

Einfluß der Stromwandlerkernsättigung auf das Übertragungsverhalten bei großen Strömen

Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Krüger
OMICRON electronics GmbH, Klaus, Österreich

Kurzfassung

Werden Stromwandler mit hohen Fehlerströmen beaufschlagt, können die Magnetkerne in die Sättigung gehen. Auch Gleichstromkomponenten, wie etwa bei verlagerten Kurzschlussströmen können eine Kernsättigung bewirken. Bei Schutzkernen ist dieser Effekt unerwünscht, da das am Wandler angeschlossene Schutzrelais gerade in diesen Fällen das „richtige Abbild“ des Primärstromes benötigt, um einwandfrei zu funktionieren. Dies gilt insbesondere für den Differentialschutz. Wenn die beiden Stromwandler, die zur Differenzbildung benutzt werden, unterschiedliche Sekundärstromverläufe aufweisen, kann es zu Fehlauflösungen kommen.

Das Ziel dieses Beitrages ist es, auf die Änderungen in den neuen VDE-Normen einzugehen und aufzuzeigen, wie mit modernen Prüfeinrichtungen die notwendigen Prüfungen einfach und rationell durchgeführt werden können.

Die neuen VDE-Normen

Um die richtige Funktion des Schutzes zu gewährleisten, ist es unerlässlich, die wichtigsten Stromwandlerdaten zu überprüfen. Dieser Sachverhalt wurde auch im VDE-Normenwerk berücksichtigt. Die VDE 0414 Teil 1 „Stromwandler“ vom Januar 1994, die der IEC 185: 1987 + A1: 1990 entsprach, wurde durch die Normen DIN EN 60044-1 bzw. VDE 0414 Teil 1 (Ausgabe November 2001) und DIN EN 60044-6 bzw. VDE 0414 Teil 7 (Ausgabe Oktober 2000) ersetzt. In diesen neuen Normen werden die Eigenschaften von Stromwandlern und die messtechnische Überprüfung präziser als bisher festgelegt.

In der „alten“ VDE 0414 Teil 1 vom Januar 1994 gab es zwar einen Anhang A, in dem Stromwandler für Schutzzwecke auf drei Seiten behandelt wurden. Im Gegensatz zur IEC 60044-1 waren dort der Genauigkeitsgrenzfaktor und die sekundäre Grenzspannung definiert, nicht jedoch die Kniepunkt-EMK und das Remanenzverhalten.

In den neuen Normen nehmen die Stromwandler für Schutzzwecke einen recht großen Raum ein. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass mit den Möglichkeiten der modernen Schutztechnik auch die Anforderungen an das transiente Übertragungsverhalten der Stromwandler gerade im Bereich großer Ströme gestiegen sind. Es gibt neben den herkömmlichen Klassen P und M nun auch die Klassen PR und PX. Die Wandlerkerne der Klasse PR weisen einen geringen Remanenzfluss auf. Wandlerkerne der Klasse PX haben eine geringe Streureaktanz. Als Typen- und Stückprü-

fung sind bei PX-Kernen außer den Prüfungen für Strommessabweichung und Fehlwinkel auch folgende Prüfungen vorgeschrieben:

- Messung der Kniepunkt-EMK und des größten Magnetisierungsstromes. Bei einer Erhöhung der Kniepunktspannung um 10% darf der Magnetisierungsstrom nicht mehr als 50 % ansteigen. Die Magnetisierungskurve muss mindestens bis zur Kniepunkt-EMK aufgezeichnet werden. Gemäß VDE 0414 Teil 1 wird der Effektivwert des Magnetisierungsstromes gemessen.
- Messung des Widerstandes der Sekundärwicklung. Der Messwert wird auf eine Betriebstemperatur von 75° C umgerechnet.
- Messung der Abweichung des Windungszahlenverhältnisses. Es darf eine vereinfachte Prüfung des Übersetzungsverhältnisses ohne Bürde durchgeführt werden.

Der Teil 7 der VDE 0414 entspricht dem Teil 6 der IEC 60044. Er enthält die Anforderungen an Stromwandler für Schutzzwecke für das transiente Übertragungsverhalten. Es werden dort folgende Klassen unterschieden:

- Klasse TPS
Sie bezieht sich auf Stromwandler mit schwachem Streufluss ohne Angaben über den Remanenzfluss. Das Windungszahlenverhältnis muss gleich $1/K_n$ sein. Der Fehler dieses Übersetzungsverhältnisses darf 0,25% nicht überschreiten. Die Fehlergrenzbedingung wird durch die Magnetisierungskurve bestimmt. Die sekundäre Magnetisierungs-Grenzspannung U_{al} darf nicht kleiner als der festgelegte Wert sein. Der dabei

fließende Magnetisierungsstrom (=Fehlerstrom) muss kleiner als der maximal zulässige Fehlerstrom sein. Bei einer Erhöhung der Spannung U_{al} um 10%, muss der Stromanstieg kleiner als 100% sein. Die sekundäre Magnetisierungs-Grenzspannung wird durch den Anwender festgelegt und folgendermaßen ausgedrückt:

$$U_{al} \geq KK_{ssc} (R_{ct} + R_b) I_{sn}$$

mit:

K	festzulegender Faktor (eine ausführliche Beispielrechnung ist im Anhang D der VDE 0414 Teil 7 enthalten)
K_{ssc}	Faktor des symmetrischen Bemessungs-Kurzschlussstromes
R_{ct}	sekundärer Wandlerwicklungswiderstand
R_b	Bürdenwiderstand
I_{sn}	sekundärer Nennstrom

- Klasse TPX
Definiert durch die den Scheitelwert des Augenblickswertes des Fehlers während festgelegter transienter Stromflussfolge bestimmte Genauigkeitsgrenze. Kein Grenzwert für den Remanenzfluss.
- Klasse TPY
Definiert durch die den Scheitelwert des Augenblickswertes des Fehlers während festgelegter transienter Stromflussfolge bestimmte Genauigkeitsgrenze. Grenzwert für den Remanenzfluss < 10% vom Sättigungsfluss.
- Klasse TPZ
Definiert durch die den Scheitelwert des Augenblickswertes des Fehlers der Wechselstromkomponente während eines einzelnen Stromflusses mit größter Gleichstromverlagerung bei festgelegter Zeitkonstante ($T_s = L_s / R_s$) des Sekundärkreises bestimmte Genauigkeitsgrenze. Keine Anforderung an den Fehlergrenzwert der Gleichstromkomponente. Der Remanenzfluss ist praktisch vernachlässigbar.

Einfluss von Kniepunkt-EMK und Bürdenwiderstand auf das transiente Übertragungsverhalten bei großen Strömen

Für das Übertragungsverhalten spielen nicht nur die Magnetisierungskurve, sondern auch der sekundäre Wicklungswiderstand und die externe Wandlerbürde eine entscheidende Rolle. Am Beispiel eines Stromwandlers der Klasse 5P20 mit 30VA soll dies deutlich gemacht werden. Die Berechnung erfolgte mit dem Simulationsprogramm *NetSim*. Das Bild 1 zeigt den

voll verlagerten Kurzschlussstrom bei einem Leiter-Leiter-Fehler mit einem Fehlereintritt bei 0°. Der Stromwandler ist mit 20% seiner Nennbürde belastet. Die obere Kurve stellt den berechneten Wandlersekundärstrom, die untere Kurve den auf die Sekundärseite umgerechneten Primärstrom dar. Der gesamte Stromverlauf wird durch den Wandler richtig wiedergegeben. Sättigungseffekte sind nicht zu erkennen. Das Bild 2 zeigt die Signale des gleichen Wandlers, der aber nun mit der Nennbürde belastet ist. Deutlich sieht man den abgeschnittenen Verlauf des Sekundärstromes.

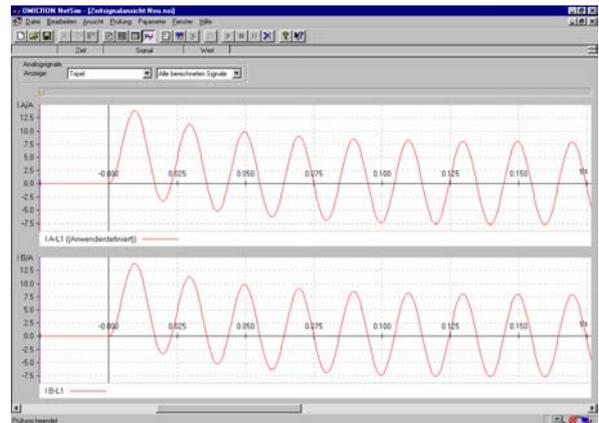


Bild 1 Stromwandler 30VA 5P20, Bürde=20%

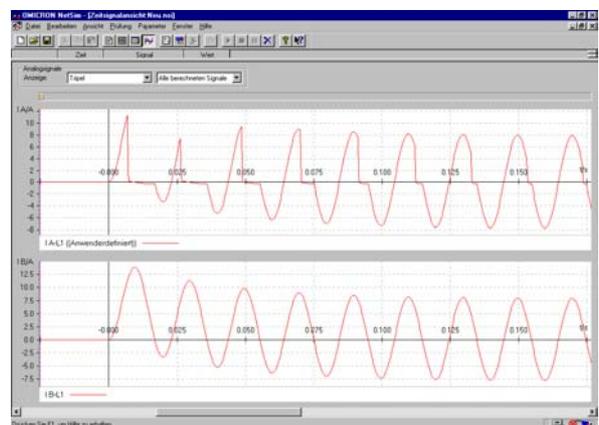


Bild 2 Stromwandler 30VA 5P20, Bürde=100%

Dieses Abschneiden ist darauf zurückzuführen, dass der Wandlerkern in die Sättigung geht. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass eine ungleiche Bebürdung der für die Differenzbildung benutzten Stromwandler eine Fehlerrückmeldung des Differentialschutzes verursachen kann. Bei der Simulation wurden die wichtigsten Wandlerdaten, wie Übersetzung, Genauigkeitsgrenzfaktor, Widerstand der Sekundärwicklung, Bürdenwiderstand, gesättigte und ungesättigte Wandlerinduktivität eingegeben. In der Praxis müssen diese Kennwerte durch Messung bestimmt werden.

Berechnung des tatsächlichen Genauigkeitsgrenzfaktors mit der Betriebsbürde

Wird die Magnetisierungskurve bis zu dem Strom aufgenommen, der der Fehlergrenzbedingung entspricht, kann aus den Werten der Magnetisierungskurve auch der tatsächliche Genauigkeitsgrenzfaktor (früher Überstromziffer genannt) bestimmt werden. Hierzu müssen die Werte des sekundären Wicklungswiderstandes und die Bürdenimpedanz bekannt sein.

Beispiel: Stromwandler 400A / 5A, 60VA, Klasse 5P10. Die Messungen wurden mit dem *OMICRON CPC 100* durchgeführt, das später noch beschrieben wird.

CTBurden:		RWinding:	
Datum/Uhrzeit:	12/13/2001 21:01:05	Datum/Uhrzeit:	12/13/2001 21:04:09
Überlast:	nein	Überlast:	nein
Bewertung:	OK	Bewertung:	OK
Nominalwerte:		I test:	5.000 A
I sek.:	5.000 A	R min.:	40.000 µΩ
Frequenz:	50.00 Hz	R max.:	2.0000 Ω
I test:	5.000 A	Intervall:	10.000 s
Automatisch:	ja	Ergebnisse:	
Ergebnisse:		IDC:	4.1025 A
I sek.:	4.9997 A 0.00 °	V DC:	477.3 mV
U sek.:	2.8144 V 1.08 °	R mess.:	116.4 mΩ
Bürde:	14.073 VA	Abweichung:	0.02 %
cos Φ:	1.000	Zeit:	26.000 s
		Temperatur-Kompensation für Kupfe	
		T mess.:	25.0 °C
		T ref.:	75.0 °C
		R ref.:	139.2 mΩ

Bild 3 Protokoll Bürde- und Widerstand R_s

Aus dem Prüfprotokoll werden folgende Werte ermittelt: $R_{CT}=139,2m\Omega$ (auf $75^\circ C$ umgerechnet) und $R_b=14,073VA / (5A)^2 * \cos(1,08^\circ)=0,56281\Omega$, $X_b=14,073VA / (5A)^2 * \sin(1,08^\circ)=0,0106\Omega$.

Der maximal zulässige Fehlerstrom ist:

$$I_e \leq 0,05 * 10 * I_{sn} = 2,5A$$

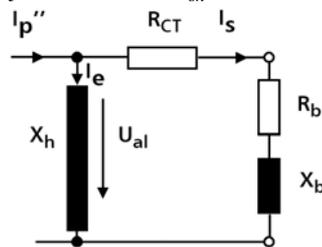


Bild 4 Stromwandler-Ersatzschaltbild

Zur Messung der Genauigkeitsgrenzspannung wird an die Sekundärwicklung eine möglichst sinusförmige Spannung angelegt, die solange gesteigert wird, bis ein Magnetisierungsstrom fließt, der dem maximal zulässigem Fehlerstrom entspricht. Wird die Magnetisierungskurve in diesem Fall mindestens bis zu einem Magnetisierungsstrom von 2,5A aufgenommen, kann

die Genauigkeitsgrenzspannung direkt aus der Kurve entnommen werden. In unserem Beispiel ist $U_{al}=131,3V$ (Interpolation). Der Genauigkeitsgrenzfaktor ist damit:

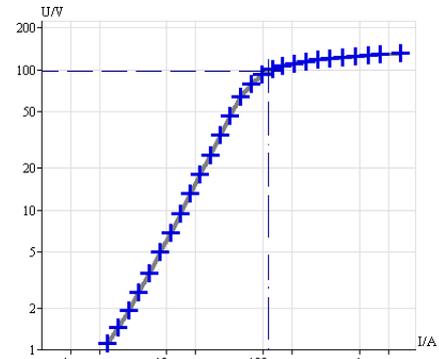
$$K_x = (U_{al} / \sqrt{(R_{CT} + R_b)^2 + X_b^2}) / I_{sn} = 37,4$$

Mit der Nennbürde von 60VA, $\cos \varphi = 0,8$ würde sich ein Genauigkeitsgrenzfaktor $K_x=10,3$ ergeben. Wegen der Unterbürdung des Wandlers ist der tatsächliche Genauigkeitsgrenzfaktor viel höher als der Nennwert. Bis zum 37,4 - fachen Nennstrom bleibt der Messfehler unter der zulässigen Grenze von 5%.

CTExcitation:

Datum/Uhrzeit: 12/13/2001 22:05:13
 Überlast: nein
 Bewertung: n/v
 U max: 200.0 V
 I max: 2.50000 A
 Frequenz: 50.00 Hz

U	I
131.67 V	2.6214 A
128.61 V	1.6244 A
126.83 V	1.2309 A
124.67 V	903.7 mA
122.40 V	666.1 mA
119.93 V	492.2 mA
117.37 V	368.8 mA
114.32 V	275.0 mA
110.97 V	208.3 mA
106.78 V	159.4 mA
101.24 V	124.4 mA
92.770 V	96.7 mA
79.760 V	74.24 mA
64.360 V	58.56 mA
46.800 V	45.32 mA
34.030 V	35.57 mA
24.740 V	28.08 mA
17.970 V	22.22 mA
13.070 V	17.53 mA
9.500 V	13.81 mA
6.9100 V	10.86 mA
5.0200 V	8.520 mA
3.5300 V	6.530 mA
2.6100 V	5.120 mA
1.9400 V	4.010 mA
1.4500 V	3.130 mA
1.1100 V	2.430 mA



Kniepunktberechnung: IEC
 U knie: 97.95 V
 I knie: 113.1 mA

Bild 5 Magnetisierungskurve

Die ungesättigten und die gesättigten Wandlerinduktivitäten können ebenfalls aus der Magnetisierungskurve berechnet werden. Dazu wird die Magnetisierungskurve in zwei Abschnitte aufgeteilt und durch zwei Geraden ersetzt. Die Aufteilung erfolgt am einfachsten bei der Kniepunktspannung.

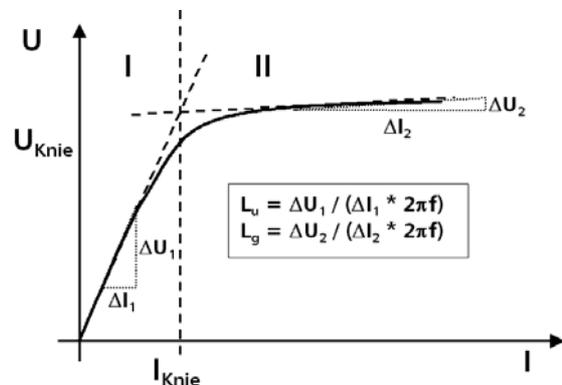


Bild 6 Gesättigte und ungesättigte Induktivität

$$L_g = (131,7 - 124,6) / ((2,62 - 0,9) * 314) = 13mH$$

$$L_u = (46,8 - 5) / ((0,045 - 0,0085) * 314) = 3,6H$$

$$T_s \approx L_u / (R_{CT} + R_b) = 3,6 / (0,139 + 0,563) = 5,12s$$

Messung der Spannungen und der Ströme

Über die Art der Messeinrichtungen gibt es in der VDE 0414 Teil 1 und der VDE 0414 Teil 7 unterschiedliche Angaben:

Norm	Messung der Spannung	Messung des Stromes
VDE 0414 Teil 1	Effektivwert	Effektivwert
VDE 0414 Teil 7	arithmetischer Mittelwert der gleichgerichteten Wechselspannung, kalibriert in Effektivwerten	Scheitelwert

Die angelegte Spannung soll „im wesentlichen“ sinusförmig sein. Bei einem Prüfgerät ist dies nicht so einfach zu verwirklichen. Auf der einen Seite werden sehr hohe Prüfspannungen von bis zu 2kV und mehr benötigt, auf der anderen Seite fließen kurzzeitig extrem hohe Ströme bis zu einigen 10 A. Gute Prüfeinrichtungen haben daher mehrere umschaltbare Bereiche, um den Innenwiderstand der Spannungsquelle möglichst gering zu halten. Da trotz aller Maßnahmen der hohe Scheitelwert des Stromes die Spannungsform beeinflusst, ist es sinnvoll, nicht den Effektivwert der Spannung, sondern wie in der VDE 0414 Teil 7 vorgeschrieben den arithmetischen Mittelwert der gleichgerichteten Spannung zu messen.

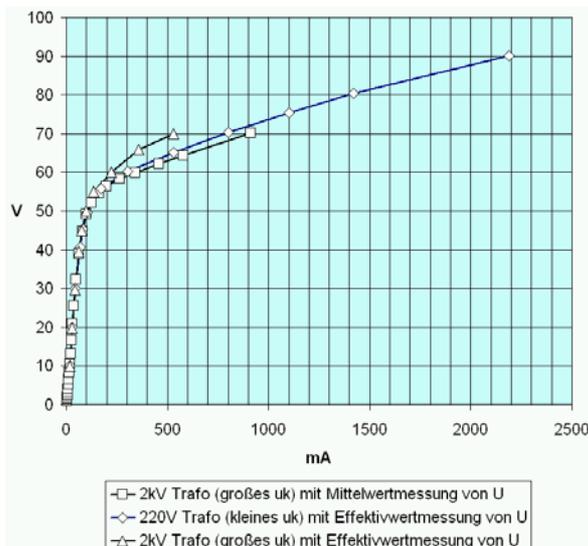


Bild 7 Vergleich Effektivwert - Mittelwert

Die Unterschiede in der Messung sind beachtlich. Bei der Messung in Bild 7 wurde ein Transformator für 2kV (u_k =groß) mit einem Trafo für 220V (u_k =klein) verglichen. Beim 2kV Trafo war die Spannungsform nicht mehr völlig sinusförmig. Die Messung des arithmetischen Mittelwertes der gleichgerichteten Spannung liefert trotzdem genaue Resultate, während die Messung des Effektivwertes eine zu hohe Spannung liefert. Die im Teil 7 vorgeschriebene Messung des Stromscheitelwertes anstelle des Effektivwertes ist sehr zu begrüßen, da \hat{I} proportional dem für das transiente Wandlerverhalten maßgeblichen Scheitelwert der magnetischen Feldstärke ist.

Messeinrichtungen zur Messung der Wandlerdaten

Da die Aufnahme der Magnetisierungskurve relativ zeitaufwendig ist, wird sie in der Praxis nicht sehr häufig durchgeführt. Alle Messungen dieses Beitrags wurden mit einer vollautomatischen Prüfeinrichtung durchgeführt, die neben den Stromwandlerprüfungen auch Prüfungen an Spannungswandlern, Transformatoren, Leistungsschaltern, und vielem mehr ermöglicht. Das kompakte Gerät liefert Ströme bis zu 2000A und Spannungen bis zu 2kV. Alle Prüfungen laufen vollautomatisch ab, der eingebaute Computer speichert die Messwerte. Die in diesem Beitrag gezeigten Protokolle wurden automatisch generiert.



Bild 8 OMICRON CPC 100

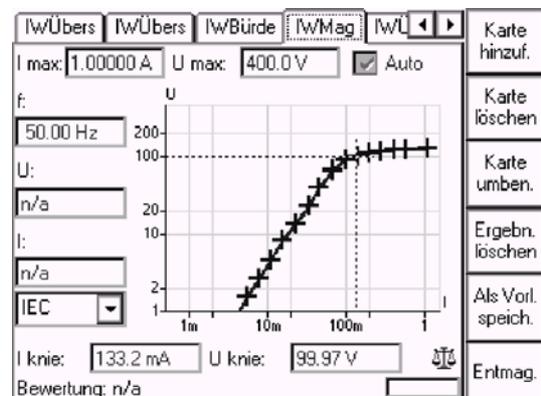


Bild 9 Vollautomatische Messung der Magnetisierungskurve

Schlussfolgerungen

Die neuen Normen VDE 0414 Teil 1 und Teil 7 enthalten detaillierte Definitionen und Prüfanweisungen für Stromwandler, die in Schutzkreisen eingesetzt werden. Moderne Schutztechnik stellt hohe Anforderungen an die transienten Übertragungseigenschaften der Messwandler. Die Prüfung der Wandlerdaten ist dank moderner Technik sehr einfach und rationell möglich. Auf eine „Vor Ort-Prüfung“ sollte nicht verzichtet werden, um die Funktionstüchtigkeit der Schutztechnik zu gewährleisten. Mit den gewonnenen Daten kann eine Rechnersimulation z.B. mit *NetSim* durchgeführt werden. Werden die simulierten Ströme und Spannungen über ein Sekundärprüfgerät wie beispielsweise das *OMICRON CMC 256* den Schutzrelais zugeführt, kann der ganze Schutzkreis unter realistischen Extrembedingungen geprüft werden.

Literatur

- [1] DIN EN 60044-1 – VDE 0414 Teil 1
Messwandler, Teil 1: Stromwandler, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin 2001
- [2] DIN EN 60044-6 – VDE 0414 Teil 7
Messwandler Teil 6: Anforderungen an Stromwandler für Schutzzwecke für transientes Übertragungsverhalten, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin 1999
- [3] IEC 60044-1 Instrument transformers, Part 1
Current transformers, first edition, International Electrotechnical Commission, Genf 1996
- [4] IEC 60044-1 Instrument transformers, Part 1
Current transformers, Amendment 1, International Electrotechnical Commission, Genf 2000
- [5] IEC 60044-6 Instrument transformers, Part 6
Requirements for protective current transformers for transient performance, International Electrotechnical Commission, first edition, Genf 1992
- [6] Norbert Schuster: Differentialschutz mit Transformatoren im Schutzbereich, ETZ, Heft 13-14/2001
- [7] Michael Krüger: CT excitation curve testing methods, Energy Source and Distribution, September/October 2001
- [8] NetSim, Introductory Examples, OMICRON electronics, Klaus 2001