

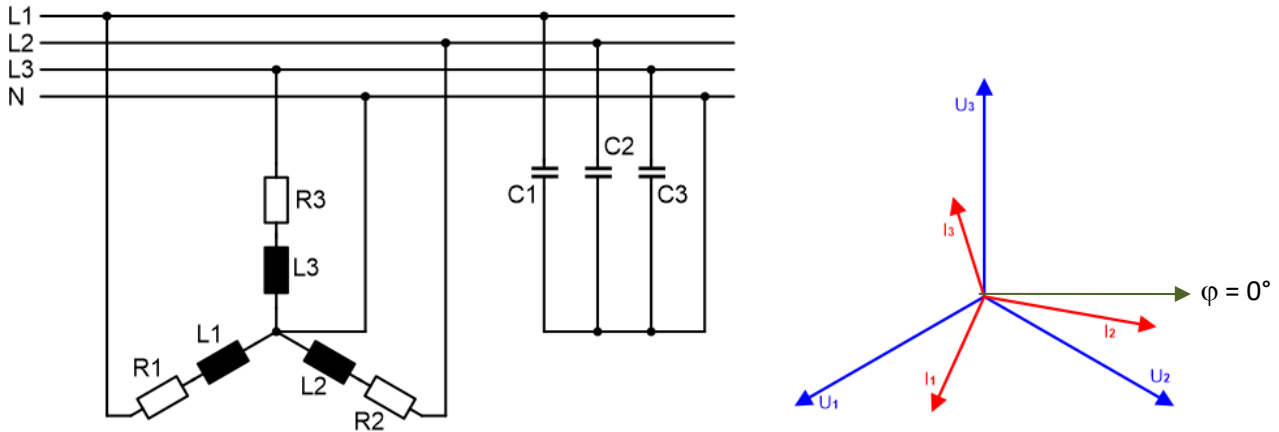
Dreileitersystem

Sternschaltung mit unterschiedlicher, ohmscher und induktiver Last, Phasenkompensation.

$U_{str} = 230V$, $R_1 = 12\Omega$, $L_1 = 27mH$, $R_2 = 10\Omega$, $L_2 = 12mH$, $R_3 = 17\Omega$, $L_3 = 17mH$

Kompensation mittels Strang-Kondensatoren, der gewünschter $\cos\varphi = 0,95$ als Minimum.

Der Nullleiterstrom im unkompensierten System soll graphisch hinsichtlich Betrags und Winkel ermittelt werden.



In einer Exceltabelle lassen sich die elektrischen Größen einfach berechnen. In einer Eingabetabelle, links unten, werden die elektrischen Werte der Elemente aus den Angaben einmalig eingegeben.

In der rechnenden Tabelle, rechts unten, werden Strom, Leistungen, Phasenlage je Leitungsstrang berechnet. Die elektrischen Werte werden aus der Eingabetabelle geholt. Etwas verwirrend ist, dass die Leitungen, bzw. die

Leitungsstränge des Drehstromsystems und die Induktivitäten mit den gleichen Buchstaben, L1, L2, L3 bezeichnet werden, aber die Werte der Induktivität haben eine Einheit, in diesem Fall „mH“.

Eingabe		φ
Ustr	230 V	U_{L1}
R1	12 Ω	210
L1	27 mH	U_{L2}
R2	10 Ω	-30
L2	12 mH	U_{L3}
R3	17 Ω	90
L3	17 mH	
Komp	0,95 $\cos\varphi$	

Berechnung der unsymmetrischen induktiven Last									
	R	X_L	Z	I	S	$\cos\varphi$	φ	P	Q_L
	Ω	Ω	Ω	A	kVA	unkomp	$^\circ$	kW	kVAr
L1	12	8,482	14,695	15,652	3,600	0,817	35,254	2,940	2,078
L2	10	3,770	10,687	21,522	4,950	0,936	20,655	4,632	1,746
L3	17	5,341	17,819	12,907	2,969	0,954	17,440	2,832	0,890

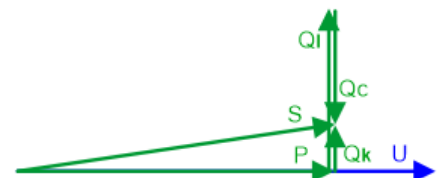
Hier einige Formeln und Erklärungen zur Tabelle:

„R“ wird aus der Eingabetabelle übernommen, $X_L = \omega * L$ (aus Eingabetabelle) $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$,

$$I = \frac{U_{str}}{Z}, S = U_{str} * I, \cos\varphi = \frac{R}{Z}, \varphi = \arccos(\cos\varphi) * 180 / \pi, P = S * \cos\varphi, Q_L = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Es ist zu erkennen, dass in den Strängen L1 und L2 der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ **unter**, im Strang L3 **über** 0,95 beträgt. Somit bedürfen die ersten beiden einer Kompensation mit einem Kondensator.

Die induktive Blindleistung ist der kapazitiven Blindleistung entgegengesetzt, somit muss der Kondensator so dimensioniert werden, dass ein Leistungsfaktor von 0,95 zustande kommt.



Kompensation auf $\cos\varphi$ (C13)					
Qc	Ic	Xc	C	$\cos\varphi$	Bemerkung
kVAr	A	Ω	μF	komp.	Text
1,112	4,833	47,6	67	0,950	kompensiert
0,224	0,973	236,5	13	0,950	kompensiert
n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,954	nicht komp

Die für den vorgegebenen Leistungsfaktor benötigte Blindleistung:

$$Q_k = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Die kapazitive Blindleistung ergibt sich aus:

$$Q_c = Q_l - Q_k = Q_l - \sqrt{S^2 - P^2}$$

In der Tabelle sieht die Berechnung von Qc dann so aus: $K21 - (((J21/\$C\$13)^2 - (J21^2))^{0,5})$

Es würden alle Kompensationen berechnet werden, auch jene, bei denen $\cos\varphi >$ des gewünschten Wertes wäre. Daher wurde eine WENN-Bedingung eingeführt und die Formel sieht nun etwas kompliziert aus, sie gibt aber bei Überkompensation ein „n.b.“ für „nicht berechnet“ aus.

=WENN(H21<\$C\$13;K21-(((J21/\$C\$13)^2)-(J21^2))^0,5;"n.b.") Qc

Die Berechnung der Kapazität erfolgt über Ic und Xc.

$$I_c = \frac{Q_c}{U} \quad \text{und} \quad X_c = \frac{U}{I_c}$$

Die Formeln in den Feldern sind wieder um die WENN-Funktion ergänzt:

=WENN(H21<\$C\$13;1000*L21/\$C\$5;"n.b.")Ic, =WENN(H21<\$C\$13;\$C\$5/M21;"n.b.")Xc

Der Faktor 1000 ist der Berechnung mit kW bez. kVAr geschuldet.

Zum Schluss noch die $\cos\varphi$ - Berechnung:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{(Q_l - Q_c)^2 + P^2}}$$

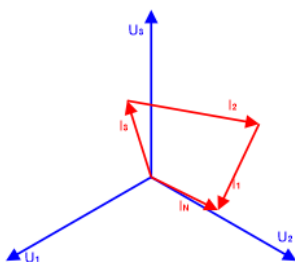
Die Formeln in den Feldern sind wieder um die WENN-Funktion ergänzt, wobei in dieser Spalte der unkompensierte Leistungsfaktor $\cos\varphi$ angezeigt wird:

=WENN(H21<\$C\$13;J21/(((K21-L21)^2)+(J21^2))^0,5;H21))

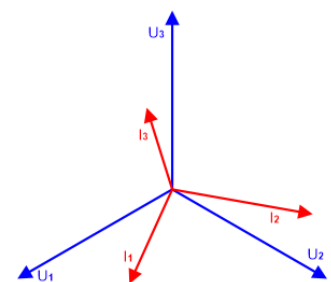
Die komplette Excel-Datei ist [hier als XLSX-Datei](#) und [hier als ZIP-Datei](#) zum Herunterladen bereit.

Nun zum letzten Teil der Aufgabe, die Darstellung des Nullleiter-Stromes des unkompensierten Systems.

Rein graphisch, werden die Stromvektoren maßstabsgetreu hinsichtlich Betrag und Winkel in den Spannungs-Stern eingezeichnet (Bild rechts). Hierbei muss ein Maßstab festgelegt sein, z.B. 1cm entspricht 5A

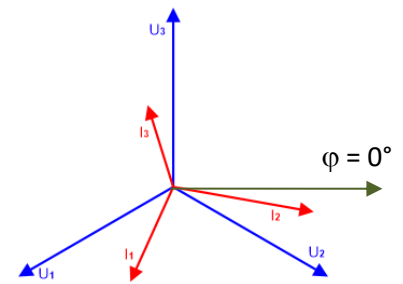


Nun gibt es mehrere Möglichkeiten die Vektoren aneinander zu reihen. Z.B.: An die Spitze von I3 wird der Vektor I2 verschoben. An dessen Spitze wird der Vektor I1 angefügt. Dann bleibt ein Abstand zum Mittelpunkt und das ist der Vektor des Nullleiterstromes. Im gegebenen Beispiel kann nun der Betrag abgemessen und mit dem Zeichnungs-Maßstab berechnet werden. Der Winkel ist bei diesem Beispiel zufällig fast phasengleich mit Strang L2 (linkes Bild).



Für die mathematische Berechnung sind grundsätzlich die Kenntnisse über Vektoren und Vektoraddition erforderlich. Darauf kann aber hier in der Kürze nicht im Detail eingegangen werden, nur so viel sei als Prinzip festgelegt, dass bei allen Vektoren in ihre X-Komponente und in ihre Y-Komponente erfasst werden. Es wird die Richtung des Nullwertes (Nullwinkel) des Phasenwinkels definiert (festgelegt) und die Winkel aller anderen Vektoren darauf bezogen.

Die X-Werte und die Y-Werte werden einfach addiert, wobei auf Vorzeichen besonders geachtet werden muss. Das Resultat ergibt den X-Wert und den Y-Wert des resultierenden Vektors, in diesem Fall des Nullleiterstromes. Aus diesen Werten werden der Betrag und der Winkel berechnet.



In der Eingabetabelle ist in der Spalte „φ“ der Winkel der Spannung der einzelnen Stränge bezogen auf den Nullwinkel angegeben.

Die Spalten „I“ und „φ“ werden aus der großen oberen Tabelle

Berechnung des Nullleiterstromes hinsichtlich Betrag und Winkel								
	I	φ	φ0	X-Wert	Y-Wert	Betrag	φ	Kontr.
	A	°	°			A	°	
L1	15,652	35,254	245,25	-14,21	-6,552			15,652
L2	21,522	20,655	-9,34	-3,494	21,236			21,522
L3	12,907	17,440	107,44	12,314	-3,868			12,907
N				-5,395	10,816	12,087	-26,51	12,087

übernommen. Die Spalte „φ0“ enthält den Winkel der jeweiligen Ströme bezogen auf den Nullwinkel. Es wird jeweils der Spannungswinkel (zum Nullwinkel) plus der Phasenverschiebung des Stromes auf Grunde der induktiven Last gerechnet. Damit ist der Winkel des jeweiligen Stromes zum Nullwinkel festgelegt. Der Wert des jeweiligen Stromes wird aus der oberen Tabelle aus der 5. Spalte (I) entnommen. Somit ist jeder Strom mit Betrag und Winkel definiert.

Die X- und Y-Komponenten werden mit $x = \sin\phi$ und $y = \cos\phi$ berechnet. Beispiel: $=C33*\text{SIN}(E33*\text{PI}()/180)$. Da Excel die Winkel im Radiant-Maß rechnet, ist die Ergänzung „*PI()/180“ erforderlich, um Werte in Winkelgrade zu bekommen.

Nach der Summe der X- und Y-Werte ergeben sich die Werte für den resultierenden Vektor, der des Nullleiterstromes. Über Pythagoras und Winkelfunktion lassen sich Betrag und Winkel errechnen.

$$\text{Betrag} = \sqrt{(\text{XWert})^2 + (\text{YWert})^2} \quad \text{z.B.:} \quad =(((\text{F36})^2)+((\text{G36})^2))^{\wedge}0,5$$

$$\text{Winkel} = \arctan \frac{\text{Y-Wert}}{\text{X-Wert}} \quad \text{z.B.:} \quad =\text{ARCTAN}(\text{F36}/\text{G36}) * 180/\text{PI}()$$

Die Spalte „Kontr“ ist eine Überprüfungsspalte und kontrolliert, ob die anfangs übernommenen Ströme und das Ergebnis mit einer anderen Berechnungsart übereinstimmen.

Variation der graphischen Addition der Stromvektoren des unkompensierten Systems, immer mit dem gleichen Ergebnis nämlich des Vektors des Nullleiterstromes I_N .

