

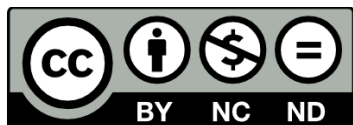


# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ II

## Ενότητα 4: Άεργη Ισχύς και Αντιστάθμιση

Λαμπρίδης Δημήτρης  
Ανδρέου Γεώργιος

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# 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.





# Άεργη Ισχύς και Αντιστάθμιση



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

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. Η σημασία της αντιστάθμισης
2. Διόρθωση του συντελεστή ισχύος
3. Καταναλωτές άεργης ισχύος
4. Μέσα αντιστάθμισης



# Άεργη Ισχύς

- Δεν παράγει μέσο έργο.
- Προέρχεται από περιοδικά ηλεκτρικά – μαγνητικά πεδία (πυκνωτές – αυτεπαγωγές).
- Κατά τη διάρκεια δημιουργίας του πεδίου:  
Ενέργεια **απορροφάται** από το δίκτυο.
- Κατά τη διάρκεια μείωσης του πεδίου:  
Ενέργεια **αποδίδεται** πίσω στο δίκτυο.



# Αντιστάθμιση

Παραγωγή άεργης ισχύος με άεργα στοιχεία (όπως πυκνωτές, αυτεπαγωγές, στρεφόμενοι πυκνωτές) για την αλλαγή της άεργης ισχύος ενός καταναλωτή ή μιας Γραμμής Μεταφοράς.



# Πυκνωτής C

- Τάση:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos \omega t$$

- Ρεύμα:

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} = -\sqrt{2}VC\omega \sin \omega t = -\sqrt{2}VC\omega \cos(\omega t + 90^\circ)$$





# Πυκνωτής C

- Ισχύς:

$$\begin{aligned} p_C(t) &= v(t) \cdot i(t) = -2V^2 C \omega \sin \omega t \cos \omega t \\ &= -V^2 C \omega \sin(2\omega t) = V^2 C \omega \cos(2\omega t + 90^\circ) \\ &= W_C \cos(2\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

όπου:

$$W_C = \frac{1}{2} C (\sqrt{2}V)^2 = V^2 C$$

**η μέγιστη ηλεκτροστατική ενέργεια στον πυκνωτή C.**



# Αυτεπαγωγή $L$

- Τάση:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos \omega t$$

- Ρεύμα:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}V}{L\omega} \sin \omega t$$



# Αυτεπαγωγή $L$

- Ισχύς:

$$\begin{aligned} p_L(t) &= v(t) \cdot i(t) = 2 \frac{V^2}{L\omega} \sin \omega t \cos \omega t \\ &= \frac{V^2}{L\omega} \sin(2\omega t) \\ &= -W_L \omega \cos(2\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

όπου:

$$W_L = \frac{1}{2} L \left( \frac{\sqrt{2}V}{L\omega} \right)^2 = \frac{V^2}{L\omega^2}$$

η μέγιστη μαγνητική ενέργεια στην αυτεπαγωγή  $L$ .



# Μιγαδικές Ισχύεις σε Μονοφασικό Κύκλωμα

- Μιγαδική ισχύς πυκνωτή  $C$ :

$$\bar{S}_C = \bar{V}\bar{I}^* = jQ_C = -jV^2C\omega$$

- Μιγαδική ισχύς αυτεπαγωγής  $L$ :

$$\bar{S}_L = \bar{V}\bar{I}^* = jQ_L = j\frac{V^2}{L\omega}$$

- $Q_C, Q_L$ : Άεργη Ισχύς
- Φυσική έννοια: είναι η μέγιστη τιμή της ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ισχύος που ρέει σε  $C$  ή  $L$ .



# Μιγαδικές Ισχείς σε Μονοφασικό Κύκλωμα

- Στην πραγματικότητα δεν υφίσταται η έννοια της φοράς στην άεργη ισχύ και στο πεδίο της συχνότητας.
- Χρησιμοποιούμε παρόλα αυτά πρόσημα ανάλογα με την προέλευσή της, λόγω της αντίθετης στιγμιαίας φοράς της σε πυκνωτές και αυτεπαγωγές.
- Για σύμβαση φοράς καταναλωτή ισχύουν:
  - Χωρητικός καταναλωτής:  $Q_C < 0$
  - Επαγωγικός καταναλωτής:  $Q_L > 0$



# Αποτελέσματα μεταβολής της άεργης ισχύος $Q$ σε ΓΜ (1/3)

Μεταβολή του ρεύματος φορτίου /



Μεταβολή των απωλειών της ΓΜ

Από την  $P = \sqrt{3}VI \cos \varphi$  συμπεραίνουμε ότι για  $\cos \varphi \uparrow$  θα είναι  $I \downarrow$

Από την  $P_{loss} = 3I^2 R = R \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi}$  συμπεραίνουμε ότι για  $\cos \varphi \uparrow$  θα είναι  $P_{loss} \downarrow$

Ειδικά για  $\cos \varphi = 1$  θα είναι  $P_{loss} \rightarrow \min$ .



# Αποτελέσματα μεταβολής της άεργης ισχύος $Q$ σε ΓΜ (2/3)

Μεταβολή της πτώσης τάσης:

Σε ΓΜ του συστήματος μεταφοράς ΥΤ (150 kV – 400 kV) ισχύει με καλή προσέγγιση η σχέση  $R' \cong 0$ .

Οπότε η πτώση τάσης (δηλαδή η διαφορά μεταξύ των **μέτρων** της τάσης  $V_S$  του άκρου αποστολής  $S$  και της τάσης  $V_R$  του άκρου παραλαβής  $R$  της ισχύος) είναι:

$$V_S - V_R \cong \frac{Q_R X}{V_R}$$



# Αποτελέσματα μεταβολής της άεργης ισχύος $Q$ σε ΓΜ (3/3)

Μεταβολή της κυματικής αντίστασης  $Z_0$  μακριάς ομοιογενούς ΓΜ χωρίς απώλειες:

Με μέσα αντιστάθμισης μπορούμε να αλλάξουμε τα χαρακτηριστικά των ΓΜ, δηλαδή την διαμήκη αυτεπαγωγή  $L'$  και την εγκάρσια χωρητικότητα  $C'$  ανά μονάδα μήκους, οπότε αλλάζουμε:

- τη **φυσική ισχύ** και
  - το **όριο ευστάθειας**
- του συστήματος μεταφοράς.





# Αποτελέσματα μεταβολής της άεργης ισχύος $Q$ σε ΓΜ (3)

Μεταβολή της κυματικής αντίστασης  $Z_0$



Μεταβολή της φυσικής ισχύος  $P_N = \frac{V_R^2}{Z_0}$

$$\text{όπου } Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \text{ για } R' \cong 0$$



# Διόρθωση του συντελεστή ισχύος $\cos\varphi$ σε καταναλωτή

- Συντελεστής ισχύος φορτίου:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

όπου η γωνία  $\varphi$  είναι η γωνία μεταξύ της φασικής τάσης  $V_{ph}$  και του ρεύματος  $I$ .

**Επιθυμητή αλλαγή από  $\cos\varphi_1$  σε  $\cos\varphi_2$  με πρόσθετη άεργη ισχύ  $Q_A$ .**

$$Q_A = P(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1) \begin{cases} < 0 \Rightarrow C \\ > 0 \Rightarrow L \end{cases}$$



# Είδη Αντιστάθμισης

- Τοπική:
  - Π.χ. σε κάθε ασύγχρονο κινητήρα (<30 kW) και σε ΜΣ ΜΤ/ΧΤ.
- Ομαδική:
  - Π.χ. σε πολλούς κινητήρες μαζί (γενικά σε ομάδες όμοιων συσκευών).
- Γενική:
  - Στον υποσταθμό του καταναλωτή.

Γίνεται με ρυθμιζόμενους πυκνωτές, με στόχο τη διατήρηση ενός περίπου σταθερού συντελεστή ισχύος.



# Απόζευξη πυκνωτών από το δίκτυο

**Προσοχή** στα παγιδευμένα φορτία και στην υψηλή τάση των πυκνωτών!

- Αντιστάσεις εκφόρτισης στη ΧΤ με χρονική σταθερά  $T_S = RC < 1 \text{ sec.}$

Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η πλήρης βραχυκύκλωση του πυκνωτή με αγωγό Cu 10 mm<sup>2</sup> πριν από την εκτέλεση εργασίας στον πυκνωτή.



# Μεγάλοι καταναλωτές άεργης ισχύος (1/2)

- Μεγάλο μέρος (60% - 70% σε βιομηχανικές χώρες – 30% - 40% στην Ελλάδα σήμερα) της ηλεκτρικής ενεργής ισχύος στο δίκτυο απορροφάται από τη βιομηχανία.
- Η χρήση της ενεργής ισχύος συνοδεύεται από μεγάλη κατανάλωση άεργης ισχύος.

Μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές άεργης ισχύος είναι:

1. Ασύγχρονοι κινητήρες.
2. Ηλεκτρονικά ισχύος.
3. Ηλεκτρικές υψικάμινοι τήξης μετάλλων (flicker).
4. Ηλεκτρικές συγκολλήσεις.



# Μεγάλοι καταναλωτές άεργης ισχύος (2/2)

## 5. Δίκτυο Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Πρέπει εδώ να γίνει αντιστάθμιση με:

- **Πυκνωτές**, σε υπερφορτιζόμενες εναέριες ΓΜ, και σε υποσταθμούς καταναλωτών ΧΤ.
- **Πηνία**, σε καλώδια και σε μακριές εναέριες ΓΜ που λειτουργούν με μικρό φορτίο.



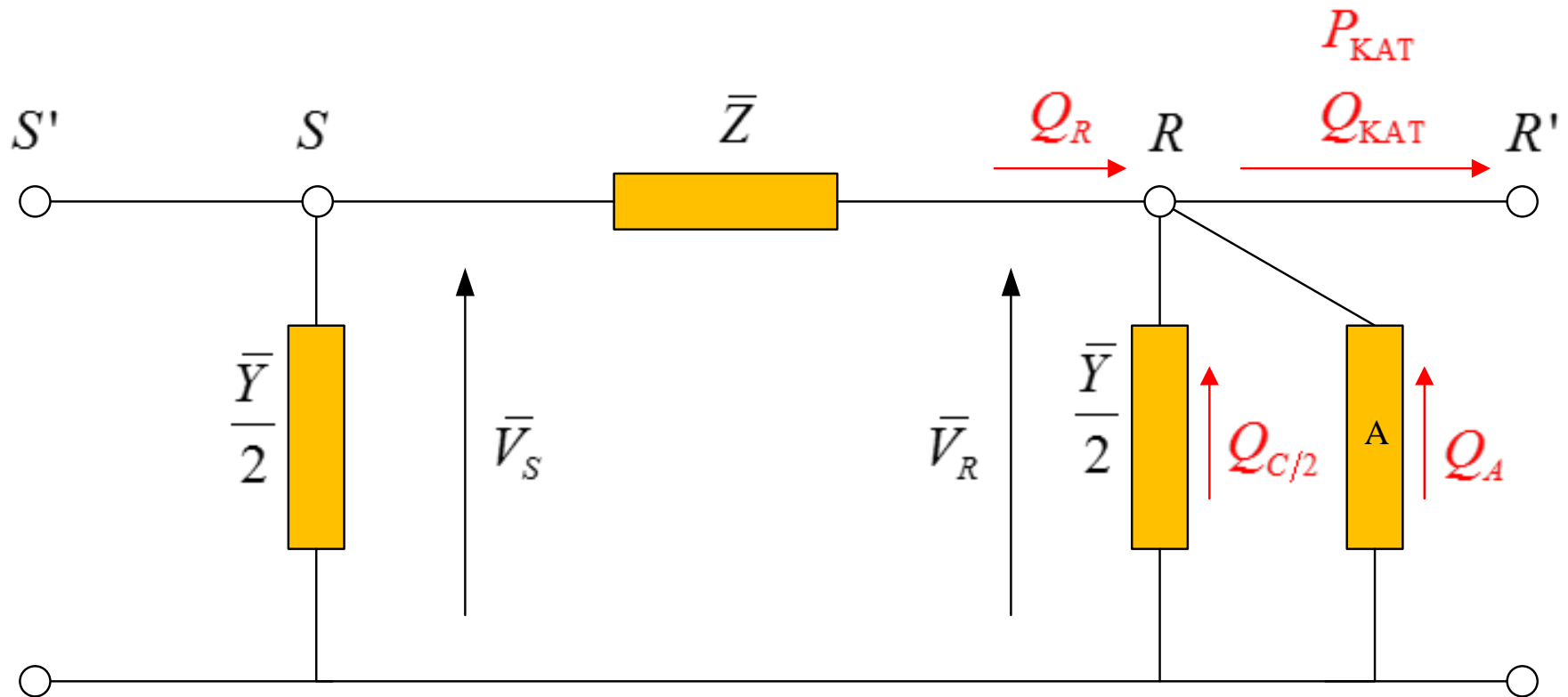
# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (1/6)

Θεωρούμε το γνωστό μοντέλο μιας κοντής ΓΜ  $SR$ , προσαυξημένο στην πλευρά του καταναλωτή  $R'$  και της πηγής  $S'$  με τις αγωγιμότητες των κάθετων σκελών ενός Π-τετράπολου κυκλώματος με το οποίο θέλουμε να παραστήσουμε προσεγγιστικά μια ΓΜ μεγάλου μήκους.

(δηλαδή μια γραμμή για την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ρεύμα στην αρχή της γραμμής  $S'$  **δεν** είναι ίσο με το ρεύμα στο τέλος της γραμμής  $R'$ ).



# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (2/6)





# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (3/6)

- Γνωστά:

$$P_{KAT}, \quad \cos\varphi \quad \Rightarrow \quad Q_{KAT} = P_{KAT} \tan\varphi$$

$\bar{V}_R$  (Τάση Αναφοράς, Ονομαστική Τάση)

Επιθυμητή πτώση τάσης  $\Rightarrow \bar{V}_S$

- Άγνωστα:

Στοιχείο Αντιστάθμισης  $A$ , που παρέχει **άγνωστη** άεργη ισχύ  $Q_A$  στο άκρο παραλαβής  $R$ .



# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (4/6)

- 1<sup>ο</sup> βήμα:

– ΓΜ με απώλειες:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{Z} \cos(y - \theta) - \frac{V_R^2}{Z} \cos y \Rightarrow \theta$$

– ΓΜ χωρίς απώλειες:

$$R \rightarrow 0 \Rightarrow y \cong 90^\circ \Rightarrow P_R = \frac{V_R V_S}{X} \sin \theta$$



# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (5/6)

- 2<sup>ο</sup> βήμα:

– ΓΜ με απώλειες:

$$Q_R = \frac{V_R V_S}{Z} \sin(y - \theta) - \frac{V_R^2}{Z} \sin y \Rightarrow Q_R$$

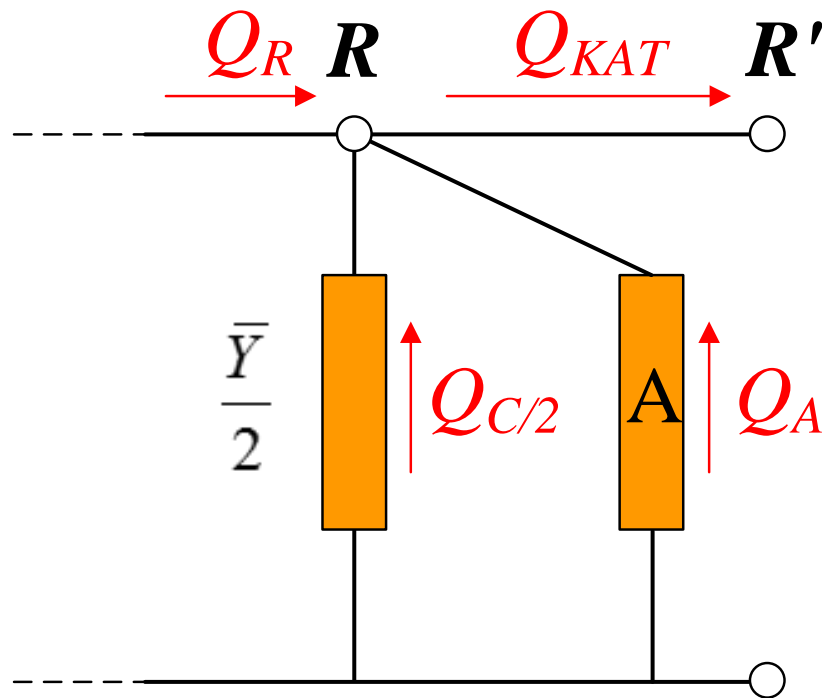
– ΓΜ χωρίς απώλειες:

$$R \rightarrow 0 \Rightarrow y \cong 90^\circ \Rightarrow Q_R = \frac{V_R V_S}{X} \cos \theta - \frac{V_R^2}{X} \Rightarrow Q_R$$



# Προσεγγιστικό Π-τετράπολο ισοδύναμο κύκλωμα μακριάς ΓΜ $S'R'$ (6/6)

- 3<sup>ο</sup> βήμα: Ισολογισμός άεργης ισχύος στο άκρο παραλαβής  $R$ .



$$Q_{KAT} = Q_R + Q_{C/2} + Q_A \Rightarrow Q_A$$



# Υπολογισμός στοιχείου αντιστάθμισης (1/2)

- Αν  $Q_A > 0 \Rightarrow$  Πυκνωτής  $C$ 
  - Σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$Q_A = \frac{V_R^2}{X} = \frac{V_R^2}{\frac{1}{C_Y \omega}} = V_R^2 C_Y \omega \Rightarrow C_Y = \frac{Q_A}{V_R^2 \omega}$$

- Σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3}$$



# Υπολογισμός στοιχείου αντιστάθμισης (2/2)

- Αν  $Q_A < 0 \Rightarrow$  Πηνίο  $L$ 
  - Σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$|Q_A| = \frac{V_R^2}{X} = \frac{V_R^2}{L_Y \omega} = L_Y = \frac{V_R^2}{|Q_A| \omega}$$

- Σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$L_\Delta = 3L_Y$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης, Ανδρέου Γεώργιος. «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ II, Άεργη Ισχύς και Αντιστάθμιση». 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, Χειμερινό εξάμηνο 2014-2015

