

Gliederung der KlausurAufgabe 1 - 40 Pkt ~ 45 min

Aufgabe 2 - 20 Pkt

Aufgabe 3 - " $\sim 22,5$ min

Hilfsmittel:

Bücher, Script, Formelsammlung, Schreibzeug, Taschenrechner
verboten:

Übungsaufs. + Log.

Begriffe:Nennwert: geeigneter gerundeter Wert einer Größe zur
Bezeichnung oder Identifizierung eines Elementes,
einer Gruppe, einer EinrichtungGrenzwert: Der in einer Festlegung enthaltene größte oder
kleinste zulässige Wert einer GrößeBemessungswert: Ein für eine vorgegebene Betriebsbedingung
geltender Wert einer Größe der im Abg.
vom Hersteller für ein Element, eine Gruppe
oder Einrichtung festgelegt wird.Beispiele - Mittelspannungsnetz $U_n = 10 \text{ kV}$

$$U_{r, \text{Trabo}} = 12 \text{ kV}$$

- Synchromotor $n_n = 3000 \text{ min}^{-1} = n_r$

da Drehzahl ausschlaggebend für Konstruktion u. Bemessung

Quelle DIN 40200

Verwendung von EVS

Bemessungsstrom; Strangstrom

Bemessungsspannung } Außenleiterspannung
Nennspannung }

Leistungen:

einphasig $p(t) = u(t) \cdot i(t)$

mit $U = \frac{|\hat{u}|}{\sqrt{2}}$ und $I = \frac{|\hat{i}|}{\sqrt{2}}$

folgt nach längerer Herleitung

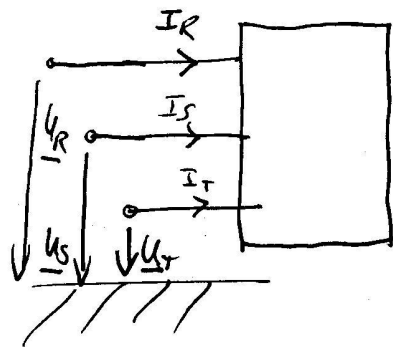
$$P = UI \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

$$Q = UI \sin(\varphi_u - \varphi_i)$$

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ$$

dreiphasig

$$\underline{S} = 3 \underline{U}_R \underline{I}_R^*$$



$$= \sqrt{3} (\sqrt{3} U_R) I_R^*$$

Transformator

Drehstromtransformator

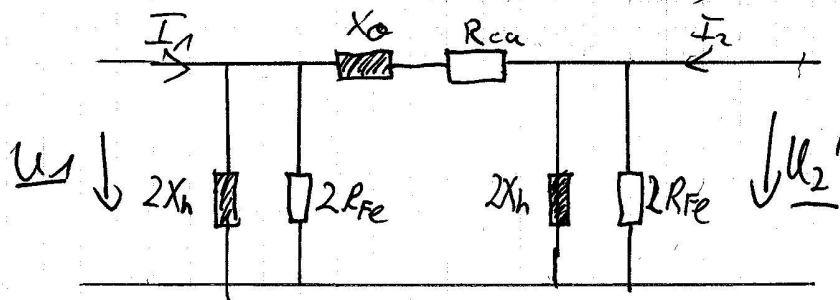
- 3 Phasen ($\neq$ 3 Wicklungen)
- Übersetzungsverhältnis komplex
 - Schaltgruppe berücksichtigen

z. B. $\text{Yd}5 \rightarrow$ US-Seite eilt d. OS-Seite $5 \times 30^\circ = 150^\circ$ nach
OS: Stern $\leftarrow$ $\rightarrow$ US: Dreieck

Übersetzungsverhältnis $\neq$ Wicklungsverhältnis

→ Bild Script 3.8

Ersatzschaltbild : (PT)



mit $U_2' = \dot{u} U_2$ $I_2' = \frac{I_2}{\dot{u}}$

$$\underline{Z}' = \dot{u}^2 \underline{Z}$$

in den Aufgaben i.d.R. Übertrager weglassen

ESB-Elemente

X_0, R_{ca} aus KS

$$R_{ca} \propto P_{cu,r} \left(\frac{U_{r1}}{S_r} \right)^2$$

falls $R_{ca} < X_0$

$$U_{kr} = \frac{U_{kr}}{U_r \sqrt{3}} \Rightarrow X_0 \approx \sqrt{U_{kr}^2 \left(\frac{U_{r1}}{S_r} \right)^2 - R_{ca}^2}$$

$$\approx U_{kr} \frac{U_{r1}}{S_r} \quad \text{ab } \frac{X_0}{R_{ca}} \geq 3$$

R_{Fe}, X_h aus LL

falls $R_{Fe} \gg X_h$

$$R_{Fe} \approx \frac{U_{r1}^2}{P_{Fe,r}}$$

$$X_h \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{3 U_{01}^2}{U_{r1}^2} - \frac{1}{R_{Fe}^2}}} \downarrow \approx \frac{U_{r1}}{\sqrt{3} I_{01}}$$

Stelltransformator

↳ variables Übersetzungsverhältnis

$$\dot{u} = U_r (1 + \frac{\Delta}{100})$$

↑ relative Abweichung

Leitungen:

Leitungskenngrößen

R' → Widerstandsbelag

L' → Induktivitätsbelag

C' → Kapazitätsbelag

G' → Ableitbelag

Ausbreitungskoeffizient:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

Dämpfung Phasenkoef.

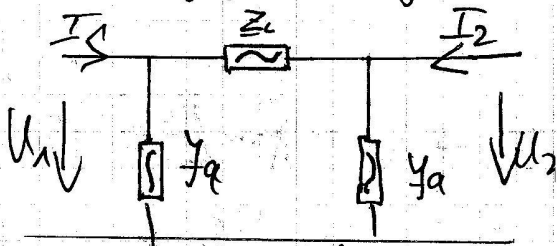
verlustlos

$$\gamma = j\beta = j\omega \sqrt{L'C'}$$

Wellenwiderstand verlustlos

$$Z_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

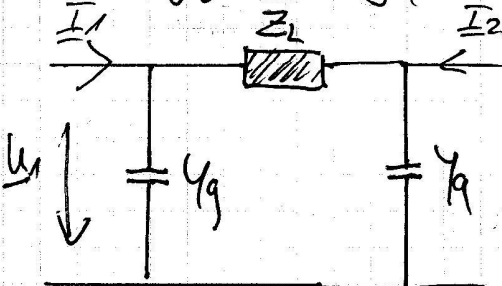
Leitungsgleichung (verlustbehaftet)



$$\begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_w \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_w} \sinh(\gamma l) & -\cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix}$$

$$Y_q = \frac{1}{Z_w} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)$$

Leitungsgleichung (verlustlos)



$$Z_L = j Z_w \sin(\beta l) \quad Y_q = j \frac{1}{Z_w} \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right)$$

Natürliche Leistung

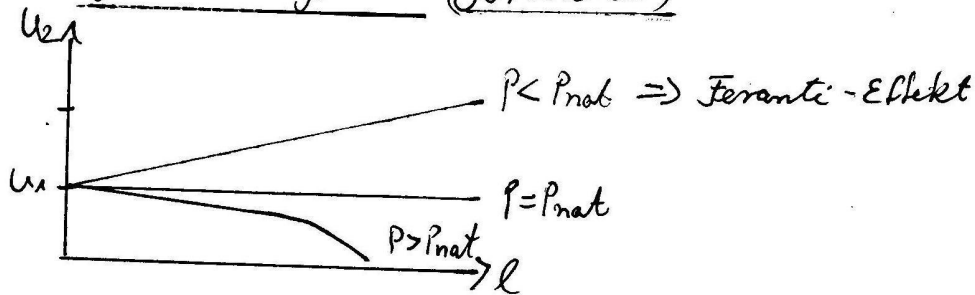
abgegebene Leistung bei Abschluss mit Z_w

$$S_2 = S_{nat} = 3 \frac{U_2^2}{Z_0} \quad (\text{verlustbehaftet})$$

$$P_{nat} = \frac{3 U_2^2}{Z_w} = \frac{U_m^2}{Z_w} \quad (\text{verlustlos})$$

$U_2 = U_m / \sqrt{3}$

Belastungsfälle (verlustlos)



$$R_L = Z_w \Rightarrow U_2 = U_1 \quad I_2 = I_1$$

$$P_1 = P_2 = P_{nat}; \quad Q_1 = Q_2 = 0$$

$R_L > Z_w$ (Schwachlast)

$$Q_1 < 0 \quad \frac{1}{\tau}$$

$$U_2 > U_1 \quad I_2 < I_1$$

$$P_1 = P_2 < P_{nat}$$

$R_L < Z_w$ (Starklast)

$$\Rightarrow Q_1 > 0 \quad \text{--- ~~---~~ ---}$$

$$U_2 < U_1 \quad I_2 > I_1$$

$$P_1 = P_2 > P_{nat}$$

$\Rightarrow$ Leitung selbst benötigt Blindleistung
Kompensation

— $S_2 > P_{nat}$ Längskompensation —

$$\tilde{\beta} = \beta \sqrt{1 - k_L} \quad k_L: \text{Kompensationsgrad}$$

$$\text{da } \tau = (1 - k_L)L$$

$$\Rightarrow \tilde{Z}_w = Z_w \sqrt{1 - k_L} \Rightarrow \tilde{P}_{nat} = \frac{P_{nat}}{\sqrt{1 - k_L}}$$

$$\Rightarrow \tilde{L} \downarrow \Rightarrow Z_w \downarrow \Rightarrow \tilde{P}_{nat} \uparrow$$

— $S_2 < P_{nat}$ Querkompensation $\tilde{C}' = (1 - k_q)C'$

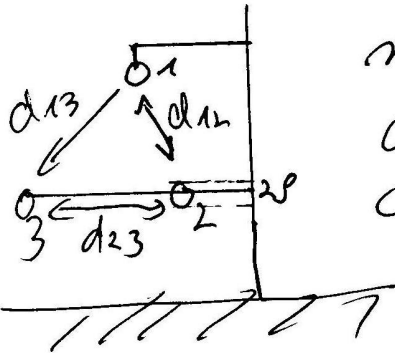
$$\tilde{\beta} = \beta \sqrt{1 - k_q} \quad \text{da } C' = (1 - k_q)C'$$

$$\Rightarrow \tilde{Z}_w = \frac{Z_w}{\sqrt{1 - k_q}}; \quad P_{nat} = P_{nat} \sqrt{1 - k_q}$$

$$\Rightarrow \tilde{C}' \downarrow \Rightarrow \tilde{Z}_w \uparrow \Rightarrow \tilde{P}_{nat} \downarrow$$

Berechnung v. L' und C'

geometrische Anordnung der Leiter



mittlerer geometr. Abstand

$$d = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}}$$

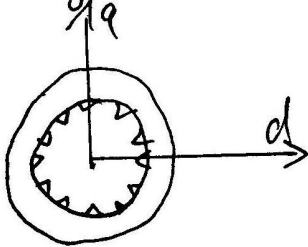
n = Anzahl Leiter

$$C' \approx \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{d}{\rho_B}}$$

$$L' \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{\rho_B e^{-\frac{1}{4n}}}$$

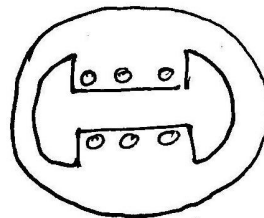
Synchrongenerator

Turbogenerator



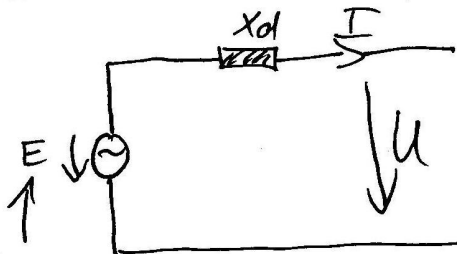
$$X_q = X_d$$

Schenkelgenerator



$$X_q \neq X_d$$

Ersatzschaltbild Turbogenerator



$$\underline{U} = \underline{E} - j X_d \underline{I}$$

$\uparrow$ Polradspannung
 $\uparrow$ Generatorklemmenspannung

Phasenspannung

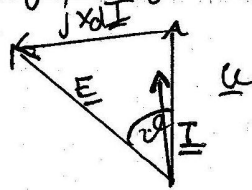
Bsp.: $\underline{U} = U$ $\underline{E} = E e^{j\alpha}$ $\leftarrow$ Polradwinkel
 $\sim$ zum Erregerstrom und Ständer
 $=$ Winkel zw. Drehfeld des Rotors

$$X_d = X_d \quad X_r = X_d \frac{u_r}{\sqrt{3} I_r} = X_d \frac{a_r^2}{s_r}$$

$\uparrow$
 Bemessungsreaktanzen

X_d bezogene synchrone Reaktanz analog zu u_k

Zeigerdiagramm ohne Beschreibung



$\Rightarrow$ Vom Generator abgegebene Wirkleistung

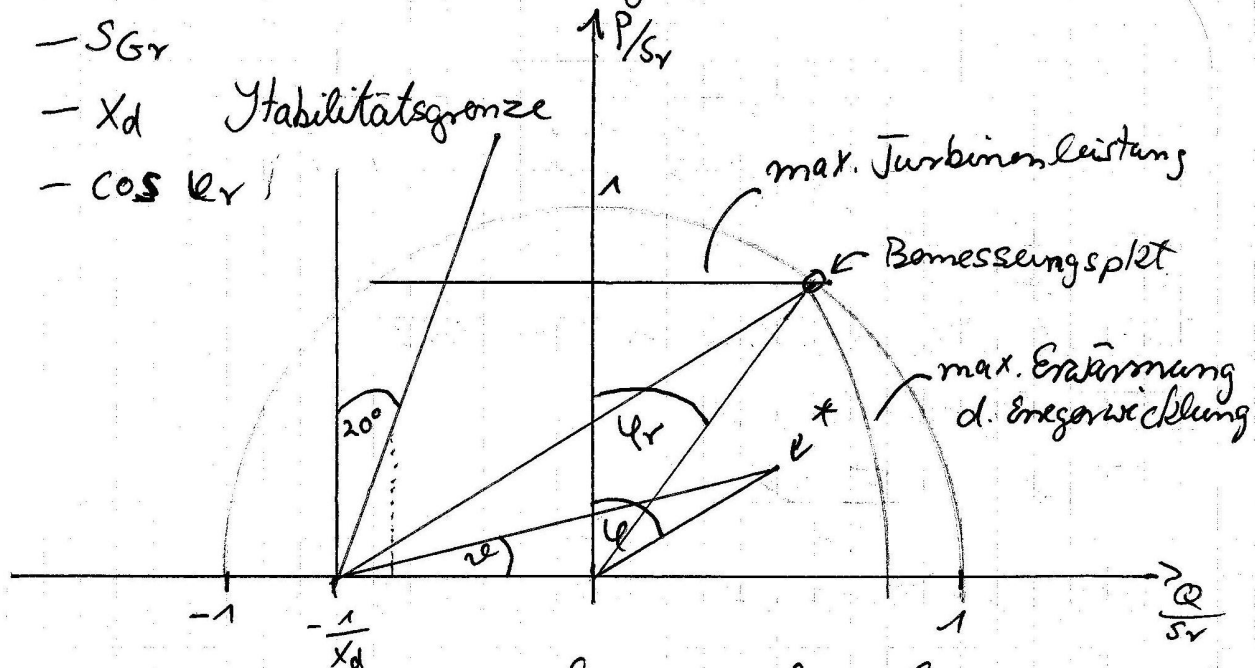
$$P_0 = 3 \frac{E_U}{X_d} \sin \varphi \neq S_G \text{ (Scheinleistung v. Generator)}$$

Betriebsdiagramm des Turbogenerators

- SGr

- X_d Stabilitätsgrenze

- $$- \cos \theta_Y$$



möglicher Betriebspkt* $\leq$ nie mehr als 20°

Verbraucher

Stationäre Verbrauchermodelle

- konstante Leistung

$$\underline{P + jQ} = 3 \underline{UI}^* \Rightarrow$$

Konstant $\uparrow$ Phasenspannung

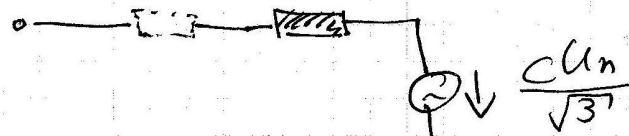
- PQ-Knoten bei Lastfluss

- Konstante Impedanz

$$\underline{Z} = \frac{u}{\underline{I}} \approx \frac{p + jQ}{3|\underline{I}|^2}$$

Querbed. für Lastheles

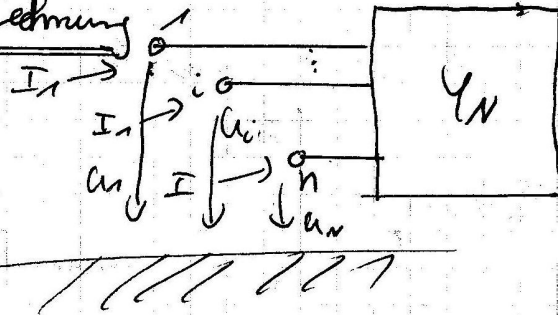
Kurzschlussmodell Asynchronmotor



$$Z_n' = \left(\frac{I_{en}}{I_{rn}} \right)^{-1} \frac{U_{rn}^2}{S_{rn}}$$

$I_{en} = I_{Anlauf}$

Lastflussberechnung



$$\underline{I} = \underline{Y}_N \underline{U}$$

Knotenadmittanzmatrix aus π -ESB

Nebendiagonalelemente

$$Y_{n,ik} = - \sum_m Y_{L,m}$$

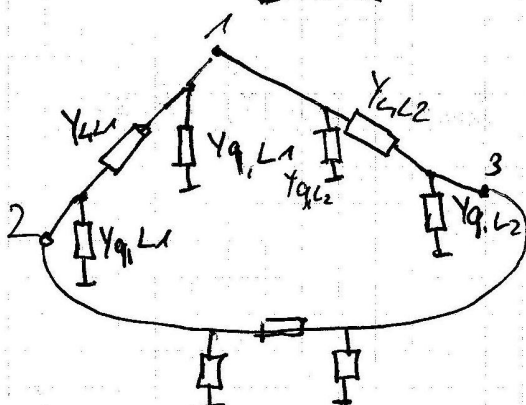
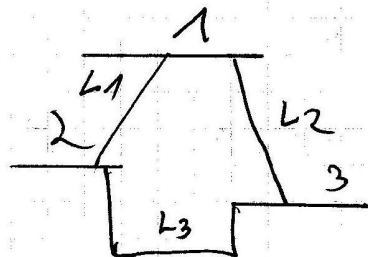
Längsadmittanzen zw. Knoten i und k

Hauptdiagonalelemente

$$Y_{N,ii} = \sum_m (Y_{q,im} + Y_{L,im})$$

$\nwarrow$ Quer
 $\nearrow$ Längs

Bsp.:



$$\underline{Y}_N = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix}$$

$$Y_{11} = Y_{q,L1} + Y_{q,L2} + Y_{L,L1} + Y_{L,L2}$$

$$Y_{12} = -Y_{L,L1}$$

Lastflussformel

$$\underline{\vec{I}} = \underline{\vec{Y}}_N \underline{\vec{U}}$$

$$\Rightarrow \underline{\vec{S}} = 3 \cdot \text{diag}(\underline{\vec{U}}) \cdot \underline{\vec{Y}}^* \underline{\vec{U}}^*$$

→ Zustandsgröße für jeden Knoten

$$P_i, Q_i, U_i, \varphi_i$$

Knotentypen

Knoten	bekannt	gesucht
PV	P_i, U_i	Q_i, φ_i
PQ	P_i, Q_i	U_i, φ_i
SLACK	U_i, φ_i ↑ = 0	P_i, Q_i

Lösungsverfahren

- Newton-Raphson
- schneller-entkoppelter Lastfluss

Wirklastflussberechnung

Voraussetzung:

- kleine Verluste

- kleine Spannungswinkeldifferenzen
- einheitliche Knotenspannungen
- $U_i \approx \frac{U_0}{\sqrt{3}}$

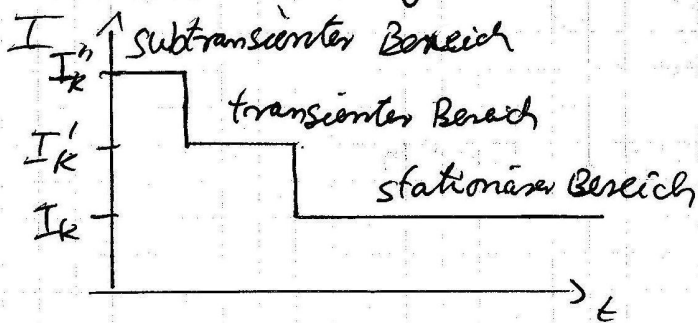
$$\vec{P} = U_0^2 \cdot \underline{\vec{B}}' \vec{\varphi}$$

berechnet aus $\underline{\vec{Y}}$ mit $B'_{ii} = \sum_{i \neq q} |Y_{iq}|$ $B'_{ij} = -|Y_{ij}|$

Kurzschlussstromberechnung

zeitlich veränderter KS-Strom

→ Nachbelastung durch Zeitintervalle



⇒ näherungsweise Berechnung v. I_k'' mittels komplexer Wechselstromleistung

- Anfangs KS-Wechselstromleistung

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$$

fiktiv - VDE 0102: Vereinfachungen:

- Vernachlässigung von Quergliedern
- " " ohmschen Anteilen

Falls $\frac{R_k}{X_k}$ d. KS-impedanz $< 0,3$

- Vernachlässigung nicht ohmscher Verbraucher
- Einheitliche Polradspannung $E'' = C \frac{U_n}{\sqrt{3}}$
- Asynchronmotoren falls Betrag $\leq 5\%$

Berechnungsverfahren:

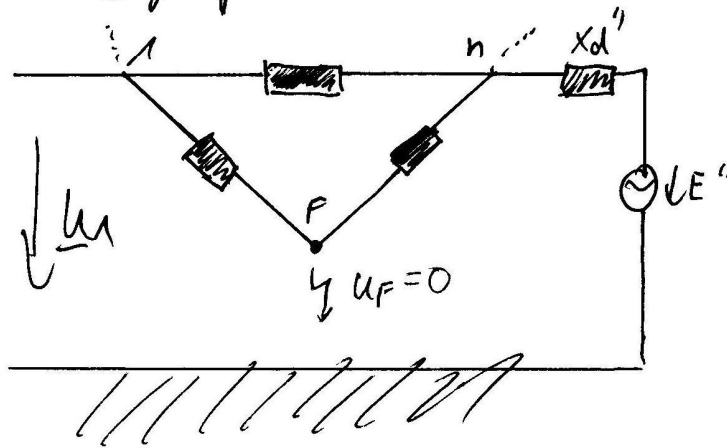
Superposition:

- Überlagerung: Zustand vor Fehlereintritt

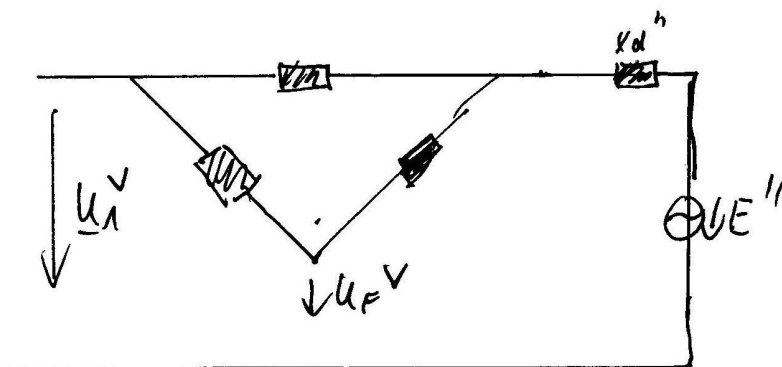
Änderung des Zustands

Zustand nach Fehlereintritt

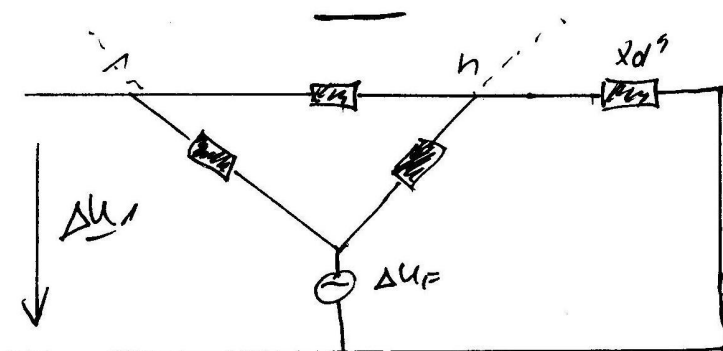
Superposition: KS



=



$U_{or} = V$



Superposition: $\underline{U}_i = \underline{U}_i^V - \Delta \underline{U}_i$

an Fehlerstelle: $U_F = 0 \Rightarrow \underline{U}_F^V = \Delta \underline{U}_F$

$\underline{I}_K'' = \underline{I}_K^V - \Delta \underline{I}_K$

- Ersatzspannungsquellenverfahren

$\Rightarrow$ Vernachlässigung des V-Systems

$\Rightarrow \underline{U}_F^V \approx C \frac{\underline{U}_n}{\sqrt{3}}$ mit $C = \begin{cases} 1,0 & \text{falls } \leq 1 \text{ kV} \\ 1,1 & \text{falls } > 1 \text{ kV} \end{cases}$

$\underline{I}_K^V \approx 0$

11