

Mutuelle Kopplung entzaubert

Wie sich zwei parallele Freileitungssysteme beeinflussen

Die mutuelle Kopplung von Freileitungssystemen ist ein Phänomen, dem viele sonderbare Eigenschaften zugeschrieben werden. Wenn Berechnung und Messung von Leitungsimpedanzen nicht auf Anhieb übereinstimmen, hören wir oft die Aussage, dass dies wohl an der mutualen Kopplung liegen wird. Dies kann stimmen, tut es aber oft nicht. Tatsächlich ist die mutuelle Kopplung ein Effekt, der eigentlich leicht zu verstehen ist: Zwei Freileitungssysteme, die parallel verlaufen, beeinflussen sich gegenseitig. Der Beitrag erläutert kurz Hintergründe, die Definition der komplexen Kopplungsimpedanz Z_M und zwei Methoden zur Messung derselben.

Der erste Teil dieses Beitrags bietet die Herleitung der Formeln, die später für die Berechnung der mutualen Kopplungsimpedanz aus den Messergebnissen benötigt werden. Auch wenn die vielen Formeln nicht nach jedermanns Geschmack sind, so sollten doch die ersten Schritte klarmachen, dass die mutuelle Kopplung keine

misst man eine Leiter-Erd-Schleife. Wird die Erde durch das System II verbessert, indem System II an beiden Seiten geerdet wird, verkleinert sich natürlich die Nullimpedanz. Aus den zwei Messergebnissen lässt sich schliesslich die Kopplungsimpedanz berechnen.

Herleitung der mutualen Kopplungsimpedanz

Wenn zwei dreiphasige Systeme über eine lange Distanz parallel verlaufen, kann die Tatsache, dass ein im einen System auftretender Fehlerstrom Ströme im anderen System induziert, nicht länger vernachlässigt werden. Moderne Relais berücksichtigen dies in Form einer Einstellung, der mutualen Kopplungsimpedanz oder des transformatorischen Kopplungsfaktors.

Schauen wir uns hierzu eine Anordnung von zwei Leitern an (Bild 1): Der in System I fließende Strom induziert in System II eine Spannung. Wenn in System II ein Stromfluss möglich ist, kann dieser Strom wiederum eine Spannung in System I induzieren. Hierzu lässt sich folgende Gleichung aufstellen, wobei Z_i die komplexe Leiter-

impedanz selbst darstellt und Z_{i-II} die Impedanz zur Berücksichtigung der Kopplung zwischen den beiden Leitern.

$$U_I = I_I Z_I + I_{II} Z_{I-II} \quad (1)$$

Dasselbe gilt für den anderen Leiter.

$$U_{II} = I_I Z_{I-II} + I_{II} Z_{II} \quad (2)$$

Die Kopplungsimpedanzen zwischen den beiden Systemen sind in beiden Richtungen gleich.

Für dreiphasige Systeme ist das Prinzip dasselbe, nur dass hier mehr Leiter betroffen sind. In Bild 2 ist die Leitung auf einer Seite geerdet, sodass alle Spannungen Bezug gegen Erde haben. Nun tritt die mutuelle Kopplung sowohl zwischen den Leitern desselben Systems als auch gegenüber den Leitern des anderen Systems auf.

$$U_{L11} = I_{L11} Z_{L11} + I_{L21} Z_{L11-L21} + I_{L31} Z_{L11-L31} + I_{L11} Z_{L11-L11} + I_{L21} Z_{L11-L21} + I_{L31} Z_{L11-L31} \quad (3)$$

Die Definition aller Gleichungen für alle Leiter führt zu einer Gleichungsmatrix zur Beschreibung der Situation (Formel 4 unten auf dieser Seite).

Diese Gleichungen lassen sich durch einige Annahmen erheblich vereinfachen. Eine Annahme ist, dass beide Systeme identisch und in sich völlig symmetrisch sind. Die Impedanz eines Einzelleiters nennen wir Z_a , die Kopplung zwischen den Leitern innerhalb eines Systems Z_b und die Kopplungsimpedanz von einem System zum anderen Z_M . Dies vereinfacht die Gleichung wie folgt:

$$\begin{pmatrix} U_{L11} \\ U_{L21} \\ U_{L31} \\ U_{L11} \\ U_{L21} \\ U_{L31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_a & Z_b & Z_b & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_b & Z_a & Z_b & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_b & Z_b & Z_a & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_a & Z_b & Z_b \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_b & Z_a & Z_b \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_b & Z_b & Z_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L11} \\ I_{L21} \\ I_{L31} \\ I_{L11} \\ I_{L21} \\ I_{L31} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Übrigens kann man Z_1 leicht aus der Matrix eines Systems berechnen, indem

Ulrich Klapper, Kees Koreman

geheimnisvolle Sache ist, sondern lediglich die Spannung, die der in einem Leiter fließende Strom in einen anderen, parallelen Leiter induziert. Dies lässt sich bequem mit einer komplexen Impedanz, der sogenannten Kopplungsimpedanz Z_M , ausdrücken.¹⁾ Die Strom-Spannungs-Methode ist damit vom Prinzip her schon erklärt: Der Strom im System I ruft eine Spannung im System II hervor, und diese kann gemessen werden.

Dass die Sache mit dem Induzieren der Spannung natürlich auch vom System II auf das System I wirkt, ist vielleicht nicht auf den ersten Blick zu sehen. Bei der Strom-Strom-Methode wird die Nullimpedanz vom System I zweimal gemessen. Bei der ersten Messung «erlaubt» man, dass die im System II induzierte Spannung auch wirklich einen Strom hervorruft, indem man System II beidseitig erdet. Bei der zweiten Messung wird dies verhindert, indem das System an einem Ende aufgetrennt wird. Da im ersten Fall auch der Strom in System II eine Spannung im System I induziert, verändert sich für die zwei Messungen die Nullimpedanz.

Man kann letzteren Effekt auch anders erklären. Bei der Nullimpedanzmessung

$$\begin{pmatrix} U_{L11} \\ U_{L21} \\ U_{L31} \\ U_{L11} \\ U_{L21} \\ U_{L31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{L11} & Z_{L11-L21} & Z_{L11-L31} & Z_{L11-L11} & Z_{L11-L21} & Z_{L11-L31} \\ Z_{L21-L11} & Z_{L21} & Z_{L21-L31} & Z_{L21-L11} & Z_{L21-L21} & Z_{L21-L31} \\ Z_{L31-L11} & Z_{L31-L21} & Z_{L31} & Z_{L31-L11} & Z_{L31-L21} & Z_{L31-L31} \\ Z_{L11-L11} & Z_{L11-L21} & Z_{L11-L31} & Z_{L11} & Z_{L11-L21} & Z_{L11-L31} \\ Z_{L21-L11} & Z_{L21-L21} & Z_{L21-L31} & Z_{L21-L11} & Z_{L21} & Z_{L21-L31} \\ Z_{L31-L11} & Z_{L31-L21} & Z_{L31-L31} & Z_{L31-L11} & Z_{L31-L21} & Z_{L31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L11} \\ I_{L21} \\ I_{L31} \\ I_{L11} \\ I_{L21} \\ I_{L31} \end{pmatrix} \quad (4)$$

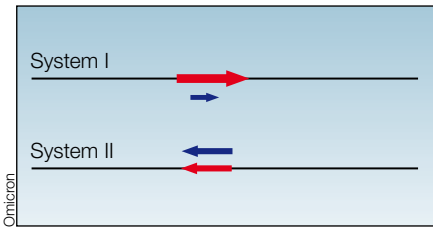


Bild 1 Mutuelle Kopplung zwischen zwei Leitern.

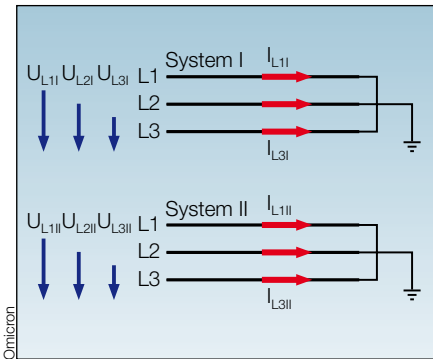


Bild 2 Zwei 3-phasige Systeme mit mutuellem Kopplung.

man gedanklich einen Strom durch die Schleife L1–L2 schickt.

$$\begin{pmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ U_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_a & Z_b & Z_b \\ Z_b & Z_a & Z_b \\ Z_b & Z_b & Z_a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{\text{Test}} \\ -I_{\text{Test}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die Mitimpedanz ist per Definition die Impedanz der halben Schleife und daher:

$$Z_1 = \frac{U_{L1} - U_{L2}}{2 \cdot I_{\text{Test}}} = Z_a - Z_b \quad (7)$$

Möglichkeiten zur Messung von Mitimpedanzen Z_1 und Nullimpedanzen Z_0 wurden bereits in früheren Veröffentlichungen 2003, 2004 und 2006 vorgestellt [1, 2, 3, 4]. Hier werden zwei einfache Arten zur Messung von mutuellen Kopplungsimpedanzen aufgezeigt. Der klassische Ansatz [5] ist die Einspeisung eines Stromes I_0 in jeden einzelnen Leiter von System I und die anschließende Messung der Spannung an den drei Leitern von System II (Bild 3). Wenn die Ströme in System II gleich null sind und alle drei Ströme in System I für jede Spannung von System II gleich I_0 sind, ergibt sich folgende Gleichung:

$$U_{II} = 3 \cdot I_0 Z_M \quad (8)$$

Die oben beschriebene Methode ist einfach zu verstehen, allerdings erweist sich bei der praktischen Messung eine andere Methode als einfacher, da diese keine Verdrahtung an System II erfordert. Bei dieser Methode wird die Nullimpedanz von System I zweimal gemessen, einmal bei an beiden Seiten geerdetem System II und einmal bei (mindestens einseitig) offenem System II

(Bild 4). Für die erste Messung wird die Leitung ein- oder beidseitig geöffnet. Der Strom in System II ist dann gleich null, was uns folgende Ableitung aus der ersten Zeile von Gleichung (5) erlaubt:

$$U_{01} = 2 \cdot I_0 Z_0 + I_0 Z_a \quad (9)$$

$$\frac{U_{01}}{I_0} = Z_{01} = 2 \cdot Z_0 + Z_a \quad (10)$$

Z_{01} ist das Messergebnis für die Messung der Nullsystem-Komponente von System I bei zumindest einseitig offenem System II.

Das zweite Ergebnis wird bei beidseitig geerdetem System II ermittelt und Z_{02} benannt. Dabei ist die Spannung in System II null, weil es ja beidseitig geerdet ist. Verwenden wir die letzte Zeile von Gleichung (5), so ergibt sich:

$$0 = 3 \cdot I_0 Z_M + 2 \cdot I_0 Z_b + I_0 Z_a \quad (11)$$

$$I_{II} = -\frac{3 \cdot I_0 Z_M}{2 \cdot Z_b + Z_a} \quad (12)$$

Die erste Zeile von Gleichung (5) ist etwas komplexer:

$$U_{02} = 2 \cdot I_0 Z_b + I_0 Z_a + 3 \cdot I_{II} Z_M \quad (13)$$

Unter Verwendung von Gleichung (12) erhält man:

$$U_{02} = 2 \cdot I_0 Z_b + I_0 Z_a - 3 \cdot \frac{3 \cdot I_0 Z_M}{2 \cdot Z_b + Z_a} Z_M \quad (14)$$

$$\frac{U_{02}}{I_0} = Z_{02} = 2 \cdot Z_b + Z_a - 3 \cdot \frac{3 \cdot Z_M}{2 \cdot Z_b + Z_a} Z_M \quad (15)$$

Z_{02} ist das Messergebnis für die Messung der Nullsystem-Komponente von System I bei kurzgeschlossenem System II. Durch Einsetzen von Gleichung (10) in Gleichung (15) erhält man folgende Vereinfachung:

$$Z_{02} = Z_{01} - 3 \cdot \frac{3 \cdot Z_M}{Z_{01}} Z_M \quad (16)$$

Dies ermöglicht uns nun eine einfache Berechnung von Z_M aus den zuvor gemessenen Ergebnissen.

$$Z_M = \frac{1}{3} \sqrt{(Z_{01} - Z_{02}) \cdot Z_{01}} \quad (17)$$

Der grosse Vorteil der Strom-Strom-Methode im Vergleich zur Strom-Spannungsmethode liegt darin, dass kein Eingriff in System II erforderlich ist. Zwar muss das System immer noch ausser Betrieb genommen werden, und die Erdtrenner müssen während der beiden Messungen bedient werden; verglichen mit Spannungsmessungen an System II, die unter Umständen in einer erheblichen Entfernung vom Endpunkt von System I durchgeführt werden müssen, ist dies jedoch schnell erledigt.

Da die meisten Relais keine direkte Eingabe der mutuellen Kopplungsimpedanz erlauben, sondern die Eingabe dieser Grösse als Faktor bezogen auf die Mitimpedanz erfordern, muss dieser noch berechnet werden. Wie beim k-Faktor existieren auch hierfür je nach Relaishersteller unterschiedliche Formate. Ein mögliches Format ist ein komplexer transformatorischer Kopplungsfaktor, bei dem die mutuelle Kopplungsimpedanz, bezogen auf die Mitimpedanz der Leitung, als Verhältnis eingestellt wird.

$$k_M = \frac{Z_M}{Z_1} \quad (18)$$

Eine weitere Definition splittet den ohmschen und den induktiven Anteil in zwei Werte. R_L und X_L sind hierbei die reale und die imaginäre Komponente der Mitimpedanz und R_M und X_M die Komponenten der komplexen Kopplungsimpedanz Z_M .

$$\frac{R_M}{R_L} \text{ und } \frac{X_M}{X_L} \quad (19)$$

Messung von k-Faktoren

Verglichen mit der Berechnung ist die Messung der Leitungsparameter einschliesslich der k-Faktoren heutzutage relativ einfach zu machen. Wie für die Messung der Leitungsimpedanz werden das Prüfgerät CPC 100 zur Erzeugung von variablen

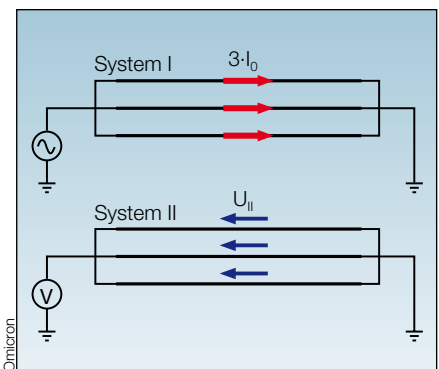


Bild 3 Strom-Spannungsmethode zur Messung der mutuellen Kopplung.

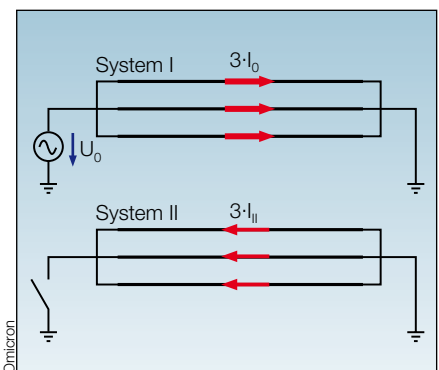


Bild 4 Strom-Strom-Methode zur Messung der mutuellen Kopplung.



Bild 5 Für die Messung werden ein Prüfgerät zur Erzeugung von variablen Frequenzen, eine Kopplungseinheit sowie eine Erdungseinheit für den Anschluss an die Freileitung benötigt.

Frequenzen, die die Kopplungseinheit CP CU1 sowie die Erdungseinheit CP GB1 für den Anschluss an die Freileitung benötigt (Bild 5). Für die klassische Leitungsimpedanzmessung sind sieben Messungen erforderlich: Drei Messungen der Leiter-Leiter-Schleifen (L1-L2, L1-L3 und L2-L3), drei Messungen der Leiter-Erde-Schleifen (L1-E, L2-E und L3-E) und eine Messung der Schleife aller drei Leiter gegen Erde (L1L2L3-E). Alle hierfür generierten Signale besitzen eine von der Netzfrequenz abweichende Frequenz, und alle Messungen werden frequenzselektiv entsprechend diesen Frequenzen durchgeführt. Diese Frequenzdifferenz ist notwendig, um Interferenzen durch andere in Betrieb befindliche Systeme zu verhindern, welche die Messergebnisse andernfalls unbrauchbar machen würden.

Die letzte der oben genannten Messungen ist die Messung der Nullimpedanz. Diese wird normalerweise bei in Betrieb befindlichem Parallelsystem durchgeführt. Hierfür gibt es zwei Gründe: Erstens wollen Versorgungsunternehmen normalerweise nicht zwei Systeme gleichzeitig ausser Betrieb nehmen. Der zweite Grund (der jedoch oft zu Unrecht vernachlässigt wird) ist, dass das Ergebnis natürlich realistischer ist als bei abgeschaltetem Parallelsystem. Bei einem echten Fehler in System I ist es wohl wahrscheinlich, dass das Parallelsystem ebenfalls in Betrieb ist. Deshalb sollte dieses auch bei der Messung in Betrieb sein.

Für die tatsächliche Messung der mutualen Kopplungsimpedanz muss das Parallelsystem jedoch ausser Betrieb genommen werden. Nun werden zwei zusätzliche Messungen für System I durchgeführt. Ohne Änderung der Verkabelung an System I wird System II nun beidseitig geerdet und die Messung wiederholt. Dann wird System II mindestens an einem Ende geöffnet, sodass ein Stromfluss unterbunden wird, und die Messung an System I erneut ausgeführt.

Nun liegen drei Ergebnisse für die Nullimpedanz von System I vor. Das erste Ergebnis wird zur Berechnung des k-Faktors verwendet, die beiden letzten zur Berechnung der mutualen Kopplungsimpedanz entsprechend Formel (17). Mithilfe der Vorlage für die mutualen Kopplungsimpedanz werden diese Berechnungen automatisch durchgeführt, sodass keine manuelle Nacharbeit erforderlich ist (Bild 6).

Fallstudie

Wir vergleichen für eine 150-kV-Leitung in den Niederlanden die Ergebnisse der Strom-Spannungs-Methode mit den Ergebnissen der Strom-Strom-Methode, um herauszufinden, ob die Ergebnisse übereinstimmen. Auf den Masten waren zwei Systeme geführt, eines mit der Bezeichnung WIT, das andere mit der Bezeichnung ZWART. Die Gesamtlänge der Leitung betrug 22,5 km. Die Untersuchung fand im Oktober 2005 statt.

Zuerst wurde die Nullimpedanz des Systems ZWART gemessen, das System WIT war dabei ausser Betrieb, am entfernten Ende geerdet und am nahen Ende offen. Das Ergebnis war $Z_{01} = 22,100e^{j79.93^\circ} \Omega$. Dann wurde der Erdtrenner des Systems WIT am nahen Ende geschlossen und die Nullimpedanz des Systems ZWART erneut gemessen. Aufgrund des kurzgeschlosse-

nen Parallelsystems war das Ergebnis diesmal kleiner: $Z_{02} = 17,555e^{j81.68^\circ} \Omega$.

Anhand von Formel (17) konnte Z_M wie folgt berechnet werden:

$$Z_M = \frac{1}{3} \sqrt{(Z_{01} - Z_{02}) \cdot Z_{01}} = 3,355e^{j77.01^\circ} \quad (20)$$

Nun wurde die andere Methode ausprobiert. Der Strom wurde immer noch in System ZWART eingespeist, diesmal wurde das System WIT jedoch am nahen Ende wieder geöffnet und dort die Spannung gemessen. Es wurde nur die Summe der drei eingespeisten Ströme gemessen, $3 \cdot I_0$ war also $11,831e^{j0^\circ} A$. Die Spannung betrug $38,742e^{j76.39^\circ} V$. Anhand von Formel (8) kamen wir zu folgendem Ergebnis:

$$Z_M = \frac{U_{||}}{3 \cdot I_0} = 3,275e^{j76.39^\circ} \quad (21)$$

Die Ergebnisse der beiden Methoden zeigen eine überraschend gute Übereinstimmung. Für solch eine schwierige Messung erscheint eine Abweichung von 2,5% als sehr akzeptabel.

Schlussfolgerung

Die Messung der mutualen Kopplung ist mit modernen Mitteln ein Zusatzaufwand von wenigen Minuten, wenn man bereits die Nullimpedanz misst. Vorausgesetzt, man kann das parallele System ausser Be-

fachbeiträge

Mutuelle Kopplung - Vorlage					
Vorlage:	Mutual Coupl.				
Version:	1.40	OMICRON			
Prüfung durchgeführt von:		XML-File Laden			
Omicron electronics GmbH		Bericht Drucken			
Oberes Ried 1					
A-6833 Klaus					
Tel.: +43 / 55 23 / 507 - 333					
support@omicron.at					
Leitung:					
Ulrich Klapper					
Teilnehmer:					
Kees Koreman, Martin Vester, Mitarbeiter von Eneco u.a.m.					
Testobjekte:					
Name System I	APE-KAT WIT				
Länge System I	23km				
Name System II	APE-KAT SWART				
Länge System II	23km				
Test Information:					
Datum:	2005-10-18 14:47				
CPC Ergebnisdater:	W:\Ullrich\ad00\Projects\CPC 100\WIN\PMTS\Templates\CPC 100 & CP CU1 or CP CU2\Mutual Coupling\Mutual Coupling Example.xml				
Measurements:		R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
L1-L2: $Z_{L1} + Z_{L2}$		2,964	18,637	18,871	80,96°
L1-L3: $Z_{L1} + Z_{L3}$		2,944	18,095	18,333	80,76°
L2-L3: $Z_{L2} + Z_{L3}$		2,869	17,484	17,718	80,68°
L1-E: $Z_{L1} + Z_E$		2,134	12,725	12,903	80,48°
L2-E: $Z_{L2} + Z_E$		2,160	12,443	12,629	80,15°
L3-E: $Z_{L3} + Z_E$		2,060	12,694	12,860	80,78°
L1L2L3-E: $Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3} + Z_{0E}$ mit System II ein		1,148	6,604	6,703	80,14°
L1L2L3-E: $Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3} + Z_{0E}$ mit System II geerdet		0,847	5,790	5,852	81,68°
L1L2L3-E: $Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3} + Z_{0E}$ mit System II offen		1,288	7,253	7,367	79,93°
Gemessene Impedanzen:		R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
Nullimpedanz Z_0		1,463	9,036	9,154	80,80°
Kopplungsimpedanz Z_M		3,444	19,812	20,109	80,14°
Kopplungsnullimpedanz Z_{0M}		0,779	3,264	3,355	76,57°
k-Faktor Format:		RE / RL und XE / XL			
k-Faktor:		RE/RL [1] XE/XL [1]			
k-Faktor RE / RL und XE / XL		0,451 0,398			
Mutuelles Kopplungsfaktor Format:		RM / RL und XM / XL			
Mutuellem Kopplungsfaktor:		RM/RL [1] XM/XL [1]			
Mutuellem Kopplungsfaktor RM / RL und XM / XL		0,533 0,361			

Bild 6 Excel-Vorlage für die mutualen Kopplungsmessung

trieb nehmen. Durch die Nullimpedanzmessung an einem System können durch Kurzschliessen und Offenlassen des anderen Systems alle notwendigen Parameter ermittelt werden. Der Vergleich mit der konventionellen Messung mit Einspeisung eines Stromes und Messung der Spannung am parallelen System zeigt, dass die zwei Methoden eine gute Übereinstimmung bieten.

Referenzen

- [1] L. Fickert: Bestimmung von Selbst- und Koppelimpedanzen, Omicron-Anwendertagung, Friedrichshafen, 2003, 6.1–6.8.
- [2] S. Kaiser: Unterschiedliche Ausprägungen der Erdimpedanzanpassung in Distanzschutzgeräten – Welche Impedanz misst ein digitaler Distanzschutz?, Omicron-Anwendertagung, Friedrichshafen, 2004, 11.1–11.5.
- [3] R. Wild: Einfluss des beidseitig geerdeten Kabelschirms auf die elektrischen Kennwerte (R/X), Omicron-Anwendertagung, Weimar, 2006, 9.1–9.8.
- [4] A. Dierks: Accurate Calculation and Physical Measurement of Transmission Line Parameters to Improve Impedance Relay Performance, Proceedings Southern African Power System Protection Conference, 2004, Eskom Enterprises, 143–149.
- [5] J. Neufert: Induktive Kopplung bei Doppelleitungen, Technische Universität Berlin, Fachbereich Elektrotechnik, 1996, 83–84.

Angaben zu den Autoren

Ulrich Klapper, Dipl.-Ing., hat an der Fernuniversität Hagen Elektrotechnik studiert. Vor, während und nach dem Studium war er seit 1986 bei den Firmen Kempter Elektronik und Neutrik in der Elektronikentwicklung tätig. Seit 1998 arbeitet er für Omicron, zuerst in der Entwicklung am CPC 100, 2003 wechselte er ins Produktmanagement für Primärtechnikprodukte.
Omicron GmbH, A-6833 Klaus,
ulrich.klapper@omicron.at

Kees Koreman begann 1980 nach dem Studium bei Kema im Electrical Research Department. 1990 wurde er bei Sep Schutz- und Kon-

trollingenieur. Zwischen 1995 und 2001 war er für die Niederlande im Cigré Study Committee SCB5 «Protection and control». Heute arbeitet er beim niederländischen Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO in der Abteilung für Asset Management und ist im HVDC-Projekt NorNed involviert.
TenneT TSO B.V., NL-6800 Arnhem,
k.koreman@tennet.org

¹⁾ Der Einfachheit halber sind die komplexen Variablen wie Z , I oder U im Artikel nicht unterstrichen. Die Berechnungen sind aber durchwegs mit komplexen Zahlen durchzuführen.

Résumé

Démystification du couplage mutuel

Influence mutuelle de deux lignes aériennes parallèles. Le couplage mutuel des systèmes de lignes aériennes est un phénomène auquel on attribue bien des propriétés étranges. Lorsque le calcul et la mesure d'impédance des lignes ne concordent pas d'emblée, on nous déclare souvent que cela serait dû au couplage mutuel. Cela peut être vrai, mais ce n'est souvent pas le cas. En fait, le couplage mutuel est un effet facile à comprendre: deux lignes aériennes disposées parallèlement s'influencent l'une l'autre. L'article expose les raisons cachées, la définition de l'impédance complexe de couplage Z_M et deux méthodes permettant de la mesurer.