Zusammenfassung WSDST — Fabian Steiner HS24

Trapezregel: $X = \frac{1}{T}\sum_{k=1}^{N-1} \frac{t_{k+1}-t_k}{2}(i_k + i_{k+1})$

Trapezregel RMS: $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{k=1}^{N-1} \frac{t_{k+1}-t_k}{2}(i_k^2 + i_{k+1}^2)}$

Mittelwert: $X_0 = \bar{X} = X_m = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} x(t)\,dt$

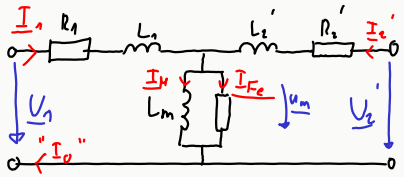
Quadratischer Mittelwert: $X^2 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,dt$

Effektivwert/RMS: $X_{eff} = \sqrt{X^2} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,dt}$

Gleichrichtwert: $X_{|m|} = |\bar{X}| = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)|\,dt$

Wirkleistung: $P = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} p(t)\,dt$

Müesamer Trafo



R_1, R_2' Kupferwiderstände Prim, Sec
L_1, L_2' Streufluss Spule
R_{Fe} Eisenverlust
L_m Hauptfluss Spule
I_M Magnetisierungsstrom
I_{Fe} Primärstrom für Verluste

$U_2' = U_2 \frac{N_1}{N_2}$ | $I_2' = I_2 \frac{N_1}{N_2}$

$\eta = \frac{P_{2N}}{P_{1N}+P_K+P_{10}}$ $I_n = \frac{S_n}{U_n}$

$R_2' = R_2\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$ $L_2' = L_2\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$

$\eta = \frac{S_n - P_V}{S_n}$

Leerlauf:

$L_1 + R_1 \rightarrow$ ganz $I_2' = 0$, $I_{10} = I_M + I_{Fe}$

$U_1 = R_1 \cdot I_1 + j\omega L_1 \cdot I_1 + j\omega L_m \cdot I_M$ $\quad 0 = -j\omega L_m I_M + U_2'$

$P_{10} = I_{Fe} \cdot U_1 \rightarrow R_{Fe}$; $Q_{10} = I_M \cdot U_1 \rightarrow L_H$

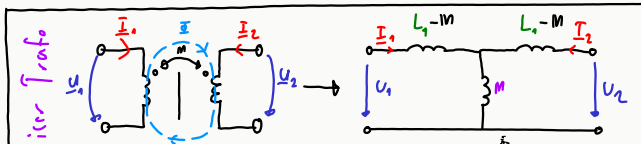
Kurzschluss:

R_{Fe} & L_m ganz $U_2' = 0$; $U_m = j\omega L_m I_M$

$I_K = I_{1N}$ (Nennstrom) ; $0 = R_2' I_2' + j\omega L_2' I_2' - j\omega L_H I_M$

$Z_K = P_K + jX_K = U_K / I_K$ $\quad P_K = I_{1N}^2 \cdot R_K$

Wirk Trafo



$\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \end{bmatrix}$ $\quad \frac{d}{dt} \rightarrow j\omega$ ersetzt

$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} \overset{\sin}{\Longrightarrow} U_1 = N_1 \cdot \omega \cdot \hat{\Phi}$

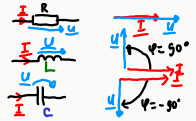
$B = \mu \cdot H$ $\quad \Phi = \int B \cdot ds$

$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ $\quad \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_{L1}}{Z_{L2}}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$

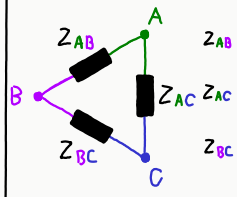
$Z = R + jX$ Komplexer Widerstand (Impedanz) | R: Wirkwiderstand (Resistanz) | X: Blindwiderstand (Reaktanz)

$Y = G + jB$: Komplexer Leitwert (Admittanz) | G: Wirkleitwert (Konduktanz) | B: Blindleitwert (Suszeptanz)

	Z		Y			
Widerstand	$Z_R = R$		$Y_R = G = \frac{1}{R}$			
Induktivität	$Z_L = j\omega L = jX_L$	$X_L = \omega L$	$Y_L = \frac{1}{j\omega L} = jB_L$	$B_L = -\frac{1}{\omega L}$	$W_L = \frac{1}{2}LI_L^2$	
Kondensator	$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = jX_C$	$X_C = -\frac{1}{\omega C}$	$Y_C \quad j\omega C \quad jB_C$	$B_C = \omega C$	$W_C = \frac{1}{2}CU_C^2$	
	$Z = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{S^*} = \frac{S}{I^2}$		$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z}$			



Stern-Dreieck-Umwandlung (Y ⇒ Δ)

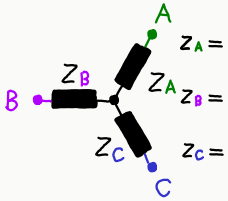


$Z_{AB} = Z_A + Z_B + \frac{Z_A Z_B}{Z_C}$

$Z_{AC} = Z_A + Z_C + \frac{Z_A Z_C}{Z_B}$

$Z_{BC} = Z_B + Z_C + \frac{Z_B Z_C}{Z_A}$

Dreieck-Stern-Umwandlung (Δ ⇒ Y)

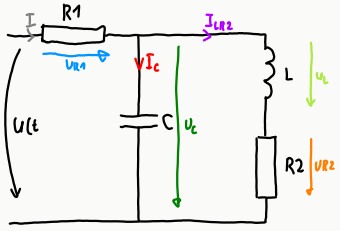


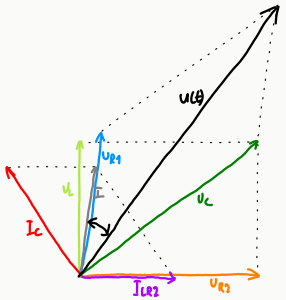
$Z_A = \frac{Z_{AB} Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$

$Z_B = \frac{Z_{AB} Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$

$Z_C = \frac{Z_{AC} Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$

Komplexe Leistung	$S = P + jQ$
[Scheinleistung] = VA	$S = U \cdot I^* = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = \frac{U^2}{Z^*} = I^2 \cdot Z$ $S = U \cdot I = \frac{U^2}{Z} = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + Q^2}$
[Wirkleistung] = W	$P = \mathrm{Re}(S) = S \cdot \cos(\varphi) = I^2 \cdot \mathrm{Re}(Z)$
[Blindleistung] = var	$Q = \mathrm{Im}(S) = S \sin(\varphi) = P \cdot \tan(\varphi)$
[Leistungsfaktor] = 1	$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \cos(\varphi)$ (bei sin Schwingungen)



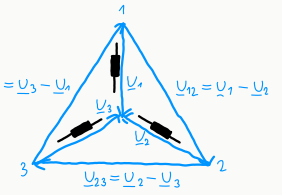


TR: [X ▶ Polar] [conj(...) Konjugiert komplex] [(X∠φ) braucht ()] [X ▶ DD (rad zu Grad)] [imag (...)] [real (...)]

Rechtsdrehend:

- Verkettete Spannung
- Aussenleiterströme
- Gesamt-Scheinleistung
- Scheinleistung pro Strang
- Wirkleistung
- Blindleistung
- Wirkarbeit
- Blindarbeit

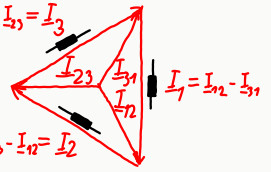
Sternschaltung (Y)



$U = U_{Str} \cdot \sqrt{3}$ $\quad \underline{U} = \underline{U}_{Str} \cdot \sqrt{3}\, e^{j30°}$

$I = I_{Str}$

Dreieckschaltung (Δ)



$U = U_{Str}$

$I = I_{Str} \cdot \sqrt{3}$ $\quad \underline{I} = \underline{I}_{Str} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j30°}$

$S = 3 \cdot S_{Str} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ in VA

$\underline{S}_{Str} = \underline{U}_{Str} \underline{I}^*_{Str}$ in VA

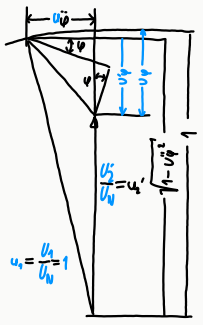
$P = S \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$ in W

$Q = S \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$ in var

$W = P \cdot t = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot t$ in Ws, kWh

$W_b = Q \cdot t = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot t$ in varh, kvarh

Kappsches Dreieck



$$u_\varphi = u_{\varphi'} + 1 - \sqrt{1 - u_{\varphi''}^2}$$

$$u_\varphi \approx u_{\varphi'} \quad (\text{für } u_z = \frac{U_2}{U_N} \cdot 100\% < 4\%$$

$$u_{\varphi'} = n \cdot u_r \cdot \cos\varphi + n \cdot u_x \cdot \sin\varphi$$

$$u_{\varphi'} = n \cdot u_x \cdot \cos\varphi - n \cdot u_r \cdot \sin\varphi$$

$$\text{Lastfaktor } n = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

$$u_r = \frac{R_k \cdot I}{U_N} \qquad u_x = \frac{X_k \cdot I}{U_N}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} - \Delta U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} - \frac{1}{\ddot{u}} U_N u_\varphi$$

$$\Delta U_2 \approx \frac{1}{\ddot{u}} \cdot (U_R \cdot \cos\varphi + U_X \cdot \sin\varphi)$$

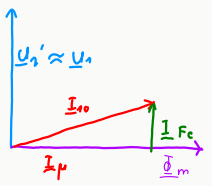
Beim kappschen Dreieck wird mit "genormten" Grössen (klein u) gerechnet: $u = \frac{U_{\text{Strang}}}{U_{N,\text{Strang}}} = \frac{U_x}{U_N}$ $\quad U_N = U_1$

Das Kappsche Dreieck dreht sich um die Spitze der primärspannung. Bei konstantem Strom und variablem cos(φ) beschreibt U_2' einem Kreis um die Primärspannung.
Bei **kapazitiver Last steigt** die Sekundärspannung über den Leerlaufwert an.
Ähnlichkeitssatz:
Ändert sich U_2 oder U_1 so ändern sich alle Grössen massstäblich

Bsp.: $U_{2neu} = U_{2alt} \cdot \frac{U_{1neu}}{U_{1alt}}$

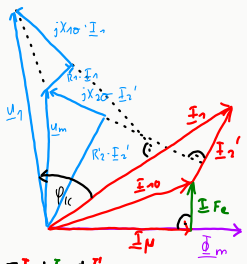
Leerlauf

Φ_m = Magnetischer Fluss



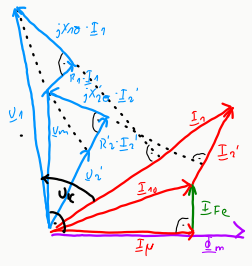
$\underline{I}_1 = 0$
$\underline{I}_{10} = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe}$
$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_m \underline{I}_\mu$
$0 = -j\omega L_m \underline{I}_\mu + \underline{U}_2'$

Kurzschluss



$\underline{I}_1 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_1'$
$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_m \underline{I}_m$
$0 = R_2' \cdot \underline{I}_1' + j\omega L_{2\sigma}' \cdot \underline{I}_1' - j\omega L_m \underline{I}_\mu + \underline{U}_2'$
$\underline{U}_2' = 0$
$\underline{U}_m = j\omega L_m \underline{I}_\mu$

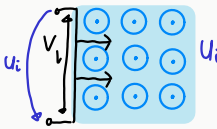
Nennbetrieb (ohmsch)



$\underline{I}_1 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_1'$
$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_m \underline{I}_m$
$0 = R_2' \cdot \underline{I}_1' + j\omega L_{2\sigma}' \cdot \underline{I}_1' - j\omega L_m \underline{I}_\mu + \underline{U}_2'$
$\underline{U}_m = j\omega L_m \underline{I}_\mu$

- 90% der Kabel werden von Bager zerstört
- Hauptfehlerquelle von Kabel: Übertemperatur
- Bei Überproduktion steigt Spannung & Frequenz
- HVDC erst ab ~ 800KM wirtschaftlich
- ~1% der Hauptleistung eines Kraftwerks wird als regelleistung gebraucht.
- Netzbrummen → 100Hz Netz ist rechtsdrehend!

Bewegungsinduktion gerade bewegung



$U_i = V \times B$
$= B \cdot l \cdot v$



$U_i = \omega \cdot B \cdot N \cdot a \cdot b \cdot \sin(\alpha)$

$\underline{\Phi} = \frac{B_m}{\sqrt{2}} \cdot A \cdot e^{j0}$

$U_m = j\omega N_1 \underline{\Phi}$

$\underline{S}_0 = P_{Fe} + jQ_\mu$

$\underline{I}_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_m} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$

$\underline{I}_\mu = \frac{Q_\mu}{U_m} \cdot e^{j0}$

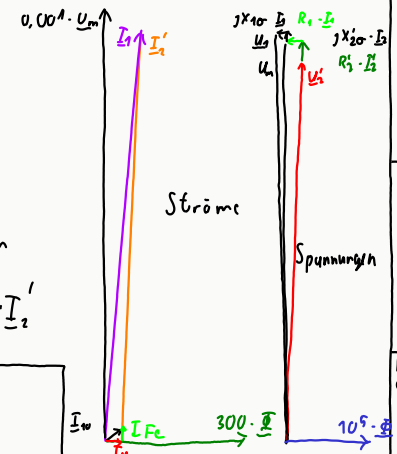
$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_\mu$

$P_n = R_L \cdot I_2^2 = R_L = \frac{P_n}{I_2^2}$

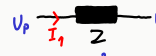
$\underline{I}_2' = \frac{U_m}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 (R_1 + jX_{1\sigma} + R_L)}$

$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + U_m$

$\underline{U}_2' = \underline{U}_m - R_2' \cdot \underline{I}_2' - jX_{2\sigma}' \cdot \underline{I}_2'$



Drehstromtrafo als Impedanz



in prozent

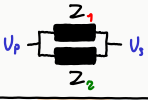
$z = u_k \cdot \frac{U^2}{S} \cdot 6 \cdot \arccos\left(\frac{P_{Cu}}{P_k}\right)$ (S → betrag)

Leistungsverteilung parallel geschalteter trafos

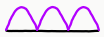
$z_1 \| z_2$

Leistung mit cosφ $\quad S = S_0 \angle \arccos(\varphi)$

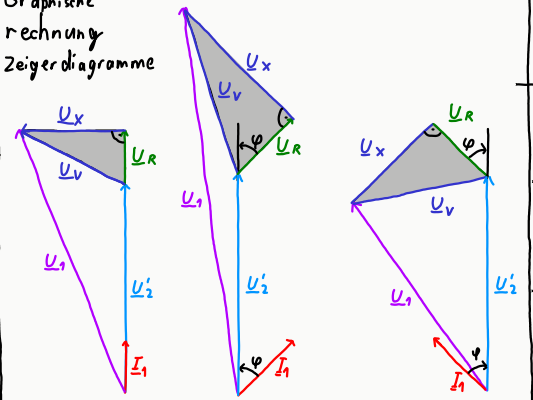
$S_{t1} = S \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$



Kennzahl: Multipliziert man die Kennzahl mit 30°, erhält man den Winkel, um den die Sternspannung des entsprechenden Strangs der HV Seite nacheilt
6 → 6·30° → 180° eilt LV noch

Form	Funktion	Gleichrichtwert	Formfaktor	Effektivwert	Scheitelfaktor	x_0	x^2
Formel		$\lvert x\rvert = \frac{1}{T}\int_0^T \lvert x(t)\rvert dt$	$\frac{X}{\lvert x\rvert}$	$X = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)dt}$	$k_s = \frac{x_{max}}{x_{eff}}$		
	$A \cdot \sin(t)$	$\frac{2}{\pi} \approx 0.637$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$	$\sqrt{2} \approx 1.414$	0	$\frac{A^2}{2}$
	$A \cdot \lvert\sin(t)\rvert$	$\frac{2}{\pi} \approx 0.637$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$	$\sqrt{2} \approx 1.414$	$\frac{2A}{\pi}$	$\frac{A^2}{2}$
	$\begin{cases} A\sin(t) & 0<t<\pi \\ 0 & \text{Sonst} \end{cases}$	$\frac{1}{\pi} \approx 0.318$	$\frac{\pi}{2} \approx 1.571$	$\frac{1}{2} = 0.5$	2	$\frac{A}{\pi}$	$\frac{A^2}{4}$
	$A \cdot \Lambda(t)$	$\frac{1}{2} = 0.5$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.155$	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.557$	$\sqrt{3} \approx 1.732$	0	$\frac{A^2}{3}$
	$\begin{cases} A & 0<x<t \\ 0 & \text{Sonst} \end{cases}$	1	1	1	1	0	A^2
DC	1	1	1	1	1		
		$\frac{t_1}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{t_1}}$	$\sqrt{\frac{t_1}{T}}$	$\sqrt{\frac{T}{t_1}}$	$A\frac{t}{T}$	$A^2\frac{t}{T}$

Graphische Berechnung Zeigerdiagramme

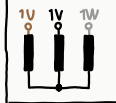
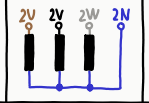
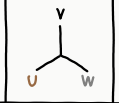
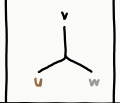
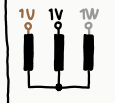
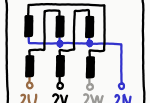
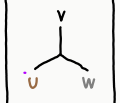
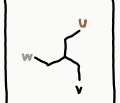
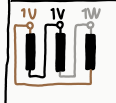
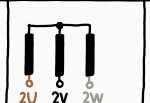
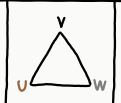
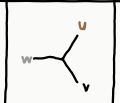
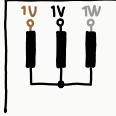
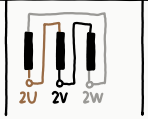
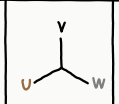


φ = 0 rein ohmsche Last

φ > 0 induktive Last

φ < 0 kapazitive Last

Konstruktion:
1. U_2' senkrecht
2. I_1 mit φ zu U_2'
3. U_R in Phase mit I_1
4. Kappsches Dreieck ⇒ U_1

Schaltung Oberspannungswicklung	Schaltung Unterspannungswicklung	Zeigerbild Oberspannungswicklung	Zeigerbild Unterspannungswicklung	Schaltgruppe	hauptsächlicher Verwendungszweck
				YynO	Stern-Stern Transformatoren, die nicht zur Verteilung dienen
				YznS	Stern-Zickzack Kleine Verteilungstransformatoren mit sekundär voll belastbarem Sternpunkt leiter
				DyS	Dreieck-Stern grosse Verteilungstransformatoren mit sekundär voll belastbarem Sternpunktleiter
				YdS	Stern-Dreieck Maschinentransformatoren für Generatoren grosser Leistung