

Εξοικονόμηση ενέργειας σε Η/Μ εγκαταστάσεις με βελτίωση του συντελεστή ισχύος

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης
Αιολική Γη Α.Ε.
www.aiolikigi.gr

Εισαγωγή

- Οι εταιρείες παραγωγής και διανομής τροφοδοτούν τους καταναλωτές με ενεργό και άεργο ισχύ για τη λειτουργία των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων.
- Την άεργο ισχύ την απορροφούν κυρίως οι κινητήρες, για τη δημιουργία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία τους.
- Άεργο ισχύ επίσης απορροφούν οι μετασχηματιστές, οι λαμπτήρες φωτισμού με στραγγαλιστικά πηνία για ρύθμιση της τάσης, οι ηλεκτροσυγκολλήσεις.
- Η άεργος ισχύς για να παραχθεί και να μεταφερθεί έως τις καταναλώσεις φορτίζει γεννήτριες σταθμών παραγωγής, γραμμές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές κλπ, με αποτέλεσμα οι εγκαταστάσεις και οι μηχανές να υπερφορτίζονται και να περιορίζεται η ικανότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος.
- Επιπλέον αυξάνονται οι απώλειες μεταφοράς και οι πτώσεις τάσης.

Εισαγωγή

- Οι σημαντικότερες κοινές περιπτώσεις καταναλώσεων έργου ισχύος απαντώνται σε ασύγχρονους κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές διαδικασίες βιομηχανιών και βιοτεχνιών, καθώς επίσης στον εμπορικό και οικιακό τομέα, όπως:
 - οι ανελκυστήρες
 - οι κυλιόμενες κλίμακες
 - τα ηλεκτρικά αντλητικά συστήματα
 - οι ανεμογεννήτριες ορισμένων τεχνολογιών
 - τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς
 - τα κλιματιστικά μηχανήματα
 - τα ψυγεία
 - τα πλυντήρια και στεγνωτήρια ρούχων.

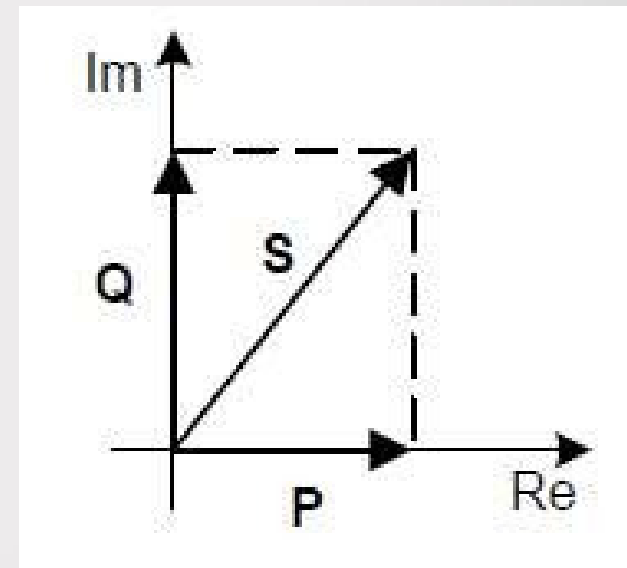
Συντελεστής ισχύος

- Αν P είναι η ενεργός και Q η άεργος κατανάλωση ισχύος σε μία ηλεκτρική εγκατάσταση, τότε ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης ορίζεται ως ο λόγος της κατανάλωσης ενεργού ισχύος προς τη «φαινόμενη» ισχύ του φορτίου, η οποία είναι το γεωμετρικό άθροισμα της ενεργού και της άεργου ισχύος του φορτίου:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \Leftrightarrow \cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\varphi}}$$

όπου η φαινόμενη ισχύς ορίζεται ως $\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$

$$\text{και } \tan\varphi = \frac{Q}{P}$$



Συντελεστής ισχύος

- Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει το βαθμό κατανάλωσης άεργου ισχύος από τα φορτία.
- Ένα «καλό» φορτίο παρουσιάζει τιμές του συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$) κοντά στη μονάδα (π.χ. 0,95 – 0,99) ενώ ένα «κακό» φορτίο παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές του συντελεστή ισχύος.
- Για παράδειγμα, ένα φορτίο ενεργού ισχύος 100kW καταναλώνει 48,4 / 32,8 / 14kVA άεργου ισχύος εάν ο συντελεστής ισχύος του είναι 0,90 / 0,95 / 0,99, αντίστοιχα.
- Στην πράξη, ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται για μέσα χρονικά διαστήματα, με βάση τις καταναλώσεις ενεργού και άεργου ενέργειας στα διαστήματα αυτά.

Συντελεστής ισχύος

Παράδειγμα υπολογισμού μέσου μηνιαίου συντελεστή ισχύος.

- Έστω ότι σε μία εγκατάσταση καταγράφονται για ένα μήνα οι παρακάτω καταναλώσεις ενεργού και άεργου ενέργειας:
άεργος ενέργεια: $A = 136.600 \text{ kVAh}$
ενεργός ενέργεια: $W = 105.000 \text{ kWh}$.
- Ο μέσος μηνιαίος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\tan \varphi = \frac{A}{W} \Leftrightarrow \tan \varphi = 1,301$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + 1,301^2}} \Leftrightarrow \cos \varphi = 0,609$$

Συντελεστής ισχύος

Παράδειγμα υπολογισμού μέσου μηνιαίου συντελεστή ισχύος.

- Στην ίδια με ανωτέρω εγκατάσταση εισάγονται διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος, οπότε οι μηνιαίες καταναλώσεις ενεργού και άεργου ενέργειας καταμετρώνται ως εξής:
άεργος ενέργεια: $A = 50.000 \text{ kVAh}$
ενεργός ενέργεια: $W = 105.000 \text{ kWh}$.
- Ο μέσος μηνιαίος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$\tan \varphi = \frac{A}{W} \Leftrightarrow \tan \varphi = 0,476$$

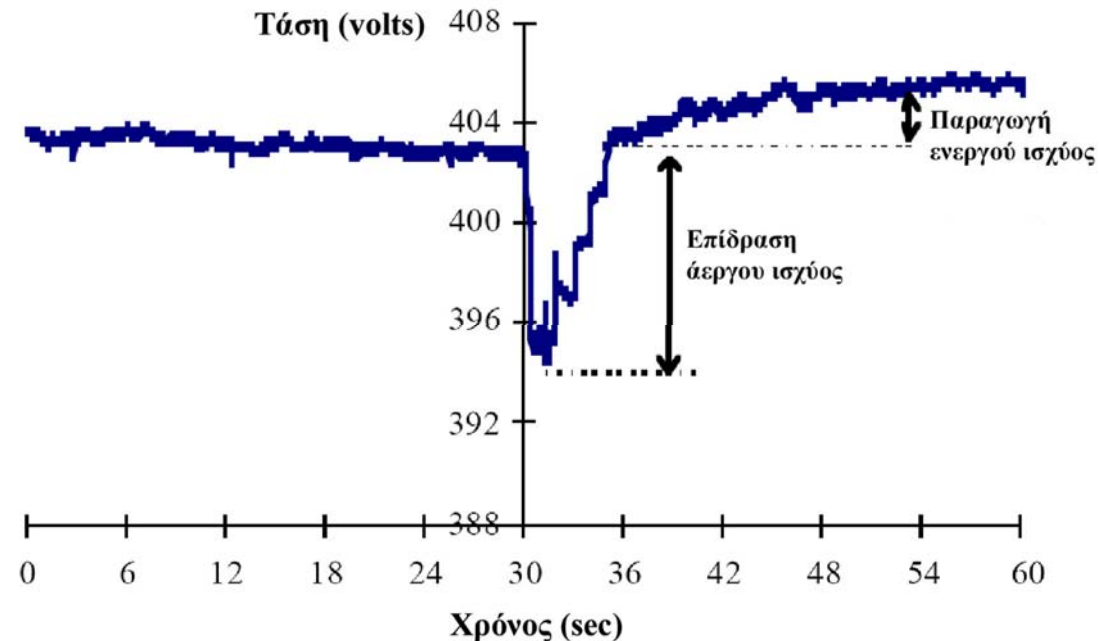
$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + 0,476^2}} \Leftrightarrow \cos \varphi = 0,903$$

Συντελεστής ισχύος

- Από τα ανωτέρω είναι προφανές ότι ο συντελεστής ισχύος μιας εγκατάστασης αυξάνεται τείνοντας προς τη μονάδα, όσο μειώνεται η κατανάλωση έργου ισχύος, σε σχέση με την κατανάλωση ενεργού ισχύος.
- Η αύξηση του συντελεστή ισχύος σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση συνεπάγεται πολλά σημαντικά οφέλη, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.
- Συνεπώς οι διατάξεις βελτίωσης (αύξησης) του συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης αποσκοπούν στη μείωση της κατανάλωσης έργου ισχύος.
- Η έργο ισχύος δεν μεταφέρεται εύκολα, διότι οι προκύπτουσες κατά τη μεταφορά απώλειες δύνανται να συνιστούν υψηλό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης, ενώ προκύπτουν και πρόσθετες απώλειες ενεργού ισχύος.
- Έτσι, η έργο ισχύος θα πρέπει να αντιμετωπίζεται τοπικά, στα σημεία που προκύπτει αύξηση της ζήτησής της.

Συντελεστής ισχύος

- Η ροή άεργου ισχύος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται άμεσα με την τάση των δικτύων αυτών.
- Η απότομη ζήτηση άεργου ισχύος, που εμφανίζεται κατά την εκκίνηση επαγωγικών φορτίων, θα προκαλέσει σημαντική πτώση τάσης στο δίκτυο.
- Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η μείωση στην κατανάλωση άεργου ισχύος και η διόρθωση του συντελεστή ισχύος προϋποθέτει την εισαγωγή συσκευών και διατάξεων υποστήριξης της ονομαστικής τάσης του δικτύου τοπικά.
- Τέτοιες συσκευές είναι οι πυκνωτές.



Οφέλη από τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος

Μείωση των απωλειών ενέργειας

- Η μείωση των απωλειών ενέργειας Δp μιας εγκατάστασης, για σταθερή μεταφερόμενη ενεργό ισχύ, εξαρτάται από το συντελεστή ισχύος αυτής.
- Οι απώλειες ισχύος p_R σε μία ωμική αντίσταση R που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , δίνονται από τη σχέση:

$$p_R = R \cdot I^2$$

- Αν V είναι η τάση στα άκρα της αντίστασης, $\cos\phi$ ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης και P η ενεργός μεταφερόμενη ισχύς διαμέσου της αντίστασης, τότε:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \Leftrightarrow I = \frac{P}{V \cdot \cos\phi}$$

- Τελικά οι απώλειες ισχύος γράφονται: $p_R = R \cdot \left(\frac{P}{V \cdot \cos\phi} \right)^2$

Μείωση των απωλειών ενέργειας

- Οι απώλειες ισχύος σε μία εγκατάσταση στην οποία ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται από $\cos\phi_1$ σε $\cos\phi_2$ θα είναι διαδοχικά:

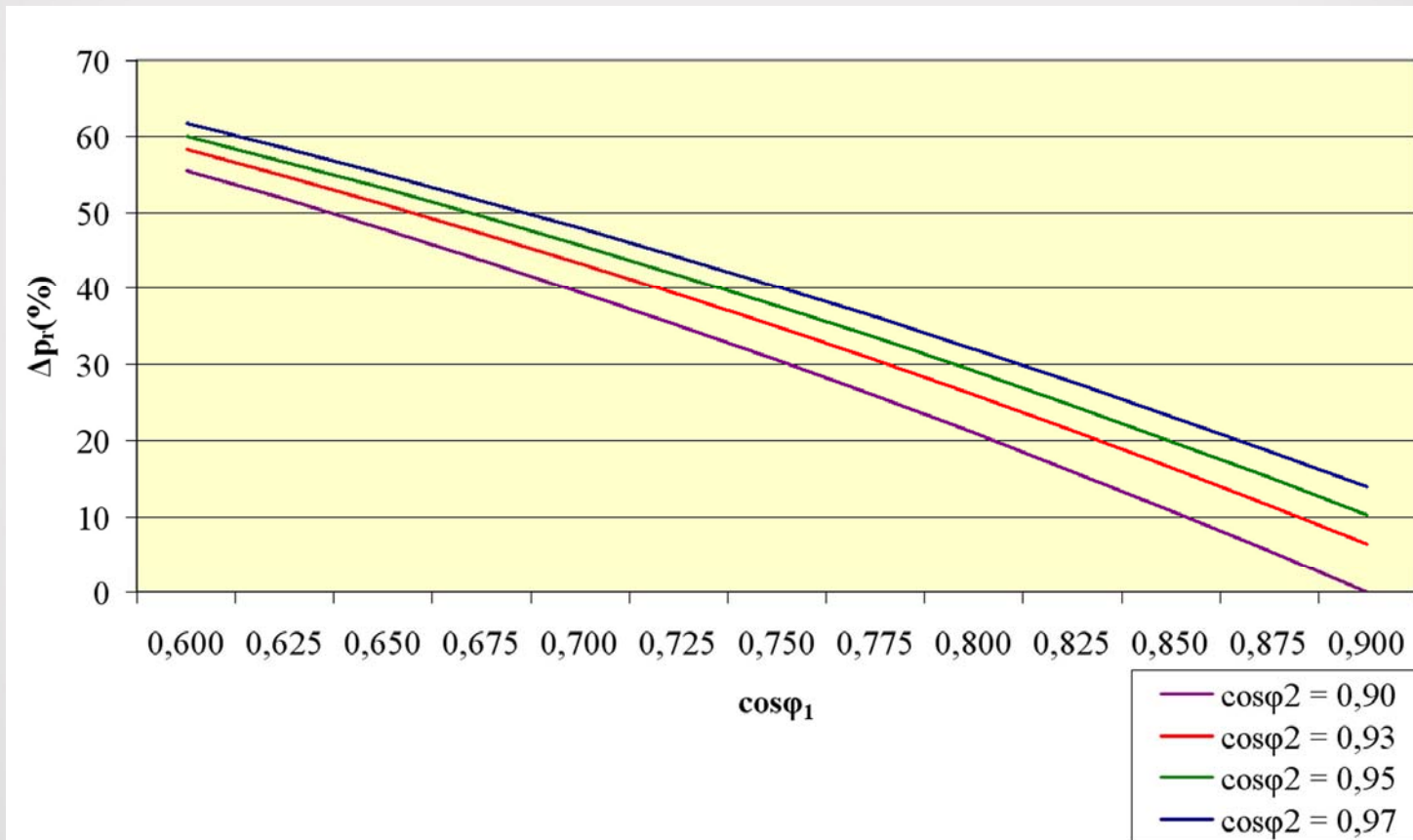
$$p_{R1} = R \cdot \left(\frac{P}{V \cdot \cos\phi_1} \right)^2 \quad p_{R2} = R \cdot \left(\frac{P}{V \cdot \cos\phi_2} \right)^2$$

- Η σχετική μεταβολή των απωλειών μεταφοράς λόγω της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος θα είναι:

$$\Delta p_R = \frac{p_{R1} - p_{R2}}{p_{R1}} \Leftrightarrow \Delta p_R = 1 - \frac{\cos^2\phi_1}{\cos^2\phi_2}$$

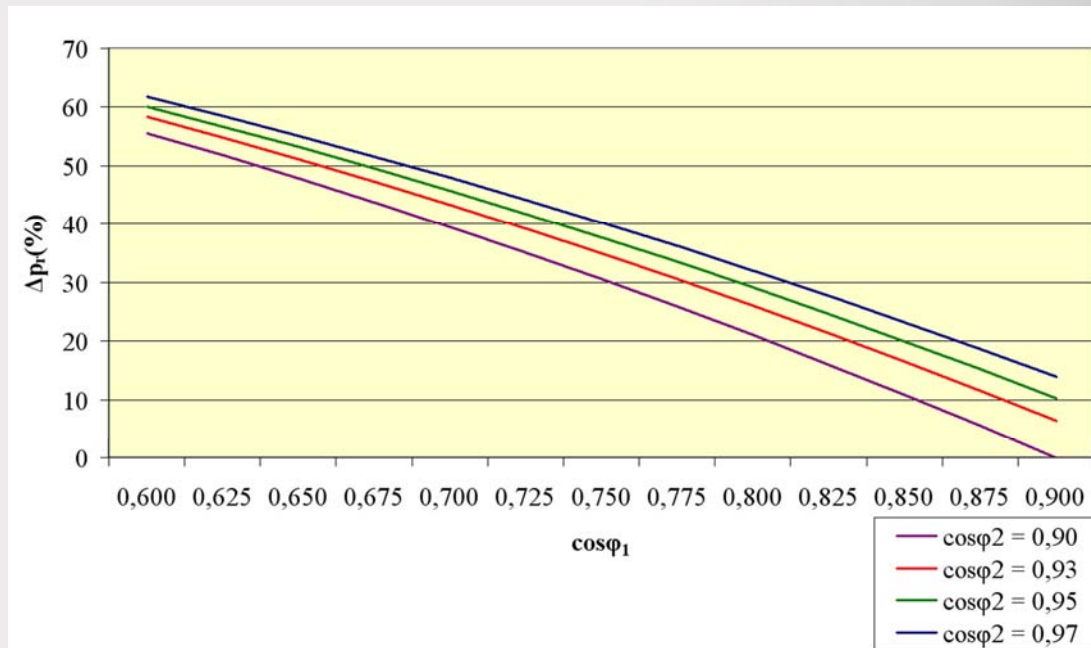
Μείωση των απωλειών ενέργειας

- Η γραφική παράσταση της ανωτέρω σχέσης δίνει το ακόλουθο διάγραμμα



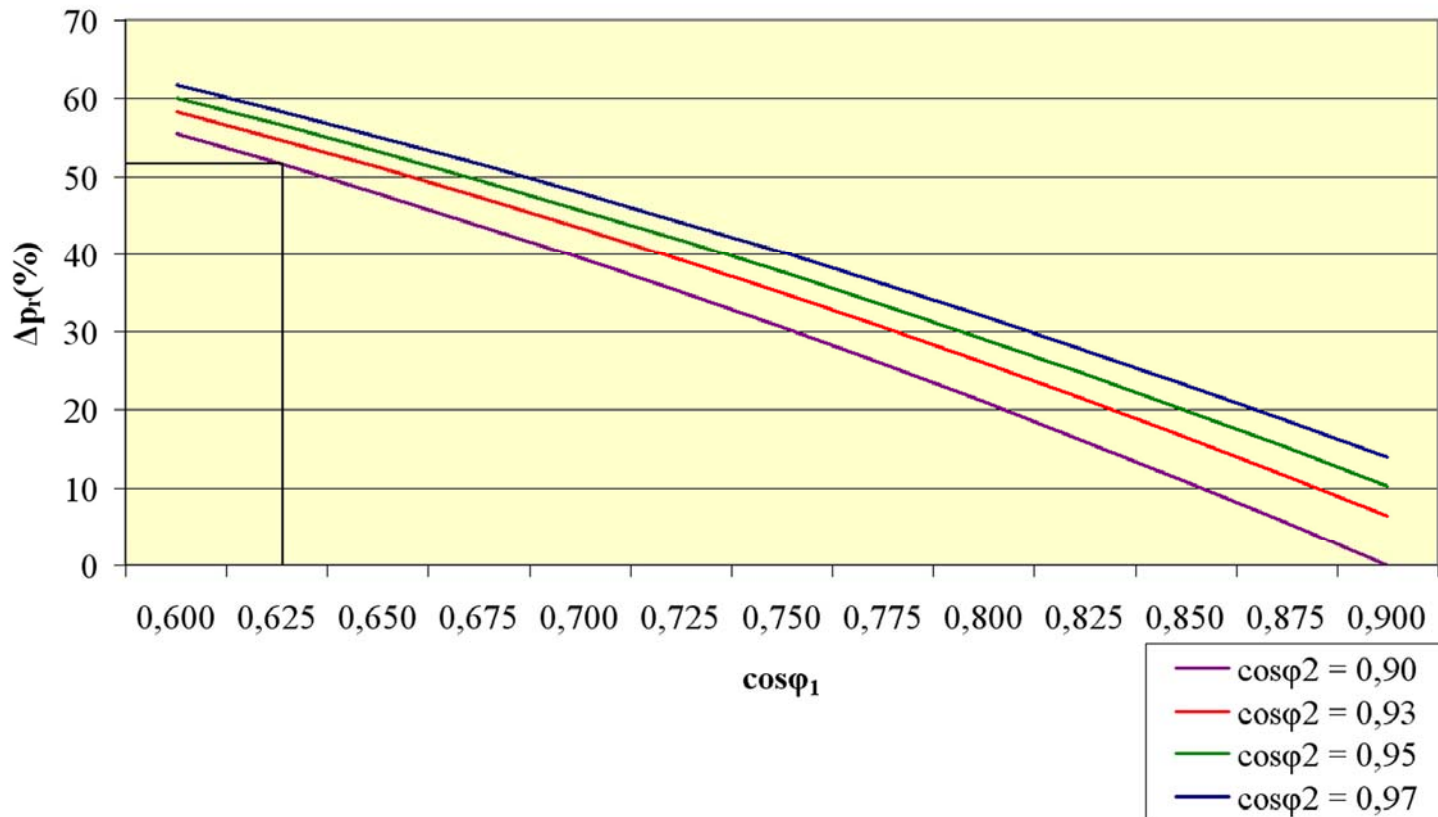
Μείωση των απωλειών ενέργειας

$\cos\phi_1$	$\cos\phi_2$			
	0,90	0,93	0,95	0,97
	$\Delta p_r(\%)$			
0,600	55,56	58,38	60,11	61,74
0,625	51,77	54,84	56,72	58,48
0,650	47,84	51,15	53,19	55,10
0,675	43,75	47,32	49,52	51,58
0,700	39,51	43,35	45,71	47,92
0,725	35,11	39,23	41,76	44,14
0,750	30,56	34,96	37,67	40,22
0,775	25,85	30,56	33,45	36,16
0,800	20,99	26,00	29,09	31,98
0,825	15,97	21,31	24,58	27,66
0,850	10,80	16,46	19,94	23,21
0,875	5,48	11,48	15,17	18,63
0,900	0,00	6,35	10,25	13,91



Μείωση των απωλειών ενέργειας

- Με χρήση του ανωτέρω διαγράμματος (ή πίνακα) μπορούμε για παράδειγμα να δούμε ότι αν ο συντελεστής ισχύος διορθωθεί από 62,5% σε 90%, τότε η μείωση στις απώλειες μεταφοράς ενέργειας θα είναι 51,77%.



Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

- Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης μειώνει την πτώση τάσεως στους μετασχηματιστές και στις γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται εγκατεστημένα πριν το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών.
- Για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης σε μια εγκατάσταση ισχύει η σχέση:

$$\Delta V = Z \cdot I \Leftrightarrow \Delta V = R \cdot I \cdot \cos\varphi + X \cdot I \cdot \sin\varphi$$

όπου:

$$Z = R + j \cdot X$$

R και X η ωμική και επαγωγική αντίστοιχα συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης Z του μετασχηματιστή ή των γραμμών μεταφοράς.

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

Παράδειγμα υπολογισμού πτώσης τάσης σε μετασχηματιστή.

- Έστω μετασχηματιστής με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ονομαστική ισχύς: $S = 630\text{kVA}$
 - τάση βραχυκύκλωσης: $u_k = 4\%$
 - απώλειες στο χαλκό: $P_{cu} = 6.500\text{W}$.
- Τάση βραχυκύκλωσης είναι τάση του πρωτεύοντος για την οποία διέρχεται από αυτό ρεύμα ίσο με το ονομαστικό, όταν το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο. Δίνεται από τη σχέση:

$$u_k = \sqrt{u_x^2 + u_r^2}$$

όπου u_r και u_x η ωμική και επαγωγική πτώση τάσης στο μετασχηματιστή.

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

Παράδειγμα υπολογισμού πτώσης τάσης σε μετασχηματιστή.

- Ωμική πτώση τάσης:

$$u_r = \frac{R \cdot I}{V_{ov.}} = \frac{P_{Cu}}{S} \Leftrightarrow u_r = \frac{6,5}{630} \cdot 100\% \Leftrightarrow u_r = 1,03\%$$

- Επαγωγική πτώση τάσης:

$$u_x = \frac{X \cdot I}{V_{ov.}} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \Leftrightarrow u_x = 3,87\%$$

- Αν ο συντελεστής ισχύος ισούται με $\cos \phi = 0,7$ ($\sin \phi = 0,71$), η πτώση τάσης στο μετασχηματιστή υπολογίζεται:

$$\frac{\Delta V}{V_{ov.}} = \frac{R \cdot I}{V_{ov.}} \cdot \cos \phi + \frac{X \cdot I}{V_{ov.}} \cdot \sin \phi = 3,47\%$$

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

Παράδειγμα υπολογισμού πτώσης τάσης σε μετασχηματιστή.

- Αν υποθέσουμε ότι ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται σε $\cos\phi = 0,95$ ($\sin\phi = 0,31$), τότε η πτώση τάσης στο μετασχηματιστική υπολογίζεται:

$$\frac{\Delta V}{V_{ov.}} = \frac{R \cdot I}{V_{ov.}} \cdot \cos\phi + \frac{X \cdot I}{V_{ov.}} \cdot \sin\phi = 2,18\%$$

δηλαδή προκύπτει μειωμένη κατά 1,29%.

- Αν και η τιμή αυτή μπορεί να φαίνεται μικρή, εντούτοις είναι πολύ σημαντική.
- Πράγματι, αν η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη κατά 1,29%, αυτό σημαίνει ότι για ίδια μεταφερόμενη ισχύ, η ένταση ρεύματος θα πρέπει να αυξηθεί κατά το ίδιο ποσοστό.

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

Παράδειγμα υπολογισμού πτώσης τάσης σε μετασχηματιστή.

- Τότε όμως θα είχαμε αύξηση των ωμικών απωλειών μεταφοράς κατά:

$$\frac{R \cdot I_2^2 - R \cdot I_1^2}{R \cdot I_1^2} = \frac{I_2^2}{I_1^2} - 1 = (1 + \delta I)^2 - 1 = 2,60\%, \quad \text{όπου} \quad \delta I = \frac{I_2 - I_1}{I_1} = 1,29\%$$

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

- Η πτώση τάσης σε καλώδια μεταφοράς δεν είναι τόσο σημαντική λόγω της χαμηλότερης επαγωγικής αντίστασης σε σχέση με τους μετασχηματιστές.
- Ωστόσο η μεταφορά άεργου ισχύος, σε εγκατάσταση με χαμηλό συντελεστή ισχύος, μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτιση των καλωδίων και να προκαλέσει τελικά σημαντική πτώση τάσης σε αυτά, με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς του καλωδίου.
- Αν η διόρθωση του συντελεστή ισχύος γίνει κοντά στους κινητήρες, τότε τα καλώδια αποφορτίζονται από άεργο ισχύ και ελαττώνεται η πτώση τάσης σε αυτά.

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

Μείωση πτώσης τάσης σε καλώδια μεταφοράς ισχύος συναρτήσει του συντελεστή ισχύος και της διατομής του καλωδίου.

Διατομή καλωδίου (mm ²)	Συντελεστής ισχύος εγκατάστασης					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Ικανότητα μεταφοράς ισχύος καλωδίου (kW)					
3 x 10	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0
3 x 16	27,5	33,0	38,5	44,0	49,5	55,0
3 x 25	33,7	40,5	47,2	54,0	60,8	67,5
3 x 35	41,2	49,5	57,8	66,0	74,2	82,5
3 x 50	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0
3 x 70	61,0	73,2	85,4	97,6	110,0	122,0
3 x 95	73,5	88,0	103,0	117,0	132,0	147,0
3 x 120	85,0	102,0	119,0	136,0	153,0	170,0
3 x 150	97,5	117,0	136,0	156,0	175,0	195,0
3 x 185	111,0	133,0	156,0	178,0	200,0	222,0
3 x 240	128,5	154,0	180,0	206,0	232,0	257,0

Μείωση της πτώσης τάσεως της εγκατάστασης

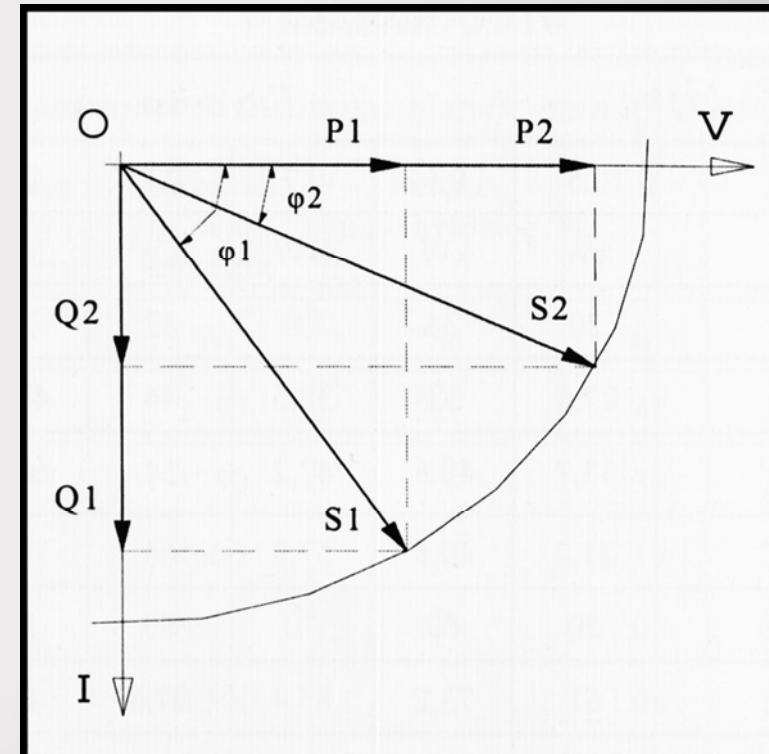
- Γενικά η πτώση τάσης σε καλώδια μεταφοράς συνεπάγεται πάντα αύξηση κατά το ίδιο ποσοστό της έντασης ρεύματος, για σταθερή μεταφερόμενη ισχύ.
- Καθώς οι ωμικές απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της έντασης, η αύξηση της έντασης συνεπάγεται αύξηση των ωμικών απωλειών.

Αύξηση ωμικών απωλειών καλωδίου συναρτήσει του συντελεστή ισχύος.						
Συντελεστής ισχύος	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Ένταση ρεύματος (%)	100	111	125	143	166	200
Ωμικές απώλειες (%)	100	123	156	205	278	400

- Από τον ανωτέρω πίνακα παρατηρούμε:
 - Για μεταβολή του $\cos\phi$ από 1 σε 0,7, οι ωμικές απώλειες διπλασιάζονται.
 - Για μεταβολή του $\cos\phi$ από 1 σε 0,5, οι ωμικές απώλειες τετραπλασιάζονται.

Αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων

- Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μιας ηλεκτρομηχανολογικής εγκατάστασης μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος της, γιατί μειώνει τα φορτία των μετασχηματιστών ισχύος και των καλωδίων μεταφοράς.
- Στο διάγραμμα είναι προφανές μεταξύ των δύο περιπτώσεων λειτουργίας ότι για ίση φαινόμενη ισχύ ($S_1 = S_2$), στη δεύτερη περίπτωση, όπου εμφανίζεται αυξημένος συντελεστής ισχύος ($\phi_2 < \phi_1$), υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος σε σχέση με την πρώτη ($P_2 > P_1$).



Αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων

Αύξηση δυναμικότητας μετασχηματιστή συναρτήσει του συντελεστή ισχύος						
Ισχύς μετασχηματιστή (kVA)	Συντελεστής ισχύος εγκατάστασης					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Ικανότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος μετασχηματιστή (kW)					
160	80	96	112	128	144	160
250	125	150	175	200	225	250
400	200	240	280	320	360	400
500	250	300	350	400	450	500
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1.000	500	600	700	800	900	1.000
1.600	800	960	1.120	1.280	1.440	1.600

Αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων

Παράδειγμα αύξησης δυναμικότητας μετασχηματιστή:

- Έστω μετασχηματιστής με ικανότητα 630kVA που πρέπει να αναλάβει φορτίο 500kW με $\cos\phi = 0,7$.
- Η ικανότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος από το μετασχηματιστή με τον ανωτέρω συντελεστή ισχύος προκύπτει: $630\text{kVA} \times 0,7(\text{kW/kVA}) = 441\text{kW}$.
Συνεπώς ο μετασχηματιστής αυτός δεν επαρκεί στην προκειμένη περίπτωση.
- Για τη μεταφορά της ανωτέρω ισχύος και με το συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος, απαιτείται μετασχηματιστής με ονομαστική ισχύ:
 $500\text{kW} / 0,7(\text{kW/kVA}) = 714,29\text{kVA}$.
- Ανάλογα με την τυποποίηση των διαθέσιμων μηχανημάτων στην αγορά, θα πρέπει να οδηγηθούμε σε εγκατάσταση μετασχηματιστή 800kVA ή 1.000kVA.
- Η αγορά μεγαλύτερου μηχανήματος συνεπάγεται αυξημένο κόστος κτήσης.

Αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων

Παράδειγμα αύξησης δυναμικότητας μετασχηματιστή:

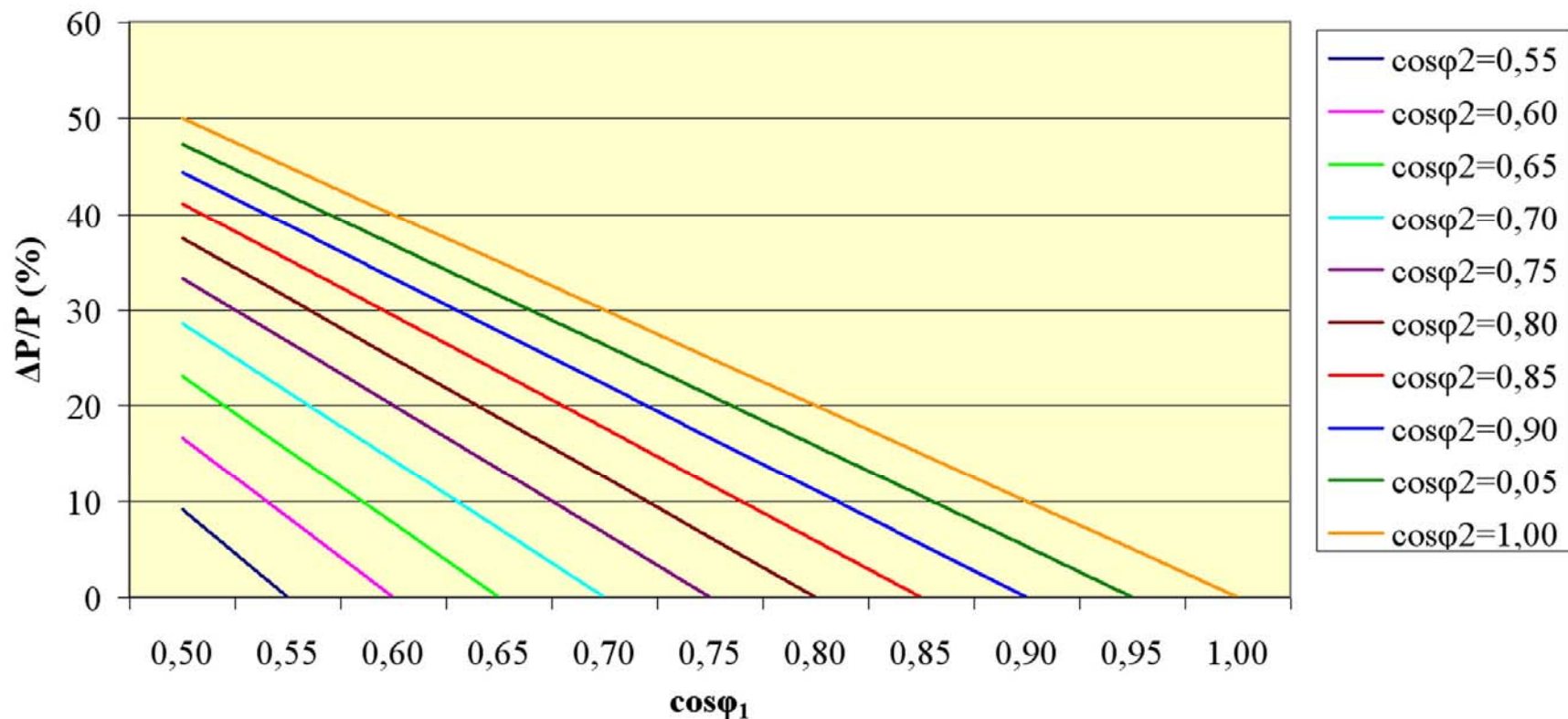
- Αν για τον ίδιο μετασχηματιστή (630kVA) και το ίδιο φορτίο (500kW), είχαμε συντελεστή ισχύος με $\cos\phi = 0,9$, τότε η ικανότητα μεταφοράς του μετασχηματιστή θα ήταν $630\text{kVA} \times 0,9(\text{kW/kVA}) = 567\text{kW}$. Συνεπώς ο μετασχηματιστής αυτός θα επαρκούσε.

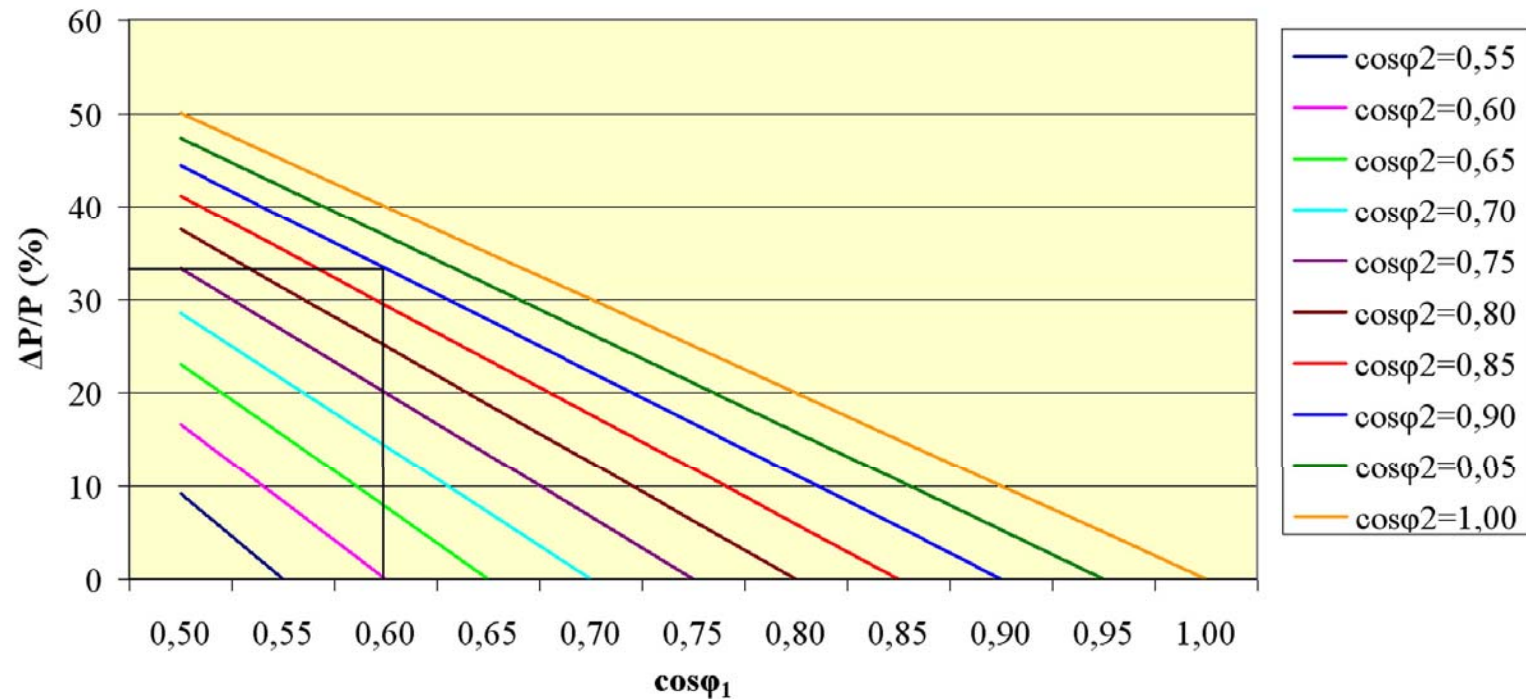
Αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων

- Αν $P_1 = V \cdot I \cdot \cos\phi_1$ και $P_2 = V \cdot I \cdot \cos\phi_2$, η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς σε δύο περιπτώσεις που αλλάζει μόνο ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης, τότε ορίζουμε τη σχετική μεταβολή της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος συναρτήσει της μεταβολής του συντελεστή ισχύος:

$$\frac{\Delta P}{P_2} = \frac{P_2 - P_1}{P_2} = 1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2}$$

- Με βάση την ανωτέρω σχέση, κατασκευάζεται το διάγραμμα της επόμενης διαφάνειας.





[illegible]

Τρόποι διόρθωσης του συντελεστή ισχύος

Τρόποι διόρθωσης συντελεστή ισχύος

- Ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται με την εγκατάσταση πυκνωτών, οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη άεργη ισχύ.
- Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται αφορούν στον τρόπο εγκατάστασης των πυκνωτών και είναι οι εξής:
 - κεντρική αντιστάθμιση
 - ομαδική αντιστάθμιση
 - τοπική αντιστάθμιση.
- Για την επιλογή του τρόπου εγκατάστασης των πυκνωτών απαιτείται λεπτομερής επιθεώρηση και αξιολόγηση της ηλεκτρικής εγκατάστασης (πίνακες, υποπίνακες, κινητήρες, διατομές καλωδίων και αποστάσεις μεταφοράς ενέργειας κλπ).

Τρόποι διόρθωσης συντελεστή ισχύος

Διόρθωση με κεντρική αντιστάθμιση.

- Η συστοιχία πυκνωτών εγκαθίσταται αμέσως μετά το μετασχηματιστή ισχύος, στους ζυγούς χαμηλής τάσης.
- Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χαμηλότερη ισχύ πυκνωτών, συνεπώς είναι η οικονομικότερη σε σχέση με τις άλλες δύο.
- Με τη μέθοδο αυτή μειώνεται η άεργος ισχύς που περνά μέσα από το μετασχηματιστή, συνεχώς μειώνεται η πτώση τάσης και οι απώλειές του, ενώ επιτυγχάνεται αύξηση της δυναμικότητάς του.

Τρόποι διόρθωσης συντελεστή ισχύος

Διόρθωση με ομαδική αντιστάθμιση.

- Με τη μέθοδο αυτή απαιτείται η εγκατάσταση συστοιχιών πυκνωτών στα ανάντη (πριν) κάθε τμήματος της εγκατάστασης.
- Αυτή η μέθοδος είναι σκόπιμη όταν υπάρχουν μεγάλα φορτία που απέχουν από τους ζυγούς χαμηλής τάσης του υποσταθμού.
- Με τη μέθοδο αυτή αποφορτίζονται τα καλώδια μεταφοράς από τους ζυγούς χαμηλής τάσης προς τους υποπίνακες των τμημάτων με συνέπεια να έχουμε μείωση των απωλειών και αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των καλωδίων.
- Επιπλέον απαιτείται η εγκατάσταση και κεντρικής συστοιχίας πυκνωτών, μικρής ισχύος, για την αντιστάθμιση των φορτίων που δεν περιλαμβάνονται στους υποπίνακες για τους οποίους γίνεται η αντιστάθμιση.
- Η απαιτούμενη συνολική χωρητική ισχύς προκύπτει μεγαλύτερη από την περίπτωση της αντιστάθμισης μόνο με κεντρική συστοιχία.

Τρόποι διόρθωσης συντελεστή ισχύος

Διόρθωση με τοπική αντιστάθμιση.

- Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μεγάλων φορτίων που χαρακτηρίζονται από συνεχή, ή έστω μεγάλη, χρονική διάρκεια λειτουργίας.
- Υλοποιείται με την εγκατάσταση πυκνωτών στους ακροδέκτες των μηχανημάτων (π.χ. κινητήρων) διά μέσου διακοπών και ασφαλειών.
- Η απαιτούμενη χωρητική ισχύς είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της κεντρικής αντιστάθμισης, καθώς ουσιαστικά υπολογίζεται επί των φορτίων αιχμής των μηχανημάτων στα οποία εγκαθίσταται.
- Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το κόστος της εγκατάστασης επιβαρύνεται με το κόστος των μέσων απόζευξης και ασφαλείας.
- Για τους ανωτέρω λόγους, η μέθοδος αυτή είναι σκόπιμη τεχνικοοικονομικά, μόνο σε περιπτώσεις μεγάλων καταναλώσεων.

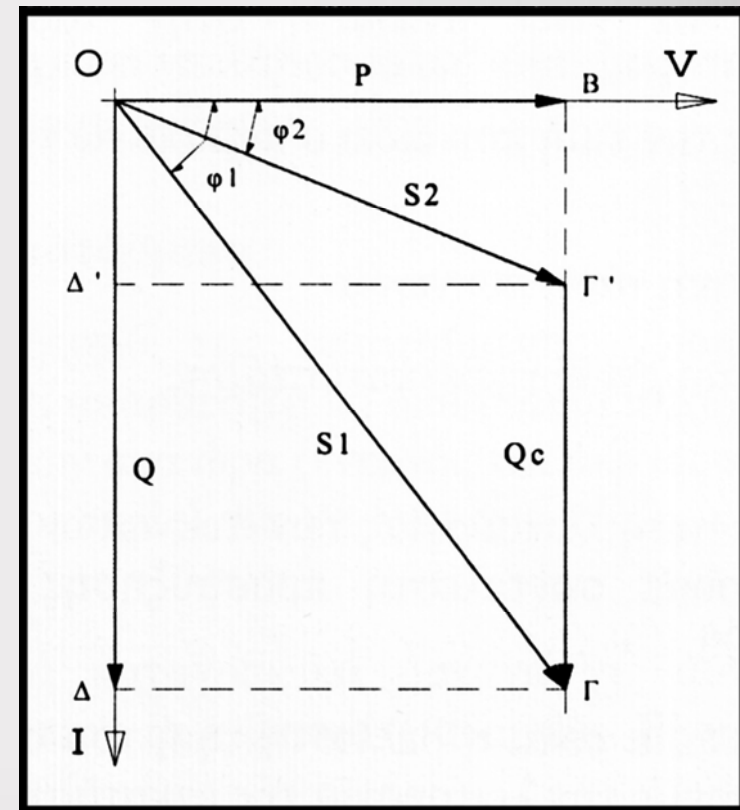
Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

- Έστω P η ενεργός ισχύς που αντιστοιχεί σε φαινόμενη ισχύ S_1 για γωνία ενεργού – άεργου ισχύος ϕ_1 , στην οποία αντιστοιχεί η τιμή της άεργου ισχύος Q .
- Για να επιτύχουμε διόρθωση του συντελεστή ισχύος από $\cos\phi_1$ σε $\cos\phi_2$ θα πρέπει να διατεθεί στην εγκατάσταση από τους πυκνωτές άεργος ισχύς Q_c ίση με:

$$Q_c = P \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \Leftrightarrow$$

$$Q_c = P \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi_1}}{\cos \phi_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi_2}}{\cos \phi_2} \right)$$



Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

- Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης χωρητικότητας, για πυκνωτές συνδεδεμένους σε τρίγωνο ισχύει η σχέση:

$$Q_c = 3 \cdot \left(\frac{V_c}{V} \right)^2 \cdot \omega \cdot C$$

όπου:

V_c η πολική τάση στους πυκνωτές

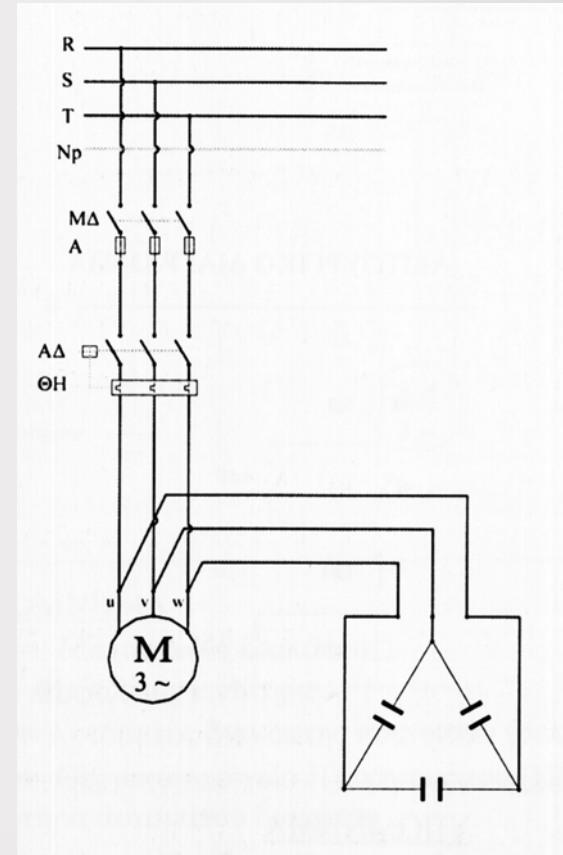
V η ονομαστική τάση του δικτύου

στο σημείο σύνδεσης των πυκνωτών

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, η γωνιακή ταχύτητα του δικτύου

f η ονομαστική συχνότητα του δικτύου

C η συνολική χωρητικότητα των πυκνωτών.



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

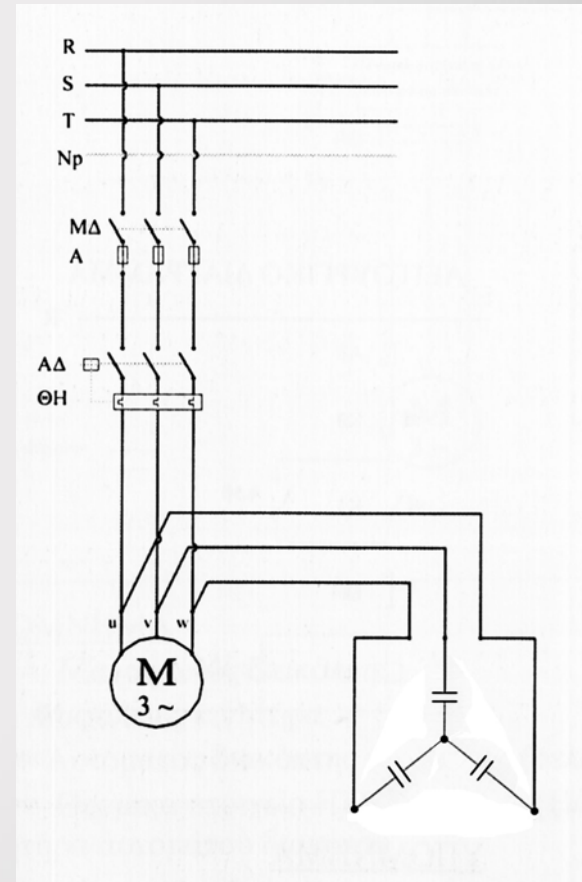
- Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης χωρητικότητας, για πυκνωτές συνδεδεμένους σε αστέρα ισχύει η σχέση:

$$Q_c = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{V_c}{V} \right)^2 \cdot \omega \cdot C$$

- Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις καταλήγουμε στο ότι σε σύνδεση σε αστέρα απαιτείται τριπλάσια χωρητικότητα πυκνωτών:

$$C_{\text{star}} = 3 \cdot C_{\text{delta}}$$

- Για το λόγο αυτό σε διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος, οι πυκνωτές συνδέονται πάντα σε τρίγωνο.



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Παράδειγμα παραμετρικού υπολογισμού:

- Έστω ότι η εγκατάσταση λειτουργεί αρχικά με συντελεστή ισχύος $\cos\phi_1=0,70$ ($\tan\phi_1=1,02$) και καταναλώνει ενεργό ισχύ P .
- Εφαρμόζοντας την ανωτέρω σχέση υπολογίζουμε την απαιτούμενη ισχύ των πυκνωτών για διάφορους συντελεστές ισχύος μετά τη διόρθωση.

$\cos\phi_2$	0,85	0,90	0,95	1,00
$\tan\phi_2$	0,62	0,48	0,33	0,00
Q_c	$0,40 \cdot P$	$0,54 \cdot P$	$0,69 \cdot P$	$1,02 \cdot P$

- Παρατηρείται ότι η διόρθωση του συντελεστή ισχύος από 0,90 σε 1,00 απαιτεί περίπου διπλασιασμό της ισχύος των πυκνωτών, οδηγώντας σε δυσανάλογα υψηλό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Για το λόγο αυτό ο συντελεστής ισχύος επιλέγεται συνήθως να διορθώνεται σε τιμές της τάξης του 0,90.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

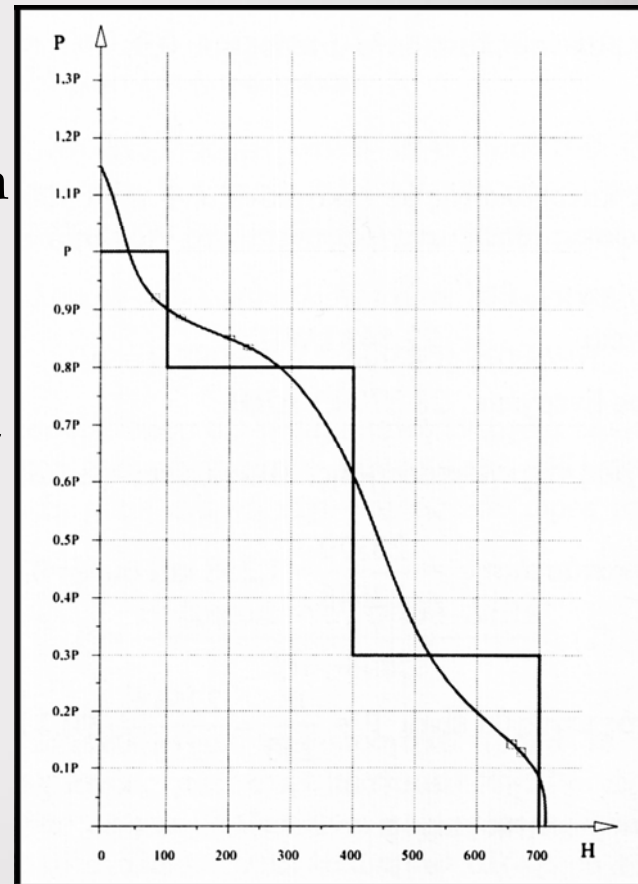
Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε κεντρική αντιστάθμιση:

- Απαραίτητο στοιχείο για τον ορθό υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος των πυκνωτών σε κεντρική αντιστάθμιση είναι η ισχύς του συστήματος στην οποία θα εφαρμοστεί η αντιστάθμιση.
- Η ισχύς αυτή συνήθως λαμβάνεται από την καμπύλη διαρκείας της κατανάλωσης.
- Αν δεν υπάρχουν στοιχεία κατανάλωσης ικανά για την εξαγωγή της καμπύλης διαρκείας, τότε θα πρέπει να γίνει σχετική εκτίμηση και βηματική προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης.
- Η ισχύς τελικά της εγκατάστασης προκύπτει ως το πηλίκο της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, γνωστή από τις μετρήσεις της εταιρείας παροχής, προς τις ώρες λειτουργίας που προκύπτουν από την καμπύλη διαρκείας.

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος πυκνωτών σε κεντρική αντιστάθμιση:

- Η ετήσια καμπύλη διαρκείας της κατανάλωσης προσεγγίζεται με τρία βήματα:
 - βήμα 1^ο: λειτουργία σε ονομαστική ισχύ P για 100h
 - βήμα 2^ο: λειτουργία σε 80% του P για 300h
 - βήμα 3^ο: λειτουργία σε 30% του P για 300h
- Αν η ετήσια κατανάλωση ενεργού ενέργειας είναι W , τότε $W = P \cdot 100h + 0,8P \cdot 300h + 0,3P \cdot 300h \Leftrightarrow W = P \cdot 430h \Leftrightarrow P = W/430h$.
- Αν η ετήσια κατανάλωση ενέργειας καταγράφεται ίση με $W = 105.000kWh$, τότε $P = 244,19kW$.



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

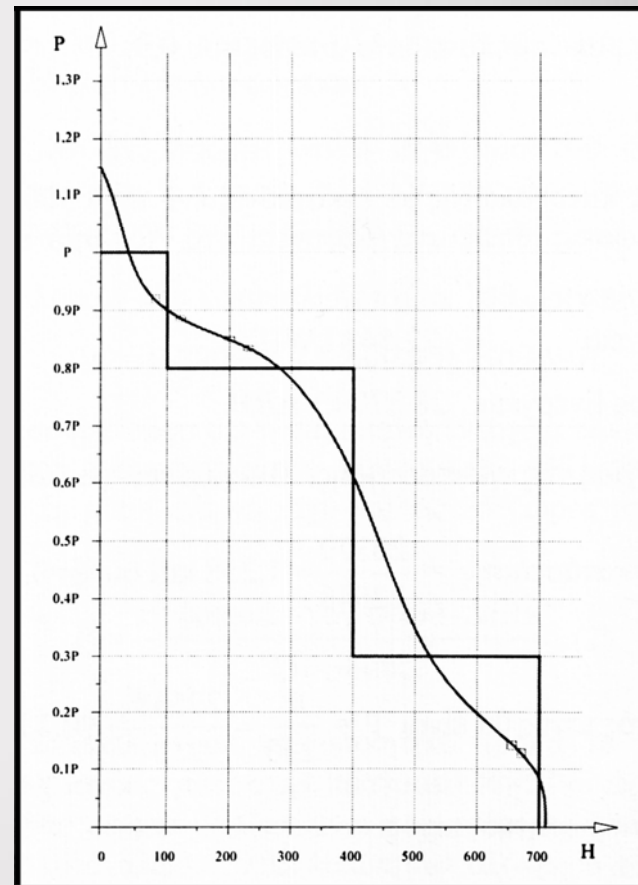
Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος πυκνωτών σε κεντρική αντιστάθμιση:

- Αν ο συντελεστής ισχύος πριν την αντιστάθμιση υπολογίζεται $\cos\phi_1 = 0,609$ ($\tan\phi_1 = 1,302$), ενώ επιδιώκεται η διόρθωσή του σε $\cos\phi_2 = 0,900$ ($\tan\phi_2 = 0,484$), τότε η ισχύς πυκνωτών θα είναι:

$$Q_c = P \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \Leftrightarrow$$

$$Q_c = 244,19 \cdot (1,302 - 0,484) \Leftrightarrow Q_c = 199,75 \text{ kVAR}$$
- Αν $V_c = 400 \text{ V}$ η πολική τάση στους πυκνωτές και $V = 380 \text{ V}$ η τάση του δικτύου, τότε $(V_c/V)^2 = 1,108$.
- Η χωρητική ισχύς πυκνωτών διορθώνεται στην τιμή:

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{V_c}{V} \right)^2 = 221,32 \text{ kVAR}$$



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η καταγραφή στοιχείων κατανάλωσης από κάθε υποπίνακα στον οποίο θα εφαρμοστεί η ομαδική αντιστάθμιση.
- Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να εγκατασταθούν ειδικά μηχανήματα που ονομάζονται αναλυτές δικτύου.



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η μέτρηση των χαρακτηριστικών κατανάλωσης από το μέρος της εγκατάστασης που θέλουμε να εφαρμόσουμε ομαδική αντιστάθμιση, τότε μπορούμε να εργαστούμε εμπειρικά, ως εξής:
 - Εντοπίζουμε τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του υποπίνακα (πλήθος και ισχύς μηχανημάτων, απόσταση από τους ζυγούς χαμηλής τάσης, διατομές καλωδίων).
 - Καταγράφονται τα χαρακτηριστικά των μηχανημάτων από τις πινακίδες τους (ισχύς, αριθμός στροφών, $\cos\phi$, ρεύμα λειτουργίας).
 - Για τα υπόλοιπα τμήματα της εγκατάστασης, πλην του μέρους που εφαρμόζεται ομαδική αντιστάθμιση, θα εφαρμοστεί κεντρική αντιστάθμιση, μειωμένης όμως ισχύος.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Η μέση κατανάλωση ισχύος από το τμήμα της εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$P = \kappa \cdot \sum \frac{P_i \cdot \mu_i}{\eta_i}$$

όπου:

κ : συντελεστής ταυτοχρονισμού λειτουργίας των μηχανημάτων

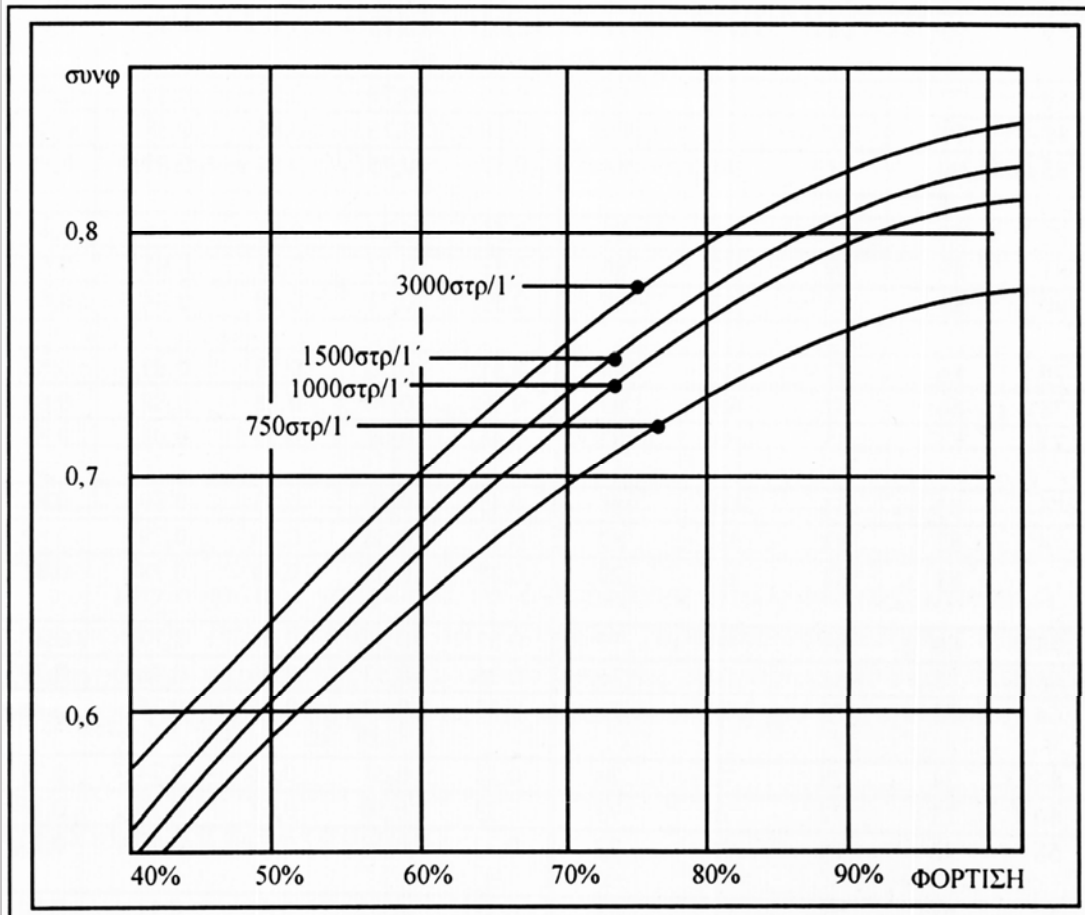
P_i : η ονομαστική ισχύς που αναφέρεται στην πινακίδα κάθε μηχανήματος του τμήματος της εγκατάστασης

μ_i : συντελεστής φόρτισης κάθε μηχανήματος του τμήματος της εγκατάστασης

η_i : βαθμός απόδοσης κάθε μηχανήματος του τμήματος της εγκατάστασης.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:



2 5%	50%	75%	100%	125%	25%	50%	75%	100%	125%
Απόδοση (η) σε %					Συντελεστής ισχύος (συνφ)				
91	95	96	95	94	0,62	0,80	0,89	0,92	0,92
90	94	95	94	93	0,61	0,79	0,88	0,91	0,91
89	93	94	93	91	0,60	0,78	0,87	0,90	0,90
88	92	93	92	90	0,59	0,77	0,86	0,89	0,90
85	91	92	91	89	0,58	0,76	0,85	0,88	0,89
83	90	91	90	88	0,57	0,75	0,84	0,87	0,88
82	89	90	89	87	0,56	0,74	0,83	0,86	0,87
81	88	89	88	86	0,53	0,72	0,81	0,85	0,86
80	87	88	87	85	0,52	0,71	0,80	0,84	0,85
79	86	87	86	84	0,51	0,70	0,79	0,83	0,84
78	86	87	85	83	0,50	0,70	0,78	0,82	0,83
77	84	85	84	82	0,48	0,67	0,76	0,81	0,83
76	83	84	83	81	0,45	0,59	0,73	0,80	0,82
74	82	83	82	80	0,39	0,56	0,70	0,79	0,82
72	81	82	81	79	0,38	0,55	0,69	0,78	0,81
70	80	81	80	77	0,37	0,54	0,68	0,77	0,80
68	78	81	79	76	0,36	0,53	0,66	0,76	0,79
64	75	79	78	75	0,35	0,52	0,65	0,75	0,78
62	74	78	77	74	0,34	0,51	0,64	0,74	0,77
60	73	77	76	73	0,33	0,50	0,63	0,73	0,76
58	72	76	75	72	0,32	0,48	0,62	0,72	0,75
57	71	75	74	71	0,31	0,47	0,61	0,71	0,74
56	70	74	73	70	0,31	0,47	0,60	0,70	0,73
55	69	73	72	69	0,30	0,46	0,59	0,69	0,72
54	68	72	71	68	0,30	0,46	0,58	0,68	0,71
53	67	71	70	67	0,29	0,45	0,57	0,67	0,70
52	66	70	69	66	0,29	0,45	0,56	0,66	0,69
52	65	69	68	65	0,28	0,44	0,55	0,65	0,68
51	64	68	67	64	0,28	0,44	0,54	0,64	0,67
51	64	67	66	63	0,27	0,43	0,53	0,63	0,66

Διάγραμμα και πίνακας μεταβολής
συντελεστή ισχύος και βαθμού
απόδοσης ασύγχρονων κινητήρων
συναρτήσει της φόρτισης και των
στροφών.

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Χαρακτηριστικά στοιχεία ασύγχρονων κινητήρων.

ΔΙΠΟΛΙΚΟΙ			3.000 στρ./l' ~50Hz			
Ισχύς		Στην ονομαστική ισχύ			Υ/Δ	
PS	kW	Στρ/1'	Βαθμ. απόδοσης %	Παράγ. Ισχύος συνφ	Ρεύμα (380V) A	Ρεύμα $\frac{I_{ex}}{I_{ov}}$
1/4	0,18	2720	60	0,69	0,66	-
1/3	0,25	2740	65	0,76	0,77	-
1/2	0,37	2740	67	0,80	1,05	-
3/4	0,55	2760	71	0,81	1,46	-
1	0,75	2780	76	0,82	1,8	-
1,5	1,1	2790	78	0,85	2,5	-
2	1,5	2830	78	0,86	3,4	2,2
3	2,2	2860	80	0,88	4,8	2,2
4	3	2870	82	0,88	6,4	2,0
5	3,7	2900	83	0,86	7,9	2,4
5,5	4	2880	85	0,87	8,2	2,3
6	4,5	2860	81	0,89	9,5	2,0
7,5	5,5	2910	84	0,88	11,4	1,9
10	7,5	2910	86	0,88	15	2,1
12,5	9	2920	88	0,88	17,5	2,3
15	11	2920	86	0,88	21,8	2,0
20	15	2925	87	0,88	29,4	2,1
25	18,5	2925	88	0,88	36,4	2,1
30	22	2930	89	0,89	43	2,1
35	26	2930	90	0,89	50	2,1
40	30	2940	90	0,89	58	2,1
50	37	2940	91	0,89	70	2,2
60	45	2955	90	0,89	86	2,0
75	55	2965	91	0,89	105	2,0
100	75	2970	91,5	0,89	140	2,0
125	90	2970	92	0,89	167	2,0
150	110	2980	92	0,90	203	2,1
180	132	2980	92,5	0,90	242	2,1
220	160	2980	93,5	0,90	292	2,1
270	200	2980	93,5	0,90	364	2,1

ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΟΙ				1.500 στρ./l' ~50Hz		
Ισχύς		Στην ονομαστική ισχύ			Υ/Δ	
PS	KW	Στρ/1'	Βαθμ. απόδοσης %	Παράγ. Ισχύος συνφ	Ρεύμα (380V) A	Ρεύμα $\frac{I_{ex}}{I_{ov}}$
1/6	0,12	1330	56	0,71	0,46	-
1/4	0,18	1340	60	0,72	0,64	-
1/3	0,25	1350	63	0,74	0,82	-
1/2	0,37	1360	66	0,74	1,15	-
3/4	0,55	1380	72	0,78	1,5	-
1	0,75	1390	74	0,78	2,0	-
1,5	1,1	1410	77	0,80	2,7	-
2	1,5	1410	77	0,80	3,7	1,8
3	2,2	1410	80	0,82	5,1	1,9
4	3	1410	81	0,82	6,9	1,9
5	3,7	1440	85	0,80	8,3	2,2
5,5	4	1430	86	0,82	8,6	2,1
6	4,5	1415	84	0,83	9,8	2,0
7,5	5,5	1450	85	0,84	11,7	2,1
10	7,5	1450	87	0,85	15,5	2,2
12,5	9	1450	86	0,85	19	2,0
15	11	1455	87	0,85	23	2,2
20	15	1455	88	0,85	31	2,0
25	18,5	1460	89,5	0,85	37	1,9
30	22	1460	90	0,85	44	1,9
35	26	1465	89,5	0,86	52	2,0
40	30	1470	91,5	0,87	57	2,2
50	37	1470	91,5	0,86	72	1,9
60	45	1470	92	0,87	86	1,9
75	55	1475	92	0,87	106	1,9
100	75	1480	92,5	0,87	142	1,9
125	90	1480	93	0,87	170	1,9
150	110	1485	93,5	0,87	206	1,9
180	132	1485	93,5	0,87	247	1,9
220	160	1485	94	0,88	296	2,0
270	200	1485	94,5	0,88	370	2,0
340	250	1485	95	0,89	450	2,1
430	315	1485	95	0,89	566	2,1

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Χαρακτηριστικά στοιχεία ασύγχρονων κινητήρων.

ΕΞΑΠΟΛΙΚΟΙ		1.000 στρ./l' ~50Hz				
PS	KW	Στην ονομαστική ισχύ			Υ/Δ	
		Στρ/1'	Βαθμ. απόδοσης %	Παράγ. Ισχύος συνφ	Ρεύμα (380V) Α	Ρεύμα $\frac{I_{ex}}{I_{ov}}$
1/4	0,18	890	60	0,70	0,65	-
1/3	0,25	890	62	0,71	0,86	-
1/2	0,37	900	66	0,71	1,2	-
3/4	0,55	910	69	0,72	1,7	-
1	0,75	920	70	0,72	2,3	-
1,5	1,1	925	73	0,72	3,2	-
2	1,5	935	78	0,73	4	1,6
3	2,2	935	79	0,74	5,7	1,6
4	3	950	79	0,77	7,5	1,9
5	3,7	960	83	0,77	8,8	2,0
5,5	4	950	81	0,79	9,5	1,9
6	4,5	940	80	0,82	10,5	1,7
7,5	5,5	950	82	0,79	13	1,9
10	7,5	960	84	0,79	17	1,8
12,5	9	960	85	0,79	20	1,8
15	11	965	86	0,80	24,5	1,8
20	15	970	89	0,82	31,5	1,7
25	18,5	975	90	0,82	38,5	1,7
30	22	975	90	0,82	46	1,7
35	26	980	91	0,83	54	1,7
40	30	980	91	0,84	61	1,8
50	37	980	92	0,85	73	1,8
60	45	985	92	0,86	87	1,9
75	55	985	92,5	0,86	105	1,9
100	75	985	93	0,86	144	1,9
125	90	985	93	0,86	172	1,9
150	110	990	93,5	0,86	210	1,9
180	132	990	94	0,86	250	1,9
220	160	990	94,5	0,86	305	1,9
270	200	990	95	0,87	368	1,9
340	250	990	95	0,87	460	1,9

ΟΚΤΑΠΟΛΙΚΟΙ		750 στρ./l' ~50Hz				
PS	kW	Στην ονομαστική ισχύ			Υ/Δ	
		Στρ/1'	Βαθμ. απόδοσης %	Παράγ. Ισχύος συνφ	Ρεύμα (380V) Α	Ρεύμα $\frac{I_{ex}}{I_{ov}}$
1/8	0,09	670	49	0,55	0,50	-
1/6	0,12	670	50	0,56	0,65	-
1/4	0,18	680	55	0,58	0,86	-
1/3	0,25	680	56	0,60	1,13	-
1/2	0,37	680	61	0,69	1,35	-
3/4	0,55	680	65	0,70	1,85	-
1	0,75	680	68	0,70	2,4	-
1,5	1,1	680	72	0,70	3,3	-
2	1,5	690	74	0,72	4,3	1,3
3	2,2	705	77	0,73	5,8	1,6
4	3	705	78	0,74	7,9	1,7
5	3,7	715	79	0,74	9,8	1,9
5,5	4	710	81	0,75	10,2	1,8
6	4,5	700	78	0,76	11,7	1,6
7,5	5,5	715	82	0,76	13,5	1,8
10	7,5	715	83	0,77	17,8	1,8
12,5	9	720	86	0,79	20,5	1,5
15	11	720	87	0,79	24,5	1,5
20	15	720	88	0,81	32	1,5
25	18,5	725	89	0,81	39	1,5
30	22	725	89,5	0,81	46	1,5
35	26	730	90	0,81	55	1,6
40	30	730	90,5	0,81	62	1,6
50	37	735	91	0,82	75	1,6
60	45	735	91,5	0,82	91	1,6
75	55	740	92	0,83	110	1,6
100	75	740	92,5	0,83	150	1,6
125	90	740	93	0,84	175	1,7
150	110	740	93,5	0,84	214	1,7
180	132	740	94	0,84	260	1,7
220	160	740	94,5	0,85	303	1,7
270	200	740	94,5	0,85	378	1,7

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Έστω τμήμα εγκατάστασης στο οποίο από τις καταγραφές στοιχείων και με μετρήσεις, προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας για τους κινητήρες του τμήματος.

Πλήθος κινητήρων n	Ισχύς κινητήρων (kW)	Συντελεστής φόρτισης μ	Συντελεστής ισχύος $\cos\phi$	Βαθμός απόδοσης η	$n \cdot (P \cdot \mu) / \eta$	$\cos\phi \cdot n \cdot (P \cdot \mu) / \eta$
5	3,7	0,60	0,68	0,84	13,21	8,99
2	5,5	0,75	0,78	0,87	9,48	7,40
2	7,5	0,60	0,66	0,81	11,11	7,33
2	9,0	0,65	0,73	0,84	13,93	10,17
1	15,0	0,75	0,74	0,84	13,39	9,91
				Αθροίσματα	61,13	43,79

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Αν θεωρήσουμε συντελεστή ταυτοχρονισμού του τμήματος $\kappa = 0,75$, τότε:

$$P = \kappa \cdot \sum \frac{P_i \cdot \mu_i}{\eta_i} \Leftrightarrow P = 45,85 \text{ kW}$$

- Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης χωρητικής ισχύος μέσω της σχέσης:

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέσο συντελεστή ισχύος του τμήματος της εγκατάστασης. Τούτος προκύπτει από τη σχέση:

$$\cos \varphi_1 = \frac{\sum v_i \cdot \frac{P_i \cdot \mu_i}{\eta_i} \cdot \cos \varphi_i}{\sum v_i \cdot \frac{P_i \cdot \mu_i}{\eta_i}} \Leftrightarrow \cos \varphi_1 = 0,716$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος πυκνωτών σε ομαδική αντιστάθμιση:

- Για $\cos\phi_1 = 0,716$ θα είναι $\tan\phi_1 = 0,975$. Αν επιδιώκεται διόρθωση του συντελεστή ισχύος με την αντιστάθμιση σε $\cos\phi_2 = 0,90$, θα είναι $\tan\phi_2 = 0,484$.
- Τελικά η απαιτούμενη χωρητική ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_c = P \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \Leftrightarrow$$

$$Q_c = 45,83 \cdot (0,975 - 0,484) \Leftrightarrow Q_c = 22,50\text{kVAR}$$

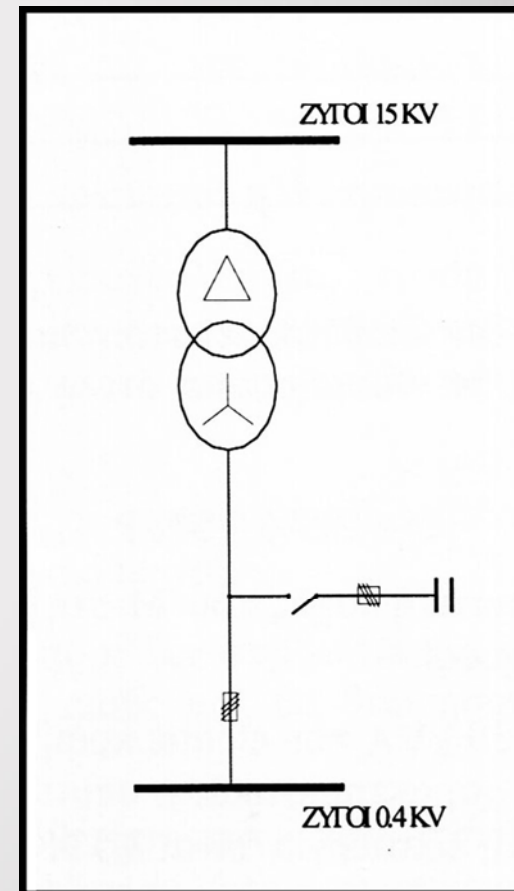
- Αν $V_C = 400\text{V}$ η πολική τάση στους πυκνωτές και $V = 380\text{V}$ η τάση του δικτύου, τότε $(V_C/V)^2 = 1,108$.
- Η χωρητική ισχύς πυκνωτών διορθώνεται στην τιμή:

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{V_c}{V}\right)^2 = 24,93\text{kVAR}$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική)
αντιστάθμιση μετασχηματιστών:

- Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος στους μετασχηματιστές γίνεται με την απευθείας σύνδεση πυκνωτών κατάλληλης ισχύος στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή.
- Αν είναι γνωστό το ρεύμα μαγνητίσεως του μετασχηματιστή, είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός της ισχύος των πυκνωτών.



Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική)
αντιστάθμιση μετασχηματιστών:

- Έστω μετασχηματιστής 630kVA με ονομαστική τάση λειτουργίας 400V.
- Το ρεύμα μαγνητίσεως για τυποποιημένο μετασχηματιστή 630kVA, είναι $I_o = 1,8\%$ ως προς το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή.
- Υπολογίζουμε την ονομαστική ένταση ρεύματος στο μετασχηματιστή από τη σχέση:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_{ov} \Leftrightarrow I_{ov} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{ov}} \Leftrightarrow I_{ov} = \frac{630.000V \cdot A}{\sqrt{3} \cdot 400V} \Leftrightarrow I_{ov} = 909,3A$$

- Ρεύμα μαγνητίσεως:

$$I_o = 1,8\% \cdot I_{ov} \Leftrightarrow I_o = 0,018 \cdot 909,3A \Leftrightarrow I_o = 16,37A$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική) αντιστάθμιση μετασχηματιστών:

- Η απορροφούμενη από το μετασχηματιστή άεργος ισχύς είναι:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_o \Leftrightarrow Q_c = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 16,37A \Leftrightarrow Q_c = 11,34kVAR$$

- Επιλέγεται να τοποθετηθούν πυκνωτές για τοπική αντιστάθμιση στη χαμηλή τάση του μετασχηματιστή με χωρητική ισχύ 15kVA.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική) αντιστάθμιση μετασχηματιστών:

- Σε περίπτωση που δεν διατίθενται στοιχεία για τους πυκνωτές (π.χ. μηχανήματα παλαιάς κατασκευής), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η απαιτούμενη ισχύς των πυκνωτών θα είναι (η μικρότερη τιμή για μετασχηματιστές μεγαλύτερης ισχύος):

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_o \Leftrightarrow Q_c = 3,5 - 5\% \cdot P$$

όπου P η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή.

- Στην περίπτωση του μετασχηματιστή του προηγούμενου παραδείγματος, με ονομαστική ισχύ 630kVA, η εφαρμογή της εμπειρικής αυτής μεθόδου θα έδινε: $Q_c = 0,035 \cdot 630kVA \Leftrightarrow Q_c = 22,05kVAR$, αντί 15kVAR που υπολογίσαμε αναλυτικά.

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Απαιτούμενη ισχύς πυκνωτών σε τοπική αντιστάθμιση μετασχηματιστών:

Απαιτούμενη χωρητική ισχύς πυκνωτών για τοπική αντιστάθμιση μετασχηματιστών τυποποιημένης σειράς 15/0,4kV	
Ισχύς μετασχηματιστή (kVA)	Ισχύς πυκνωτών (kVAR)
160	5,0
250	7,5
400	10,0
630	15,0
1.000	20,0
1.600	30,0

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική) αντιστάθμιση ηλεκτροσυγκολλήσεων:

- Οι στατές ηλεκτροσυγκολλήσεις τύπου αντίστασης ή τόξου απορροφούν από το δίκτυο μεγάλες ποσότητες μαγνητικής ενέργειας (άεργος ισχύς).
- Για το λόγο αυτό είναι εφοδιασμένες συνήθως με τους κατάλληλους πυκνωτές από τον κατασκευαστή.
- Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο και δεν έχουμε διαθέσιμα στοιχεία, τότε χάριν των υπολογισμών θεωρούμε ότι λειτουργούν με μέσο συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0,45$.
- Γενικά, με την τοποθέτηση πυκνωτών χωρητικής ισχύος ίσης με το μισό της ισχύος του μηχανήματος, επιτυγχάνεται ικανοποιητική διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική) αντιστάθμιση ασύγχρονων κινητήρων:

- Για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος τοπικά σε κινητήρες θα πρέπει να επιλεγεί χωρητική ισχύς πυκνωτών που να πλησιάζει αλλά να μην ξεπερνά την ισχύ του κινητήρα.
- Τούτο απαιτείται για να αποκλειστεί η περίπτωση παροχής ισχύος από τον κινητήρα προς το δίκτυο (αυτοδιέγερση) και η δημιουργία υπερτάσεων.
- Για αυτό το λόγο υπολογίζουμε την απαιτούμενη χωρητική ισχύ των πυκνωτών για την αντιστάθμιση του κινητήρα σε κενή λειτουργία (χωρίς φορτίο).
- Δυστυχώς το ρεύμα κενής λειτουργίας του κινητήρα I_0 σπάνια αναγράφεται στα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Συνεπώς παρουσιάζονται δυσκολίες για τον υπολογισμό της απαιτούμενης άεργου ισχύος.

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική)
αντιστάθμιση ασύγχρονων κινητήρων:

- Η άεργος ισχύς που απορροφά ο κινητήρας κατά την εκκίνησή του δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_o$$

- Η απαιτούμενη χωρητική ισχύς των πυκνωτών υπολογίζεται με βάση την ανωτέρω ισχύ, εισάγοντας ένα συντελεστή ασφαλείας $k = 0,85 - 0,90$, για την αποφυγή της αυτοδιέγερσης:

$$Q_c = k \cdot \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_o$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών

Παράδειγμα υπολογισμού απαιτούμενης ισχύος πυκνωτών σε τοπική (ατομική) αντιστάθμιση ασύγχρονων κινητήρων:

- Έστω ισχύς κινητήρα $P = 30\text{kW}$, τάση λειτουργίας κινητήρα $V = 380\text{V}$, ρεύμα λειτουργίας εν κενώ $I_o = 18\text{A}$.
- Η απαιτούμενη χωρητική ισχύς των πυκνωτών υπολογίζεται:

$$Q_c = k \cdot \sqrt{3} \cdot V_{ov} \cdot I_o \Leftrightarrow Q_c = 0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 380\text{V} \cdot 18\text{A}$$
$$\Leftrightarrow Q_c = 10,66\text{kVAR}$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ΙΣΧΥΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Ισχύς πυκνωτών σε τοπική αντιστάθμιση ασύγχρονων κινητήρων:

Ισχύς κινητήρα		Αριθμός στροφών (rpm)				
		3.000	1.500	1.000	750	500
HP	kW	Απαιτούμενη χωρητική ισχύς πυκνωτών (kVAR)				
10	7,5	5	5	5	7,5	-
20	15	7,5	7,5	7,5	10	10
30	22	7,5	10	10	12,5	15
40	30	10	12,5	15	15	20
50	37	12,5	15	15	20	25
75	55	15	20	20	25	30
100	74	20	25	25	30	40
150	110	30	35	40	45	55
220	162	40	50	60	70	80

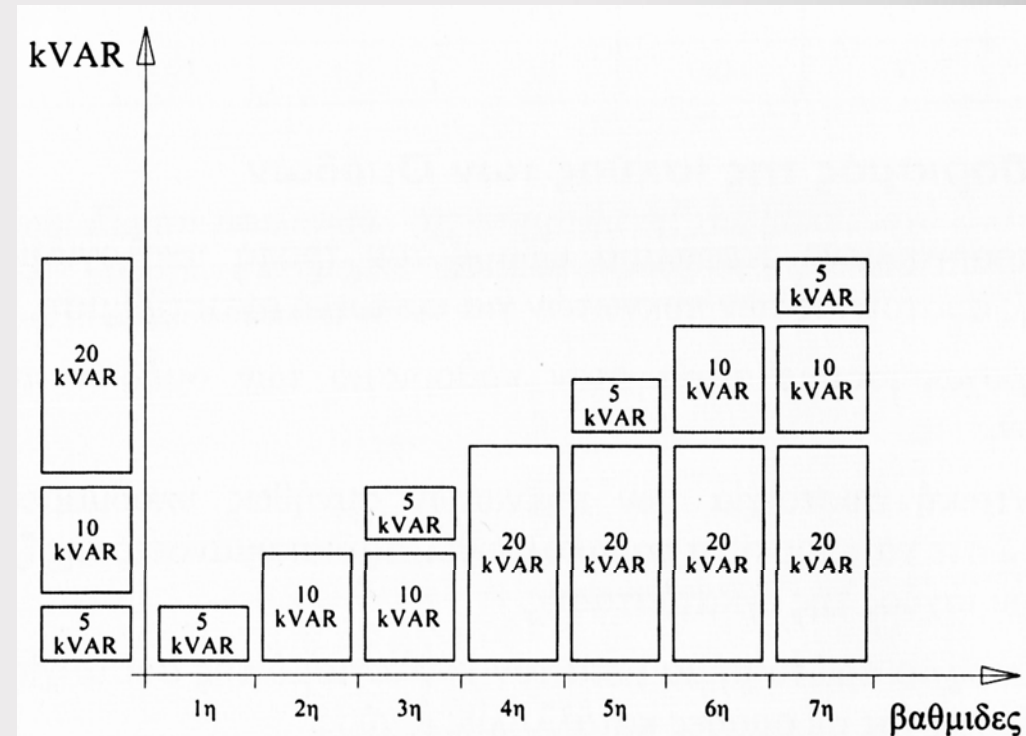
Επιλογή της βέλτιστης συστοιχίας πυκνωτών

Καθορισμός της ισχύος των ομάδων

- Η κεντρική συστοιχία των πυκνωτών συνήθως υποδιαιρείται σε ομάδες, ώστε να μπορεί να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της ζήτησης της αέργου ισχύος της εγκατάστασης.
- Για την καλύτερη παρουσίαση του θέματος, έστω, για παράδειγμα, ότι σε μία εγκατάσταση απαιτούνται πυκνωτές ισχύος 35kVAR.
- Θα εξεταστούν τρεις περιπτώσεις σύνθεσης της συστοιχίας των πυκνωτών από ομάδες:
 - οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:2:4:8, δηλαδή η επόμενη ομάδα πυκνωτών έχει διπλάσια ισχύ από την προηγούμενη
 - οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:2:2
 - οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:1:1:1.

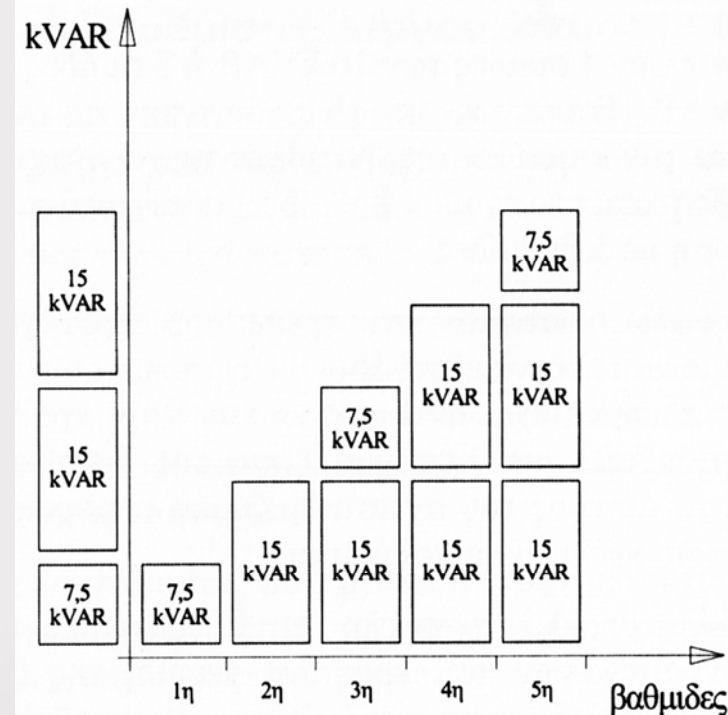
Καθορισμός της ισχύος των ομάδων

- Οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:2:4:8.
- Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να τοποθετήσουμε τρεις ομάδες πυκνωτών, με ισχείς 5, 10 και 20kVAR, που θα συνδέονται με αυτόματο ρελέ, κατάλληλης ισχύος διακοπής στους ζυγούς.
- Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να επιτύχουμε επτά διαφορετικούς συνδυασμούς, που θα αυξάνονται ανά 5kVAR μεταξύ τους.
- Σε αυτή την περίπτωση η συστοιχία μπορεί να παρακολουθεί πολύ καλά τις μεταβολές της αέργου ισχύος της εγκατάστασης με γραμμικό τρόπο.



Καθορισμός της ισχύος των ομάδων

- Οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:2:2.
- Εάν εγκαταστήσουμε τρεις ομάδες πυκνωτών με ισχείς 7,5, 15 και 15kVAR, μπορούμε να επιτύχουμε πέντε διαφορετικούς συνδυασμούς, που η ισχύς τους αυξάνεται κατά 7,5kVAR.
- Και με αυτό τον τρόπο η παρακολούθηση των μεταβολών της αέργου ισχύος μπορεί να είναι ικανοποιητική.



Καθορισμός της ισχύος των ομάδων

- Οι ομάδες έχουν ισχείς που ακολουθούν τη σχέση: 1:1:1:1, δηλαδή έχουν όλες την ίδια ισχύ.
- Ο αριθμός των βαθμίδων που μπορούμε να επιτύχουμε είναι ίσος με τον αριθμό των ομάδων των πυκνωτών.
- Στο παράδειγμά μας, θα μπορούσε να κατασκευαστεί συστοιχία με τέσσερις ομάδες των 10kVAR ή τρεις των 10kVAR και μία των 5kVAR.
- Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί η γραμμικότητα των προηγούμενων περιπτώσεων.

Σύγκριση των ανωτέρω περιπτώσεων

- Εκ πρώτης φαίνεται ότι η τρίτη περίπτωση πρέπει να αποφευχθεί, λόγω της αδυναμίας παρακαλούθησης της ζήτησης άεργου ισχύος.
- Τα οφέλη που θα προκύψουν από μία λεπτή ρύθμιση της διατιθέμενης ισχύος έχουν σχέση με το μέγεθος του αντισταθμιζόμενου φορτίου. Επομένως για μικρά φορτία τα οφέλη είναι πολύ μικρά.
- Επιπλέον, τα οφέλη αυτά εξανεμίζονται από την καταπόνηση των πυκνωτών που προκαλεί μείωση της ζωής τους, εξαιτίας των αλλεπάλληλων χειρισμών ζεύξεων και αποζεύξεων για την παρακολούθηση του φορτίου.
- Το ίδιο ισχύει και για τους αυτόματους διακόπτες, των οποίων οι επαφές πρέπει να συντηρούνται συχνά λόγω των δυσμενών συνθηκών λειτουργίας.
- Κατά συνέπεια, στις περισσότερες περιπτώσεις η διόρθωση επιδιώκεται να γίνεται για μια μέση τιμή του συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, χωρίς να μας ενδιαφέρει η αντιστάθμιση τιμών μικρής διάρκειας της άεργου ισχύος.

Σύγκριση των ανωτέρω περιπτώσεων

- Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρότερος αριθμός λειτουργιών των αυτόματων διακοπών ζεύξεως και, το πολύ σημαντικότερο, μικρότερος αριθμός στιγμιαίων υπερτάσεων στους πυκνωτές, οι οποίες καταπονούν τις μονώσεις τους και συντομεύουν τη διάρκεια ζωής τους.
- Εν κατακλείδι, στην πράξη επιλέγεται συνήθως για κάθε βαθμίδα μιας συστοιχίας πυκνωτών ισχύς ίση με 15 – 25% της συνολικής ισχύος της συστοιχίας.



Τέλος παρουσίασης

Ευχαριστώ για την προσοχή σας

