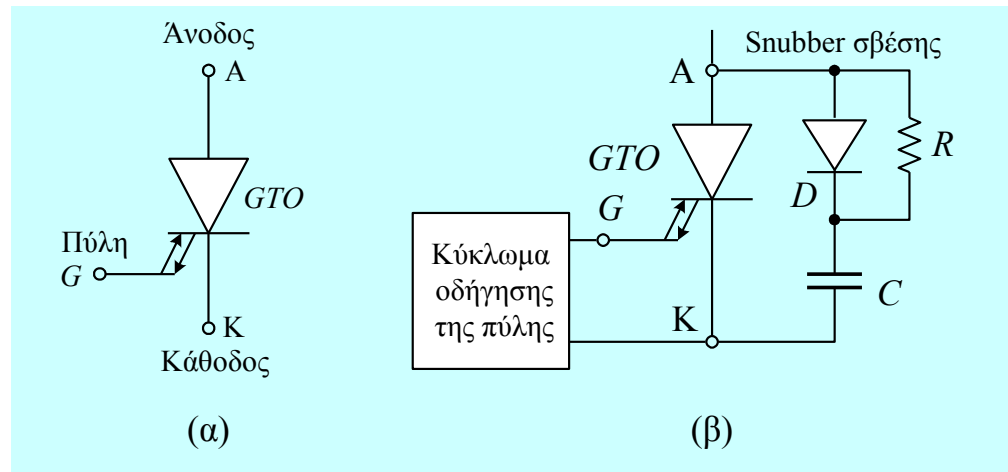


Ισοδύναμο κύκλωμα του *DIAC* (α), Κυκλωματικό σύμβολο (β)  
και η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (γ)



# To Thyristor GTO (Gate Turn Off)

- ❑ Το *GTO* είναι ένας τροποποιημένος *SCR* με ικανότητα αποκοπής (σβέσης) από την πύλη.
- ❑ Για την αποκοπή του *GTO* απαιτείται η εφαρμογή ενός εξαιρετικά υψηλού στιγμιαίου αρνητικού παλμού ρεύματος στην πύλη (περίπου ίσο με το 1/3 του ρεύματος φορτίου).
- ❑ Το *GTO* δεν αποκόπτει αρνητικές τάσεις.
- ❑ Στη λειτουργία του *GTO* απαιτείται η χρήση προστατευτικών διατάξεων (*snubber*), εξαιτίας της πολύ μικρής τιμής της παραμέτρου  $(du_F/dt)_{\max}$ .

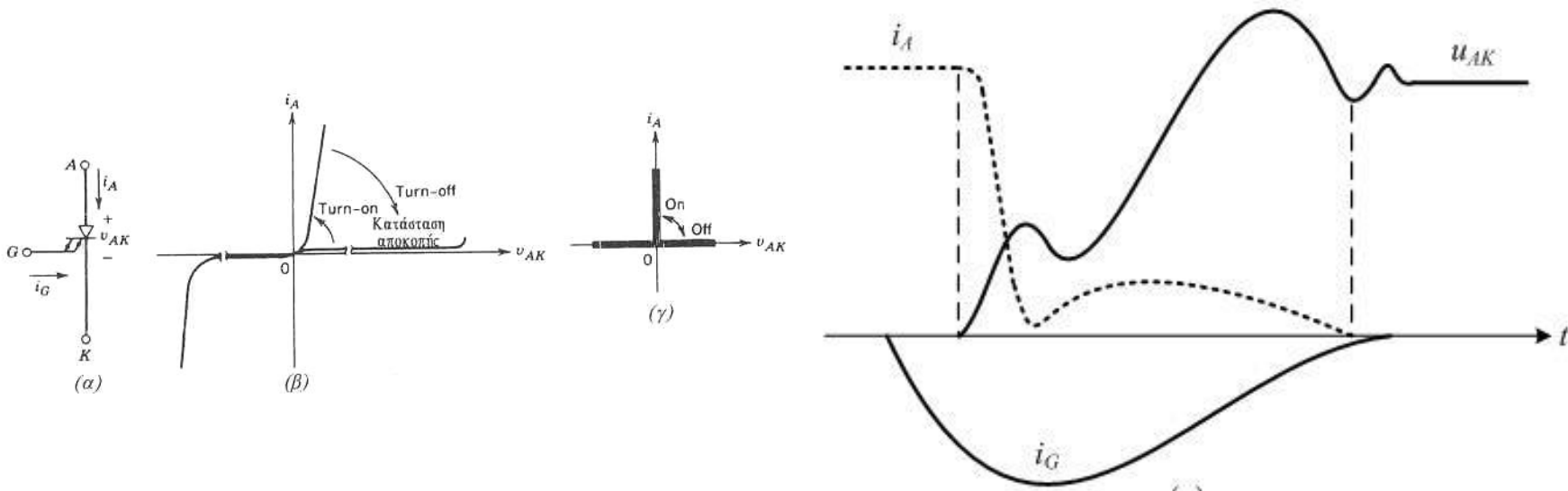


Κυκλωματικό σύμβολο του *GTO* (α) και κύκλωμα προστασίας κατά τη σβέση (β).



# To Thyristor GTO

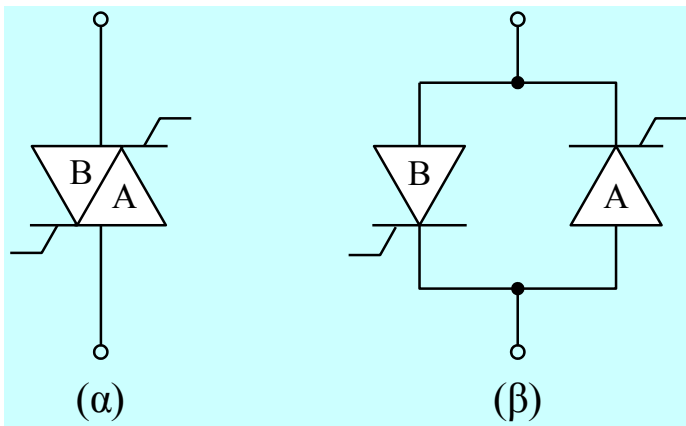
- ❑ Τάση αγωγιμότητας 2-3 V (λίγο μεγαλύτερη του thyristor).
- ❑ Ταχύτητα μετάβασης <25  $\mu$ s.
- ❑ Τάση αποκοπής έως 4,5 kV.
- ❑ Ρεύματα της τάξης των kA.
- ❑ Χρήση σε εφαρμογές με μεγάλα ρεύματα και τάσεις σε συχνότητες μέχρι 10 kHz.





# Αμφίδρομος SCR

- Ο αμφίδρομος *SCR* (*Bi-Directional Control Thyristor, BCT*), είναι ένας νέος ημιαγωγός διακόπτης, ο οποίος πρωτοεμφανίστηκε το 1998.
- Ο *BCT*, αποτελείται από δύο *SCRs*, οι οποίοι συνδέονται αντιπαράλληλα και κατασκευάζονται στο ίδιο πλακίδιο πυριτίου, ενώ παρέχεται σε συσκευασία *press pack* για την κατασκευή μετατροπέων ισχύος με μικρότερο όγκο, απλούστερο σύστημα ψύξης και μεγαλύτερη αξιοπιστία.



Κυκλωματικό σύμβολο του *BCT* (α), το οποίο αποτελείται από δύο αντιπαράλληλα *SCR* (β)

Εικόνα 2: *BCT* σε συσκευασία *press pack* και του πλακιδίου πυριτίου (*silicon wafer*)

# To IGCT (1/3)

- ❑ Το *IGCT* (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) πρωτοεμφανίστηκε εμπορικά το 1997 και έχει ραγδαία διάδοση στην περιοχή των μετατροπέων μεγάλης ισχύος.
- ❑ Η κατασκευή του *IGCT* βασίζεται στις νεότερες τεχνολογίες κατασκευής των *GTO* και των *IGBT* και είναι ο πρώτος διακόπτης ισχύος ο οποίος παρέχεται μαζί με το κύκλωμα οδήγησής του.



# Το IGCT (2/3)

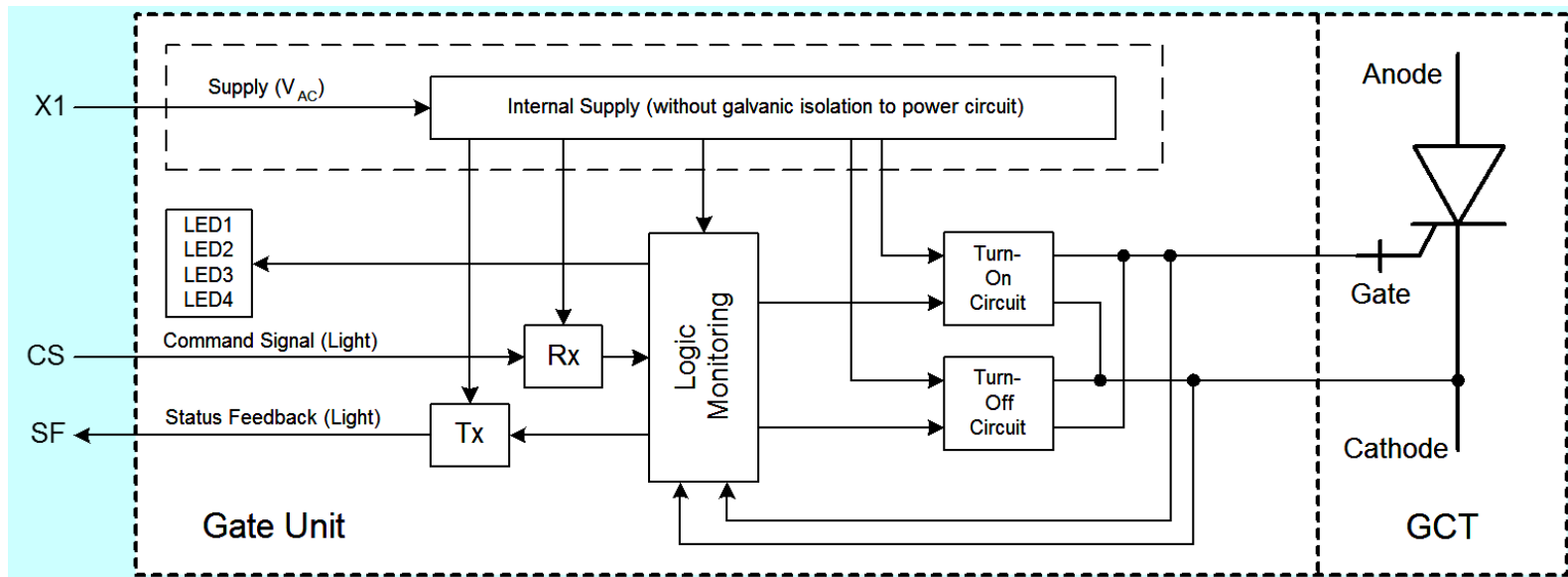


Εικόνα 3: Ασύμμετρο IGCT

- ❑ Οι δύο πλέον διαδεδομένοι τύποι IGCT είναι το ασύμμετρο (*asymmetric*) IGCT και το αντίστροφης αγωγής (*reverse conducting*) IGCT. Ακόμη, συμμετρικά (*symmetric*) και διπλής πύλης (*dual gate*) IGCT έχουν παρουσιαστεί πρόσφατα.
- ❑ Το IGCT συνδυάζει με μοναδικό τρόπο τις ελάχιστες απώλειες αγωγής των *thyristors*, με την ιδανική σβέση των *transistors*.



# To IGCT (3/3)



Λειτουργικό διάγραμμα του κυκλώματος οδήγησης της πύλης του ασύμμετρου *IGCT*.



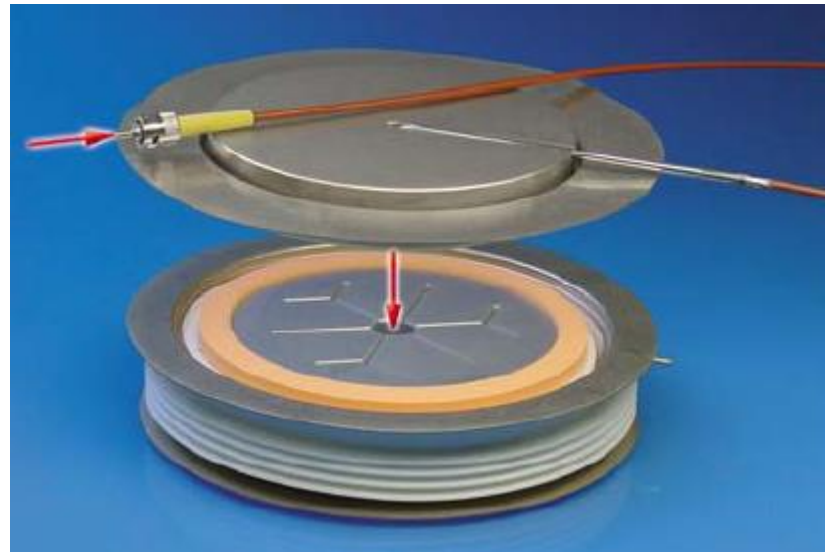
# Οπτικά διεγχειρόμενα Thyristors (1/2)

- ❑ Τα οπτικά διεγχειρόμενα thyristors (*Light Triggered Thyristors, L T T*) πρωτοεμφανίστηκαν το 1980, ως αντικαταστάτες των ηλεκτρικά διεγχειρόμενων SCR σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος.
- ❑ Τα LTT σκανδαλίζονται από υπέρυθρους παλμούς φωτός με ισχύ λίγα ως μερικές δεκάδες mW, και διάρκεια της τάξης των 10μs.
- ❑ Με τη χρήση των LTT λύνονται τα προβλήματα της γαλβανικής απομόνωσης και της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στα κυκλώματα οδήγησης των ηλεκτρικών SCR, παρόλη τη μικρή ισχύ διέγερσης. Ακόμη, βελτιώνεται σημαντικά η αξιοπιστία τόσο των διατάξεων σκανδαλισμού, όσο και ολόκληρου του μετατροπέα ισχύος, με ταυτόχρονη μείωση του ολικού κόστους.



# Οπτικά διεγερόμενα Thyristors (2/2)

- ❑ Ο παλμός οδηγείται με οπτικές ίνες
- ❑ Χρήση σε εφαρμογές υψηλής τάσης.
- ❑ Ενδεικτικές προδιαγραφές: 4kV, 3kA, πτώση τάσης 2V, φωτεινή διέγερση 5 mW.



Εικόνα 4: Κατασκευαστική δομή των LTT

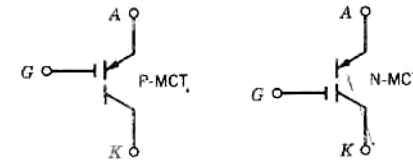


# Ελεγχόμενα MOS thyristor (MCT)

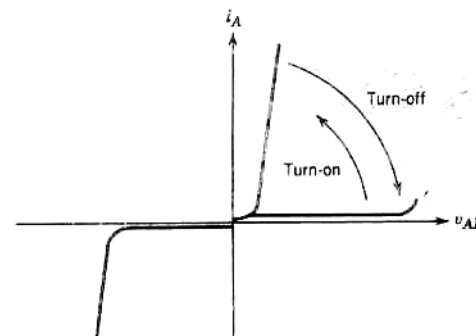
- ❑ Χαμηλή πτώση τάσης όπως το GTO.
- ❑ Μανδάλωση.
- ❑ Έλεγχος με τάση  $v_{GK}$ .
- ❑ Ίδια ενέργεια στην πύλη όπως το MOSFET και IGBT.
- ❑ Τάσεις έως 2.5 - 3.0 kV.
- ❑ Ρεύματα 50 – x100 A (μικρότερα του GTO).

Δύο μεγάλα πλεονεκτήματα σε σχέση με το GTO:

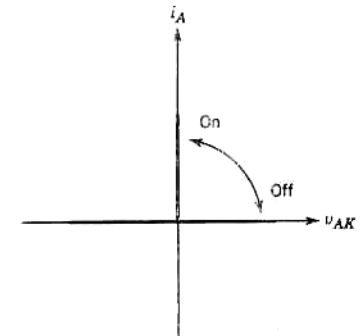
- ❑ Δεν απαιτεί αρνητικό ρεύμα στην πύλη.
- ❑ Μικρότερος χρόνος μετάβασης.



(α)



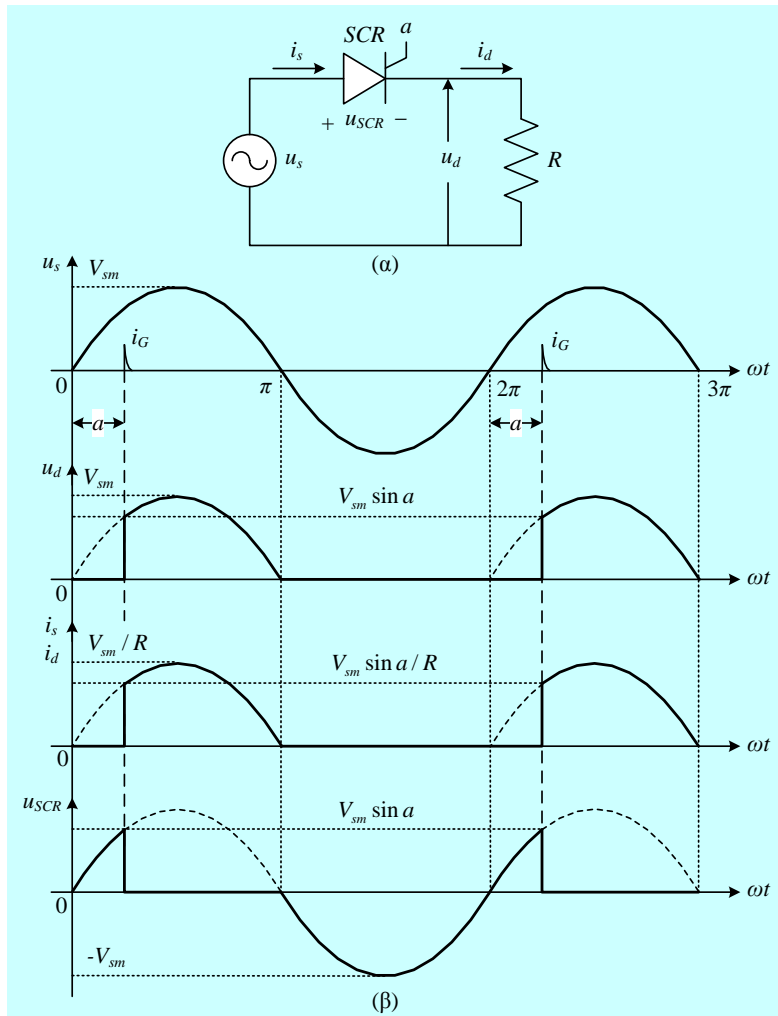
(β)



(γ)



# Κύκλωμα απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό φορτίο



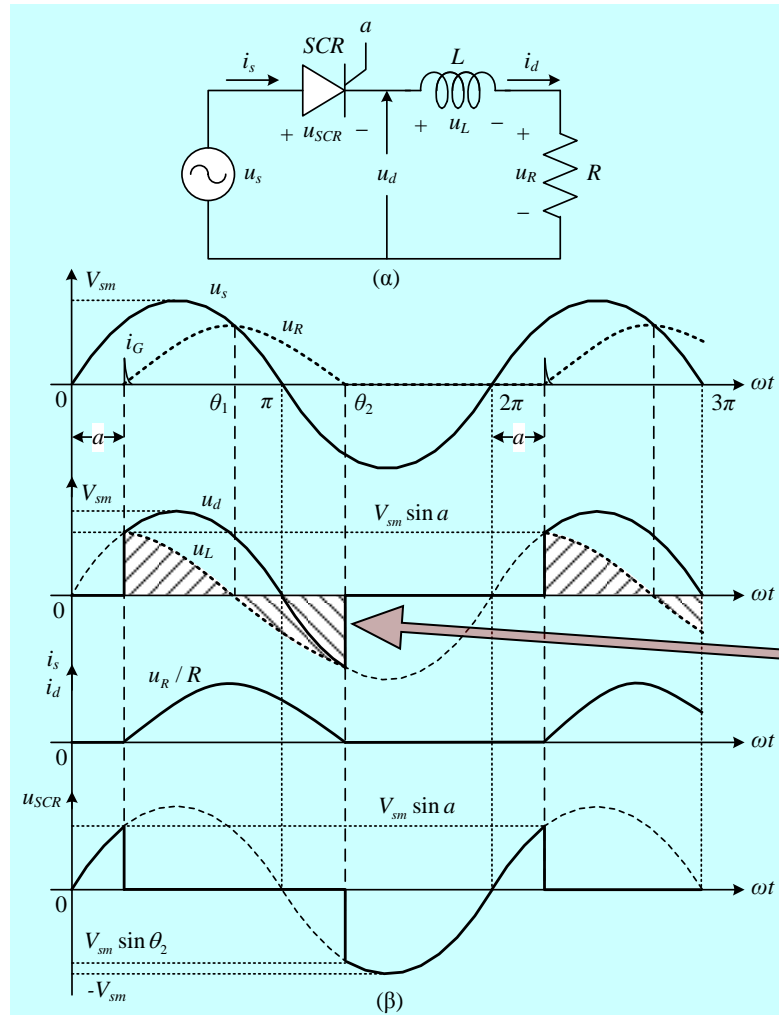
$$V_{da}^h = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) =$$

$$= \frac{V_{sm}}{\pi} \left[ \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right] = V_{do}^h \left[ \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right]$$





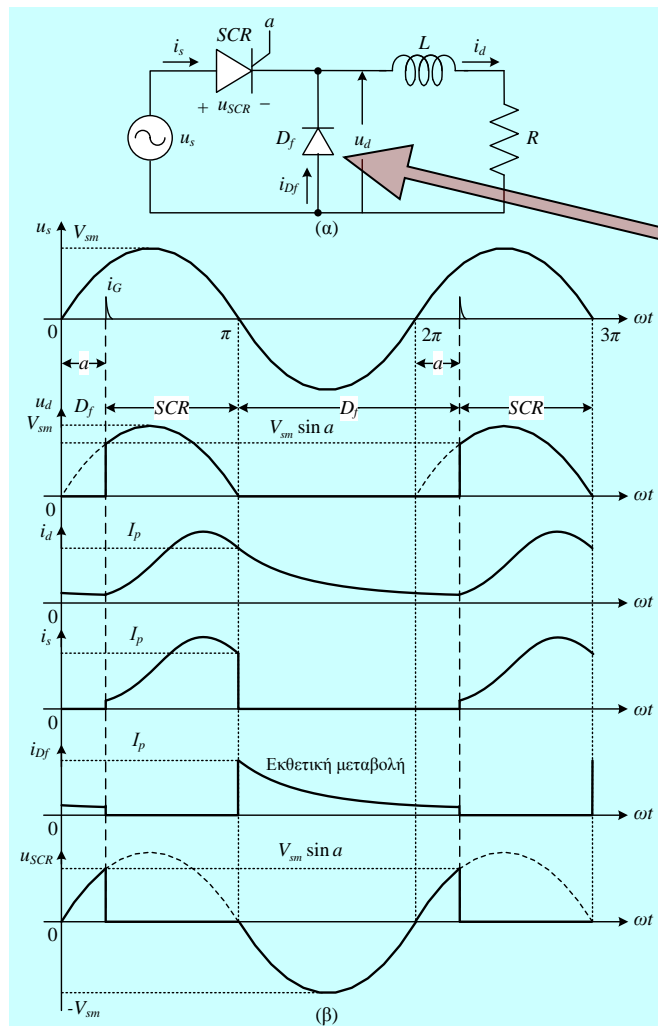
# Κύκλωμα απλής ανόρθωσης με SCR και ωμικό-επαγωγικό φορτίο



Αναστροφή ισχύος



# Κύκλωμα απλής ανόρθωσης με SCR, ωμικό-επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης ροής

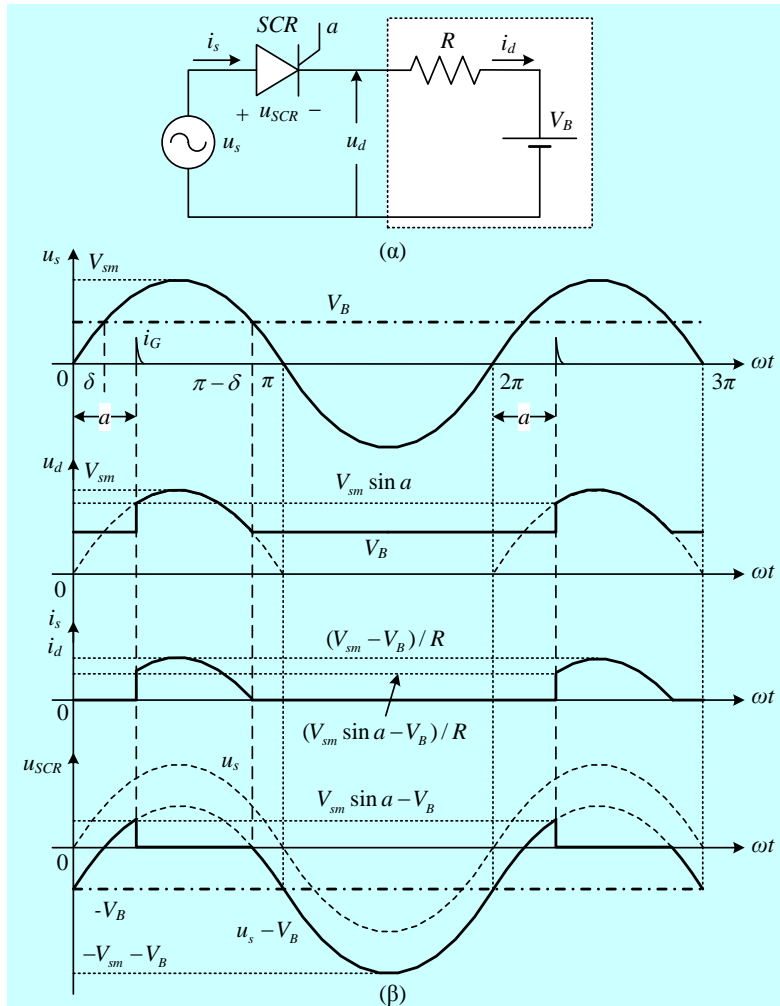


δίοδος ελεύθερης ροής

- ✓ αποτρέπει την εφαρμογή αρνητικής τάσης στο φορτίο,
- ✓ αποκλείει την αναστροφή ισχύος,
- ✓ προκαλεί καλύτερη εξομάλυνση του ρεύματος φορτίου.



# Κύκλωμα απλής ανόρθωσης με SCR για φόρτιση μπαταρίας



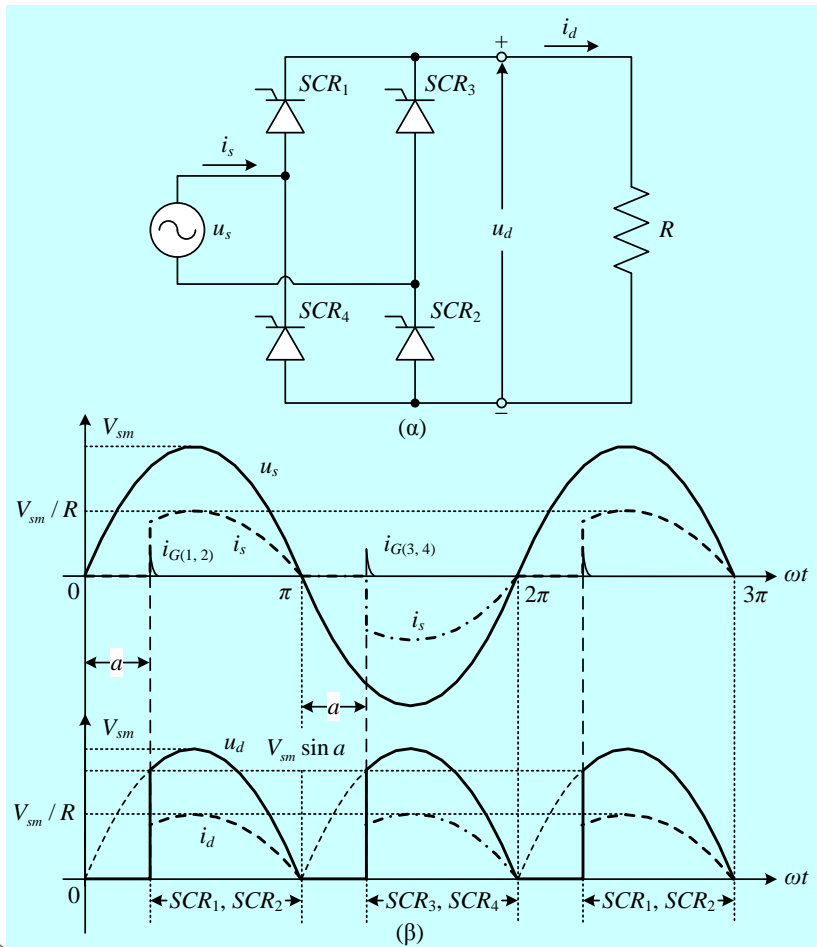
$$I_d = \frac{1}{2\pi R} \int_a^{\pi-\delta} (V_{sm} \sin \omega_s t - V_B) d(\omega_s t)$$

$$\delta = \sin^{-1}(V_B / V_{sm})$$

Πρέπει να ισχύει:  $\delta < a < \pi - \delta$



# Ανορθωτής γέφυρας με SCR και ωμικό φορτίο



$$V_{da}^f = \frac{1}{\pi} \int_a^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{V_{sm}}{\pi} (1 + \cos a)$$

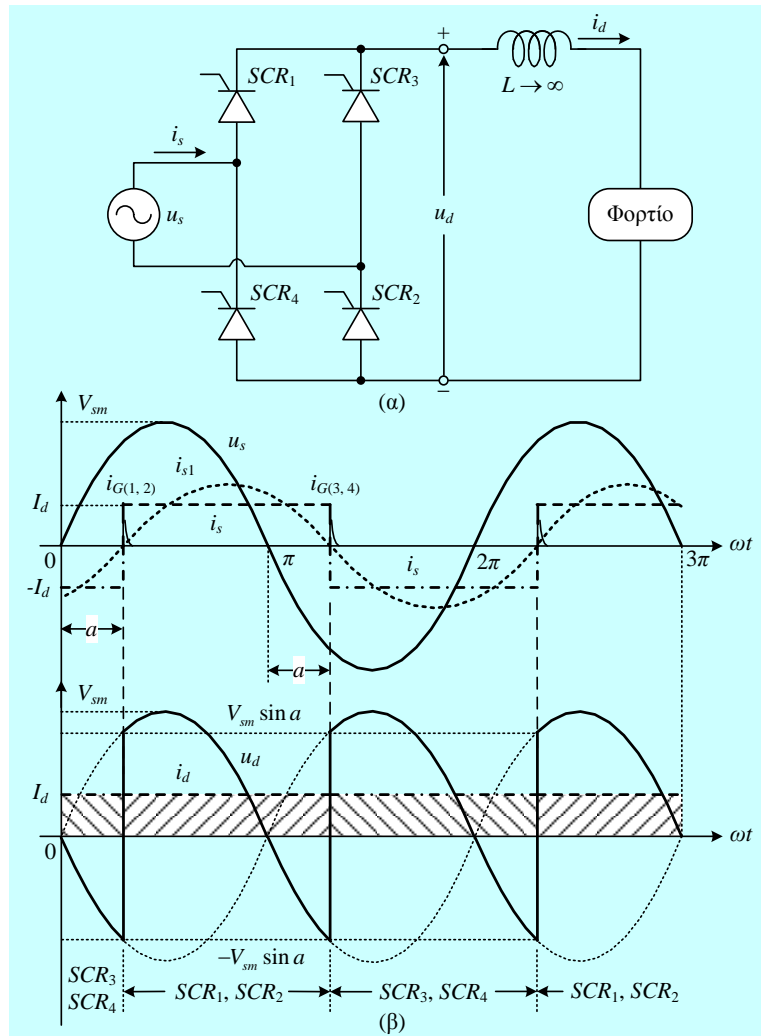
$a = 0^\circ \Rightarrow$  λειτουργία ως δίοδοι  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow V_{da(a=0)}^f = V_{do}^f = 2V_{sm} / \pi$$

$$a = \pi \Rightarrow V_{da(a=\pi)}^f = 0$$



# Ανορθωτής γέφυρας με SCR και φορτίο με άπειρη επαγωγή

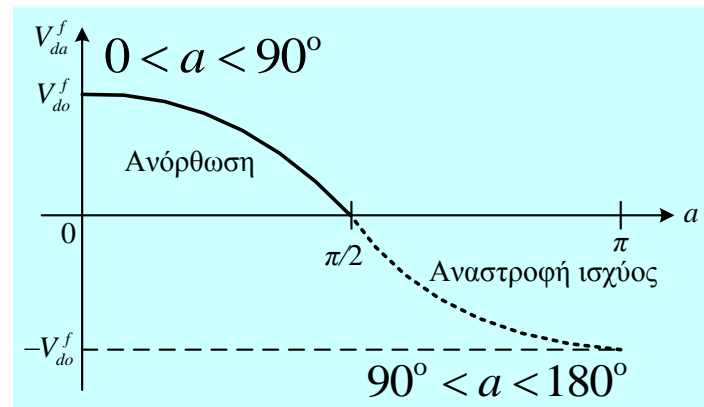


$$V_{da}^f = \frac{1}{\pi} \int_a^{\pi+a} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{2V_{sm}}{\pi} \cos a = V_{do}^f \cos a$$

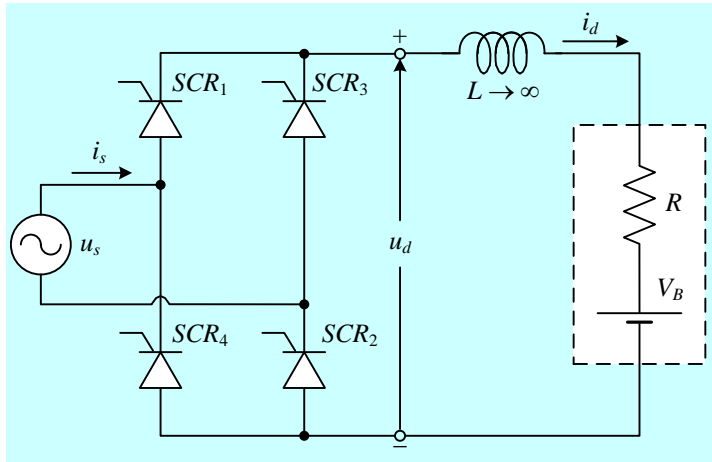
$$\cos \phi_1 = \cos a$$

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos a$$

$$P_s = V_s I_{s1} \cos \phi_1 = V_{da}^f I_d = \frac{2V_{sm}}{\pi} I_d \cos a$$



# Ανορθωτής γέφυρας με SCR για φόρτιση μπαταρίας



$$V_{da}^f = \frac{1}{\pi} \int_a^{\pi+a} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{2V_{sm}}{\pi} \cos a = V_{do}^f \cos a$$

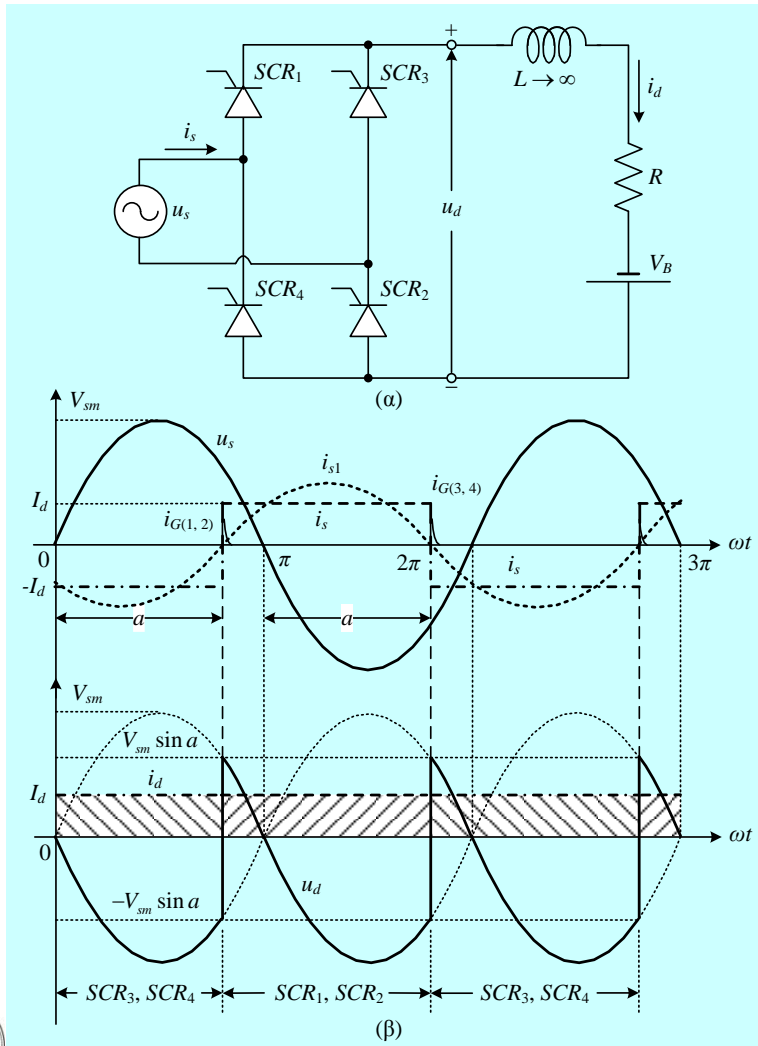
$$0 < a < \cos^{-1} \left\{ \frac{V_B \pi}{2V_{sm}} \right\}$$

$$I_d = \frac{V_{da}^f - V_B}{R}$$

ισχύς φόρτισης της μπαταρίας:  $P_B = V_B I_d$



# Ανορθωτής γέφυρας με SCR για αναστροφή ισχύος



Όταν  $90^\circ < a < 180^\circ$

τότε η μέση τάση εξόδου είναι αρνητική, δηλ. ο μετατροπέας μεταφέρει ισχύ από την dc έξοδο στην ac είσοδο και η μέση τιμή ισχύος είναι αρνητική:

$$P_{d|a>\pi/2} = P_s = V_{da}^f I_d = V_{do}^f I_d \cos a = V_s I_{s1} \cos \phi_1 < 0$$

Η  $V_B$  με εσωτ. αντίσταση  $R$  μπορεί να είναι μια μπαταρία, είτε η τάση από φωτοβολταϊκά στοιχεία ή από ανεμογεννήτρια.

$$I_d = \frac{V_{da}^f - V_B}{R}$$

όπου  $V_{da}^f = V_{do}^f \cos a$  και  $V_B$  αρνητικές.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

- Εικόνα 1:

IXYS high power 32mm die phase control thyristors:

<http://www.electronicsspecifier.com/passives/n0795yn140-n0795yn180-n0530yn220-n0530yn250-ixys-high-power-32mm-die-phase-control-thyristors>

- Εικόνα 2:

BCT -Bi-directional Control Thyristor:

<http://www.ecmelectronics.co.uk/powersemiconductor1.html>

- Εικόνα 3:

Integrated gate-commutated thyristors:

<http://new.abb.com/semiconductors>

- Εικόνα 4:

Κατασκευαστική δομή των LTT: <http://www.powerguru.org/pulsed-power-applications/>





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ, Ηλεκτρονικά ελέγχου ισχύος». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](http://opencourses.auth.gr/eclass_courses).



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2013-2014





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

