

1 Wechsel- und Drehstromrechnung

Ohmscher Widerstand R

u und i können sprunghaft ändern

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

$$i(t) = \frac{u(t)}{R}$$

$$\underline{Z} = R$$

$$\underline{Z} = R + jX = |Z| \cdot e^{j\varphi} = \frac{U^2}{S^*}$$

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$$

verkettete Spannung U : $U = \sqrt{3} \cdot U_{Str}$

Kapazität C

u kann nicht sprunghaft ändern

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + u(0)$$

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = -j \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$|\underline{Z}| = Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$P = \Re(\underline{S}) = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Induktivität L

i kann nicht sprunghaft ändern $u(t) =$

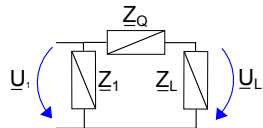
$$L \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau + i(0)$$

$$\underline{Z} = j \cdot \omega \cdot L$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\Im(\underline{Z})}{\Re(\underline{Z})} \right) = \arctan \left(\frac{X}{R} \right)$$

$$Q = \Im(\underline{S}) = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$



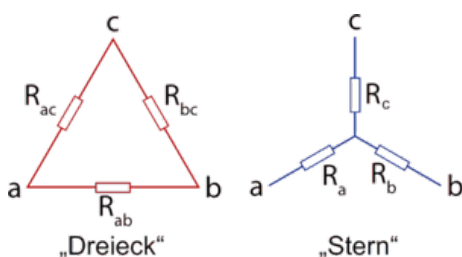
$$\underline{U}_L = \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_Q} \cdot \underline{U}_1$$

2 Grundlagen Drehfeldmaschinen

2.0.1 Stern- (Y) / Dreieckschaltung (Δ)

	Sternschaltung (Y)	Dreieckschaltung (Δ)
Verkettete Spannung	$U = U_{Str} \cdot \sqrt{3} \quad \underline{U} = \underline{U}_{Str} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}$	$U = U_{Str} \quad \underline{U} = \underline{U}_{Str}$
Aussenleiterströme	$I = I_{Str} \quad \underline{I} = \underline{I}_{Str}$	$I = I_{Str} \cdot \sqrt{3} \quad \underline{I} = \underline{I}_{Str} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j30^\circ}$
Gesamt-Scheinleistung	$S = 3 \cdot S_{Str} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad \text{in [VA]}$	$S = 3 \cdot S_{Str} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad \text{in [VA]}$
Scheinleistung pro Strang	$S_{Str} = U_{Str} \cdot I_{Str} \quad \text{in [VA]}$	
Wirkleistung	$P = S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{in [W]}$	
Blindleistung	$Q = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad \text{in [var]}$	

2.0.2 Stern-Dreieck-Umwandlung



Umwandlung $\Delta \rightarrow Y$:

$$Z_c = \frac{Z_{ac} Z_{bc}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ac}}$$

$$I_{ab} = \frac{I_a \cdot Z_a - I_b \cdot Z_b}{Z_{ab}}$$

Umwandlung $Y \rightarrow \Delta$:

$$Y_{ac} = \frac{Y_a Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

Bei gleichen Widerständen:

$$R_Y = \frac{R_\Delta}{3}$$

Bei gleichen Kapazitäten:

$$C_Y = C_\Delta \cdot 3$$

Bei gleichen Induktivitäten:

$$L_Y = \frac{L_\Delta}{3}$$

3 Drehstrom- Synchronmaschinen(DSM)

3.1 Ersatzschaltbild

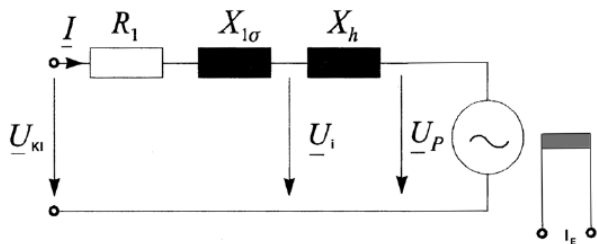


Abbildung 1: Ersatzschaltung DSM

Es gibt 2 Unterteilungen:

Wirkleistung: Gibt die DSM leistung ab oder nimmt sie auf. Zu erkennen ist das am Phasenwinkel zwischen U_{KL} und U_P . Ist U_P voreilend, so ist es ein **Generator**, anderseits ein **Motor**.

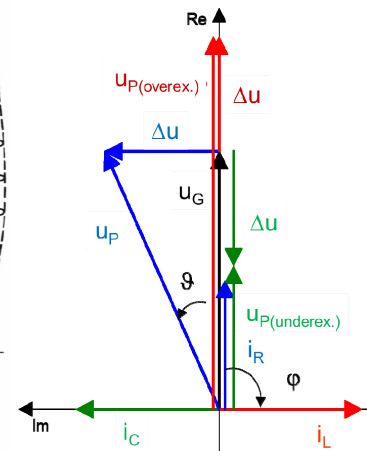
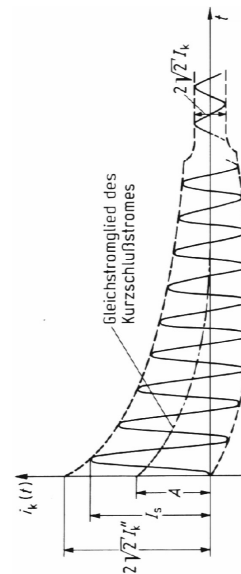
Blindleistung: Blindleistung Auf- oder Abgabe. Bei **Übererregung** oder auch **kapazitiven Betrieb** gibt der DSM Blindleistung ab. Bei **Untererregung** oder auch **induktiven Betrieb** nimmt er auf.

3.1.1 Phasenschieber

Ein DSG, der im Idealfall nur Blindleistung mit dem Netz austauscht. In der Praxis müssen die Verluste des DSG (Reibung, Ventilation, Stromwärme etc.) entweder vom Netz oder von einer Antriebsmaschine gedeckt werden. Der Phasenschieber kennt folgende Betriebsmodi:

- **übererregt** ($U_p > U_N$): der DSG gibt Blindleistung ab, verhält sich also bezüglich seiner Klemmen wie ein Kondensator.
- **untererregt** ($U_p < U_N$): der DSG nimmt Blindleistung auf, verhält sich also bezüglich seiner Klemmen wie eine Induktivität.

	Übererregung	Untererregung
Motor		
Generator		



3.2 Allgemeine Formeln

Polpaarzahl	p
Drehfeldzahl [s^{-1}] bzw. [min^{-1}]	$n = \frac{f}{p}$ bzw. $n = \frac{f \cdot 60}{p}$
Schlupf [-]	$s = \frac{n_d - n}{n_d}$
Spannungsfall über Synchroner Reaktanz	$\underline{U}_{XD} = jX_d \cdot \underline{I}$
Leerläufererregestrom für Nennspannung	I_{E0N}
Lastabhängiger Erregestrom	$\frac{I_{Eneu}}{I_{Ealt}} = \frac{U_{Pneu}}{U_{Palt}}$ (im Leerlauf ist $U_p = U_{KL}$)
Klemmenspannung	$U_{kl} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$

Strang- bzw. Phasenspannung	$\underline{U}_{kl} = \underline{U}_p + \underline{U}_{XD}$
Polradspannung	$U_p = \sqrt{U_{kl}^2 + X_d^2 \cdot I^2 + 2 \cdot U_{kl} \cdot X_d \cdot I \cdot \sin \varphi}$
Elektrischer Lastwinkel oder Polradwinkel gem. ESB	$\vartheta = \arg(U_p)$ (Winkel zwischen \underline{U}_p und \underline{U}_{kl}) $ U_p \cdot \sin(\vartheta) = U_{XD} \cdot \cos(\Phi)$
Wirkleistung des DSG	$P_{el} = 3 \cdot U_{kl} \cdot \frac{U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta = 3 \cdot U_{kl} \cdot I \cdot \cos \varphi = M \cdot \omega \cdot \eta$
Wirkkomponente des Statorstroms	$I \cdot \cos \varphi = \frac{U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta$
Antriebsmoment des DSG	$M_{Welle} = \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n \cdot \eta} \cdot U_{kl} \cdot \frac{U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta = \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n \cdot \eta} \cdot U_{kl} \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{P_{mech}}{\omega}$ $= \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N \cdot p}{\eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N}$
Leistung für Turbogeneratoren	$S_N = c \cdot n \cdot D^2 \cdot l_i$; $c = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot 0.9 \cdot A \cdot B_\delta$ $A = \frac{p' \cdot \text{number}_{phase} \cdot N \cdot I}{D \cdot \pi}$
p.u.	$x_d = X_d \frac{I_N}{U_N / \sqrt{3}} = X_d \frac{S_N}{U_N^2}$; $u_{kl} = \frac{U_{kl}}{U_N}$; $i_{kl} = \frac{I_{kl}}{I_N}$
Spannung unter Last (siehe Abb. 3.1)	$\Delta \underline{u} = \underline{i} \cdot jx_d = (i_R - j i_L + j i_C) = i_L x_d - i_C x_d + j i_R x_d$ $\underline{u}_p = u_{kl} + \Delta \underline{u} = u_{kl} + i_L x_d - i_C x_d + j i_R x_d$
Short circuit of an SM (siehe Abb. 3.1) I_k'' : Initial SC AC current I_S : maximal asymmetric SC current I_k : continuous SC current x_d'' : normally 10 times lower than x_d (0 – 100ms), subtransient x_d' : is as twice as high than x_d'' (100 – 500ms), transient $\underline{u}_{0\lambda}, \underline{i}_0$: values before SC	$i_k(t) = (i_k'' - i_k') e^{-\frac{t}{T_d''}} + (i_k' - i_k) e^{-\frac{t}{T_d'}} + i_k$ $i_k'' = \frac{e''}{jx_d''}$ $e'' = \underline{u}_{0\lambda} + jx_d'' \cdot \underline{i}_0 \approx 1.1$ (worst case) $i_k' = \frac{e'}{jx_d'}$ $e' = \underline{u}_{0\lambda} + jx_d' \cdot \underline{i}_0 \approx 1.15$ $i_k = \frac{e}{jx_d}$ $e = \underline{u}_{0\lambda} + jx_d \cdot \underline{i}_0$

3.3 Betriebsverhalten

Siehe Abbildung 1

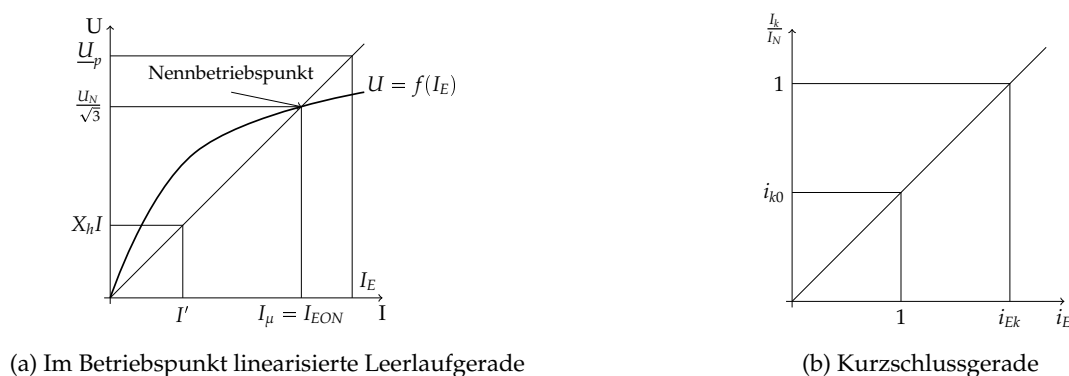


Abbildung 1: Kurven in den Verschiedenen Betriebsarten

Leerlauf $I_E = \frac{U_p \cdot \sqrt{3} \cdot I_{EON}}{U_N}$ Die Formel ist für die linearisierte Gerade
 I_E : Erregerstrom
 U_p : verkettete Nennspannung des DS- Netzes
 I_{EON} : Leerläuferregerstrom für Nennspannung

Kurzschluss $X_d = \frac{U_p}{I_{k0}}$ Gilt unter Vernachlässigung des Wicklungswiderstand
 Die Kurzschlussgerade ist linear

3.3.1 Netzbetrieb

Im Netzbetrieb wird die Frequenz, Klemmenspannung, Umlaufsinn und Phasenlage vom Netz vorgegeben. Das heisst bevor man mit einer DSM ans Netz will, muss man sie so synchronisieren, dass alle jene Parameter mit dem Netz übereinstimmen. Sind die Maschine und Netz synchronisiert und zusammengeschaltet, kann mit Hilfe von I_E und der mechanischen Leistung der Blindstromanteil eingestellt werden:

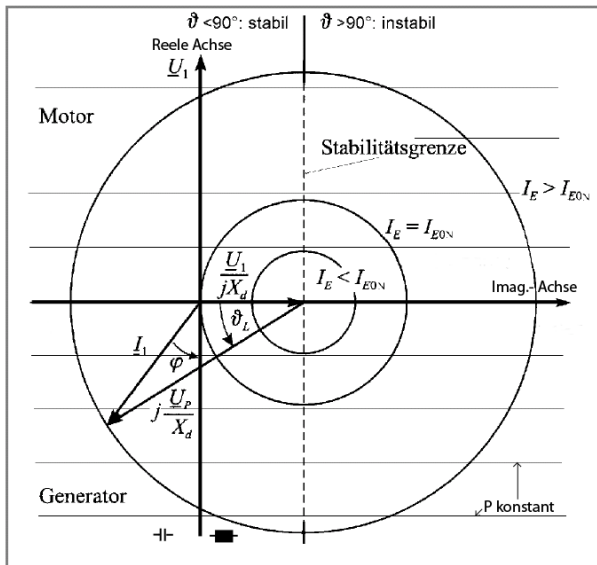


Abbildung 2: Ortskurve einer DSM im starren Netz

- Da $U_{kl} = U_1$ konstant ist, ist der Ursprung des Zeigers $\frac{j \cdot U_p}{X_d}$ immer am gleichen Ort.
- Mit dem Erregerstrom kann man die Länge des Zeigers $\frac{j \cdot U_p}{X_d}$ einstellen.
- Die mechanische Leistung ist proportional zum Abstand der Zeigerspitze zur Imaginärachse.
- Die Blindleistung ist proportional zum Abstand der Zeigerspitze zur Reellenachse.
- Ist nun die mechanische Leistung konstant und man ändert den Erregerstrom, so wandert die Zeiger auf einer Linie parallel zur Imag-Achse hin und her.
- Überschreitet der Zeiger die Stabilitätslinie, schlüpft der Läufer durch und es gibt grosse Lärm- und Wärmeentwicklung, da die mechanische Leistung zu gross wird für den Erregerstrom.
- Bleibt der Erregerstrom konstant und die mechanische Leistung ändert sich, so wandert der Zeiger auf dem Kreis um $(0, \frac{U_{kl}}{j \cdot X_d})$. Jedoch wiederum nur bis zur Stabilitätsgrenze, da dort die Wirkleistung für diesen Erregerstrom maximal ist.

4 Netze

4.1 Komponenten und Technologie von Stromnetzen

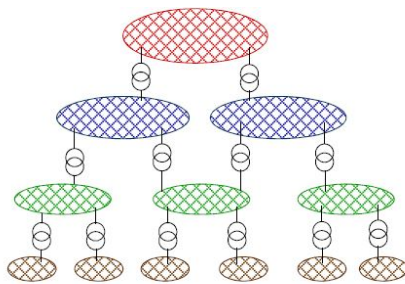
Netzebenen

Höchstspannung
380 kV, 220 kV
> 300 MVA

Hochspannung
150 kV bis 50 kV
100 MVA

Mittelspannung
36 kV bis 6 kV
< 30 MVA

Niederspannung
0,4 kV
< 1 MVA



- Netzebene 1** NE1: Verteilnetz (Ausdehnung national, international)
- Netzebene 2** Topologie: stark vermaschtes Netz, Freileitungen
- Netzebene 3** NE3: überregionales Verteilnetz (Ausdehnung mehrere Kantone)
leicht vermaschtes Netz oder Ringnetz, Freileitungen
- Netzebene 4** NE4: Transformierung NE3 zu NE5
- Netzebene 5** NE5: Verteilnetz (Ausdehnung Kanton, Tal)
Ringnetz, Strahlennetz, Freileitungen und Kabel
- Netzebene 6** NE6: Verteilnetz (Ausdehnung Gemeinde)
offener Ring, Strahlennetz, Freileitungen und Kabel
- Netzebene 7**

Entso-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity

4.2 Leitungsbeläge

Widerstandsbelag

Ursache: ohmscher Widerstand des Leiters

$$R' = \sigma \frac{\rho}{A}, R' \text{ in } \Omega/m$$

σ : Verseilfaktor ($\sigma \approx 1.07$), ρ : Leitungsfähigkeit in $\Omega mm^2/m$,

A : Leiterquerschnitt in mm^2 , k_{SR} : Skineffekt

Induktivitätsbelag

Ursache: Verkettung der magnetischen Flüsse

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\ln \frac{d}{r_{eq}} + \frac{1}{4} \right) \quad d = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{31}}$$

r : Leiterradius in m , d : mittlerer Leiterabstand in m

d_{ij} : Abstand zwischen Phase i und j

Ableitbelag

Ursache: Korona- und Kriechstromverluste an der Oberfläche

G' in $S/m \Rightarrow$ kann in vielen Fällen vernachlässigt werden

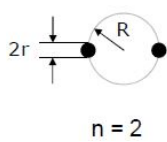
Kapazitätsbelag

Überlagerung der Einzelspannungen liefert den Kapazitätsbelag C' in F/m

$$C' = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{r_{eq}}}$$

r : Leiterradius in m

d : mittlerer Leiterabstand in m

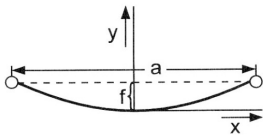
Bündelleiter

$$r_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot R^{n-1} \cdot r}$$

r_{eq} : äquivalenter Leiterradius in m
 R : Abstand der Bündelleiter in m
 r : Teilleiterradius
 n : Anzahl Bündelleiter

typische Werte für 110kV

	FL	Kabel	$\frac{FL}{K}$
R' [$\frac{\Omega}{km}$]	0.1	0.02	5:1
G' [$\frac{\mu S}{km}$]	0.05	1	1:20
L' [$\frac{mH}{km}$]	1	0.3	3:1
C' [$\frac{nF}{km}$]	10	300	1:30

Sag

$$y \approx \frac{mg}{2\sigma} x^2$$

$$f_{max} = y \cdot (a/2)^2$$

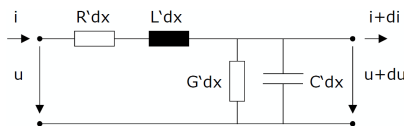
$$h_{min} = 6 + \frac{U_N - 110 \text{ kV}}{150 \text{ kV}}$$

Skin effect

$$R_{\sim} = R_{=} \cdot k_s; \quad k_s \approx 1 + \frac{1}{3}\eta^4$$

$$\eta = \frac{r}{2\delta}; \quad \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}}$$

$$R_{=} = \frac{\rho(\vartheta) \cdot l}{A}; \quad \rho(\vartheta) = \rho_{20}[1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ \text{C})]$$

4.3 Leitungsmodell und Betriebsverhalten

allgemeine DGL:

$$-du = R'dx \cdot i + L'dx \cdot \frac{di}{dt}$$

$$-di = G'dx \cdot u + C'dx \cdot \frac{du}{dt}$$

DGL für Wechselstrom:

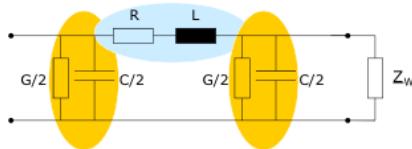
$$\frac{dU}{dx} = R' \underline{I} + j\omega L' \underline{I}$$

$$\frac{dI}{dx} = G' \underline{U} + j\omega C' \underline{U}$$

Lösung für Wechselstrom:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma} l + \underline{Z}_w \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma} l \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_w} \sinh \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma} l \quad \underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \left[\frac{1}{m} \right] \quad \underline{Z}_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} [\Omega]$$

$$\underline{Z}_w \approx \sqrt{X_L X_C} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{d}{r}$$

PI-Ersatzbild (vereinfacht)

Vereinfachte Modellierung einer Leitung, jedoch nur wenn kürzer als 250 km(FL)/50 km(Kabel) und die Frequenz 50 Hz ist. Ersatzbild mit Querimpedanz (gelb) und Längsimpedanz (blau).

Erwärmung der Isolation: $\tan \delta = \frac{G}{\omega C} \Rightarrow P_V = 3 \cdot U^2 G = U^2 \omega C \cdot \tan \delta$

Spannungsabfall (vereinfacht): $\Delta U = \frac{P \cdot R}{U_N} + \frac{Q \cdot X}{U_N}; \quad \Delta u = \frac{\Delta U}{U_N}; \quad \text{messen: } \Delta u = \frac{S_A \cdot \cos \varphi}{S_K} \quad \Delta U \approx \Delta U_L = \sqrt{3} \cdot I \cdot X_L$

Relativer Spannungsabfall: $d = \frac{\Delta U}{U_V} \approx \frac{\Delta S_A}{S_K} \cdot \cos(\psi_K - \phi) \quad \psi$: network impedance angle, ϕ : angle of load ($\approx 60^\circ$)

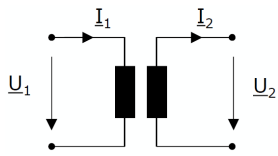
Verluste in Leitung: $P_V = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad Q_{ind} = 3 \cdot I^2 \cdot X_L \quad Q_{cap} = \frac{U^2}{X_C} \quad Q_{ges} = Q_{ind} - Q_{cap}$

Ferranti-Effekt: $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + jX_L \cdot \underline{I}_2; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_F}{-2jX_C}; \quad \Rightarrow \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \left(1 - \frac{X_L}{2X_C}\right)^{-1} \quad \Delta U = \frac{1}{2} U_1 \omega^2 l^2 C' L'$

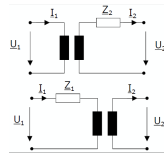
4.4 Begriffe

- Kurzschluss:** extreme übernatürliche Belastung, Leitung verhält sich wie L , Spannung sinkt entlang der Leitung ab.
- Leerlauf:** extreme unternatürliche Belastung, Leitung verhält sich wie C , U -Überhöhung am Leitungsende, Ferranti-Effekt
- Natürliche Leistung:** Bei einer gewissen Belastung wird in den Querelementen genau so viel Blindleistung erzeugt, wie im Längspfad verbraucht wird. Die Leitung verhält sich neutral bezüglich Blindleistung. Die natürliche Leistung wird übertragen, wenn die Leitung mit \underline{Z}_w belastet wird. $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_w}; \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 (\cosh \underline{\gamma} l + \sinh \underline{\gamma} l) = \underline{U}_2 e^{\underline{\gamma} l}; \quad \underline{I}_{nat} = \sqrt{\frac{U_N^2}{3X_L X_C}} = \sqrt{\frac{U_N^2}{3L' C'}}$
- Übernat. Belastung:** $\underline{Z}_{Last} < \underline{Z}_w, Q_{quer} < Q_{laengs}, U$ an Leitungsende ist tiefer als U am Leitungsanfang (KS)
- Unternat. Belastung:** $\underline{Z}_{Last} > \underline{Z}_w, Q_{uer} > Q_{laengs}, U$ an Leitungsende ist höher als U am Leitungsanfang. Freileitungen werden meistens, Kabel immer unternatürlich betrieben (Leerlauf, kapazitiv)
- Wellenimpedanz:** typische Werte: Freileitungen $|\underline{Z}_w| \approx 300 \Omega$, Kabel $|\underline{Z}_w| \approx 40 \Omega$

4.5 Transformatormodell



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \ddot{u}$$



$$\frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2$$

Dreiphasentransformator:

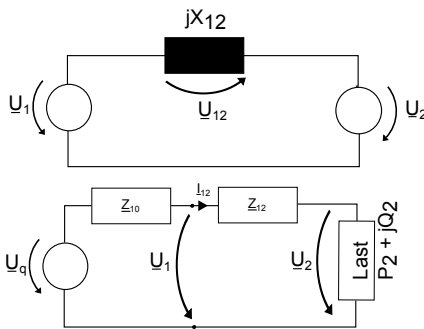
- Amplitude und Phasenlage der Spannung können verändert werden
- Übersetzungsverhältnis wird komplex: \ddot{u}

Kennzeichnung beim 3-Phasen-Trafo: $[a][b][c][d] = \begin{cases} [a] & \text{Oberspannungswicklung, Grossbuchstabe (Y,D,III,Z)} \\ [b] & \text{Unterspannungswicklung, Kleinbuchstabe (y,d,iii,z)} \\ [c] \cdot 30^\circ & \text{Phasenverschieben zwischen Unter- und Oberspannungsseite} \\ [d] = 0 & \text{falls Neutraleiter herausgeführt (optional)} \end{cases}$

$$\ddot{u}_0 = \frac{w_1 \pm \Delta w_1}{w_2} = \ddot{u}_N + \Delta \ddot{u}$$

$$X_T = u_K \cdot \frac{U_N^2}{S_{NT}}$$

4.6 Active power transmission



Leistung allgemein $P = S \cdot \cos \varphi$, $Q = S \cdot \sin \varphi$, $S = U \cdot I^*$

Übertragungswinkel $\vartheta_{12} = \vartheta_1 - \vartheta_2$

Wirkleistung $P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{12}} \cdot \sin \vartheta_{12}$, $P_{12,max} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{12}}$, $P_{21} = -P_{12}$

Blindleistung $Q_{12} = \frac{U_1^2}{X_{12}} - \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{12}} \cdot \cos \vartheta_{12}$, $Q_{21} = \frac{U_2^2}{X_{12}} - \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{12}} \cdot \cos(-\vartheta_{12})$

⇒ Wirkleistungsübertragung hängt hauptsächlich von ϑ_{12} ab

⇒ Blindleistungsübertragung hängt hauptsächlich von der Amplitudendifferenz ab

Iterationsformel $U_2^{(n)} = U_1 - \frac{S_2^*}{(U_2^{(n-1)})^*} \cdot Z_{12} = U_1 - \frac{P_2 - jQ_2}{(U_2^{(n-1)})^*} \cdot Z_{12}$; $(U_2^{(0)} = U_1)$

4.7 Frequenzregelung im Verbundnetz

grid droop for UCTE: $c_P = \frac{\Delta P/P_N}{\Delta f/f_N} \approx 0.5$; Droop: $s = -\frac{\Delta f/f_N}{\Delta P/P_N}$; $K_{Regulation} = \frac{\Delta P}{\Delta f} = s^{-1} \frac{P_N}{f_N}$ [MW/Hz]

Primärregelung - erste Sekunden (15- 30 s): alle reagieren

- dezentrale Regelung • basiert auf lokaler Frequenzmessung • Frequenz-Leistungs-Statistik = P-Regler (bleibende Abweichung!)
- findet vollautomatisch und lokal im Turbinenregler des Kraftwerks statt • Erbringung im gesamten Netzgebiet
- gesamte Netzkennzahl MW/Hz wird auf Länder aufgeteilt • jedes Land leistet entsprechenden Beitrag (CH ≈ 70 MW, UCTE ≈ 3000 MW/Hz) • $P_P = \Delta f \cdot K_{CH}$

Sekundärregelung - erst Minuten: ausgewählte 'Teamkollegen' übernehmen

- basiert auf Messwertsummen der Grenzleitungen, Frequenzabweichungen und dem Korrektursignal Synchronzeit • PI-Regler • führt Frequenz zurück auf Sollwert $f_{soll} = f_{old} + \frac{\Delta P_{SR}}{K_{SR}}$ • findet vollautomatisch im zentralen Netzregler der Regelzone statt • Erbringung durch entsprechende Regelzone • CH ≈ 400 MW

Tertiärregelung - nach einigen Minuten: 'Ersatzfahrer' steigt auf

- Entlastung der Sekundärregelung • zentral und manuell durchgeführt • manueller Abruf • ermöglicht nach einer Störung die neuerliche Optimierung des Kraftwerkeinsatzes • Dispatcher trifft Entscheidungen • $P_T = P_{Ausfall} - P_P - P_S$ • CH $\approx +450/-390$ MW

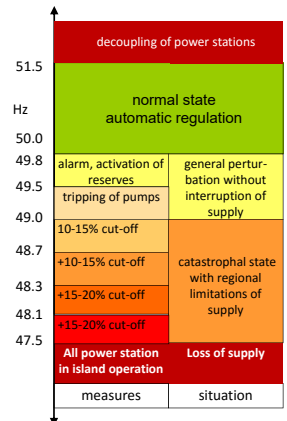
4.8 Netzsicherheit und Massnahmen

$n - 1$ -Sicherheit

• der Ausfall eines Betriebsmittels darf zu keiner Überlastung eines anderen Betriebsmittels führen • n : ist die aktuelle Anzahl der Betriebsmittel • nach Ausfall eines Betriebsmittels stehen nur noch $n - 1$ Betriebsmittel zu Verfügung • bei Verletzung der $n - 1$ -Sicherheit ist noch nichts passiert • keine $n - 1$ -Sicherheit = keine Reserve • Verhinderung Kaskadeneffekt

Massnahmen bei Gefährdung der Netzsicherheit

• Topologische Massnahmen (Umleiten der Lastflüsse durch Veränderung der Topologie \Rightarrow Änderung der Sammelschienen Konfiguration, Stufen von Transformatoren, Zu-/Abschalten von Leitungen und Trafos, FACTS) • Produktionsverschiebung (Redispatch \Rightarrow Eingriff in die Produktion = Eingriff in den Markt = unerwünscht) • Lastabwurf (siehe Abb. 4.8)



4.9 Voltage quality

- **voltage**: sinusoidal as possible, amplitude and frequency in rated values
- **harmonics**: reduced durability of capacitors and motors

$$\rightarrow THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1} \leq 8\% \quad THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_i^2}}{I_A} \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_K}{S_A}}$$
- **flickere (periodic voltage oscillation)**: oscillation of the light density
- **unbalance**: thermal losses/vibrations in el. machines
- **(commutation-)notches**: disturbance of process controls, crash

Characteristic of the voltage	Values/tolerance	mean x	observation time
Frequency	50 Hz; $\pm 1\%$	10 s	1 year
Voltage magnitude	$\pm 10\% U_N$	10 min	1 week
longterm flicker	$P_{lt} = 1$	2h	1 week
Harmonics	$THD \leq 8\%$	10 min	1 week
Unbalance	$U_2/U_1 < 2\%$	10 min	1 week

4.10 HVDC

	HVAC	HVDC	HVDC/HVAC
Nominal voltage for the same isolation	$U_\lambda = \frac{U_{iso}}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{AC} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot U_{iso}$	$U_{DC} = U_{iso}$	$\frac{U_{DC}}{U_{AC}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$
Transmission power	$S_{AC} = \sqrt{3} \cdot U_{AC} \cdot I_{AC}$	$S_{DC} = 2 \cdot U_{DC} \cdot I_{DC}$	$\frac{2 \sqrt{2} \cdot I_{DC}}{3 \cdot I_{AC}}$
Transmission losses	$P_{VAC} = 3 \cdot I_{AC}^2 \cdot R_{AC}$	$P_{VDC} = 2 \cdot R_{DC} \cdot I_{DC}^2$	$\frac{9 \cdot R_{DC}}{3 \cdot 4 \cdot R_{AC}} \approx \frac{3}{4}$
Material (ropes)	$V_{AC} = 3 \cdot A_{AC} \cdot l$	$V_{DC} = 2 \cdot A_{DC} \cdot l = \frac{3}{2} \cdot A_{AC} \cdot l$	0.5

$$U_{DC\alpha} = 1.35 \cdot U_\Delta \cdot \cos \alpha$$

α : firing angle

$$U_{DC} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} U \cos(\omega t) d(\omega t)$$

Converter: $U_{AC\Delta} = \frac{U_{DC}}{1.42}$

$$D_{w\Delta Y} = \frac{U_1 \cdot \sqrt{3}}{U_2}$$

$$D_{wY\Delta} = \frac{U_1}{U_2 \cdot \sqrt{3}}$$

$$D_{w\Delta\Delta} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$D_{wYY} = \frac{U_1}{U_2}$$

4.11 Starpoint (phase fault between 3N)

- **rigid earthing**: LV, EHV (and MV when meshed), fast identification of fault, after a longer time for all,

$$I_K = \frac{U_{3N}}{Z_K} = \frac{U_N/\sqrt{3}}{Z_K}$$
- **isolated**: MV, $I_F = \frac{U_{13}}{-jX_{CE}} + \frac{U_{23}}{-jX_{CE}} = \frac{\sqrt{3}U_N}{X_{CE}}$
- **compensated**: MV after a certain time or with enough cables, $\frac{U_{3N}}{X_D} = \frac{\sqrt{3}U_N}{X_{CE}} \Rightarrow X_D = \frac{X_{CE}}{3} \Rightarrow L = \frac{X_D}{\omega}$

4.12 Short-circuit calculation

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k''^*$$

$$Z_k = \frac{c \cdot U_N^2}{S_k''^*}$$

simplified: $c = 1.1$ (siehe Tabelle 3.2)

Single Phase Load: $S_A = k_u (\approx 0.7\%) \cdot S_k$

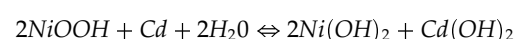
5 Batteries

Pb Batteries



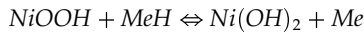
- + Low price due to high number of pieces
- + Available in many different types
- + Well recyclable
- Slight specific energy
- Not allowed for deep discharging
- Low lifespan and temp. sensitive

NiCd



- + High power, fast-chargeable (0.1 - 4C)
- + Low temperature compatibility
- + High number of cycles (1000 - 4000)
- Temperature sensitive
- Memory effect
- Highly self-discharging rate

NiMH



- + High energy density
- + Fast chargeable
- + Low costs and ecological
- Low power density
- Memory effect
- High self-discharging rate

5.1 Peukert factor

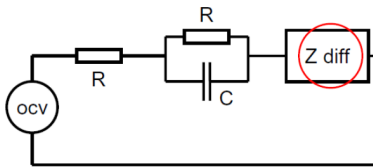
Peukert factor k ; $1.1(\text{better}) < k < 1.5$:

$$H_x = H_0 \cdot \left(\frac{H_0}{T_0 \cdot I_x} \right)^{k-1}$$

$$I_k \cdot t_e = C$$

I_k : Peukert corrected discharge current
 t_e : discharge time
 C : constant
 H_x : available capacity
 I_x : applied current
 H_0 : manufacturer's capacity value [Ah]
 corresponding to the discharge time T_0 [h]

5.3 Modelling



The aging process is simulated with Z_{diff} . One possible calculation for this impedance is the so called Warburg impedance (semi-infinite diffusion).

$$Z(\omega) = \frac{K}{\sqrt{j\omega}} = \frac{K(1-j)}{\sqrt{2\omega}}$$

6 SuperCaps

voltage	$\sim 2 \text{ V}$
capacity	$\sim 3000 \text{ F}$
power density	$P' = \frac{U_{SCAPmax} \cdot I}{m} = \frac{U_{SCAPmax}^2}{4 \cdot R_s \cdot m}$ $m = \text{Masse}$
energy	$W' = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot C \cdot U_{SCAPmax}^2$ $\rightarrow U = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{C}}$
efficiency	$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_S} \rightarrow \text{max @50\% : } R_L = R_S$ $\eta = \frac{U - R_S \cdot I}{U} = \frac{P - RI^2}{P}$

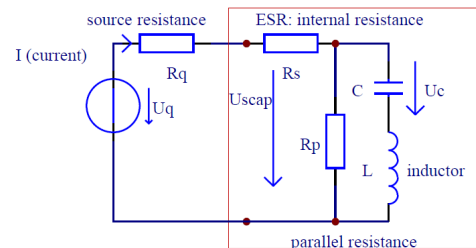
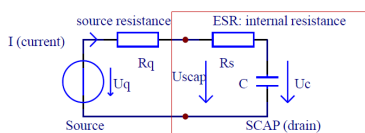
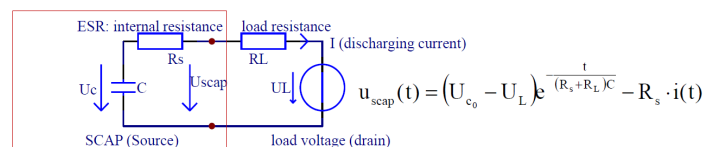


Abbildung 2: Real model for a SCAP



$$u_{scap}(t) = U_q \left(1 - e^{-\frac{t}{(R_q + R_s)C}} \right) + R_s \cdot i(t)$$

(a) charging



$$u_{scap}(t) = (U_{c_0} - U_L) e^{-\frac{t}{(R_s + R_L)C}} - R_s \cdot i(t)$$

(b) discharging

Abbildung 3: Simplified model for a SCAP

7 Windkraft

$$\text{max. Windleistung: } P_{max} = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

$$\text{Leistungsbeiwert: } c_P = \frac{P_W}{P_{max}} = 0.3 \dots \frac{16}{27}$$

$$\text{Windturbinenleistung: } P_W = c_P \cdot P_{max} = c_P \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

$$\text{Dichte Luft: } \rho_{Luft} \approx 1.29 \text{ kg/m}^3$$

