Technische Universität Braunschweig

Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme

Grundlagen der elektrischen Energietechnik
Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung
Übung 2 - Berechnung von Dreieckschaltungen

Johanna Grobler, 18.04.2024

Aufgaben aus der Vorlesung

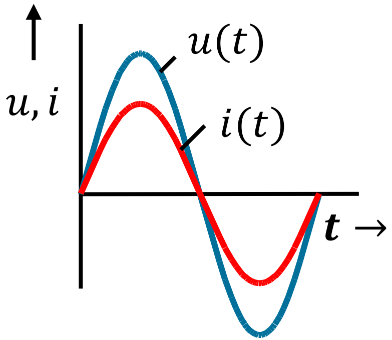
I. Welche Bezeichnungen gibt es für die beiden Stromsysteme in einem Drehstromsystem ?
- Dreieckstrom → I_{Δ}, (Strangstrom)
- Sternstrom → $I_{\curlywedge}$, (Außen-)Leiterstrom (Strom in einem Leiter), Bemessungsstrom

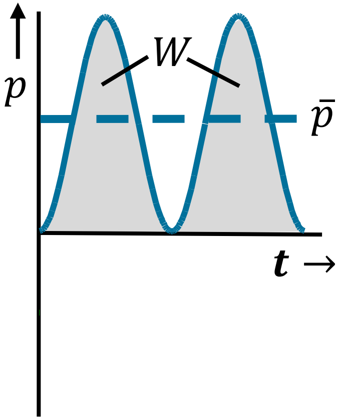
II. Wie groß ist der Bemessungsstrom eines Verbrauchers in Dreieckschaltung bei einem Strangstrom von 520 A ?
- $I_{\curlywedge} = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} = 1{,}73 \cdot 520\ \mathrm{A} = 901\ \mathrm{A}$

III. Was ist die Momentanleistung?
- $p = u \cdot i$, Augenblickswert der Leistung,

  ändert sich mit der Zeit t

IV. Wie ist die Wirkleistung definiert?
- $P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \cdot dt = U_{\mathrm{eff}} \cdot I_{\mathrm{eff}} \cdot \cos\varphi$





V. Welcher Faktor gibt das Verhältnis zwischen Schein- und Wirkleistung an?
- $\cos\varphi$ → Verschiebungsfaktor

Aufgaben aus der Vorlesung

VI. Welche Leistungsart führt zu einem Pendeln der Austauschleistung im Netz?

- Blindleistung

VII. Welche Einheiten haben die unterschiedlichen Leistungsarten?

- Scheinleistung: VA (Volt Ampère)
- Wirkleistung: W (Watt)
- Blindleistung: var (Var, volt ampère reactive)

Aufgaben aus der Vorlesung (VIII)

Außenleiterstrom: $S = 3 \cdot U_\curlywedge \cdot I$, $S = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I$

$$I_\curlywedge = \frac{S}{3 \cdot U_\curlywedge} = \frac{690\ \mathrm{MVA}}{3 \cdot 220\ \mathrm{kV}} = 1045\ \mathrm{A}$$

Verlustleistung: $P = {I_\curlywedge}^2 \cdot R \cdot 3 = \ (1045\ \mathrm{A})^2\ \cdot 10\ \Omega\ \cdot 3 = 32{,}78\ \mathrm{MW}$

Übertragene Leistung: 690 MVA

Wirk- und Blindleistung müssten komplex addiert werden.

Annahme: S=P (Phasenwinkel = 0)

Gesamtleistung: $P_{ges} = 32{,}78\ \mathrm{MW} + 690\ \mathrm{MW} = 722{,}78\ \mathrm{MW}$

Wirkungsgrad: $\eta = \frac{P_{\text{Üb}}}{P_{\text{ges}}} = \frac{690\ \mathrm{MW}}{722{,}78\ \mathrm{MW}} = 95{,}5\ \%$

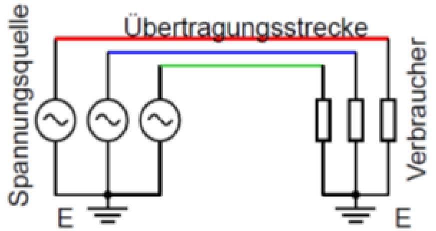
Verluste im Erdwiderstand? Verbesserung des Wirkungsgrades?

Eine symmetrische 380-kV-Übertragungsstrecke soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei 690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV. Der Bündelleiter-Widerstand betrage auf der gesamten Strecke 10 Ohm. Der Erdwiderstand auf der gesamten Strecke betrage 5 Ohm.

a. Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom!

b. Wie groß ist die gesamte Verlustleistung der Übertragungsstrecke?

c. Diskutieren sie die Effizienz der Leistungsübertragung!



Aufgaben aus der Vorlesung (IX)

Stellen Sie im einphasigen ESB die Gleichung für die Kompensation der Blindleistung auf.

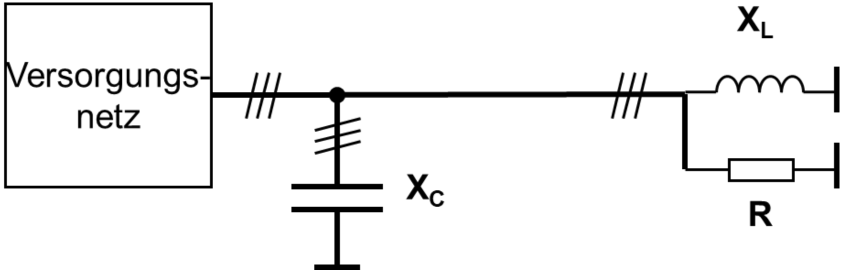
- Blindstrom soll zu 0 werden.
- Blindströme müssen sich kompensieren
- $Q_{\mathrm{C}} = Q_{\mathrm{L}}$
- $I_{X_{\mathrm{C}}} = I_{X_{\mathrm{L}}}$
- $X_{\mathrm{C}} \,||\, X_{\mathrm{L}} \rightarrow X_{\mathrm{C}} = X_{\mathrm{L}}$
- $\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \boldsymbol{C = \frac{1}{\omega^2 L}}$

Beispielrechnung:

$L = 50\ \mathrm{mH}$

$R = 30\ \Omega$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \boldsymbol{C} = \boldsymbol{\frac{1}{\omega^2 L}} = \frac{\mathbf{1}}{(2\pi f)^{\mathbf{2}} \cdot 50\ \mathrm{mH}} = \mathbf{202{,}7\ \mu F}$$

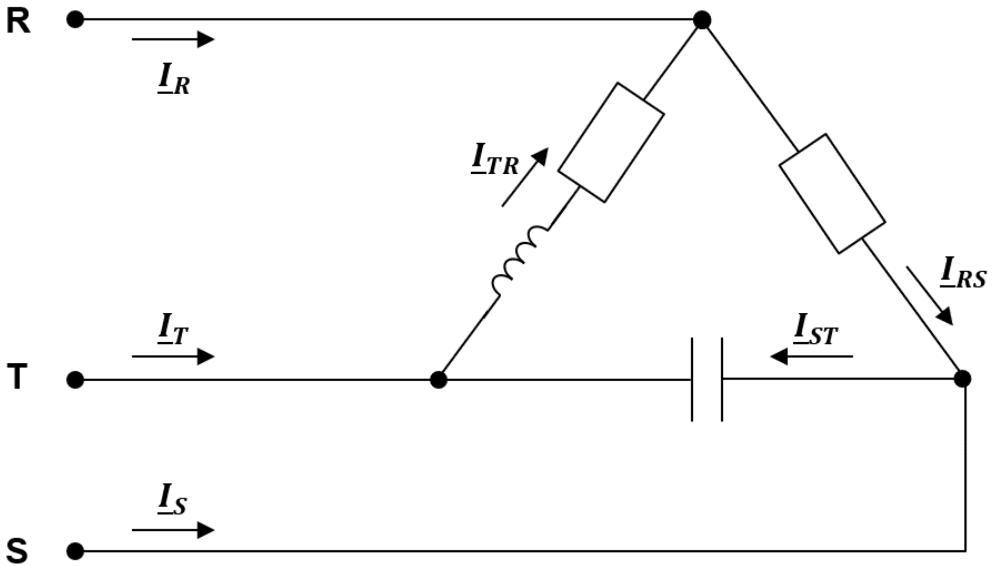


$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Aufgabe 2a

Es sind die Beträge der Strangströme $\underline{I}_{\mathrm{RS}}$, $\underline{I}_{\mathrm{ST}}$ und $\underline{I}_{\mathrm{TR}}$ zu bestimmen
sowie deren Phasenwinkel gegen die Strangspannungen. Welche Größe eilt vor?



Aufgabe 2a

R-S: rein ohmscher Verbraucher, nur Wirkleistung

Spannung und Strom sind in Phase

$\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{RS}}} = \mathbf{0°} \rightarrow \cos(\varphi_{\mathrm{RS}}) = 1$

$$\boldsymbol{I_{\mathrm{RS}}} = \frac{\boldsymbol{P_{\mathrm{RS}}}}{\boldsymbol{U_{\mathrm{RS}}} \cdot \mathbf{cos}(\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{RS}}})} = \frac{6.000\ \mathrm{W}}{400\ \mathrm{V}} = \mathbf{15\ A}$$

Q > 0: induktive Blindleistung

Q < 0: kapazitive Blindleistung

$$\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{Phase}}} = \boldsymbol{\varphi_{\mathrm{ui}}} = \boldsymbol{\varphi_{\mathrm{u}}} - \boldsymbol{\varphi_{\mathrm{i}}}$$

S-T: rein kapazitiv, nur Blindleistung,

Strom eilt um 90° vor

$\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{ST}}} = \mathbf{-90°} \rightarrow \sin(\varphi_{\mathrm{ST}}) = -1$

$$\boldsymbol{I_{\mathrm{ST}}} = \frac{\boldsymbol{Q_{\mathrm{ST}}}}{\boldsymbol{U_{\mathrm{ST}}} \cdot \mathbf{sin}(\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{ST}}})} = \frac{-2.500\ \mathrm{var}}{400\ \mathrm{V} \cdot (-1)} = \mathbf{6{,}25\ A}$$

T-R: ohmsch-induktiv, Strom eilt nach

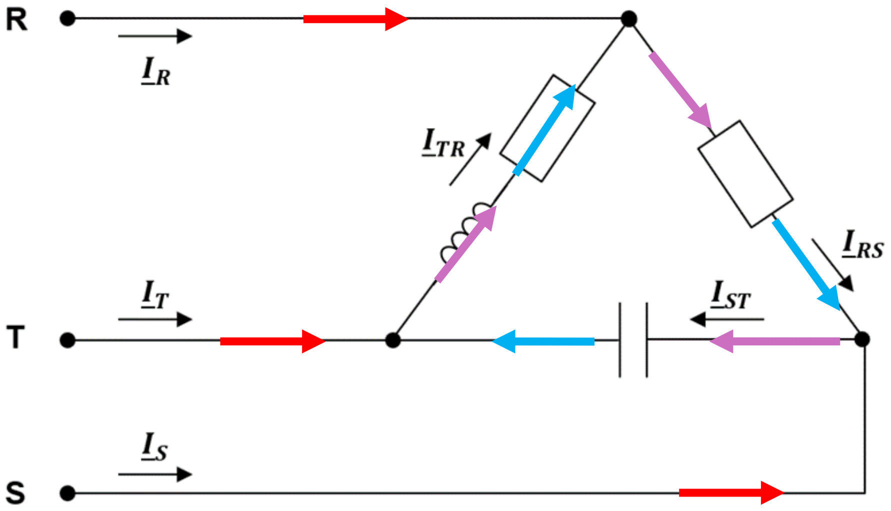
$$\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{TR}}} = \mathbf{arctan}\frac{\boldsymbol{Q_{\mathrm{TR}}}}{\boldsymbol{P_{\mathrm{TR}}}} = \arctan\frac{5.000}{3.000} = \mathbf{59°}$$

$$\boldsymbol{I_{\mathrm{TR}}} = \frac{\boldsymbol{S_{\mathrm{TR}}}}{\boldsymbol{U_{\mathrm{TR}}}} = \frac{\sqrt{(3.000\ \mathrm{W})^2 + (5.000\ \mathrm{var})^2}}{400\ \mathrm{V}} = \mathbf{14{,}6\ A}$$

Aufgabe 2b

Die Leiterströme $\underline{I}_\mathrm{R}$, $\underline{I}_\mathrm{S}$ und $\underline{I}_\mathrm{T}$ sind aus den Strangströmen rechnerisch zu ermitteln.

Es ist ein Zeigerdiagramm zu konstruieren. (Maßstab: 40 V/cm, 4 A/cm)



$$\underline{I}_\mathrm{RS} = \underline{I}_\mathrm{TR} + \underline{I}_\mathrm{R} \quad \rightarrow \underline{I}_\mathrm{R} = \underline{I}_\mathrm{RS} - \underline{I}_\mathrm{TR}$$

$$\underline{I}_\mathrm{TR} = \underline{I}_\mathrm{T} + \underline{I}_\mathrm{ST} \quad \rightarrow \underline{I}_\mathrm{T} = \underline{I}_\mathrm{TR} - \underline{I}_\mathrm{ST}$$

$$\underline{I}_\mathrm{ST} = \underline{I}_\mathrm{S} + \underline{I}_\mathrm{RS} \quad \rightarrow \underline{I}_\mathrm{S} = \underline{I}_\mathrm{ST} - \underline{I}_\mathrm{RS}$$

Aufgabe 2b

Bestimmung der Spannung: Jeweils 120° Versatz

$$\underline{U}_{\mathrm{ST}} = 400\ \mathrm{V} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,180°} \triangleq 10\ \mathrm{cm}$$

$$\underline{U}_{\mathrm{TR}} = 400\ \mathrm{V} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,60°}$$

$$\underline{U}_{\mathrm{RS}} = 400\ \mathrm{V} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,60°}$$

Aufgabe 2b

Bestimmung der Strangströme in kartesischen Koordinaten

(für Addition/Subtraktion)

Beträge aus a)

→ Phasenwinkel bestimmen

$$\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{Phase}} = \boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{ui}} = \boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{u}} - \boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{i}}$$

$$\varphi_{\mathrm{Strom}} = \varphi_{\mathrm{Spannung}} - \varphi_{\mathrm{Phase}}$$

$$\varphi_{I_{\mathrm{RS}}} = \varphi_{U_{\mathrm{RS}}} - \varphi_{\mathrm{RS}} = -60° - 0° = -60°$$

$$\varphi_{I_{\mathrm{ST}}} = \varphi_{U_{\mathrm{ST}}} - \varphi_{\mathrm{ST}} = 180° - (-90°) = 270° = -90°$$

$$\varphi_{I_{\mathrm{TR}}} = \varphi_{U_{\mathrm{TR}}} - \varphi_{\mathrm{TR}} = 60° - 59° = 1°$$

Aufgabe 2b

$$\underline{I}_{\mathrm{RS}} = I_{\mathrm{RS}} \cdot e^{\mathrm{j}\,\varphi_{I_{\mathrm{RS}}}} = I_{\mathrm{RS}} \cdot \cos\,\varphi_{I_{\mathrm{RS}}} + \mathrm{j} \cdot I_{\mathrm{RS}} \cdot \sin\,\varphi_{I_{\mathrm{RS}}} = 15\ \mathrm{A} \cdot \cos -60° + \mathrm{j} \cdot 15\ \mathrm{A} \cdot \sin -60°$$

$$\boldsymbol{\underline{I}_{\mathrm{RS}}} = 7{,}5\ \mathbf{A} - \mathbf{j}\ 13\ \mathbf{A}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{ST}} = I_{\mathrm{ST}} \cdot e^{\mathrm{j}\,\varphi_{I_{\mathrm{ST}}}} = I_{\mathrm{ST}} \cdot \cos\,\varphi_{I_{\mathrm{ST}}} + j \cdot I_{\mathrm{ST}} \cdot \sin\,\varphi_{I_{\mathrm{ST}}} = 6{,}25\ \mathrm{A} \cdot \cos -90° + \mathrm{j} \cdot 6{,}25\ \mathrm{A} \cdot \sin -90°$$

$$\boldsymbol{\underline{I}_{\mathrm{ST}} = -\mathbf{j}\ 6,25\ \mathbf{A}}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{TR}} = I_{\mathrm{TR}} \cdot e^{\mathrm{j}\,\varphi_{I_{\mathrm{TR}}}} = I_{\mathrm{TR}} \cdot \cos\,\varphi_{I_{\mathrm{TR}}} + j \cdot I_{\mathrm{TR}} \cdot \sin\,\varphi_{I_{\mathrm{TR}}} = 14{,}6\ \mathrm{A} \cdot \cos 1° + \mathrm{j} \cdot 14{,}6\ \mathrm{A} \cdot \sin 1°$$

$$\boldsymbol{\underline{I}_{\mathrm{TR}} = 14,6\ \mathbf{A} + \mathbf{j}\ 0,25\ \mathbf{A}}$$

Aufgabe 2b

$\varphi = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}\{\underline{Z}\}}{\mathrm{Re}\{\underline{Z}\}}\right)$ für Quadrant I und IV

$\varphi = \pi + \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}\{\underline{Z}\}}{\mathrm{Re}\{\underline{Z}\}}\right)$ für Quadrant II

$\varphi = -\pi + \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}\{\underline{Z}\}}{\mathrm{Re}\{\underline{Z}\}}\right)$ für Quadrant III

$Re > 0,\ Im > 0$ $\rightarrow$ Quadrant I

$Re < 0,\ Im > 0$ $\rightarrow$ Quadrant II

$Re < 0,\ Im < 0$ $\rightarrow$ Quadrant III

$Re > 0,\ Im < 0$ $\rightarrow$ Quadrant IV

Aufgabe 2b

Berechnung der Leiterströme in kartesischen Koordinaten und Umwandlung in Polarkoordinaten

$\underline{I}_{\mathrm{R}} = \underline{I}_{\mathrm{RS}} - \underline{I}_{\mathrm{TR}} = 7{,}5\ \mathrm{A} - \mathrm{j}\ 13\ \mathrm{A} - 14{,}6\ \mathrm{A} - \mathrm{j}\ 0{,}25\ \mathrm{A} = -7{,}1\ \mathrm{A} - \mathrm{j}\ 13{,}25\ \mathrm{A}$ → 3. Quadrant

$$\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathbf{R}} = \sqrt{(7{,}1\ \mathrm{A})^2 + (13{,}25\ \mathrm{A})^2} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\arctan\frac{-13{,}25}{-7{,}1}} = 15\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,(62° - 180°)} = \mathbf{15\ A \cdot e^{-j\,118°}} \triangleq \mathbf{3{,}8\ cm}$$

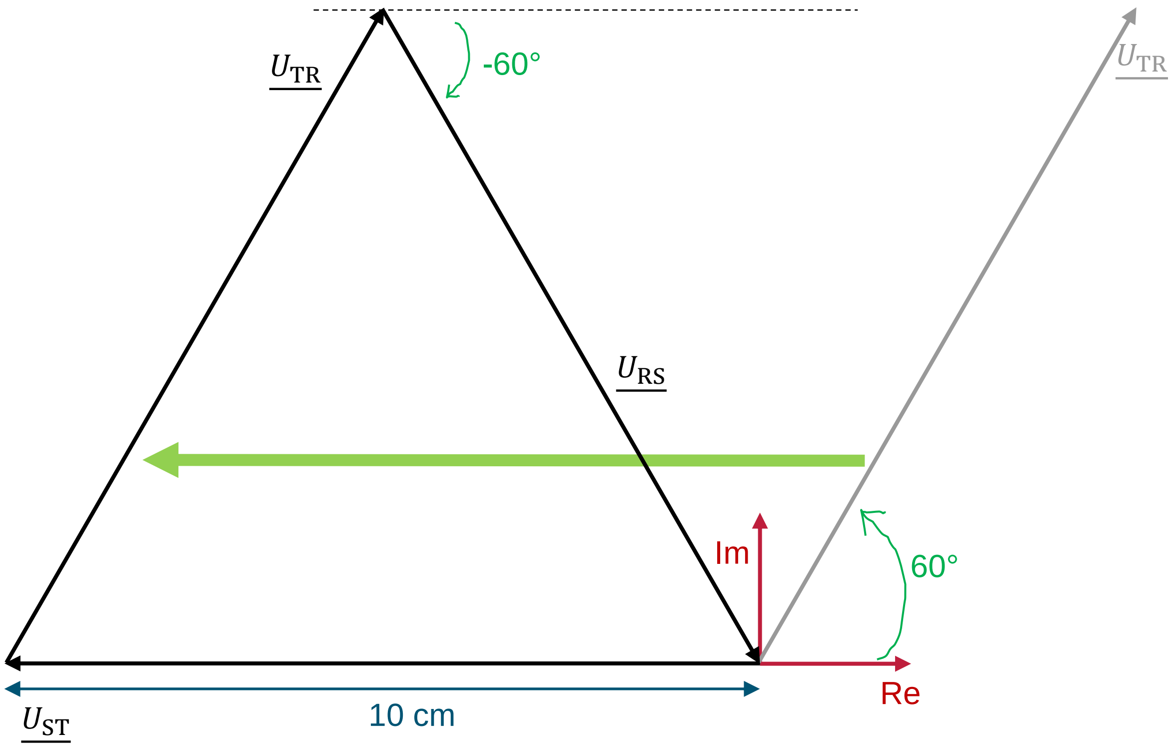
$\underline{I}_{\mathrm{S}} = \underline{I}_{\mathrm{ST}} - \underline{I}_{\mathrm{RS}} = -\mathrm{j}\ 6{,}25\ \mathrm{A} - 7{,}5\ \mathrm{A} + \mathrm{j}\ 13\ \mathrm{A} = -7{,}5\ \mathrm{A} + \mathrm{j}\ 6{,}75\ \mathrm{A}$ → 2. Quadrant

$$\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathbf{S}} = \sqrt{(7{,}5\ \mathrm{A})^2 + (6{,}75\ \mathrm{A})^2} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\arctan\frac{6{,}75}{-7{,}5}} = 10{,}1\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,(-42° + 180°)} = \mathbf{10{,}1\ A \cdot e^{j\,138°}} \triangleq \mathbf{2{,}5\ cm}$$

$\underline{I}_{\mathrm{T}} = \underline{I}_{\mathrm{TR}} - \underline{I}_{\mathrm{ST}} = 14{,}6\ \mathrm{A} + \mathrm{j}\ 0{,}25\ \mathrm{A} + \mathrm{j}\ 6{,}25\ \mathrm{A} = 14{,}6\ \mathrm{A} + \mathrm{j}\ 6{,}5\ \mathrm{A}$ → 1. Quadrant

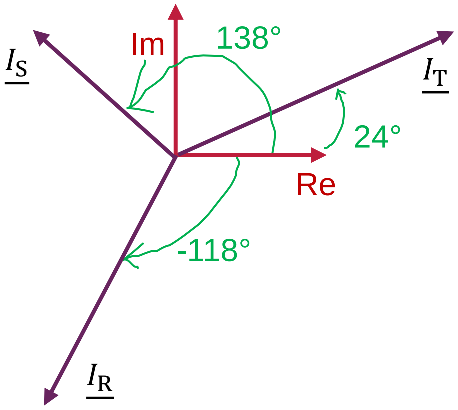
$$\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathbf{T}} = \sqrt{(14{,}6\ \mathrm{A})^2 + (6{,}5\ \mathrm{A})^2} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\arctan\frac{6{,}5}{14{,}6}} = \mathbf{16\ A \cdot e^{j\,24°}} \triangleq \mathbf{4\ cm}$$

Aufgabe 2b

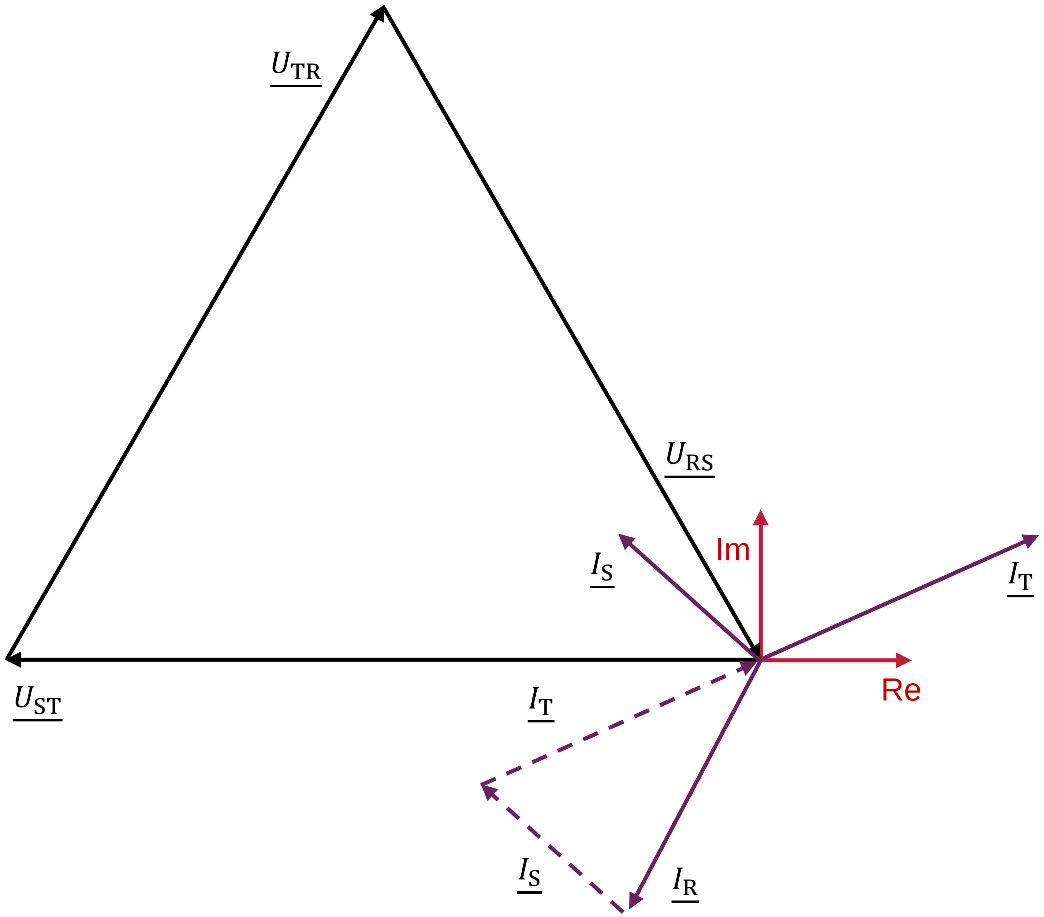


$\underline{U}_{TR}$
-60°
$\underline{U}_{TR}$
$\underline{U}_{RS}$
Im
60°
Re
$\underline{U}_{ST}$
10 cm

Aufgabe 2b



$\underline{I}_S$
Im
138°
$\underline{I}_T$
24°
Re
-118°
$\underline{I}_R$



$\underline{U}_{TR}$
$\underline{U}_{RS}$
$\underline{I}_S$
Im
$\underline{I}_T$
Re
$\underline{U}_{ST}$
$\underline{I}_T$
$\underline{I}_S$
$\underline{I}_R$