
EN Formelsammlung

Tony Pham

14. Dezember 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Deckung des Energiebedarfs	2
1.1	Frequenz-Wirkleistungsregelung	2
1.2	Belastungsdiagramm, -dauer T_n	2
2	Transformatoren	2
2.1	Grundlagen	2
2.1.1	Grundgleichungen idealer Trafo	2
2.1.2	Bemessung Trafos	2
2.1.3	Wachstumsgesetze	2
2.2	ESB Trafo	2
2.3	Betriebskonstanten	2
2.3.1	Kurzschlussmessung	2
2.3.2	Berechnung Betriebskonstanten	3
2.4	Trafo-Schaltgruppen	3
2.5	Parallelbetrieb Trafos	3
2.5.1	Parallelbetrieb: Leerlauf	3
2.5.2	Parallelbetrieb: Last	3
3	Freileitungen	3
3.1	Betriebskonstanten	3
3.1.1	Resistanzbelag	3
3.2	Reaktanzbelag	4

1 Deckung des Energiebedarfs

1.1 Frequenz-Wirkleistungsregelung

a) stationärer Zustand (Gleichgewicht)

$$W_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{mech}^2 \quad \omega_{el} = p \cdot \omega_{mech}$$
$$W_{mech-zu} = W_{el-ab} \quad P_{mech-zu} = P_{el-ab}$$

p : Polpaarzahl J : Massenträgheitsmoment

b) Störung

Sprunghafte Zunahme um $\Delta P \Rightarrow$ Abbremsen der Rotoren \Rightarrow Sinken der Drehzahl aller Generatoren \Rightarrow fehlende Energie wird aus gesp. Rotationsenergie aller elek. Maschinen übernommen ΔW_{rot}

$$W_{m-zu} \neq W_{el-ab} \quad P_{m-zu} \neq P_{el-ab}$$
$$\Delta W_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{stat} - \omega_{akt})$$

1.2 Belastungsdiagramm, -dauer T_n

$$W_{el} = P_n \cdot T_a = P_{max} \cdot T_m = P_{mittel} \cdot T_n$$

2 Transformatoren

2.1 Grundlagen

2.1.1 Grundgleichungen idealer Trafo

$$U_{ieff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}$$
$$= 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe}$$

Spannungstrafo:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$
$$\underline{U}'_2 = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$$

Stromtrafo:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$$
$$\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}}$$

Impedanztrafo:

$$Z_1 = \ddot{u}^2 \cdot Z_2$$
$$R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$$
$$L'_{2\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma}$$

Durchgangsleistung:

$$S_1 = S_2 = S_D$$

2.1.2 Bemessung Trafos

$$N_1 \cdot A_{L1} = N_2 \cdot A_{L2}$$
$$A_{Lges,1} = A_{Lges,2} = A_{cu,ges}$$

Windungsspannung:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = U_{W1} = U_{W2} = U_W$$
$$U_W \approx k \cdot A_{Fe}$$

Bemessungsleistung 3-Phasen-Trafo:

$$S_{rT} = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \hat{B}_{zul} \cdot J_r \cdot (A_{Fe} \cdot A_{Cu})$$
$$S_{rT} = k \cdot (A_{Fe} \cdot A_{Cu})$$

Auslegung:

$$f = 50Hz, B = 1,7T - 1,8T,$$
$$A_{Fe} = 1,2 \frac{A}{mm^2}$$

2.1.3 Wachstumsgesetze

Frage: 1 Trafo (900MVA) wirtschaftlicher als 3 Trafos (je 300 MVA)?

$$A_{Fe,neu} = A_{Fe} \cdot k^2 \quad A_{cu,neu} = A_{cu} \cdot k^2$$
$$V_{neu} = V \cdot k^3 \quad S_{rT,neu} = S_{rT} \cdot k^4$$

Gewicht: $m_{neu} = m \cdot k^3 \Rightarrow$ Kosten \downarrow

Verluste: $P_{V,Cu,neu} = P_{V,Cu} \cdot k^3$

Verluste: $P_{V,Fe,neu} = P_{V,Fe} \cdot k^3$

$$P_{V,ges,neu} = P_{V,ges} \cdot k^3 \Rightarrow \text{Wirkungsgrad } \eta \uparrow$$

Kühlung: $A_{Huell,neu} = A_H \cdot k^2$

\Rightarrow relative Kühlfläche \downarrow , Aufwand Kühlung \uparrow

1 Trafo wirtschaftlicher!

2.2 ESB Trafo

Maschengleichung: $\begin{pmatrix} R_1 & j\omega L'_{1\sigma} \\ R'_2 & j\omega L'_{2\sigma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ -\underline{I}'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}'_2 \end{pmatrix}$

$$U_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 - R'_2 \cdot \underline{I}'_2 - j\omega L'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{U}'_2$$

Mit $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2$ und $\underline{U}'_2 = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$:

$$U_1 = (R_1 + R_2) \cdot \underline{I}_1 + j(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}) \cdot \underline{I}_1 + \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$$

Mit $R_T = R_1 + R_2$ und $X_T = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}$:

$$U_1 = (R_T + jX_T) \cdot \underline{I}_1 + \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$$

2.3 Betriebskonstanten

2.3.1 Kurzschlussmessung

Kurzschluss(KS) der Klemmen an **OS/US**

\Rightarrow Messen der Spannung an **US/OS**

\Rightarrow Angabe relative KS-Spannung u_k in %

komplexe KS-Spannung: $\underline{U}_{kn} = U_{kn,R} + jU_{kn,X}$

$$u_{k1} = \frac{U_{k1}}{U_{rT1}/\sqrt{3}}$$

$$u_{k1} = u_{k2} = u_k = u_{kR} + j u_{kX}$$

$$\text{KS-Strom: } I_k = \frac{I_{rT}}{u_k}$$

$$\text{KS-Spannung: } U_k = u_k \cdot U_{rT}$$

2.3.2 Berechnung Betriebskonstanten

Betrag Impedanz Z :

$$Z_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{\sqrt{3} I_{rT} U_{rT}} = \frac{u_k \cdot U_{rT}^2}{100\% \cdot S_{rT}} = \frac{u_k}{100\%} \cdot Z_{Bezug}$$

Resistanz R :

$$R_T = u_{kR} \cdot \frac{U_{rT}}{\sqrt{3} I_{rT}} = \frac{u_{kR} \cdot U_{rT}^2}{100\% \cdot S_{rT}} = P_{kT} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$$

$$u_{kR} = \frac{P_{kT}}{S_{rT}}$$

$$u_{kX} = \sqrt{u_k^2 - u_{kR}^2}$$

Reaktanz X :

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = u_{kX} \cdot \frac{U_{rT}}{S_{rT}}$$

Leistung Kurschlussverlust P_{kT} :

$$P_{kT} \approx 3 \cdot R_T \cdot I_{rT}^2$$

2.4 Trafo-Schaltgruppen

tableofcontents

tableofcontents

tableofcontents

2.5 Parallelbetrieb Trafos

Allgemein:

$$\underline{U}_{1,T1} = \underline{U}_{1,T2} = \underline{U}_{1T}$$

$$\underline{U}_{2,T1} = \underline{U}_{1T} \cdot \ddot{u}_{T1} \cdot e^{j\alpha_{T1}}$$

$$\underline{U}_{2,T2} = \underline{U}_{1T} \cdot \ddot{u}_{T2} \cdot e^{j\alpha_{T2}}$$

$$\underline{S}_{T,ges} = \underline{S}_{T1} + \underline{S}_{T2}$$

2.5.1 Parallelbetrieb: Leerlauf

$$\underline{I}_M = \frac{\Delta \underline{U}}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2}} = 0$$

$$\underline{I}_{T1} = \underline{I}_{T2} \Rightarrow$$

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_{2,T1} - \underline{U}_{2,T2} = 0$$

$$\ddot{u}_{T1} = \ddot{u}_{T2}$$

$$\alpha_{T1} = \alpha_{T2}$$

Bsp.: Dy5 || Yz5 möglich!

2.5.2 Parallelbetrieb: Last

$$u_{k,T1} \neq u_{k,T2} \quad S_{r,T1} \neq S_{r,T2}$$

Stromteiler:

$$I = I_{T1} + I_{T2}$$

$$\underline{I}_{T1} = \frac{\underline{Z}_{T2}}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2}} \cdot \underline{I}$$

$$\frac{\underline{I}_{T1}}{\underline{I}_{T2}} = \frac{\underline{Z}_{T2}}{\underline{Z}_{T1}}$$

$$S_{T1} = \left| \frac{Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \right| \cdot S_{T,ges}$$

$$S_{T2} = \left| \frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \right| \cdot S_{T,ges}$$

$$\frac{I_{T1}}{I_{T2}} = \frac{u_{k,T2}}{u_{k,T1}} \cdot \frac{S_{rT1}}{S_{rT2}} = \frac{S_{rT1}}{S_{rT2}}$$

$$\Rightarrow u_{k,T1} = u_{k,T2}$$

gleiche Belastung T1 & T2 bei $S_{r,T1} \neq S_{r,T2}$

3 Freileitungen

3.1 Betriebskonstanten

$$R' = \frac{R_L}{l} \quad L' = \frac{L_L}{l}$$

$$\underline{Z}' = R' + jX' \quad \underline{Y}' = G' + jB'$$

$R' :=$ Resistanzbelag Ω/km oder $m\Omega/m$

$X' = \omega L' :=$ Reaktanzbelag

$G' :=$ Konduktanzbelag nS/km oder pS/m

$B' = \omega C' :=$ Suszeptanzbelag

3.1.1 Resistanzbelag

a) Gleichstromwiderstand

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{\rho_{20^\circ C}}{A_{eff}}$$

$$F_\vartheta = 1 + \alpha \cdot (\vartheta_{max} - 20^\circ C)$$

A_{eff} : Wirksamer Querschnitt

F_ϑ : R-erhöhung durch Leitererwärmung

ϑ_{max} : max. zul. Betriebstemp. des Leiterseils

¡Bild Folie 39 einfügen!

b) Wechselstromwiderstand

$$J = J \cdot e^{-x/\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \kappa \mu f}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

$$F_S = \frac{R'_{AC}}{R'_{DC}}$$

$$A_{AC} = 2\pi \cdot r \cdot \delta < A_{DC}$$

J : Stromdichte an Leiteroberfläche

x : Eindringtiefe in Leitung

δ : Eindringtiefe

F_S : R-Erhöhung durch Skineffekt

F_S Werte aus Folie 42 entnehmen!!!

c) Betriebsresistanzbelag R_b

$$R'_b = R'_{DC} \cdot F_\vartheta \cdot F_S$$

$$R'_b = \frac{R'_{b,Seil}}{n}$$

n : Anzahl Teilleiter

test

test

test

test

3.2 Reaktanzbelag

a) Induktivität von zweier paralleler Leiter

$$\begin{aligned}L' &= \frac{L}{l} \\L'_a &= \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \ln \frac{D}{r} \\L'_i &= \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{1}{4} \\L'_{ges} &= L'_a + L'_i = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left[\ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \right] \\D &\gg r\end{aligned}$$

L'_a : äußerer Leiterbelag

L'_i : innerer Leiterbelag

D : Leiterabstand

b) Zwei-Phasen-Leiter / AC-Leitung (L1/L2)

$$\begin{aligned}L'_b &= \frac{X'_b}{\omega} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \right] \frac{H}{m} \\X'_b &= \omega \cdot L'_b = \pi \cdot \left[4 \ln \frac{D}{r} + 1 \right] \cdot 10^{-2} \frac{\Omega}{km}\end{aligned}$$

c) Drehstromleitung

$$x'_b =$$