



Τεχνικές Μοντελοποίησης και Ανάλυσης Έξυπνων Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας

- Πρότυπο IEC 60909

Υπεύθυνος μαθήματος
Θεόφιλος Παπαδόπουλος, Αν. Καθηγητής
thrapad@ee.duth.gr

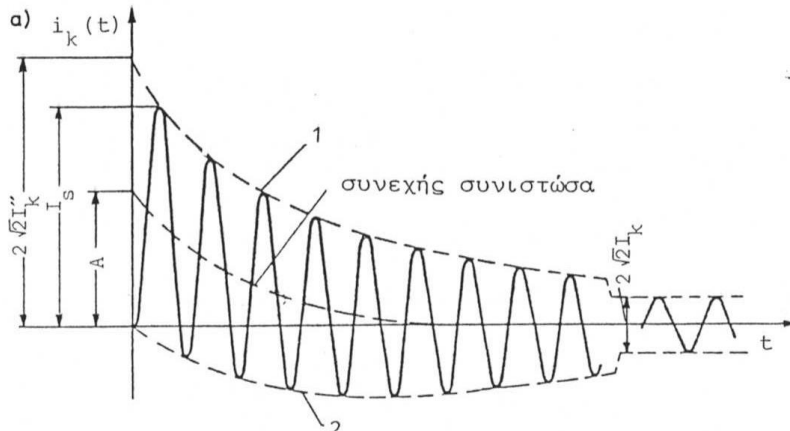


IEC 60909

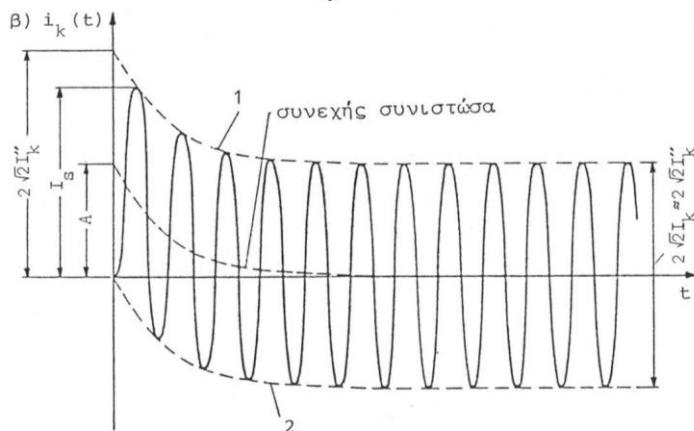


Κατηγορίες σφαλμάτων

- Ισχύει για δίκτυα με ονομαστική τάση μέχρι και 230 kV



Βραχυκύκλωμα 'κοντά' σε γεννήτρια



Βραχυκύκλωμα 'μακριά' σε γεννήτρια

Το σφάλμα εμφανίζεται όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης είναι μηδέν



Ανάλυση απόκρισης σφάλματος /1

Η απόκριση του σφάλματος σε κάθε περίπτωση αποτελείται από δύο συνιστώσες: 1) AC με τη συχνότητα του δικτύου 2) DC

rms τιμή ρεύματος

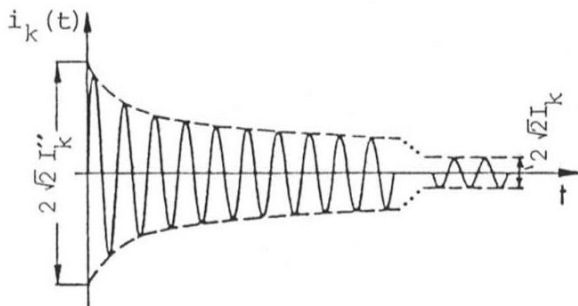
- **Σφάλματα κοντά σε γεννήτρια:** ελαττώνεται από την αρχική τιμή I_k'' στην τελική τιμή I_k . Το μεταβατικό ρεύμα I_k' (μεταξύ I_k'' και I_k) δεν απαιτείται άμεσα κατά τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως
- **Σφάλματα μακριά από τη γεννήτρια:** η επίδραση των τάσεων των πηγών θεωρείται αμελητέα και μπορεί να θεωρηθεί $I_k'' = I_k' = I_k$.



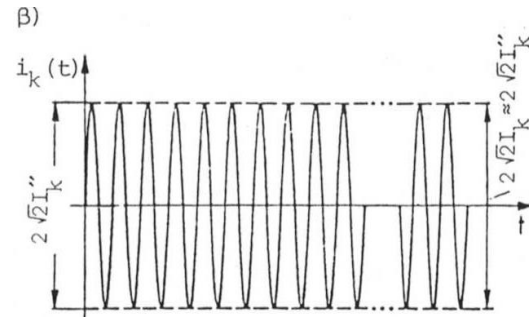
Ανάλυση απόκρισης σφάλματος /2

dc συνιστώσα στο ρεύμα /1

- Αναπτύσσεται όταν τη στιγμή που εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα, η τιμή της τάσεως τροφοδοτήσεως δεν είναι μέγιστη ή ελάχιστη, δηλ $\partial e / \partial t \neq 0$
- **Μέγιστη τιμή:** όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης είναι **μηδέν**. Τότε: $A = \sqrt{2} I_k''$
- **Ελάχιστη τιμή:** όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης είναι **max** ή **min**. Τότε $A = 0$
 - Επίσης, τότε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι συμμετρικό προς τον άξονα t



Βραχυκύκλωμα
'κοντά' σε
γεννήτρια



Βραχυκύκλωμα
'μακριά' από
γεννήτρια



Ανάλυση απόκρισης σφάλματος /3

Σφάλμα 'κοντά σε γεννήτρια' κατά IEC 60909 $I_k < I_k''$ **όταν**

- **Γεννήτριες:** η συμμετοχή τουλάχιστον μιας των γεννητριών στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' είναι μεγαλύτερη του διπλάσιου του ονομαστικού της ρεύματος
- **Σύγχρονοι ή ασύγχρονοι κινητήρες:** η συμβολή τους στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' είναι μεγαλύτερη του 5% του ρεύματος, το οποίο προκύπτει αν δεν ληφθεί υπόψη η επίδραση των κινητήρων

Σφάλμα 'μακριά από γεννήτρια' κατά IEC 909 $I_k = I_k''$ **όταν**

- Όταν το εύρος της ac συνιστώσας της $i_k(t)$ μένει πρακτικά αμετάβλητο. Τα περισσότερα σφάλματα μπορούν να θεωρηθούν με αυτή την έννοια



Βασικοί ορισμοί /1

- **Ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** $i_k(t)$ είναι το ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος στη θέση του σφάλματος
- **Εναλλασσόμενη συνιστώσα:** $i_{k\sim}(t)$ είναι η συνιστώσα του $i_k(t)$ με τη συχνότητα του δικτύου. $I_{k\sim}$ είναι η αντίστοιχη rms τιμή
- **Αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** I_k'' ή υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι η rms τιμή του $i_{k\sim}(t)$ κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος.
- **Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** i_p είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του $i_k(t)$. Το $i_k(t)$ αποκτά τη μέγιστη τιμή του όταν η dc συνιστώσα αποκτά τη μέγιστη τιμή A.
 - Συμβολίζεται με I_D στο IEC 909 και με I_s στο VDE



Βασικοί ορισμοί /2

- **Συμμετρικό ρεύμα διακοπής:** I_b ενός διακόπτη είναι η rms τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως κατά τη στιγμή της διακοπής του πρώτου πόλου του διακόπτη
 - Συμβολίζεται με I_a στο IEC 909
- **Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** I_k είναι η rms τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που παραμένει μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων



Βασικοί ορισμοί /3

- **Αρχική ή υπομεταβατική τάση:** E'' μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι η rms τιμή της ΗΕΔ που επενεργεί κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος
- **Αρχική ή υπομεταβατική αντίδραση:** X_d'' μιας σύγχρονης μηχανής είναι η επαγωγική αντίδραση της μηχανής κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος
 - Καθορίζεται από την U_n και το αρχικό ρεύμα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας υπό ονομαστικό αριθμό στροφών και ονομαστική διέγερση κενής λειτουργίας
 - Λαμβάνεται έτσι υπόψη το μη γραμμικό μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής

$$X_d'' = \frac{X_d''}{Z_n} = X_d'' \frac{S_n}{U_n^2}$$



Βασικοί ορισμοί /4

- **Τάση ισοδύναμης πηγής:** $E_i = cU_n/\sqrt{3}$ είναι η τάση ιδανικής πηγής τάσεως, η οποία εισάγεται ως μόνη πηγή τάσεως του ευθέος συστήματος στο σημείο του σφάλματος.
- **Αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως:** S''_k είναι το μέγεθος $S''_k = \sqrt{3}I''_k U_n$
- **Ισχύς διακοπής:** S_b είναι το μέγεθος $S_b = \sqrt{3}I''_b U_n$

Τα $I''_{k3\phi} U_n$ και $I''_{a3\phi} U_n$ δεν έχουν φυσική υπόσταση της ισχύος, καθώς η τάση και το ρεύμα δεν επενεργούν συγχρόνως.

Ωστόσο, τα S''_k και S''_b χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της αντοχής των στοιχείων του δικτύου στις καταπονήσεις βραχυκυκλώσεως. Οι οποίες είναι μέγιστες κατά το τριπολικό βραχ., γι' αυτό ορίζονται μόνο τότε.



Βασικοί ορισμοί /5

- Συντελεστής c
 - Λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές και χρονικές διακυμάνσεις της τάσης, η επίδραση των ρυθμίσεων τάσης των ΜΣ, η επίδραση της μεταβατικής συμπεριφοράς των γεννητριών και η επίπτωση της παράλειψης των χωρητικών φορτίων και των χωρητικότητων των ΓΜ
 - c_{max} για τον υπολογισμό του max ρεύματος
 - c_{min} για τον υπολογισμό του min ρεύματος

Ονομαστική τάση U_n	c_{max}	c_{min}
Χαμηλή τάση 100 V – 1000 V		
Συστήματα με ανοχή 6%	1,05	0,95
Συστήματα με ανοχή 10%	1,10	0,95
Μέση τάση >1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Υψηλή τάση >35 kV	1,10	1,00



Σύνθετες αντιστάσεις



Εισαγωγή

Ενεργά στοιχεία: στοιχεία που συμβάλλουν στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως

- Σύγχρονη γεννήτρια, σύγχρονος κινητήρας, τροφοδότηση από γειτονικά δίκτυα (πηγή με εσωτερική αντίσταση που εξαρτάται από την ισχύ βραχυκυκλώσεως)

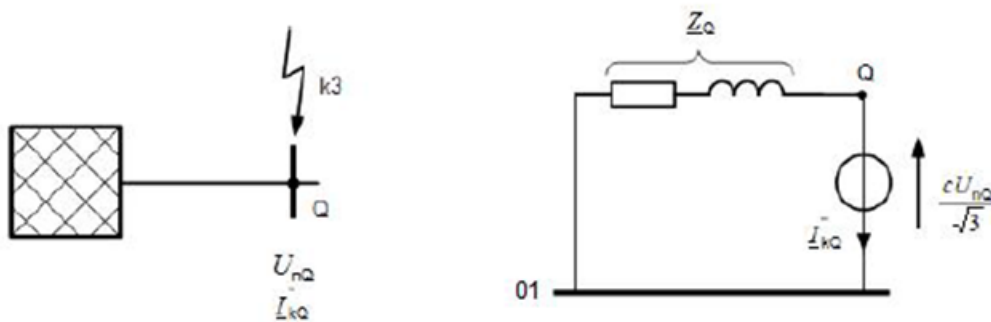
Παθητικά στοιχεία:

- Εναέριες και υπόγειες γραμμές, πηνία περιορισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως
- **Μετασχηματιστές:** θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με μικρότερες αντιδράσεις σκέδασης. Για λόγους περιορισμού της ισχύος βραχυκυκλώσεως προδιαγράφονται με την απαραίτητη σκέδαση της μαγνητικής ροής

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} \left(\frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \right)^2$$



Υποσταθμοί τροφοδοσίας



$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{I_k''} = \frac{cU_n^2}{S_k''}$$

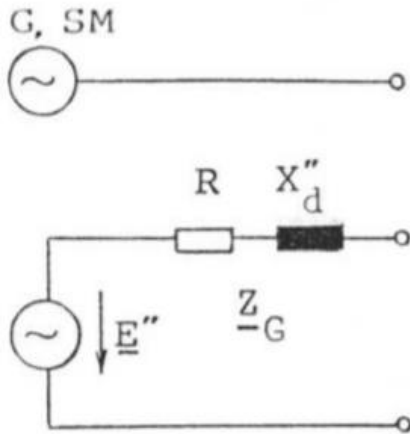
$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R/X)^2}}$$

$$\frac{R_Q}{X_Q} = 0.1$$



Σύγχρονες γεννήτριες /1

- **Γεννήτρια με άμεση σύνδεση στο δίκτυο**
 - χωρίς τη μεσολάβηση μετασχηματιστών, για παράδειγμα σε βιομηχανικά δίκτυα ή σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης



$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_d + jX_d'')$$

$$X_d'' = X_d'' \frac{U_n^2}{S_n} \quad K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$$



Σύγχρονες γεννήτριες /2

■ Γεννήτρια σε σταθμό παραγωγής με OLTC

$$Z_{SK} = K_S \left(t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV} \right)$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}}$$

- Z_{SK} : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση του σταθμού παραγωγής, ανηγμένη στην πλευρά υψηλής τάσης
- $Z_G = R_d + jX''$: η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας (χωρίς το συντελεστή διόρθωσης)
- Z_{THV} : η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή, ανηγμένη στην πλευρά υψηλής τάσης (χωρίς το συντελεστή διόρθωσης)
- U_{nQ} : ονομαστική τάση του συστήματος (πολική τάση) στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο
- U_{rG} : τάση διαστασιολόγησης (rated) της γεννήτριας (πολική τάση)
- x_d'' : ανηγμένη αρχική αντίδραση (p.u.)
- x_T : η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή, θεωρώντας τα τυλίγματα στη βασική θέση λήψης του OLTC
- t_r : λόγος μετασχηματισμού (ονομαστική λήψη)
- c_{\max} : συντελεστής τάσης με βάση τον Πίνακα 3-1
- φ_{rG} : φασική γωνία μεταξύ της τάσεως και της εντάσεως κατά την ονομαστική λειτουργία



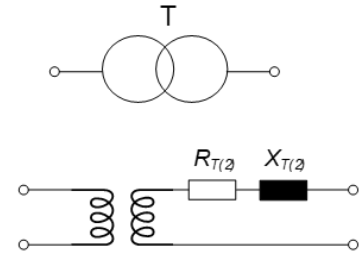
Μετασχηματιστής

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

- U_{rT} : η τάση διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή στην υψηλή ή στην χαμηλή πλευρά
- I_{rT} : το ρεύμα διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή στην υψηλή ή στην χαμηλή πλευρά
- S_{rT} : η φαινόμενη ισχύς διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή
- P_{krT} : οι συνολικές απώλειες στα τυλίγματα του μετασχηματιστή για το ρεύμα διαστασιολόγησης
- u_{kr} : τάση βραχυκύκλωσης (%)



- Για τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως εισάγεται ο παρακάτω όρος διόρθωσης για όλους τους τύπους μετασχηματιστών

$$Z_{TK} = Z_T K_T$$

$$K_T = 0.95 \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_T}$$

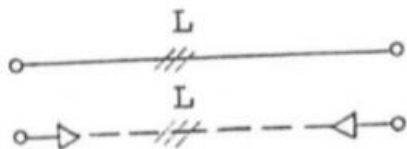
$$x_T = \frac{X_T}{\left(\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \right)}$$

- Δεν αναφέρεται σε μετασχηματιστές ανύψωσης σε σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι αντιμετωπίζονται ως ιδιαίτερη περίπτωση

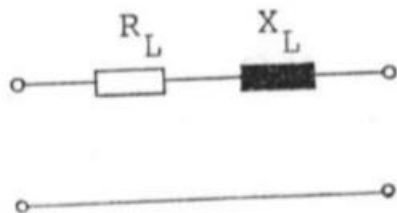


Εναέρια ή υπόγεια γραμμή

- **Μαx ρεύμα βραχ.:** οι αντιστάσεις των ΓΜ λαμβάνονται στους 20°C
- **Μin ρεύμα βραχ.:** οι αντιστάσεις των ΓΜ λαμβάνονται κατά το τέλος του βραχ.
(πχ για δίκτυα ΧΤ στους 80°C)

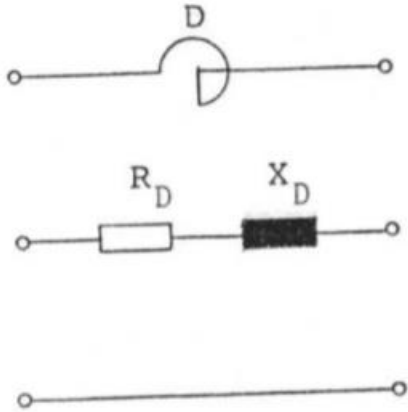


$$Z_{L1} = (R'_{L1} + jX'_{L1}) \cdot \ell$$





Πηνίο περιορισμού ισχύος βραχυκυκλώσεως



$$X_R = u_{kR} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}}$$

όπου:

- u_{kR} : η πτώση τάσης σε pu
- U_n : η ονομαστική τάση του συστήματος (πολική)
- I_{rR} : το ονομαστικό ρεύμα
- $R_R \ll X_R$ και μπορεί να παραληφθεί, διαφορετικά $R_R/X_R = 1$



Ασύγχρονος κινητήρας

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M + X_M)^2}}$$

- U_{rM} : τάση διαστασιολόγησης του κινητήρα
- I_{rM} : ρεύμα διαστασιολόγησης του κινητήρα
- I_{LR}/I_{rM} : λόγος του ρεύματος ακινητοποιημένου δρομέα (locked-rotor) προς το ονομαστικό (rated) ρεύμα του κινητήρα
- S_{rM} : φαινόμενη ισχύς του κινητήρα, η οποία θεωρώντας βαθμός απόδοσης η_{rM} και συντελεστή ισχύος $\cos\varphi_{rM}$ είναι:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cos\varphi_{rM}}$$

$$I_{rM} = \frac{P_{rM}}{\sqrt{3}U_{rM}\eta_{rM} \cos\varphi_{rM}}$$

Εάν ο λόγος R_M/X_M δεν είναι γνωστός, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές:

$$R_M / X_M = 0.1 \quad X_M = 0,995Z_M \quad \text{Κινητήρες ΜΤ Ισχύς/ζεύγος πόλων} > 1 \text{ MW}$$

$$R_M / X_M = 0.15 \quad X_M = 0,989Z_M \quad \text{Κινητήρες ΜΤ Ισχύς/ζεύγος πόλων} \leq 1 \text{ MW}$$

$$R_M / X_M = 0.42 \quad X_M = 0,922Z_M \quad \text{Κινητήρες ΧΤ μαζί με τα καλώδια σύνδεσης}$$



Ανεμογεννήτριες

$$\bar{Z}_G = R_G + jX_G = \left(\frac{R_G}{X_G} + j \right) \cdot \frac{Z_G}{\sqrt{1 + (R_G / X_G)^2}} \quad \Rightarrow \quad Z_G = \frac{1}{I_{LR} / I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} \cdot I_G} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$$

U_{rG} είναι η ονομαστική τάση της γεννήτριας.

I_{rG} είναι το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

S_{rG} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας.

I_{LR} / I_{rG} είναι ο βαθμός του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (εκκινήσεως) προς το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

- Η συνολική σύνθετη αντίσταση **θετικής ακολουθίας** των ασύγχρονων γεννητριών ενός αιολικού σταθμού μαζί με τον μετασχηματιστή που είναι συνδεδεμένες είναι:

$$\bar{Z}_{WA} = t_r^2 \cdot \bar{Z}_G + \bar{Z}_{THV}$$

- Η **αντίστροφη συνιστώσα** δύναται να θεωρηθεί ίση με την ορθή.
- Η **ομοπολική** δίνεται από τον κατασκευαστή και εξαρτάται από τον ΜΣ και την γείωσή του



Σταθμοί παραγωγής με μετατροπείς

- Προσομοιώνονται στο σύστημα **θετικής ακολουθίας** με μία πηγή ρεύματος.
- Τα στοιχεία της **πηγής** εξαρτώνται από τον τύπο του βραχυκυκλώματος και δίνονται **από τον κατασκευαστή**.
 - Η σύνθετη αντίσταση **θετικής ακολουθίας** θεωρείται ότι είναι **άπειρη**.
 - Σε περίπτωση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων η σύνθετη αντίσταση **αρνητικής ακολουθίας** εξαρτάται από την στρατηγική ελέγχου. Η τιμή της, δίνεται από τον κατασκευαστή.
 - Η **σύνθετη ομοπολική αντίσταση** ακολουθίας είναι άπειρη.
- Γενικά, ισχύουν οι ίδιες θεωρήσεις για σταθμούς με μετατροπείς τόσο σε **αιολικά** όσο και σε **φωτοβολταϊκά** πάρκα.
- Κατά τον υπολογισμό του **αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως**, οι σταθμοί με πλήρη μετατροπέα αγνοούνται, εάν η **συνεισφορά τους στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως** δεν είναι **μεγαλύτερη από 5%** χωρίς να υπολογίζονται οι σταθμοί σε αυτό.

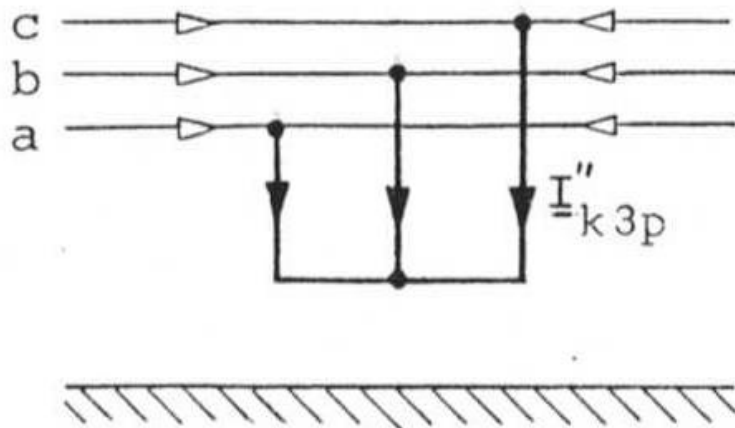


Αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως



Τριπολικό βραχ. χωρίς επαφή γης

- Η ισχύς βραχ. έχει νόημα μόνο γι' αυτή την περίπτωση

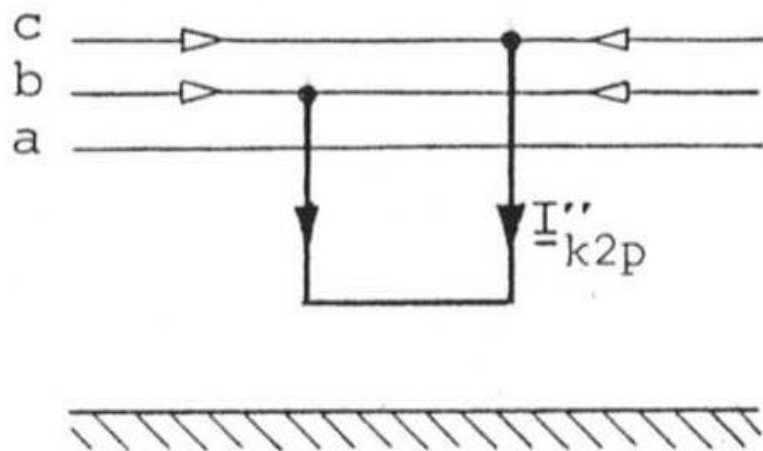


$$I''_k = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

$$I''_{k\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} + \frac{1}{Z_k} \cdot \sum_{j=1}^n Z_{ij} \cdot I_{skPF_j} = I''_{k\max PFO} + I''_{kPF}$$



Διπολικό βραχ. χωρίς επαφή γης

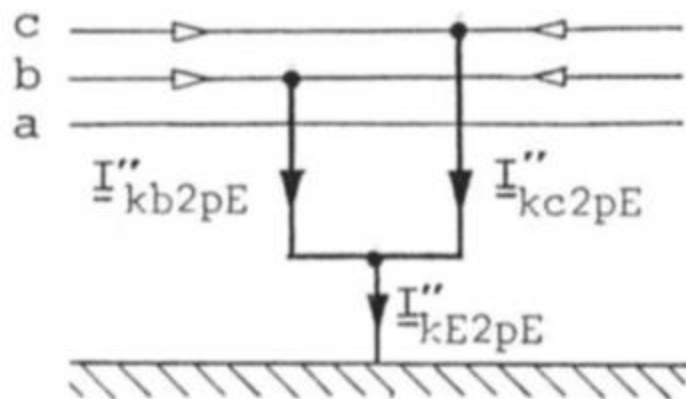


$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$

■ Εάν $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ $I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_k$



Διπολικό βραχ. με επαφή γης



$$I''_{k2EL2} = \left| \frac{\sqrt{3}(\bar{Z}_{(0)} - \bar{a}\bar{Z}_{(2)})}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$

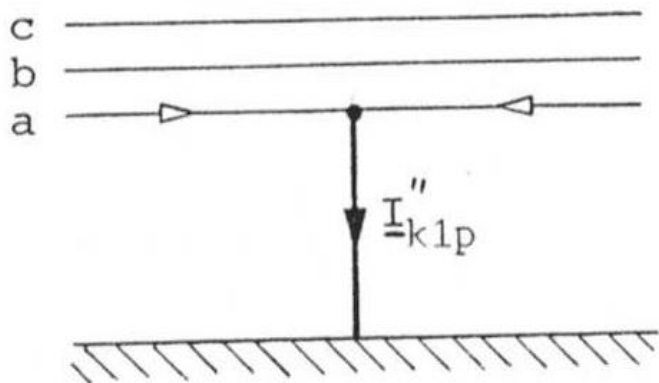
$$I''_{k2EL3} = \left| \frac{\sqrt{3}(\bar{Z}_{(0)} - \bar{a}^2\bar{Z}_{(2)})}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$

- Ρεύμα προς τη γη

$$I''_{kE2E} = \left| \frac{3\bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$



Μονοπολικό βραχ.



$$I''_{k1} = \left| \frac{3}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$



Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως

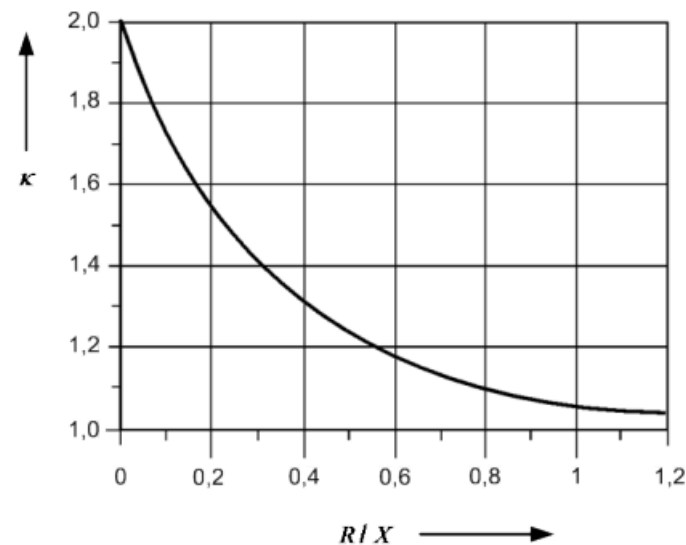


Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_s) / 1

- Είναι η **μέγιστη στιγμιαία τιμή** του ρεύματος βραχυκυκλώσεως
- Για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

- **Προσδιορισμός κ :** R/X της σύνθετης αντίστασης που διαρρέεται από το ρεύμα βραχ.
- **$i_p \max$:** όταν $R/X \ll 1$ και περίπου μία ημιπερίοδο (10 ms) μετά την έναρξη του σφάλματος





Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_s) / 2

- Προσέγγιση: $\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$
- Η παραπάνω προσέγγιση γίνεται εύκολα όταν οι παράλληλοι κλάδοι που διαρρέονται από τα επί μέρους ρεύματα βραχυκυκλώσεως έχουν τον ίδιο λόγο R/X

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k\max PFO} + \sqrt{2} \cdot I''_{kPF}$$

- Εάν οι λόγοι R/X είναι διαφορετικοί τότε:

A. Ο συντελεστής κ υπολογίζεται:

$$\kappa = \kappa_\alpha$$

- κ_α : προκύπτει για το μικρότερο λόγο R/X



Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_s) /3

B. Ο συντελεστής κ υπολογίζεται:

$$\kappa = 1,15\kappa_b$$

- κ_b : προκύπτει από το λόγο $R/X=R_k/X_k$ της συνιστάμενης $Z_k=R_k+jX_k$, όπως φαίνεται από το σημείο του σφάλματος.

Ισχύει:

- Δίκτυα ΧΤ: $1,15\kappa_b \leq 1,8$

- Δίκτυα ΥΤ: $1,15\kappa_b \leq 2,0$

C. Ο συντελεστής κ υπολογίζεται:

$$\kappa = \kappa_c$$



$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f}$$

- $Z_c=R_c+jX_c$: η σύνθ. αντίσταση που φαίνεται από το σημείο του σφάλματος ($f_c=20$ Hz για $f=50$ Hz, $f_c=24$ Hz για $f=60$ Hz).
- $\kappa=2$: για $R=0$. Τυπική τιμή για ΥΤ $\kappa=1,8$. Για ΧΤ $1<\kappa<1,6$



Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης



Μον. ρεύμα βραχ. σύγχρονων μηχανών /1

- Το ρεύμα I_k δεν μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια ακρίβεια όπως το I_k'' καθώς εξαρτάται από:

- Διέγερση γεννητριών
- Μαγνητικό κορεσμό
- Αλλαγή δομή δικτύου με το άνοιγμα των διακοπών

- **Μέγιστο ρεύμα βραχ. (υπό max διέγερση)**

- Ο λ_{\max} προσδιορίζεται από σχήματα συναρτήσεως του x_d , που αντιστοιχεί στον αντίστροφο λόγο βραχυκυκλώσεως
- **Λόγος βραχυκυκλώσεως ($1/x_d$):** ο λόγος του ρεύματος διεγέρσεως κενής λειτουργίας για ονομαστική τάση, προς το απαιτούμενο ρεύμα διεγέρσεως ώστε το μόνιμο ρεύμα τριπολικού βραχ. των ακροδεκτών της γεννήτριας να είναι ίσο με το ονομαστικό ρεύμα

$$I_{k\max} = \lambda_{\max} \cdot I_{rG}$$

- **Ελάχιστο ρεύμα βραχ. (υπό διέγερση κενής λειτουργίας)**

- Ο λ_{\min} προσδιορίζεται από σχήματα συναρτήσεως του x_d

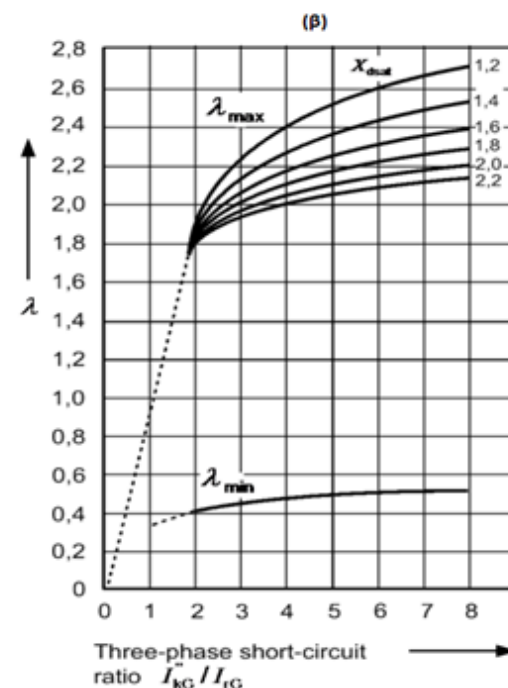
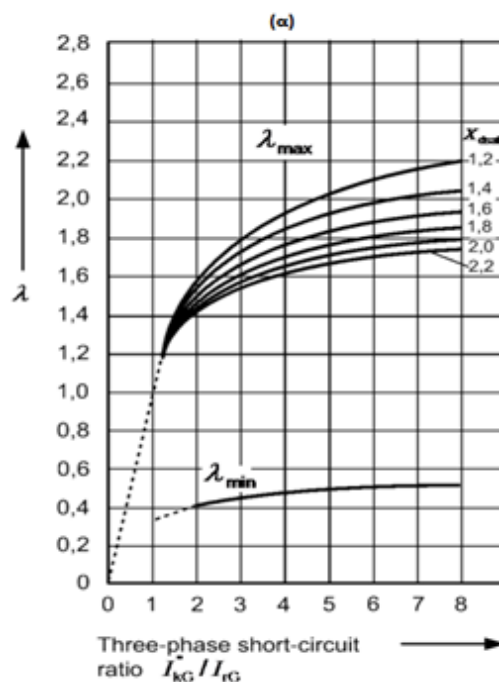
$$I_{k\min} = \lambda_{\min} \cdot I_{rG}$$



Μον. ρεύμα βραχ. σύγχρονων μηχανών /2

■ Στροβιλογεννήτριες

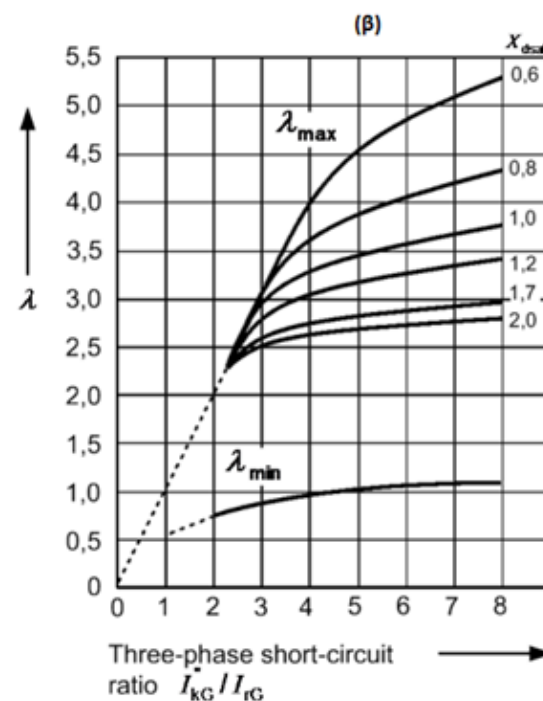
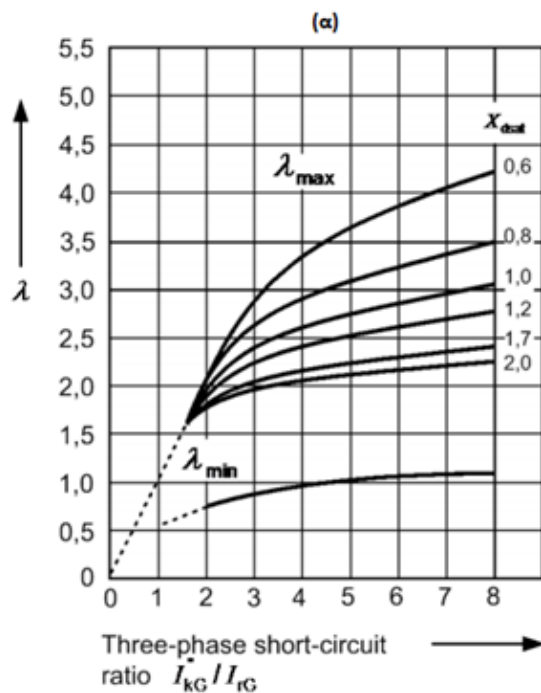
- $E_{\delta\max} = 1,3E_{\delta n}$ (σχήμα αριστερά)
- $E_{\delta\max} = 1,6E_{\delta n}$ (σχήμα δεξιά)





Μον. ρεύμα βραχ. σύγχρονων μηχανών /3

- Εκτύπων πόλων
 - $E_{\delta\max} = 1,6E_{\delta n}$ (σχήμα αριστερά)
 - $E_{\delta\max} = 2,0E_{\delta n}$ (σχήμα δεξιά)





Μον. ρεύμα βραχ. άλλων στοιχείων

- Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως ασύγχρονων μηχανών $I_k = 0$

- Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως δικτύων $I_k = I_k''$

- Συνολικό μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_k = \sum_i I_{k_i} = I_{kS} + I_{kT} + I_{kWF}$

$I_{kS} = \lambda \cdot I_{rGt}$, I_{rGt} είναι το ονομαστικό ρεύμα σύγχρονης γεννήτριας στην πλευρά υψηλής τάσης.

$I_{kT} = I_{kT}''$ για σφάλμα «μακριά» από τις γεννήτριες.



Πηγές - Αναφορές

- Δ. Τσανάκας, *Συμμετρικές συνιστώσες και ανάλυση σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΔΠΘ, Ξάνθη 1990
- Cahier technique no. 158 Calculation of short-circuit currents