

Stromwandler - Teil 3

Übertragungsverhalten bei transienten Überströmen

Erich W. Albrecht, Wiesbaden **)

1 Einführung

In Elektroenergiesystemen (EES) plötzlich auftretende Zustandsänderungen durch Kurzschlüsse sind mit transienten (schnellen) Ausgleichsvorgängen der Systemgrößen verbunden. Zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens der Stromwandler wird die Kenntnis des transienten Verlaufs des Kurzschlussstroms vorausgesetzt.

Für eine einwandfreie Funktion des Schutzes elektrischer Energieversorgungsnetze ist die amplituden- und phasentreue Übertragung, die momentanwertgetreue Übertragung der transienten Kurzschlussströme durch die Stromwandler notwendig.

2 Grundlagen

2.1 Verlauf des Kurzschlussstroms

Für den generatorfernen Kurzschlussstrom kann die Ersatzschaltung nach Bild 1 verwendet werden [1].

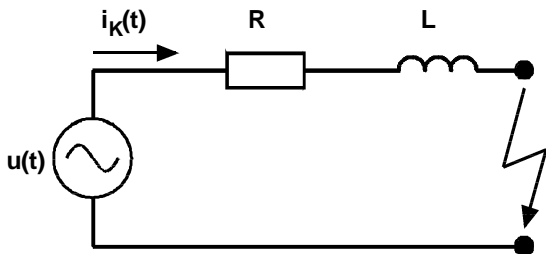


Bild 1 Netzersatzschaltung

Der Kurzschlussstrom stellt einen Einschaltvorgang dar, wobei die Verbraucher kurzgeschlossen werden. Die Differentialgleichung (1) für den Kurzschlussvorgang lautet:

$$L \cdot \frac{di_K}{dt} + R \cdot i_K = U_P \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (1)$$

α - Phasenwinkel der Spannung bei Kurzschlusseintritt

Die Lösung der Differentialgleichung (1) ergibt den zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstroms (2).

$$i_K(t) = \sqrt{2} \cdot I_K'' \left[\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_K}} \right] \quad (2)$$

Darin bedeuten:

- Effektivwert des Kurzschlussstroms

$$I_K'' = \frac{U_P}{Z_K} \quad (3)$$

- Impedanz der Kurzschlussbahn

$$Z_K = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (4)$$

- Kurzschlusswinkel

$$\varphi_K = \arctan \frac{\omega \cdot L}{R} = \arctan \frac{X_K}{R_K} \quad (5)$$

Der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstroms setzt sich aus dem stationären Glied und einer mit der für die Kurzschlussbahn typischen Kurzschlusszeitkonstante abklingenden e - Funktion zusammen. Hieraus ergeben sich zwei Grenzfälle:

- $\sin(\alpha - \varphi_K) = 0 \Rightarrow \alpha - \varphi_K = 0$

Für diesen Fall entspricht der Kurzschlusseintrittswinkel α dem Phasenwinkel der Kurzschlussbahn (Kurzschlusswinkel φ_K). Es stellt sich sofort der stationäre Kurzschlussstrom ein.

$$i_K = \sqrt{2} \cdot I_K'' \cdot \sin \omega \cdot t \quad (6)$$

Das Übertragungsverhalten des Stromwandlers für diesen Kurzschlussstrom wurde im Teil 2 [3] behandelt.

Er besitzt keine Gleichstromkomponente und wird deshalb in der Praxis auch als symmetrischer oder stationärer Kurzschlussstrom bezeichnet.

- $\sin(\alpha - \varphi_K) = -1 \Rightarrow \alpha - \varphi_K = -\frac{\pi}{2}$

Unter dieser Bedingung tritt das Gleichstromglied in voller Höhe auf und man erhält für den Kurzschlussstromverlauf:

$$i_K = \sqrt{2} \cdot I_K'' \cdot (e^{-\frac{t}{T_K}} - \cos \omega \cdot t) \quad (7)$$

Mit diesem durch eine Gleichstromkomponente verlagerten Kurzschlussstrom lässt sich für die Praxis eine „worst-case-Betrachtung“ durchführen.

Für die weiteren Ausführungen wird allerdings grundsätzlich Gleichung (2) zu Grunde gelegt und erst danach spezielle Lösungen für Gleichung (7) angegeben.

2.2 Stromwandlermodell

Grundlage für die weiteren Betrachtungen dient die im Teil1 [2] entwickelte Modellvorstellung (Bild 2).

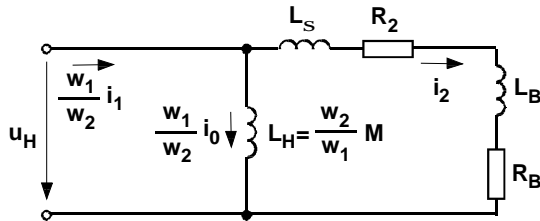


Bild 2 Ersatzschaltung des Stromwandlers

- | | |
|---|---|
| i_1 Primärstrom | i_2 Sekundärstrom |
| u_H Hauptfeldspannung | i_0 Magnetisierungsstrom |
| L_H Hauptinduktivität | |
| L_σ Streuinduktivität der Sekundärwicklung | R_2 Wirkwiderstand der Sekundärwicklung |
| L_B Induktivität der Bürde | R_B Wirkwiderstand der Bürde |

Setzt man voraus, daß die Ersatzschaltung des Stromwandlers nur lineare elektrische und magnetische Elemente enthält, so kann das Übertragungsverhalten durch die folgenden Differentialgleichungen berechnet werden:

$$L_H \cdot \frac{di_0'}{dt} = (R_2 + R_B) \cdot i_2 + (L_\sigma + L_B) \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (8)$$

Ersetzt man in Gleichung (8) den Magnetisierungsstrom i_0 durch Gleichung (9)

$$i_0' = i_1' - i_2 \quad (9)$$

und führt die Wandlerzeitkonstante und den Übertragungsfaktor

Wandlerzeitkonstante:

$$T_W = \frac{L_H + L_\sigma + L_B}{R_2 + R_B} \quad (10)$$

Übertragungsfaktor:

$$k_W = \frac{L_H}{L_H + L_\sigma + L_B} \quad (11)$$

ein, so wird das Übertragungsverhalten von der Differentialgleichung (12) beschrieben.

$$T_W \cdot k_W \cdot \frac{di_1'}{dt} = i_2 + T_W \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (12)$$

Für die Berechnung des Sekundärstroms wird Gleichung (12) umgeformt.

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{1}{T_W} \cdot i_2 = k_W \cdot \frac{di_1'}{dt} \quad (13)$$

Den Magnetisierungsstroms erhält man aus Gleichung (13) unter Berücksichtigung von

$$i_2 = i_1^* - i_0^* \quad (14)$$

in Abhängigkeit des Primärstroms.

$$\frac{di_0^*}{dt} + \frac{1}{T_W} \cdot i_0^* = (1 - k_W) \cdot \frac{di_1^*}{dt} + \frac{1}{T_W} \cdot i_1^* \quad (15)$$

Bei einem vorgegebenen Primärstrom können nun der Sekundär- und der Magnetisierungsstrom berechnet werden.

3 Sekundärstrom des ungesättigten Stromwandlers

Der zeitliche Verlauf des Sekundärstroms ergibt sich aus der Lösung der Differentialgleichung (13) mit dem zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstroms (2) als Störfunktion.

$$i_2 = k_W \cdot \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{I}_K'' \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{\omega \cdot T_W}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{aligned} & \cos(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \\ & + \omega \cdot T_W \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \end{aligned} \right] \\ & - \frac{\omega \cdot T_W}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{aligned} & \cos(\alpha - \varphi_K) \\ & + \omega \cdot T_W \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \end{aligned} \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_W}} \\ & - \frac{T_W}{T_W - T_K} \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_W}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Als Lösung für den vollverlagerten Kurzschlussstrom mit Gleichung (7) als Störfunktion erhält man den ungünstigsten Fall bezüglich des Übertragungsverhaltens.

$$a - j \kappa = - p/2$$

$$D \sin(a - j \kappa) = -1 \text{ und } \cos(a - j \kappa) = 0]$$

$$i_2 = k_W \cdot \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{I}_K'' \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{(\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{1}{\omega \cdot T_W} \cdot \sin \omega \cdot t \\ & - \cos \omega \cdot t \\ & + e^{-\frac{t}{T_W}} \end{aligned} \right] \\ & + \frac{T_W}{T_W - T_K} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_W}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Berücksichtigt man noch die Näherungen [3]

$$\frac{1}{(\omega \cdot T_W)^2} \approx 0 \quad (18)$$

$$k_w \approx 1 \quad (19)$$

$$\text{und } T_{W0} = \frac{L_H}{R_2 + R_B}, \quad (20)$$

wo durch $L_{2\sigma} + L_B \approx 0$ werden, so besteht die Ersatzschaltung des Stromwandlers nur noch aus dessen Hauptinduktivität, dem ohmschen Widerstand der Wicklung und dem ohmschen Widerstand der Bürde.

Als Näherung für den Sekundärstrom des Stromwandlers bei vollverlagertem

Kurzschlussstrom lässt sich schreiben [5]:

$$i_2 \approx \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{i}_K \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\omega \cdot T_{W0}} \cdot \sin \omega \cdot t - \cos \omega \cdot t \\ + \frac{T_{W0} \cdot e^{-\frac{t}{T_K}} - T_K \cdot e^{-\frac{t}{T_{W0}}}}{T_{W0} - T_K} \end{array} \right\} \quad (21)$$

Im Bild 3 sind die zeitlichen Verläufe des Primär- und des Sekundärstroms dargestellt. Das Gleichstromglied des Sekundärstroms besteht aus der Differenz zweier Exponentialfunktionen. Das Gleichstromglied des Sekundärstroms nähert sich schneller der Nulllinie als das Gleichstromglied des Primärstroms. Es wird negativ und durchläuft ein flaches Minimum, um sich dann langsam der Nulllinie zu nähern. Diese Abweichung vom primären Kurzschlussstromverlauf ist, solange keine Sättigung des Eisenkerns auftritt belanglos, wenn die geforderten Fehlergrenzen eingehalten werden.

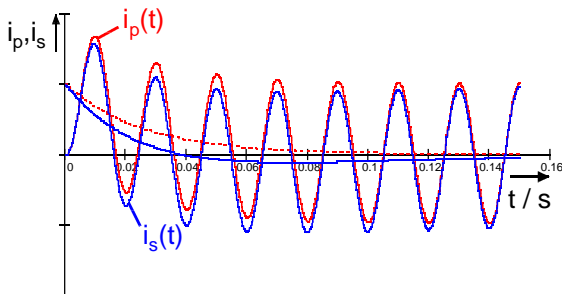


Bild 3 Zeitlicher Verlauf des Primär- und Sekundärstroms

4 Magnetisierungsstrom des ungesättigten Wandlers

Aus der Differentialgleichung für den Magnetisierungsstrom (15) und dem zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstroms (2) berechnet man den zeitlichen Verlauf des Magnetisierungsstroms (22)

$$i_0^* = \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{i}_K \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega \cdot T_W (1 - k_W)}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \\ + \omega \cdot T_W \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \end{array} \right] \\ + \frac{1}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{array}{l} \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \\ - \omega \cdot T_W \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \end{array} \right] \\ + \frac{\omega \cdot T_W \cdot k_W}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\alpha - \varphi_K) \\ + \omega \cdot T_W \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \end{array} \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_W}} \\ - \frac{T_W \cdot k_W}{T_W - T_K} \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_W}} - e^{-\frac{t}{T_K}} \right) \\ - \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_K}} \end{array} \right\} \quad (22)$$

Für den vollverlagerten Kurzschlussstrom (7) erhält man den ungünstigsten Fall für den zeitlichen Verlauf des Magnetisierungsstroms (22).

$$\cdot \quad a - j_K = -p/2$$

$$\text{P} \quad \sin(a - j_K) = -1 \text{ und } \cos(a - j_K) = 0]$$

$$i_0^* = \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{i}_K \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega \cdot T_W (1 - k_W)}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left(\begin{array}{l} \sin \omega \cdot t \\ - \omega \cdot T_W \cdot \cos \omega \cdot t \end{array} \right) \\ - \frac{1}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot \left(\begin{array}{l} \cos \omega \cdot t \\ + \omega \cdot T_W \cdot \sin \omega \cdot t \end{array} \right) \\ - \frac{(\omega \cdot T_W)^2 \cdot k_W}{1 + (\omega \cdot T_W)^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_W}} \\ + \frac{T_W \cdot k_W}{T_W - T_K} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_W}} - e^{-\frac{t}{T_K}} \right) + e^{-\frac{t}{T_K}} \end{array} \right\} \quad (23)$$

Mit der Vereinfachung (18), (19) und (20) entsteht aus Gleichung (23) die aus der Literatur [5] bekannte Formulierung für den Magnetisierungsstrom, Gleichung (24).

$$i_0^* = \frac{w_1}{w_2} \cdot \hat{i}_K \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) \\ - \frac{1}{\omega \cdot T_{W0}} \cdot \sin \omega \cdot t \end{array} \right] \quad (24)$$

Im Bild 3 ist der zeitliche Verlauf des Magnetisierungsstroms dargestellt.

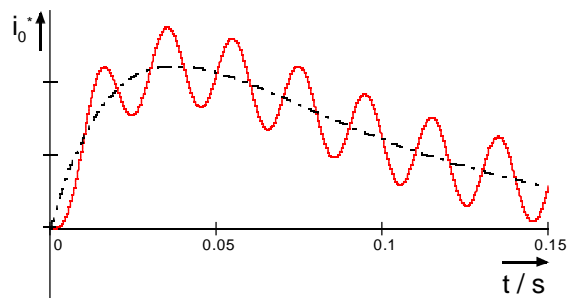


Bild 4 Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms

Mit dem Magnetisierungsstrom kann über das Durchflutungsgesetz der zeitliche Induktionsverlauf angegeben werden.

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot w_2 \cdot i_0^*(t) \quad (25)$$

Bei Verwendung von Gleichung (24), den ungünstigsten Fall, ergibt sich:

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot \frac{w_1 \cdot \hat{i}_K}{\omega \cdot T_{W0}} \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) \\ - \sin \omega \cdot t \end{array} \right] \quad (26)$$

Der Maximalwert der Induktion liegt auf der oberen Hüllkurve der Induktion. Diese Hüllkurve erhält man, wenn man den Betrag des konstant angenommenen Wechselstromanteil zum Gleichstromanteil addiert. Als Zeitfunktion der oberen Hüllkurve entsteht so der folgende Ausdruck.

$$B_{\max}(t) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot w_1 \cdot \hat{I}_K \cdot \left[\frac{T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) + \frac{1}{\omega \cdot T_{W0}} \right] \quad (27)$$

Im Bild 5 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

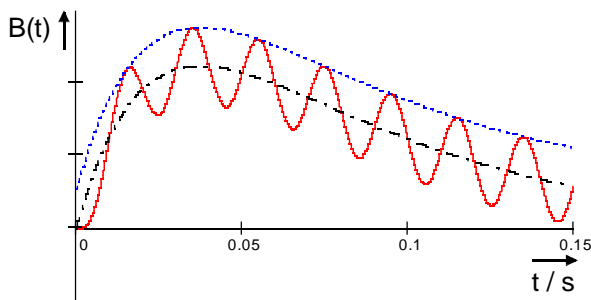


Bild 5 Induktionsverlauf im transienten Bereich

5 Dimensionieren bis zur Sättigungsinduktion

5.1 Dimensionierung ohne Berücksichtigung der Remanenzinduktion

Bei einem einmalig auftretenden Kurzschlussstrom geht man davon aus, dass keine Remanenzinduktion vorhanden ist.

Die Sättigungsinduktion wird bei einem symmetrischen Überstrom entsprechend den Herstellerangaben in etwa bei

$$\hat{I} = n_n \cdot \hat{I}_n \quad (28)$$

erreicht. Unter Verwendung von Gleichung (26) kann somit die Sättigungsinduktion angegeben werden.

$$B_S = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot \frac{w_1 \cdot n_n \cdot \hat{I}_n}{\omega \cdot T_{W0n}} \quad (29)$$

Für ein Arbeiten im linearen Übertragungsbereich des Stromwandlers darf die maximale Induktion nicht die Sättigungsinduktion überschreiten.

Als Dimensionierungsbedingung gilt:

$$B_{\max}(t) \leq B_S \quad (30)$$

Mit den Gleichungen (27) und (29) ergibt sich die folgende Bedingung.

$$n_n \geq \frac{l_{Kn}}{l_{pn}} \cdot \frac{T_{W0n}}{T_{W0}} \cdot \left[\frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) + 1 \right] \quad (31)$$

In [4] wurde abgeleitet aus dem Induktionsverlauf ein Transientenfaktor $K_{tf}(t)$ definiert.

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{l_{Fe}} \cdot \frac{w_1 \cdot \hat{I}_K}{\omega \cdot T_{W0}} \cdot K_{tf}(t) \quad (32)$$

Er beschreibt die zeitliche Änderung der Induktion.

$$K_{tf}(t) = \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) - \sin \omega \cdot t \quad (33)$$

Die obere Hüllkurve des Transientenfaktors erhält man, wenn $\sin \omega \cdot t = -1$ gesetzt wird. Diese Hüllkurve wird als transienten Dimensionierungsfaktor (34) bezeichnet.

$$K_{tf \max}(t) = \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_K}} - e^{-\frac{t}{T_{W0}}} \right) + 1 \quad (34)$$

Durch Extremwertbetrachtung lässt sich das Maximum des transienten Dimensionierungsfaktors $K_{tf \max}(t)$ bestimmen. Als Ergebnis dieser Betrachtung berechnet sich der Zeitpunkt:

$$t_{K_{tf \max}} = \frac{T_{W0} \cdot T_K}{T_{W0} - T_K} \cdot \ln \frac{T_{W0}}{T_K} \quad (35)$$

Diese Zeit ist genau der Zeitpunkt, bei dem das Gleichstromglied des Sekundärstroms (21) durch Null geht.

Mit dem berechneten Zeitpunkt erhält man den Maximalwert für den transienten Dimensionierungsfaktor $K_{tf \max}$ (36).

$$K_{tf \max} = \omega \cdot T_K \cdot \left(\frac{T_K}{T_{W0}} \right)^{\frac{T_K}{T_{W0} - T_K}} + 1 \quad (36)$$

Für die Dimensionierung ohne automatische Wiedereinschaltung (AWE) bzw. für den 1. Fehler, der eine AWE zur Folge hat, lässt sich in Anlehnung an [3] die folgende Bedingung (37) formulieren:

Dimensionierung ohne AWE

$$n_n \geq \frac{l_{Kn}}{l_{pn}} \cdot \frac{T_{W0n}}{T_{W0}} \cdot K_{tf \max} = n_B \cdot M_{\text{sym}} \cdot K_{tf \max} \quad (37)$$

$$= n_B \cdot M_{\text{asym}}$$

Dabei wird die tatsächlich wirksame Wandlerzeitkonstante (38) berücksichtigt.

$$T_{W0} = \frac{R_2 + R_{Bn}}{R_2 + R_B} \cdot T_{W0n} = \frac{1}{M_{\text{sym}}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot \tan \delta} \quad (38)$$

Die angegebene Dimensionierungsbedingung (37) berücksichtigt die volle Asymmetrie bei einem Kurzschlussvorgang (Betriebszyklus $F = 0$).

5.2 Dimensionierung mit Berücksichtigung der Remanenzinduktion

Neben dem Verhalten des Stromwandlers bei einem einmaligen Kurzschlussvorgang ist dessen Verhalten besonders bei einer AWE interessant.

Erfolgt die Einschaltung nach der AWE – Pausenzeit auf einen Kurzschluss, so ist sein Verhalten im Wesentlichen von seiner Magnetisierungskennlinie abhängig.

In Bild 6 ist der qualitative Verlauf der Magnetisierungskennlinien für die in IEC 44-6 [4] spezifizierten Klassen der Stromwandler für Schutzzecke angegeben.

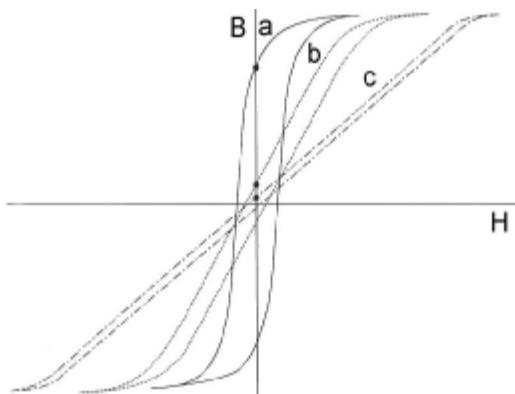


Bild 6 Magnetisierungskennlinien von Stromwandlern [6]

- a eisengeschlossener Kern (TPX)
- b Kern mit Antiremanenzluftspalt (TPY)
- c Linearkern (TPZ)

Die Schutzstromwandlerklassen TPX, TPY und TPZ zeigen die drei grundsätzlichen Möglichkeiten, wie induktive Stromwandler für die Anforderungen des transienten Übertragungsverhaltens ausgelegt werden können.

- Überdimensionierung bezüglich der angeschlossenen Bürde ohne Veränderung des magnetischen Kreises. ⇒ TPX
- Senkung des magnetischen Flusses durch Antiremanenzluftspalt. ⇒ TPY
- Linearisierung der Magnetisierungskennlinie durch mehrere Luftspalte im Kern. ⇒ TPZ

Die unterschiedlichen Magnetisierungskennlinien müssen bei der Auswahl der Stromwandler, wenn ein Betrieb bei AWE vorgesehen ist, berücksichtigt werden.

5.2.1 Dimensionierung des Stromwandlers der Klasse TPX mit AWE

Während der spannungslosen Pause der AWE bleibt die Remanenzinduktion bei dieser Klasse nahezu unverändert, so dass sie als konstant angesehen werden kann (Bild 6, Kurve a). Die Höhe der Remanenzinduktion ist abhängig vom Zeitpunkt der Unterbrechung des Kurzschlusses.

Wird beim Wiedereinschalten durch die AWE auf den bestehenden Kurzschluss geschaltet, so addiert sich die Remanenzinduktion zum erneuten Induktionsverlauf hinzu. Bild 7 zeigt den qualitativen Induktionsverlauf, wenn der Stromwandler durch die AWE wieder mit einem Kurzschluss beansprucht wird.

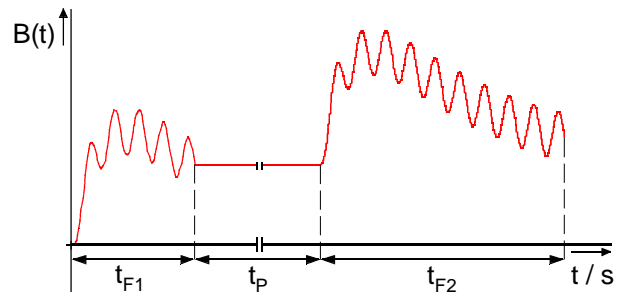


Bild 7 Qualitativer Induktionsverlauf eines Stromwandlers der Klasse TPX bei AWE

Für die Auslegung des Stromwandlers der Klasse TPX ohne Sättigungserscheinungen für einen AWE - Zyklus F – 0 – F – 0 ist wie folgt zu verfahren.

1. Überprüfung, ob der erste Fehler der Dimensionierungsbedingung ohne AWE genügt. ⇒ Gleichung 37.
2. Überprüfung, ob der zweite Fehler der Dimensionierungsbedingung mit AWE für Stromwandler der Klasse TPX genügt. ⇒ Gleichung 39

$$n_n \geq \frac{I_K''}{I_{pn}} \cdot \frac{T_{W0n}}{T_{W0}} \cdot K_{tf(TPX-AWE)} = n_B \cdot M_{sym} \cdot K_{tf(TPX-AWE)} \tag{39}$$

Der transienten Dimensionierungsfaktor $K_{tf(TPX-AWE)}$ (40) berücksichtigt die Abschaltzeit des ersten Fehlers t_{F1} und die Messzeit bis zur Schutzauflösung des zweiten Fehlers t_{F2} . Auch der zweite Fehler wird als vollverlagerter Kurzschluss angenommen.

$$K_{tf(TPX-AWE)} = \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t_{F1}}{T_K}} - e^{-\frac{t_{F1}}{T_{W0}}} \right) \cdot \sin \omega \cdot t_{F1} + \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t_{F2}}{T_K}} - e^{-\frac{t_{F2}}{T_{W0}}} \right) + 1 \tag{40}$$

5.2.2 Dimensionierung des Stromwandlers der Klasse TPY mit AWE

Bei einem Stromwandler der Klasse TPY soll die Remanenzinduktion weniger als 10% der Sättigungsinduktion betragen. Der Abbau der Induktion auf die Größe der Remanenzinduktion liegt im Sekundenbereich. Es wird bei dieser Klasse davon ausgegangen, dass in der spannungslosen Pause der AWE die Induktion nach einer einfachen

Exponentialfunktion mit der Wandlerzeitkonstante T_W abklingt. In Bild 8 ist der qualitative Induktionsverlauf bei erfolgloser AWE angegeben.

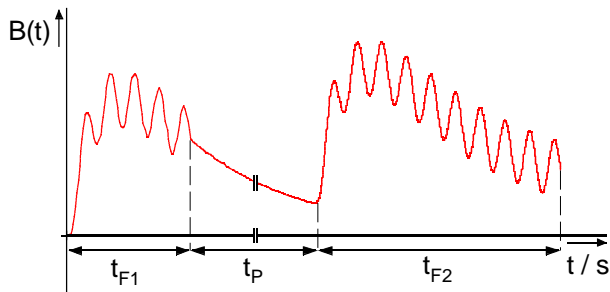


Bild 8 Qualitativer Induktionsverlauf eines Stromwandlers der Klasse TPY bei AWE

Die Auslegung des Stromwandlers der Klasse TPY ohne Sättigungserscheinungen für einen AWE - Zyklus $F - 0 - F - 0$ sollte wie folgt vorgenommen werden.

1. Überprüfung, ob der erste Fehler der Dimensionierungsbedingung ohne AWE genügt. \Rightarrow Gleichung 37.
2. Überprüfung, ob der zweite Fehler der Dimensionierungsbedingung mit AWE für Stromwandler der Klasse TPY genügt. \Rightarrow Gleichung 41

$$\eta_n \geq \frac{I_K}{I_{pn}} \cdot \frac{T_{W0n}}{T_{W0}} \cdot K_{tf(TPY-AWE)} = \eta_B \cdot M_{sym} \cdot K_{tf(TPY-AWE)} \quad (41)$$

$$K_{tf(TPY-AWE)} = \left[\frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t_{F1}}{T_K}} - e^{-\frac{t_{F1}}{T_{W0}}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t_p + t_{F2}}{T_{W0}}} + \frac{\omega \cdot T_{W0} \cdot T_K}{T_K - T_{W0}} \cdot \left(e^{-\frac{t_{F2}}{T_K}} - e^{-\frac{t_{F2}}{T_{W0}}} \right) + 1 \quad (42)$$

Der transienten Dimensionierungsfaktor $K_{tf(TPY-AWE)}$ (42) berücksichtigt die Abschaltzeit des ersten Fehlers t_{F1} , die AWE – Pausenzeit t_p und die Messzeit bis zur Schutzauslösung des zweiten Fehlers t_{F2} . Der zweite Fehler wird auch hier als vollverlagerter Kurzschluss angenommen.

5.2.3 Dimensionierung des Stromwandlers der Klasse TPZ mit AWE

Stromwandler der Klasse TPZ –Linearwandler – haben eine vernachlässigbare Remanenzinduktion.

Der Abbau der Induktion auf die Größe der Remanenzinduktion liegt bei 60 ms [6].

Bei dieser Klasse geht man davon aus, dass in der spannungslosen Pause der AWE die Induktion vollständig abgebaut ist. Es genügt also, den Wandler nach Gleichung (37) zu dimensionieren.

6 Zusammenfassung

Auf der Grundlage des zeitlichen Verlaufs des verlagerten Kurzschlussstroms wurde für das im Teil 1 [2] entwickelte Stromwandlermodell der Sekundär- und der Magnetisierungsstrom berechnet. Vom Magnetisierungsverhalten des Wandlers ausgehend wurden Dimensionierungsbedingungen für den transienten Betrieb hergeleitet. Dabei wurden die in IEC - 44 - 6 [4] aufgeführten Stromwandlerklassen berücksichtigt und Dimensionierungen für die erfolglose automatische Wiedereinschaltung (AWE) angegeben.

7 Literatur

- [1] Albrecht, E .W.;
Der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstroms
EES - Skript 2001
- [2] Albrecht, E .W.;
Stromwandler – Teil1
Modellvorstellung – Entwicklung der
Ersatzschaltung
AGAFE-Mitteilungen 20 (2001) H.2, S
- [3] Albrecht, E .W.;
Stromwandler – Teil2
Übertragungsverhalten bei stationären
Überströmen
AGAFE-Mitteilungen 21 (2002) H.1, S
- [4] IEC-44-6: Instrument transformers – Part 6:
Requirements for protective current
transformers for transient performance ;
First edition 1992-03
- [5] Clemens, H.; Rothe, K.;
Schutztechnik in Elektroenergiesystemen
Verlag Technik Berlin 1991
- [6] Hubensteiner, Helmut; u.a.
Schutztechnik in elektrischen Netzen
VDE - Verlag 1989

**)
Prof. Dipl.-Ing. E. W. Albrecht,
Fachbereich
Informationstechnologie und
Elektrotechnik,
Fachhochschule Wiesbaden

