Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Elektroenergiesysteme
und Hochspannungstechnik (IEH)
Leiter: Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried

Zusammenfassung zur Übung 1

ELEKTROENERGIESYSTEME

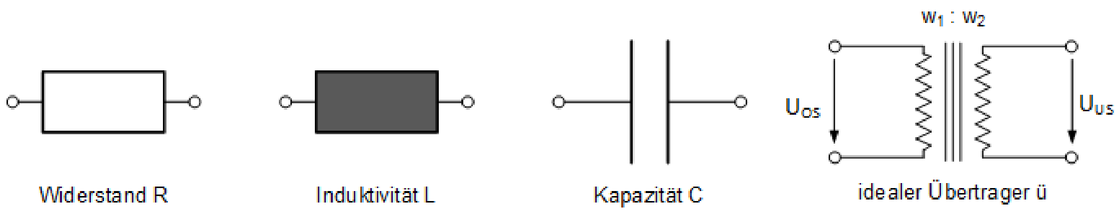
Aufgaben 1 bis 4

1) Komplexe Wechselstromrechnung:

   Anwendbar bei der allgemeinen Betrachtung eingeschwungener, sinusförmig angeregter elektrischer Netze. Starke Ähnlichkeit zur Berechnung von Gleichstromnetzwerken. Kirchhoff'sche Gesetze und Ohm'sches Gesetz anwendbar mit einer komplexen Impedanz $\underline{Z}$:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$$

2) Passive Bauelemente und idealer Übertrager (Transformator):



3) Impedanzen:

   $\underline{Z}_{\mathrm{R}} = R \qquad \underline{Z}_{\mathrm{L}} = j\omega L \qquad \underline{Z}_{\mathrm{C}} = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}$

4) Impedanztransformation bei idealem Übertrager:

   Für die Transformation von Sekundär- (US) auf Primärseite (OS) gilt:

$$\underline{Z}_{\mathrm{OS}} = \ddot{\mathrm{u}}^2 \underline{Z}_{\mathrm{US}} = (\tfrac{w_1}{w_2})^2 \underline{Z}$$

5) Komplexe Zahlen:

   - Betragsbildung

$$\underline{Z} = a + jb \qquad\qquad \underline{Z} = \frac{a+jb}{c+jd}$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{a^2+b^2} \qquad\qquad |\underline{Z}| = \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{\sqrt{c^2+d^2}}$$

   - Nützliche Information bei Umformungen:

$$\underline{Z} \cdot \underline{Z}^* = |\underline{Z}|^2$$

   - Phasenwinkel:

$$\varphi = arg(\underline{Z}) = arg(a+jb)$$

ACHTUNG: Fallunterscheidung bei Berechnung des Phasenwinkels notwendig!

$$\varphi = \begin{cases} arctan(\frac{b}{a}) & a > 0 \\ arctan(\frac{b}{a}) + \pi & a < 0 \\ \frac{\pi}{2} & a = 0, b > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & a = 0, b < 0 \end{cases}$$

6) symmetrisches Drehspannungssytem des speisenden Netzes:

In EES wird immer angenommen, dass das speisende Netz ein symmetrisches Drehspannungssystem darstellt. Für die Spannungen des symmetrischen Drehspannungsnetzes gilt:

$$\underline{U}_{\mathrm{RM}} = U_{\mathrm{Y}} e^{j(\omega t)} \qquad \underline{U}_{\mathrm{SM}} = U_{\mathrm{Y}} e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})} \qquad \underline{U}_{\mathrm{TM}} = U_{\mathrm{Y}} e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})}$$

Hinweis zu Spannungsbezeichnungen: U_{Y} ist bekannt als Strangspannung oder Sternspannung (Effektivwert der Spannung von einer Phase zum Mittelpunkt M). Ebenso ist U_{Δ} gebräuchig als verkettete Spannung, Außenleiterspannung oder Dreieckspannung (Effektivwert der Spannung von einer Phase zu einer anderen Phase). In einem symmetrischen Drehspannungssystem gilt dabei:

$$U_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{Y}$$

Wichtig: Wenn man in der Energietechnik von der Nennspannung eines Netzes spricht, dann sind die verketteten Spannungen gemeint!($400V/20kV/110kV/220kV/380kV$).

7) Verbraucheranschluss

Für den Anschluss der Verbraucher an die drei Phasen eines Drehstrom-/Drehspannungssystems gibt es zwei Möglichkeiten: die Sternschaltung und die Dreieckschaltung.

- Sternschaltung:
  Bei der Sternschaltung ist jede Phase (R, S, T) über einen Verbraucher an einen gemeinsamen Punkt N angeschlossen. Der gemeinsame Punkt N (auch Sternpunkt N genannt) kann entweder mit dem Sternpunkt M des speisenden Netzes verbunden sein oder nicht.
- Dreieckschaltung:
  Bei der Dreieckschaltung werden die Verbraucher zwischen zwei Phasen angeschlossen. Somit sind alle Phasen (über Vebraucher) direkt miteinander verbunden.

8) Symmetrische Belastung:

- symmetrische Last in Sternschaltung ($\underline{Z}_{\mathrm{R}} = \underline{Z}_{\mathrm{S}} = \underline{Z}_{\mathrm{T}} = \underline{Z}_{\mathrm{Y}}$)

$$|\underline{U}_{\mathrm{R}}| = |\underline{U}_{\mathrm{S}}| = |\underline{U}_{\mathrm{T}}| = U_{\mathrm{Y}}$$

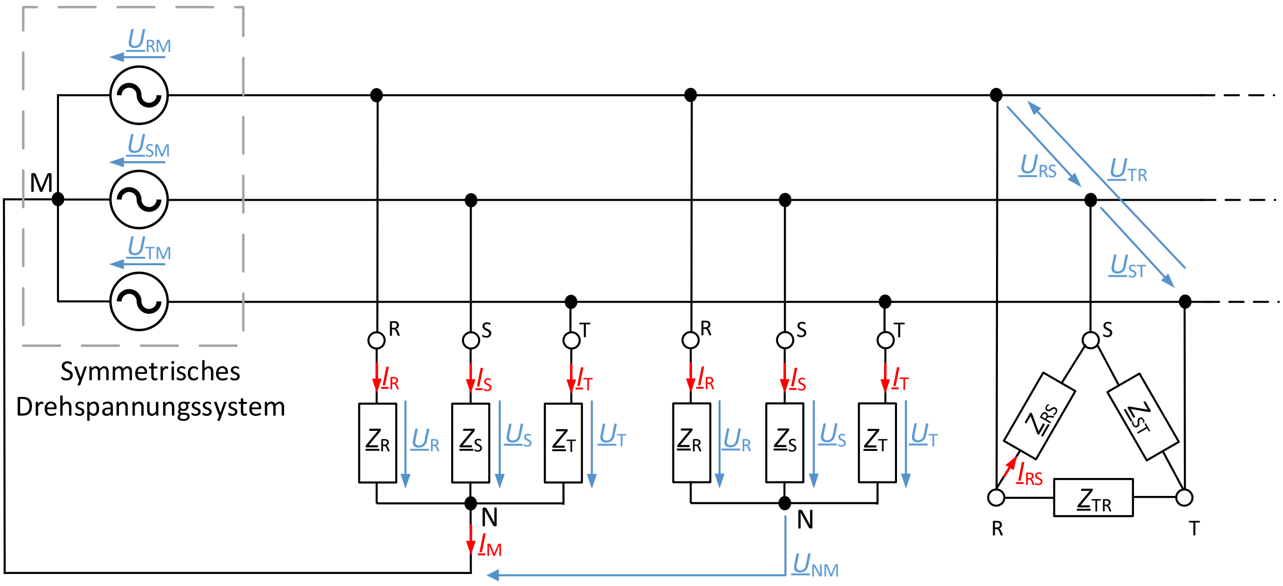
$$\underline{I}_{\mathrm{M}} = 0$$

$$\underline{S} = 3 \cdot \underline{S}_{\mathrm{Phase}} = 3 \cdot \underline{U}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{I}_{\mathrm{R}}^{*} = 3 \cdot \underline{U}_{\mathrm{R}} \cdot \frac{\underline{U}_{\mathrm{R}}^{*}}{\underline{Z}_{\mathrm{Y}}^{*}} = 3 \cdot \frac{U_{\mathrm{Y}}^{2}}{\underline{Z}_{\mathrm{Y}}^{*}}$$

- symmetrische Last in Dreiecksschaltung ($\underline{Z}_{\mathrm{RS}} = \underline{Z}_{\mathrm{ST}} = \underline{Z}_{\mathrm{TR}} = \underline{Z}_{\Delta}$)

$$|\underline{U}_{\mathrm{RS}}| = |\underline{U}_{\mathrm{ST}}| = |\underline{U}_{\mathrm{TR}}| = U_{\Delta}$$

$$\underline{S} = 3 \cdot \underline{S}_{\mathrm{Phase}} = 3 \cdot \underline{U}_{\mathrm{RS}} \cdot \underline{I}_{\mathrm{RS}}^{*} = 3 \cdot \underline{U}_{\mathrm{RS}} \cdot \frac{\underline{U}_{\mathrm{RS}}^{*}}{\underline{Z}_{\Delta}^{*}} = 3 \cdot \frac{U_{\Delta}^{2}}{\underline{Z}_{\Delta}^{*}}$$



Symmetrisches Drehspannungssystem mit Verbraucher in a) Sternschaltung mit verbundenen Sternpunkten b) Sternschaltung ohne verbundene Sternpunkte N und M c) Dreieckschaltung

9) unsymmetrische Belastung der Sternschaltung: $(\underline{Z}_R \neq \underline{Z}_S \neq \underline{Z}_T)$

Unabhängig von der Sternpunktbehandlung des Verbrauchers gilt nach Kirchhoff:

$$\underline{I}_M = \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = \frac{\underline{U}_R}{\underline{Z}_R} + \frac{\underline{U}_S}{\underline{Z}_S} + \frac{\underline{U}_T}{\underline{Z}_T} = \underline{U}_R \cdot \underline{Y}_R + \underline{U}_S \cdot \underline{Y}_S + \underline{U}_T \cdot \underline{Y}_T$$

- Seien M und N verbunden (siehe Fall a) dann gilt:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{RM} \qquad \underline{U}_S = \underline{U}_{SM} \qquad \underline{U}_T = \underline{U}_{TM}$$

Es fließt ein resultierender Strom $\underline{I}_M$ von Sternpunkt N in den Sternpunkt M (Außer geschickte Wahl der unsymmetrischen Belastung, dann KANN $\underline{I}_M = 0$ sein, siehe Übung!)

- Seien M und N getrennt (siehe Fall b) dann gilt:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{RM} - \underline{U}_{NM} \qquad \underline{U}_S = \underline{U}_{SM} - \underline{U}_{NM} \qquad \underline{U}_T = \underline{U}_{TM} - \underline{U}_{NM}$$

Bei unsymmetrischer Belastung baut sich eine Spannung $\underline{U}_{NM}$ zwischen den Sternpunkten N und M auf! Da keine Verbindung zwischen den Sternpunkten N und M existiert, kann auch kein Strom $\underline{I}_M$ fließen.

$$\underline{I}_M = 0$$

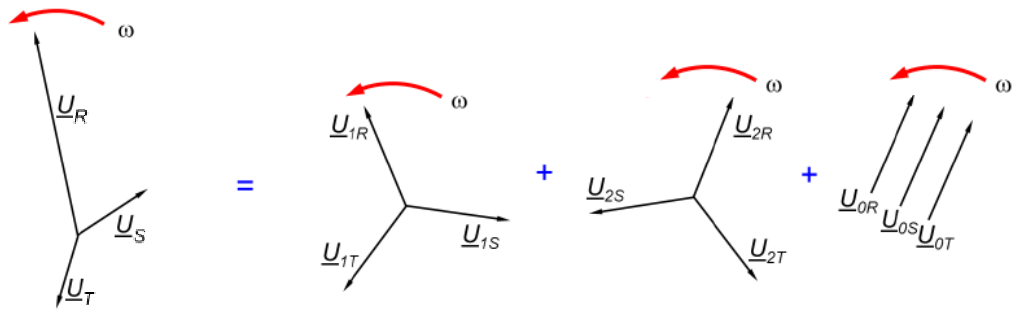
Einsetzen der Spannungen und des Stromes in Kirchhoffsche Gleichung und anschließend Umformen liefert die Spannung zwischen den Sternpunkten:

$$\underline{U}_{NM} = \frac{\underline{U}_{RM} \cdot \underline{Y}_R + \underline{U}_{SM} \cdot \underline{Y}_S + \underline{U}_{TM} \cdot \underline{Y}_T}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T} = U_Y e^{j\omega t} \frac{(\underline{Y}_R + \underline{Y}_S \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \underline{Y}_T \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}})}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T}$$

10) Symmetrische Komponenten

Ein beliebiges unsymmetrisches Dreiphasensystem lässt sich als Summe aus einem Mitsystem (Index 1), Gegensystem (Index 2) und Nullsystem (Index 0) darstellen.

- Mitsystem: symmetrisches Drehspannungssystem mit Phasenfolge RST
- Gegensystem: symmetrisches Drehspannungssystem mit Phasenfolge RTS
- Nullsystem: Alle drei Phasen haben diesselbe Phasenlage



Darstellung eines allgemeinen Drehspannungssystems durch 3 symmetrische Einzelsysteme (Mit-, Gegen- und Nullsystem)

Für die Transformation vom RST-System in das Mit-Gegen-Nullsystem von Leiter R gilt:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{1R} \\ \underline{U}_{2R} \\ \underline{U}_{0R} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{pmatrix} \qquad \text{mit } \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ}$$

Nach der Berechnung der symmetrischen Komponenten lässt sich das RST-System wie folgt beschreiben:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{2R} + \underline{U}_{0R} = \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{2R} + \underline{U}_0$$
$$\underline{U}_S = \underline{U}_{1S} + \underline{U}_{2S} + \underline{U}_{0S} = \underline{a}^2\underline{U}_{1R} + \underline{a}\underline{U}_{2R} + \underline{U}_0$$
$$\underline{U}_T = \underline{U}_{1T} + \underline{U}_{2T} + \underline{U}_{0T} = \underline{a}\underline{U}_{1R} + \underline{a}^2\underline{U}_{2R} + \underline{U}_0$$