

# Grundlagen

## Pfeilsysteme

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
|  |   |  |  |
|  | <b>Verbraucher-Pfeilsystem VPS</b><br>Spannungs- und Strompfeil gehen vom selben Pol aus. |  | <b>Erzeuger-Pfeilsystem EPS</b><br>Spannungs- und Strompfeil gehen nicht vom selben Pol aus. |

## Stern-Dreieck-Transformation

|  |                                     |  |  |
|--|-------------------------------------|--|--|
| <b>Stern → Dreieck</b><br>$Y \rightarrow \Delta$   |                                     | <b>Dreieck → Stern</b><br>$\Delta \rightarrow Y$   |  |
| $\underline{Z}_{12} = \underline{S} / \underline{Z}_3$ $\underline{Z}_{23} = \underline{S} / \underline{Z}_1$ $\underline{Z}_{31} = \underline{S} / \underline{Z}_2$ $\underline{S} = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_1$ |                                     | $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_{31} / \underline{D}$ $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{23} \cdot \underline{Z}_{12} / \underline{D}$ $\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{31} \cdot \underline{Z}_{23} / \underline{D}$ $\underline{D} = \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}$ |  |
| $\underline{Z}_\Delta = 3 \cdot \underline{Z}_Y$   | wenn alle 3 Impedanzen gleich gross |  | $\underline{Z}_Y = \underline{Z}_\Delta / 3$ |

## Drehstrom

### Sternschaltung

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| $\underline{U}_{1N} = U_S \angle 0^\circ$ $\underline{U}_{2N} = U_S \angle -120^\circ$ $\underline{U}_{3N} = U_S \angle 120^\circ$ TI-89: (230 $\angle$ 120°)   | $\underline{U}_{12} = \sqrt{3} \cdot U_S \angle 30^\circ$ $\underline{U}_{23} = \sqrt{3} \cdot U_S \angle -90^\circ$ $\underline{U}_{31} = \sqrt{3} \cdot U_S \angle 150^\circ$ TI-89: (400 $\angle$ 150°)  | $U_S = \text{Stern-/ Strangspannung}$<br>$U_S = U_{1N} = U_{2N} = U_{3N}$<br>$U_S = U_\Delta / \sqrt{3}$<br><br>$U_\Delta = \text{Aussenleiterspannung}$<br>$U_\Delta = U_{12} = U_{23} = U_{31}$<br>$U_\Delta = U_S \cdot \sqrt{3}$ |   |
| $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$ $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z} \angle \varphi$  | $\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot U_S \cdot I_S \angle \varphi$ $P = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi$  | <b>Symmetrische Belastung</b><br>$I_S = \text{Stern-/ Strangstrom} = I_1 = I_2 = I_3$<br>$\varphi = \text{Phasenwinkel der Impedanz}$<br>(Phasenverschiebung zwischen U und I)<br>$I_N = \text{Neutralleiterstrom}$                  |   |
| $\underline{U}_{1K} = \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{KN}$ $\underline{U}_{2K} = \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{KN}$ $\underline{U}_{3K} = \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{KN}$  | $\underline{S} = \underline{U}_{13} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_2^*$ $\underline{S} = \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{32} \cdot \underline{I}_3^*$ $\underline{S} = \underline{U}_{21} \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_{31} \cdot \underline{I}_3^*$ | <b>Aronschaltung</b><br>Aronschaltung gilt nur im 3-Leiternetz!  | <b>Unsymmetrische Belastung im Dreileitersystem</b> |
| $\underline{U}_{KN} = \frac{\underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1N} + \underline{Y}_2 \cdot \underline{U}_{2N} + \underline{Y}_3 \cdot \underline{U}_{3N}}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}$                     | ohne Impedanz im Neutralleiter  |  | <b>Unsymmetrische Belastung im Vierleitersystem</b> |
| $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \neq 0$ $\underline{S} = \underline{U}_{1N} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{2N} \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_{3N} \cdot \underline{I}_3^*$ | mit einer Admittanz ( $Y_N$ ) im Neutralleiter (Bild)   |  |   |
| $\underline{U}_{KN} = \frac{\underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1N} + \underline{Y}_2 \cdot \underline{U}_{2N} + \underline{Y}_3 \cdot \underline{U}_{3N}}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_N}$   |   |  |   |

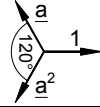
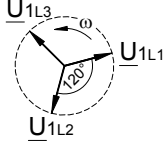
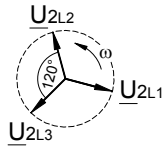
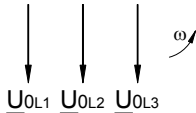
### Dreieckschaltung

|   |   |   |
|---|---|---|
| $\underline{U}_{12} = U_\Delta \angle 30^\circ$ $\underline{U}_{23} = U_\Delta \angle -90^\circ$ $\underline{U}_{31} = U_\Delta \angle 150^\circ$   |   | $U_\Delta = \text{Aussenleiter-/ Dreieckspannung (Betrag!)} = U_{12} = U_{23} = U_{31}$   |
| $I = \sqrt{3} \cdot I_\Delta$   | $\underline{S} = 3 \cdot U_\Delta \cdot I_\Delta \angle \varphi$ $\underline{S} = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I \angle \varphi$   | <b>Symmetrische Belastung</b><br>$I_\Delta = \text{Dreieck-/ Strangstrom} = I_{12} = I_{23} = I_{31}$<br>$I = \text{Aussenleiterstrom}$ |
| $\underline{S} = \underline{U}_{13} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_2^*$ $\underline{S} = \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{32} \cdot \underline{I}_3^*$ $\underline{S} = \underline{U}_{21} \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_{31} \cdot \underline{I}_3^*$ | $\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$ $\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}$ $\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$ | <b>Unsymmetrische Belastung</b><br>$P_{tot} = P_2 + P_3$  |
|   | <b>Aronschaltung</b>  |   |

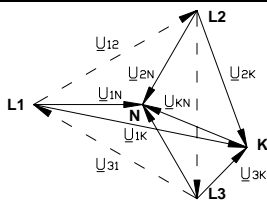
# Symmetrische Komponenten

Jedes unsymmetrische Drehstromsystem kann durch die Summe von 3 symmetrischen Systemen dargestellt werden.

## Systeme

|  |   |  |
|--|---|--|
| $\underline{a} = (1 \angle 120^\circ) = -1/2 + j \cdot \sqrt{3}/2$ $\underline{a}^2 = (1 \angle 240^\circ) = 1/\underline{a}$  |  | <b>Drehoperator <math>\underline{a}</math></b><br>Multiplikation mit $\underline{a} \rightarrow$ Drehung eines Zeigers um $120^\circ$  |
| Definition:<br>$\underline{U}_{1L1} = \underline{U}_1 \quad (ref)$ $\underline{U}_{1L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_1$ $\underline{U}_{1L3} = \underline{a} \cdot \underline{U}_1$ |  | <b>Mitsystem</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Phasenfolge normal: <math>L_1 - L_2 - L_3</math></li> <li><math>\underline{U}_1</math> = Symmetrische Spannungskomponente des Mitsystems</li> <li><math>\underline{U}_{1L1}</math> = Spannung der 1. Phase des Mitsystems</li> </ul>           |
| Definition:<br>$\underline{U}_{2L1} = \underline{U}_2$ $\underline{U}_{2L2} = \underline{a} \cdot \underline{U}_2$ $\underline{U}_{2L3} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_2$             |  | <b>Gegensystem</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Phasenfolge vertauscht: <math>L_3 - L_2 - L_1</math></li> <li><math>\underline{U}_2</math> = Symmetrische Spannungskomponente des Gegensystems</li> <li><math>\underline{U}_{2L1}</math> = Spannung der 1. Phase des Gegensystems</li> </ul> |
| Definition:<br>$\underline{U}_{0L1} = \underline{U}_{0L2} = \underline{U}_{0L3}$ $= \underline{U}_0$   |  | <b>Nullsystem</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>einphasig</li> <li><math>\underline{U}_0</math> = Symmetrische Spannungskomponente des Nullsystems</li> <li><math>\underline{U}_{0L1}</math> = Spannung der 1. Phase des Nullsystems</li> </ul>   |

## Berechnung der symmetrischen Komponenten

|   |   |   |
|---|---|---|
| $[\underline{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \angle 120^\circ & \angle -120^\circ \\ 1 & \angle -120^\circ & \angle 120^\circ \end{bmatrix}$ | <b>Matrize <math>[\underline{T}]</math></b> (zur Umrechnung benötigt)<br>Multiplikation mit $\underline{a} \rightarrow$ Drehung eines Zeigers um $120^\circ$<br>Multiplikation mit $\underline{a}^2 \rightarrow$ Drehung eines Zeigers um $240^\circ$ oder $-120^\circ$ |   |
| $\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot [\underline{T}] \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{1K} \\ \underline{U}_{2K} \\ \underline{U}_{3K} \end{bmatrix}$  |    | <b>Spannungen</b><br>$\underline{U}_0$ = Symmetrische Spannungskomponente des Nullsystems<br>$\underline{U}_{1K}$ = Spannung Phase 1 – Knoten = $\underline{U}_{+N} - \underline{U}_{KN}$ |
| $\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot [\underline{T}] \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix}$  | Vorsicht Indizes!   | <b>Ströme</b><br>$\underline{I}_1$ = Symmetrische Stromkomponente des Mitsystems<br>$\underline{I}_{L2}$ = Strom in der 2. Phase  |

|   |   |                           |
|---|---|---------------------------|
| $\begin{bmatrix} \underline{U}_{1K} \\ \underline{U}_{2K} \\ \underline{U}_{3K} \end{bmatrix} = 3 \cdot [\underline{T}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix} = 3 \cdot [\underline{T}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$ | <b>Rücktransformation</b> |
|---|---|---------------------------|

|  |   |
|--|---|
| $\underline{U}_1 = (\underline{U}_{1K} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{2K} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{3K}) / 3$ $\underline{U}_2 = (\underline{U}_{1K} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{2K} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{3K}) / 3$ $\underline{U}_0 = (\underline{U}_{1K} + \underline{U}_{2K} + \underline{U}_{3K}) / 3$ | <b>Zusammenhang</b><br>Knotenspannungen $\leftrightarrow$ symmetrische Spannungen   |
| $\underline{U}_{KN} = -\underline{U}_0$  | <b>Zusammenhang <math>\underline{U}_{KN} \leftrightarrow \underline{U}_0</math></b> |
| $\underline{I}_N = 3 \cdot \underline{I}_0$  | <b>Zusammenhang <math>\underline{I}_N \leftrightarrow \underline{I}_0</math></b>    |

|   |  |   |
|---|--|---|
| $\underline{Z}_0 = \underline{Z} + \underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{K2}$ $\underline{Z}_1 = \underline{Z} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{K1} + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{K2}$ $\underline{Z}_2 = \underline{Z} + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{K1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{K2}$ | Für nicht rotierende Anlagen, z.B. Trafos, Leitungen, gilt stets:<br>$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ | <b>Impedanzen</b><br>$\underline{Z}$ = Impedanz pro Phase<br>$\underline{Z}_0$ = Nullimpedanz<br>$\underline{Z}_{K1}$ = Kopplungsimpedanz   |
| $\underline{Z}_{K1} = \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31}$ $\underline{Z}_{K2} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{32} = \underline{Z}_{13}$   | Bedingung:<br>Drehstromnetz ist zyklisch - symmetrisch   | <b>Kopplungsimpedanzen <math>\underline{Z}_{K1}, \underline{Z}_{K2}</math></b><br>$\underline{Z}_{12}$ = Kopplung auf Phase 1 von Phase 2<br>(1. Index: Wirkung; 2. Index: Ursache) |

|   |   |
|---|---|
| $[\underline{Z}_{012}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \end{bmatrix}$ | <b>Impedanzmatrize <math>[\underline{Z}_{012}]</math></b><br>$\underline{Z}_0$ = Nullimpedanz<br>$\underline{Z}_1$ = Mitimpedanz<br>$\underline{Z}_2$ = Gegenimpedanz |
|---|---|

|   |  |
|---|--|
| $\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = [\underline{Z}_{012}] \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$ | <b>Zusammenhang der symmetrischen Komponenten</b><br>$\underline{U}_0$ = Symmetrische Spannungskomponente des Nullsystems<br>$\underline{I}_1$ = Symmetrische Stromkomponente des Mitsystems |
|---|--|

|  |   |
|--|---|
|  | <b>Ersatzschaltbild im 012-System</b><br><b>Betriebskapazität <math>C_b</math></b> <span style="float: right;"><math>[C_b] = A \cdot s / V = F</math></span><br>$C_E$ = Kapazität pro Phase gegen Erde<br>$C_L$ = Kapazität pro Phase gegen eine andere Phase |
|--|---|

### Messung der symmetrischen Impedanzen

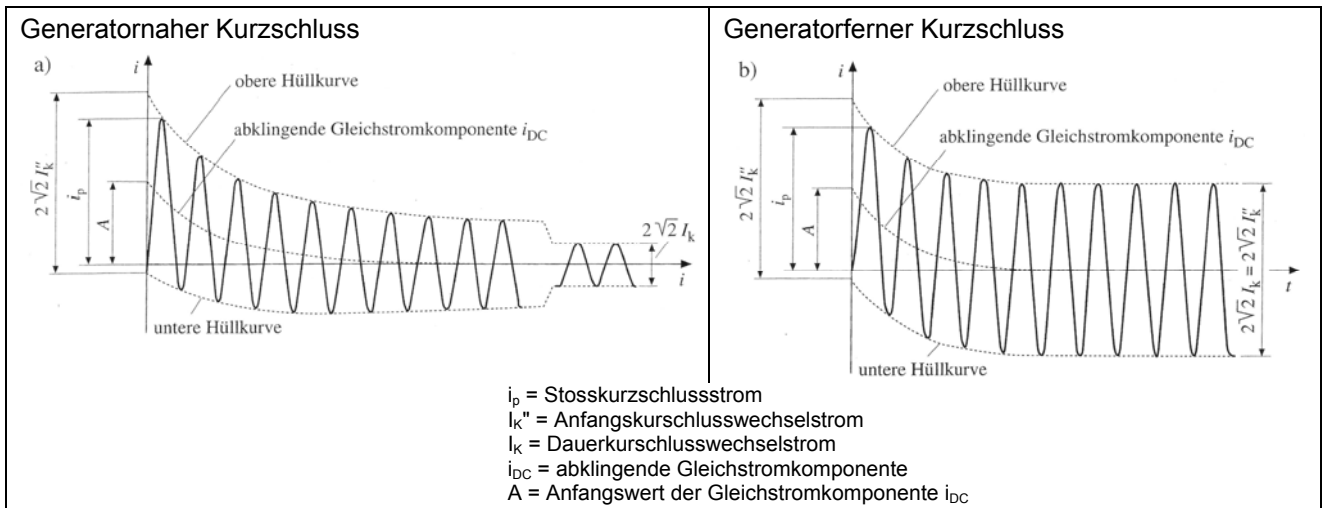
|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Mitimpedanz <math>\underline{Z}_1</math></b><br>                                   | <b>Gegenimpedanz <math>\underline{Z}_2</math></b><br> | <b>Nullimpedanz <math>\underline{Z}_0</math></b><br> |
| Bei allen nicht rotierenden Betriebsmitteln gilt: $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ |   |  |

## Kurzschlussrechnung

### Anfangskurzschlusswechselströme

|   | <b>3p KS/ES</b><br>zw. L1, L2 und L3<br>$\underline{I}_{k(3p)}'' = \underline{I}_{L1, L2, L3}$ | <b>2p KS</b><br>z.B. zw. L2 und L3<br>$\underline{I}_{k(2p)}'' = \underline{I}_{L2} = -\underline{I}_{L3}$         | <b>2p ES</b><br>z.B. zw. L2, L3 und E<br>$\underline{I}_{k(2pE)}'' = \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 3 \cdot \underline{I}_0$  | <b>1p ES</b><br>z.B. zw. L1 und E<br>$\underline{I}_{k(1p)}'' = \underline{I}_{L1} = 3 \cdot \underline{I}_0$              |
|---|--|--|--|--|
| <b>komplex</b><br>$\underline{U}_{1N}$ = Referenz<br><small>= <math>U_{q1}</math> = Spannungsquelle des Mitsystems (Phasenspannung)</small> | $\underline{I}_{k(3p)}'' = \frac{c \cdot \underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_1}$                 | $\underline{I}_{k(2p)}'' = -j \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ | $\underline{I}_{k(2pE)}'' = \frac{-c \cdot 3 \cdot \underline{U}_{q1} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_0 + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_0}$ | $\underline{I}_{k(1p)}'' = \frac{c \cdot 3 \cdot \underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}$ |
| <b>Betrag</b><br>allgemein:   | $I_{k(3p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot  Z_1 }$                                       | $I_{k(2p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{ Z_1 + Z_2 }$  | $I_{k(2pE)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot  Z_2 }{ Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0 }$  | $I_{k(1p)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$   |
| nur Reaktanzen:   | $I_{k(3p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_1}$   | $I_{k(2p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{X_1 + X_2}$  | $I_{k(2pE)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot X_2}{X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_0 + X_2 \cdot X_0}$  | $I_{k(1p)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{X_1 + X_2 + X_0}$   |
| Mit- = Gegenreaktanz:<br><small>wenn keine bezogene Phasoren<br/><math>\chi_1 = \chi_2 = X</math></small>                                   | $I_{k(3p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X}$   | $I_{k(2p)}'' = \frac{c \cdot U_N}{2 \cdot X}$  | $I_{k(2pE)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{X + 2 \cdot X_0}$  | $I_{k(1p)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{2 \cdot X + X_0}$   |

## Verlauf des Kurzschlussstromes



|  |   |                             |  |
|--|---|-----------------------------|--|
| $K = \frac{i_p}{\sqrt{2} \cdot I_k''}$   | Maximum:<br>$K = 2$ , wenn Gleichstrom-Überlagerung | In der Praxis:<br>$K = 1.8$ | <b>Stoßziffer K</b><br>$i_p$ = Stosskurzschlussstrom<br>$I_k''$ = Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (Effektivwert) |
| c berücksichtigt: <ul style="list-style-type: none"> <li>Vernachlässigung von Belastungen und Kapazitäten</li> <li>Subtransientes Verhalten von Generatoren</li> </ul> | In der Praxis:<br>$c = 1 \dots 1.1$                 | <b>Spannungsfaktor c</b>    |  |

## Betriebsmittel

|  |  |
|--|--|
| $u = U / U_N, \quad i = I / I_N, \quad z = Z / Z_N, \quad s = S / S_N$ | <b>Bezogene Größen</b> $[u, i, z, s] = pu = \text{per Unit}$ |
|--|--|

### Transformatoren

|   |  |  |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
|---|--|--|---------|------------|------------|--------------|--------|--------------|------------|------------|--------------|----------------|--|--|
| $\ddot{u} = \frac{U_{N, OS}}{U_{N, US}}$  |  | <b>Übersetzungsverhältnis <math>\ddot{u}</math></b><br>$U_{N, OS}$ = Nennspannung (verkettet) der Oberspannungsseite             |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">US → OS</td> <td style="text-align: center;">OS → US</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Spannungen</td> <td style="text-align: center;"><math>\ddot{u}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>1/\ddot{u}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Ströme</td> <td style="text-align: center;"><math>1/\ddot{u}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\ddot{u}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Impedanzen</td> <td style="text-align: center;"><math>\ddot{u}^2</math></td> <td style="text-align: center;"><math>1/\ddot{u}^2</math></td> </tr> </table> |  | US → OS  | OS → US | Spannungen | $\ddot{u}$ | $1/\ddot{u}$ | Ströme | $1/\ddot{u}$ | $\ddot{u}$ | Impedanzen | $\ddot{u}^2$ | $1/\ddot{u}^2$ | <b>Umrechnungen</b><br>Multiplikation mit Tabellenwert | Beispiel: YNd5<br>D / d : Dreieck<br>Y / y : Stern<br>N / n : Sternpunkt geerdet |
|   | US → OS  | OS → US  |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| Spannungen  | $\ddot{u}$   | $1/\ddot{u}$   |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| Ströme  | $1/\ddot{u}$   | $\ddot{u}$   |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| Impedanzen  | $\ddot{u}^2$   | $1/\ddot{u}^2$   |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| $f_E = \frac{U_E}{U_N / \sqrt{3}}$  | Wirksame Erdung: $f_E < 1.4$<br>Unwirksame Erdung: $f_E > 1.4$   | <b>Erdfehlerfaktor <math>f_E</math></b><br>$U_E$ = Spannung zwischen einem gesundem Aussenleiter und der Erde bei 1pES           |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Isoliert (freier Sternpunkt)</li> <li>Kompensiert mit Löschspule (Petersen)</li> <li>Strombegrenzend geerdet</li> <li>Direkte Erdung (niederohmig)</li> </ul>  | <b>Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung</b>  |  |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |
| $L_D = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_E}$  | Die Petersen-Spule wird an den Trafo-Sternpunkt angeschlossen und soll durch einen Schwingkreis mit $C_E$ die Nullimpedanz gegen $\infty$ erhöhen. | <b>Petersen-Spule <math>L_D</math></b> $[L_D] = V \cdot s / A = H$<br>$C_E$ = Erdkapazität (C einer Phase des Netzes gegen Erde) |         |            |            |              |        |              |            |            |              |                |  |  |

### Impedanzen der Betriebsmittel

|  |  |   |
|--|--|---|
| $Z_{KS} = u_k \cdot \frac{U_N^2}{S_{NT}}$  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit- = Gegenimpedanz <math>Z_{KT}</math></li> <li>Nullimpedanz je nach Erdung</li> </ul>            | <b>Transformator T</b><br>$u_k$ = relative Kurzschlussspannung  |
| $Z_d'' = z_d'' \cdot \frac{U_N^2}{S_{NG}}$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit- = Gegenimpedanz <math>Z_d''</math></li> </ul>  | <b>Generator G</b><br>$z_d''$ = relative subtransiente Reaktanz |
| $Z_Q = c \cdot \frac{U_N^2}{S_{KQ}''}$     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit- = Gegenimpedanz <math>Z_Q</math></li> <li>Nullimpedanz = 0 (Einspeisung über Trafo)</li> </ul> | <b>Netzeinspeisung Q</b><br>$c$ = Spannungsfaktor               |