

Praxis der Ermittlung von Nullgrößen für isolierte und kompensierte Netze

Walter Schossig
Dr. Gernot Druml

VDE Thüringen
Trench Austria GmbH

Gotha
Linz

Deutschland
Österreich

info@walter-schossig.de
g.druml@ieee.org

Kurzfassung

Eine elementare Voraussetzung für das Arbeiten von Schutzeinrichtungen ist die richtige Messgrößengewinnung und -zuführung. Die Praxis zeigt, dass speziell beim Erdschlussrichtungsschutz immer wieder Fehler bei der Beschaltung der Spannungsmessung bzw. der Montage des Kabelumbauwandlers gemacht werden. Die Folge sind neben Spannungswandler-Explosionen falsche bzw. fehlende Erdschlussrichtungsanzeigen.

In diesem Beitrag werden unterschiedliche Messschaltungen und die Unterschiede zwischen U_0 , U_{0d} , U_{NE} , U_{ne} sowie die Unterschiede zwischen I_0 , $3I_0$ und I_E aufgezeigt.

Es werden auch die Auswirkungen der Erdung der sekundären Messwicklung betrachtet.

1 Einleitung

Da jeder Querfehler und, bei einseitiger Einspeisung auch der seltener vorkommende Längsfehler, in Drehstromsystemen Spannungsunsymmetrien verschiedener Art hervorruft, ist das Kriterium Spannung zur Unterscheidung von Betriebs- und Fehlerfall das am häufigsten verwendete Kriterium [1]. Allerdings kann in manchen Fällen messtechnisch nicht immer eine eindeutige Unterscheidung zwischen einer großen natürlichen kapazitiven Unsymmetrie und einer hochohmigen Unsymmetrie getroffen werden.

Wenn das Kriterium Spannung für die Fehlererkennung verwendet wird, benötigt man für die Erkennung des Erdschlusses in einem isolierten oder kompensierten Netz die im Fehlerfall auftretende Verlagerungsspannung. Die Überschreitung eines definierten Grenzwertes wird als Erdschluss definiert. Für die Präventivmaßnahme der Abstimmung der Petersen-Spule, die im erdschlussfreien Betrieb erfolgt, wird auch die natürliche Unsymmetriespannung benötigt [2].

Das Schutzkriterium Spannung liefert eine ungerichtete Meldung. Erst eine zusätzliche Auswertung der Richtung des Nullstromes, in Bezug auf die Verlagerungsspannung, ermöglicht eine gerichtete Erdschlusserfassung.

In der Vergangenheit wurde sehr oft die Richtung der Erdschlussanzeige erst nach dem ersten Fehler und einer Fehlanzeige durch Umverdrahtung des Nullstromes oder der Nullspannung korrigiert.

Da im gesunden Betrieb die Nullgrößen sehr klein sind, ist es bei der Inbetriebnahme nicht so einfach, die Richtigkeit der Verdrahtung zu prüfen. Mit diesem Beitrag sollen ein paar Hilfestellungen gegeben werden.

2 Nullspannung

2.1 Historie

In einem Patent aus dem Jahre 1922 stellt *P.v.d. Sterr*, V & H, die messtechnischen Lösungen zur Ermittlung der Nullspannung vor [7]:

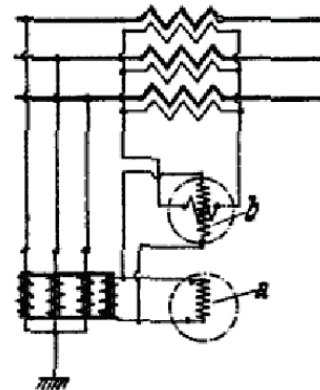


Bild 1 Ermittlung der Nullspannung, *P.v.d. Sterr*: vierter Schenkel einer Erdungsdrosselspule

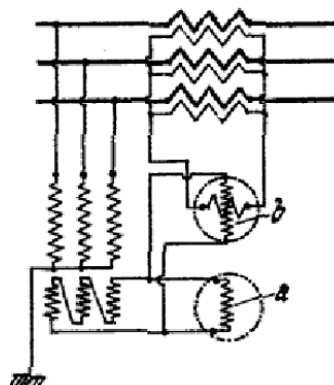


Bild 2 Ermittlung der Nullspannung, *P.v.d. Sterr*: offene Dreieckswicklung

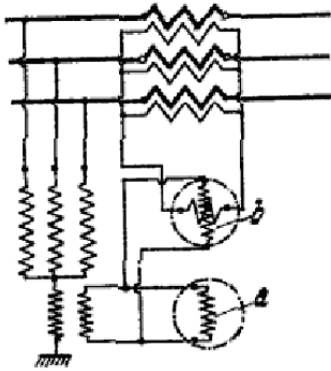


Bild 3 Ermittlung der Nullspannung, *P.v.d. Sterr*: am Transformator angeschlossene Erdungsspule

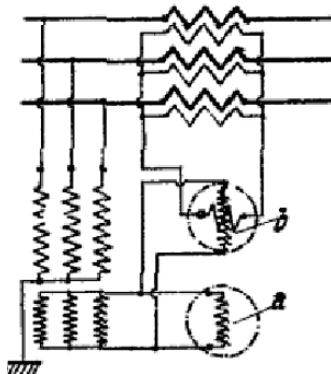


Bild 4 Ermittlung der Nullspannung, *P.v.d. Sterr*: Asymmetrieschaltung an der Sekundärspule einer Erdungsdrosselspule

In der Praxis haben sich die Lösungen gem. **Bild 2** als "offene Dreieckswicklung" und **Bild 3** als zusätzliche Spannungsmesswicklung in den Petersen-Spulen durchgesetzt.

2.2 Zeigerdiagramme

Die Messwicklung in der Petersen-Spule wird bei den üblichen Abstimmungsalgorithmen als Istwertgeber für den Verstimmungsgradregler genutzt. Bei diesen Standard-Verfahren ist nur der Betrag, aber nicht die Richtung des Zeigers der Verlagerungsspannung von Interesse.

Hingegen ist bei der gerichteten Erdschlusserfassung die Richtung der in der Erdschlusshilfswicklung gewonnenen e-n-Spannung (neu: da-dn-Spannung) von entscheidender Bedeutung. Hierzu besitzen die einpolig isolierten Spannungswandler neben der für $100/\sqrt{3}$ V ausgelegten Messwicklung eine $100/3$ -V-Hilfswicklung (**Bild 6**), durch deren Reihenschaltung ein offenes Dreieck entsteht.

Um die Zeiger der Spannungen richtig zusammzusetzen, wird zunächst die Kennzeichnung aus der Norm EN 60044-2 [4] für die Anschlüsse zitiert:

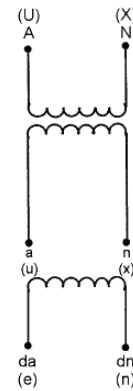


Bild 5 Kennzeichnung laut EN 60044-2: Einphasiger Spannungswandler mit einer Wicklung zur Erdschlusserfassung (e)

Im **Bild 6** ist der Wickelsinn (Wickelrichtung) durch Punkte gekennzeichnet.

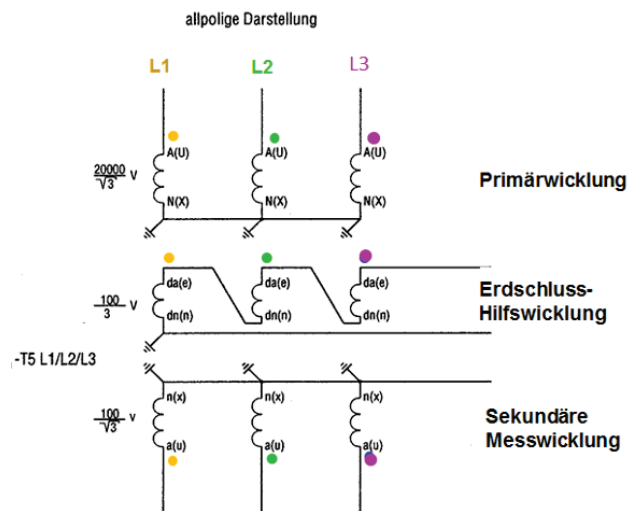


Bild 6 Schaltbild eines Spannungswandlersatzes

In **Bild 7** ist die zugehörige einpolige Darstellung des Spannungswandlersatzes mit Erdschlusserfassung dargestellt.

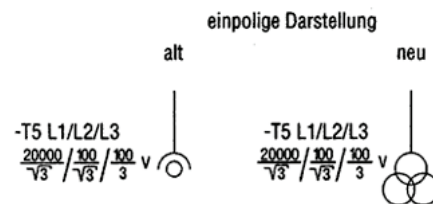


Bild 7 Einpolige Darstellung eines Spannungswandlersatzes

Bild 8 zeigt die geometrische Darstellung der Spannungszweiger auf der Primär- und Sekundärseite des Wandlersatzes im erdschlussfreien Betrieb mit einer kleinen natürlichen Unsymmetrie [6].

Bei der Addition der Spannungen in der offenen Dreieckswicklung ist der Wicklungssinn der Primärwicklung und der Erdschlusshilfswicklung zu beachten.

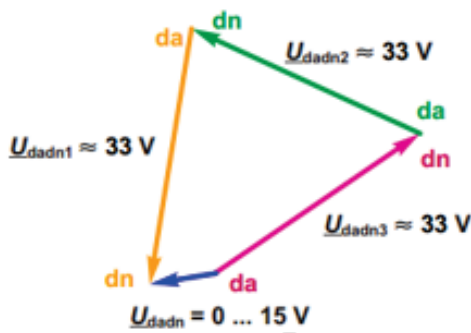
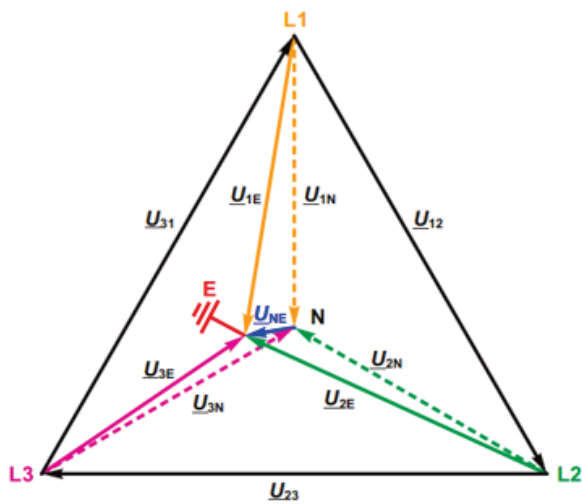


Bild 8 Spannungsverhältnisse im gesunden Netz
oben: Primärseite
unten: Sekundärseite

Aus dem Zeigerdiagramm sind die folgenden Zusammenhänge erkennbar:

$$\underline{U}_{dadn} = \underline{U}_{en} = \underline{U}_{NE} / \dot{u}_{Tr} = - \underline{U}_{EN} / \dot{u}_{Tr} = 3 \cdot \underline{U}_0 \quad (1)$$

Daraus ergeben sich die folgenden Anmerkungen:

- **Wesentlich ist, dass die Richtung der Primärspannung \underline{U}_{NE} gegenüber der Sekundärspannung \underline{U}_{ne} um 180° gedreht ist.**
- **Außerdem ist erkennbar, dass die sekundärseitige Erdung der da(e)-dn(n)-Wicklung keinen Einfluss auf die Richtung der gemessenen Spannung \underline{U}_{ne} hat.**
- **Die sekundären Indizes ne entsprechen nicht den primären Indizes NE**
- **Die resultierende Richtung von \underline{U}_{en} der offenen Dreieckswicklung ist unabhängig von der Reihenfolge der Verschaltung der Sekundärwicklungen**
- **des offenen Dreiecks. Es ergibt sich immer die gleich Richtung des Zeigers.**

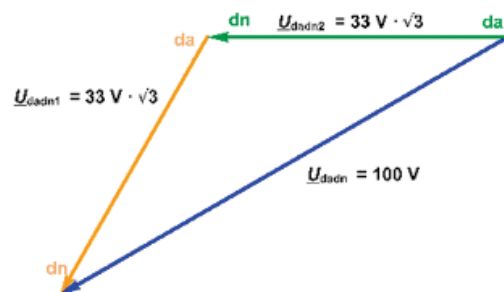
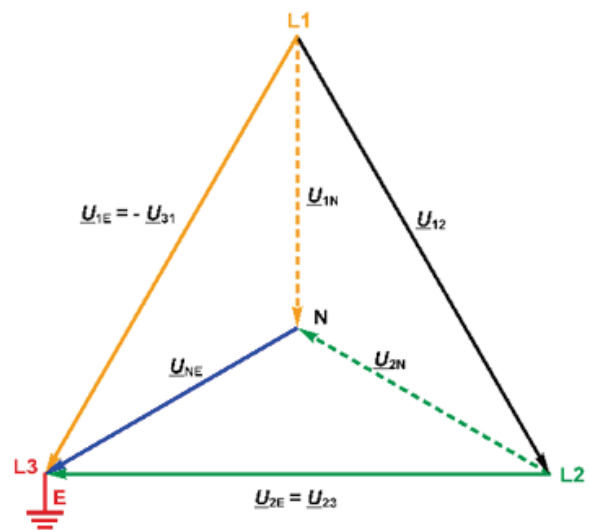


Bild 9 Spannungsverhältnisse bei Erdschluss in L3
oben: Primärseite
unten: Sekundärseite

Per Definition aus den symmetrischen Komponenten ist die Nullspannung:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}}{3} \quad (2)$$

Für die Erdschlusserfassung wird das Übersetzungsverhältnis so gewählt, dass bei einem symmetrischen Netz und bei Nennspannung auf der Primärseite auf der Sekundärseite in jeder Wicklung eine Spannung von $100/3 = 33.3$ V je Wicklung gemessen wird (**Bild 8**).

Im Falle eines satten Erdschlusses in der Phase L3, d.h. einem Übergangswiderstand von 0 Ohm, ergibt sich im gelöschten und isolierten Netz eine Spannungsverteilung nach **Bild 9**.

Dabei ist erkennbar, dass die Beträge der Spannungen U_{1E} und U_{2E} um den Faktor $\sqrt{3}$ größer werden. Somit werden auch die Spannungen auf der Sekundärseite um den gleichen Faktor größer. Der Betrag der geometrischen Summe der beiden Sekundärspannungen wird 100 V. Die Richtung von \underline{U}_{en} entspricht der Richtung von \underline{U}_{NE} . Durch die geeignete Wahl des Übersetzungsverhältnisses der Erdschlusshilfswicklung wird erreicht, dass der Betrag

der e-n Wicklung für die dreifache Nullspannung ($3\underline{U}_0$) den Wert von 100 V liefert.

Wird hingegen die Nullspannung im Erdschlussrelais aus den drei Messwicklungen rechnerisch ermittelt, so erhält man eine um $\sqrt{3}$ größere Spannung. Die Messwicklungen sind so ausgelegt, dass 100 V der Sekundärspannung 100% der primären verketteten Spannung entspricht, oder, anders formuliert, im Falle eines satten Erdschlusses im Leiter L3 werden die beiden Beträge von U_{1E} und U_{2E} auf der Sekundärseite 100 V. Somit wird der Betrag der Spannung für den satten Erdschluss:

$$3 * U_0 = 100 * \sqrt{3} = 173.21 \text{ V}$$

Durch die im Netz vorhandenen unterschiedlichen Leiter-Erde-Kapazitäten in L1, L2 und L3 ergibt sich eine natürliche Unsymmetrie, die im Freileitungsnetz (infolge unterschiedlicher Leiter-Erde-Abstände) bis etwa 15 V und im Kabelnetz (gleiche Abstand Leiter-Schirm beim Einleiterkabel) einen Betrag von wenigen mV annimmt.

Wie bereits oben erwähnt, hat die Erdung der Sekundärwicklung keinen Einfluss auf die Richtung des Zeigers von \underline{U}_{en} . Die sekundärseitige Erdung dient lediglich als Schutzmaßnahme für einen Isolationsdurchbruch von der Primär- zur Sekundärseite.

2.3 Vergleich: Messung von \underline{U}_{en} an der E-Spule und Messung mit der offenen Dreieckswicklung

In den folgenden Bildern sind die oben erwähnten zwei Methoden zur Messung von \underline{U}_{en} noch einmal aufgezeigt.

Beide Varianten führen eine geometrische Summenbildung der drei Spannungen durch. Das Ergebnis der beiden Messungen müsste identisch sein.

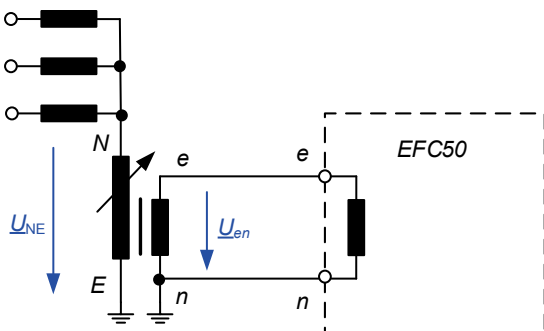


Bild 10 Messung von \underline{U}_{en} an der E-Spule

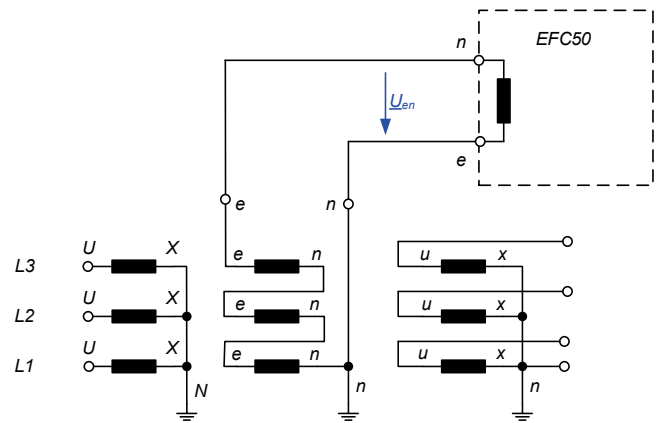


Bild 11 Messung von \underline{U}_{en} mit drei Messwandlern

In der Praxis sind die Unterschiede der Werte der Messungen von \underline{U}_{en} der beiden Schaltungen sehr groß. Dies muss insbesondere während des gesunden Netzbetriebes für den Petersen-Spulen Regler bzw. beim Parallelbetrieb von mehreren Reglern beachtet werden [2].

Bei Verwendung der offenen Dreieckswicklung können Wandler mit einer Klassengenauigkeit von 0.1 gewählt werden.

Im **Bild 10** erfolgt die Summenbildung der drei Spannungen durch den Leistungstransformator. Für den Leistungstransformator kann man aber keine Klasse 0.1 fordern. Die Klassengenauigkeit beim Leistungstransformator beträgt höchstens 3 oder 5. Dementsprechend ungenau ist die Summenbildung. Klasse 3 würde bedeuten, dass durchaus ein \underline{U}_{en} von 3 % angezeigt wird, obwohl die Summe der drei Spannungen auf der Primärseite Null ist. Wenn parallel dazu mit den Messwandlern gemessen wird, so wird dort der Fehler im Bereich von 0.1 % liegen.

Wird die Messung, wie hier angedeutet zur Regelung von Petersen-Spulen verwendet, dann sollte bei Regelverfahren die auf dem Abfahren der Resonanzkurve beruhen, die Verlagerungsspannung direkt von der Petersen-Spule verwendet werden. Andernfalls kann es passieren, dass der Regler in der oberen oder unteren Endstellung hängen bleibt. Details siehe in [2].

2.4 Prüfung

Die Prüfung der richtigen Verschaltung der Mess- und Erdschluss hilfswicklung erfordert eine dreipolige Primärprüfung. Bewährt hat sich eine Beaufschlagung der Primärwicklung mit einem Spannungswert, so dass sekundärseitig an der Messwicklung $U_{LL} = 1 \text{ V}$ bzw. $U_{LN} = 0,58 \text{ V}$ und im Erdschlussfall $U_{dadn} = 1 \text{ V}$ gemessen werden [5]. **Bild 12** zeigt den Prüfaufbau und **Bild 13** bis **Bild 16** die Messergebnisse.

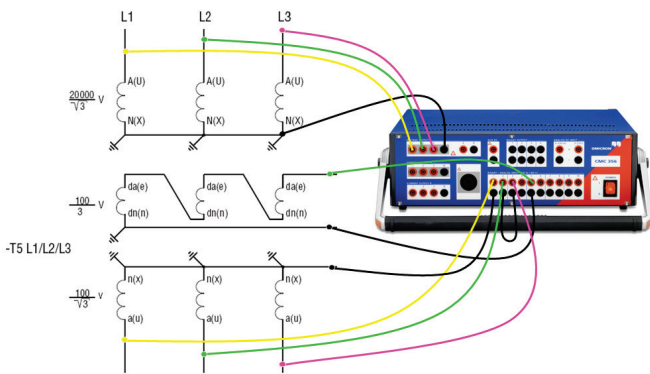


Bild 12 Prüfung des Spannungswandlersatzes mit CMC356, Omicron

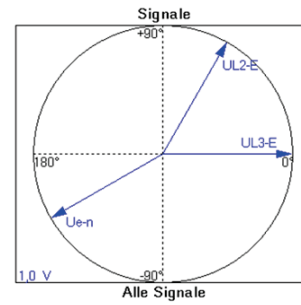


Bild 16 Offenes Dreieck: en-Wicklung falsch

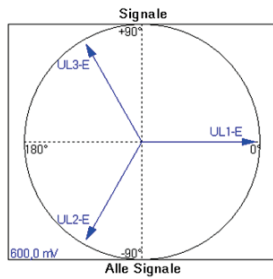


Bild 13 Messwicklung bei einem gesunden Netz

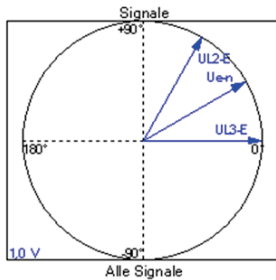


Bild 14 Messwicklung und Erdschlusswicklung bei Erdschluss im Leiter L1

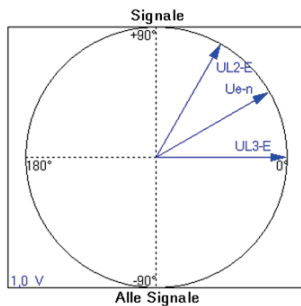


Bild 15 Offenes Dreieck: en-Wicklung richtig

3 Nullstrom

Per Definition aus den symmetrischen Komponenten ist der Nullstrom:

$$I_0 = \frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3} \quad (3)$$

Entsprechend müssen die Mess-Schaltungen aufgebaut werden.

3.1 Zeigerdiagramme

Die anliegende Betriebsspannung führt zu einem Ladestrom über den Kondensator Leiter – Erde mit dem Dielektrikum Luft bei Freileitungen bzw. PE bei Kabeln.

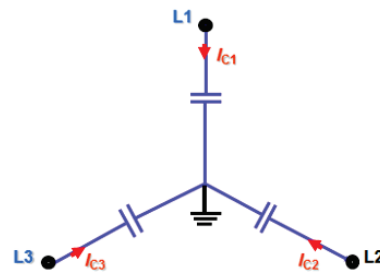


Bild 17 Ersatzschaltung einer Drehstromleitung

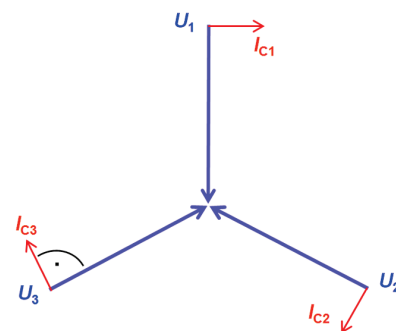


Bild 18 Zeigerdiagramme für Strom und Spannung im gesunden Betrieb

Im gesunden Betrieb sind die drei Ladeströme zur Erde gleich groß:

$$I_{Ce} = 3 \cdot I_0 = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} = 0 \quad (4)$$

Bei einem Erdschluss in Phase L1 ergibt sich das Zeigerbild entsprechend **Bild 19**

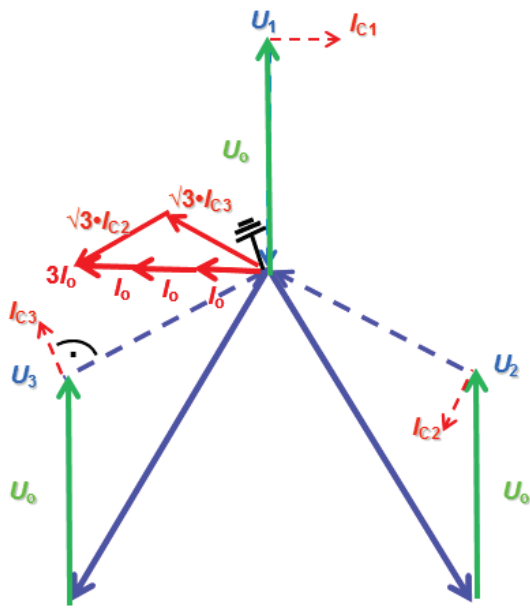


Bild 19 Zeigerdiagramm im Falle eines Erdschlusses in Phase L1

Für eine selektive (abgangsbezogene) Erdschlusserfassung wird neben der Verlagerungsspannung der Nullstrom des Leitungsabganges für die Richtungsbestimmung benötigt. **Bild 20** zeigt die messtechnischen Möglichkeiten der Nullstrommessung. Während bei dem Erdschlusswischerverfahren die Holmgrenschaltung angewandt werden kann, hat sich bei den wattmetrischen und den Oberschwingungsverfahren der Einsatz von Kabelumbauwandlern, auch nach seinem Erfinder Ferranti-Wandler genannt, durchgesetzt.

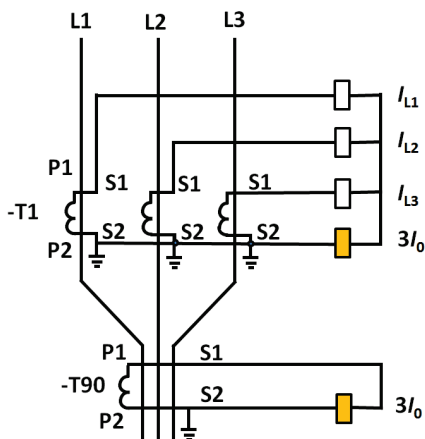


Bild 20 Möglichkeiten der Nullstrommessung:
-T1: Holmgrenschaltung bzw.
-T90: Kabelumbauwandler

Beim Kabelumbauwandler ist zu beachten, dass die Kabelmantelerden isoliert durch den Wandler zurückgenommen und erst dann mit der Stationserde verbunden werden, siehe **Bild 22**.

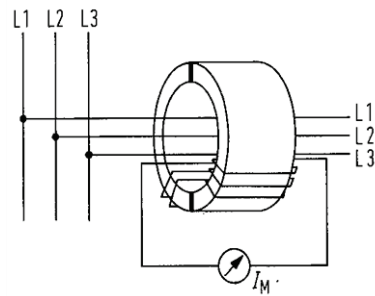


Bild 21 Kabelumbauwandler

Bei der Holmgrenschaltung werden, wie bei Berechnung der Nullspannung mit Hilfe der offenen Dreieckswicklung, zuerst drei große Werte fehlerhaft transformiert und erst danach summiert. Der verbleibende Nullstrom ist klein und die Einzelfehler der Wandler wirken sich stark aus. Beim Kabelumbauwandler erfolgt hingegen zuerst die Addition der drei Magnetfelder. Das resultierende Magnetfeld wird dann mit der entsprechenden Klassengenauigkeit des Wandlers transformiert. Daraus ergibt sich die wesentlich höhere Klassengenauigkeit der Kabelumbauwandler.

Die sekundärseitige Erdung des Wandlers ist auch hier eine reine Schutzmaßnahme und **hat keinen Einfluss auf die Richtung**.

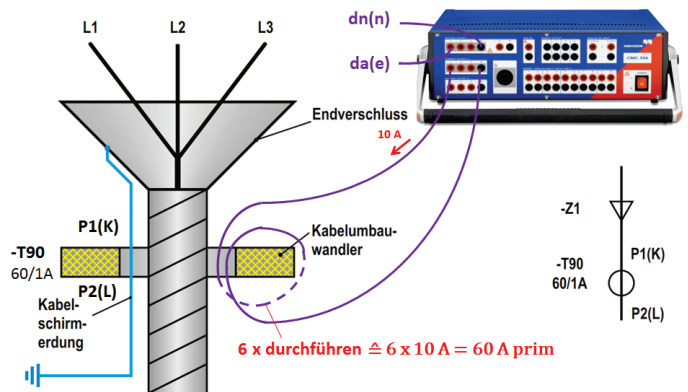


Bild 22 Prüfung der Wandleranschlusung mit CMC356, Omicron

3.2 Prüfung

Um die gesamte Schaltung zu prüfen hat sich auch hier die Primärprüfung bewährt. Eine übliche Prüfschaltung zeigt **Bild 22**.

Bei der Prüfung des Nullstromes sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Reihenfolge von S1 und S2
- Zusammenschluss der Stromwandler auf der Seite Sammelschiene oder auf der Seite Abgang
- Definition: $3I_0 = -I_E$ nach **Bild 23**

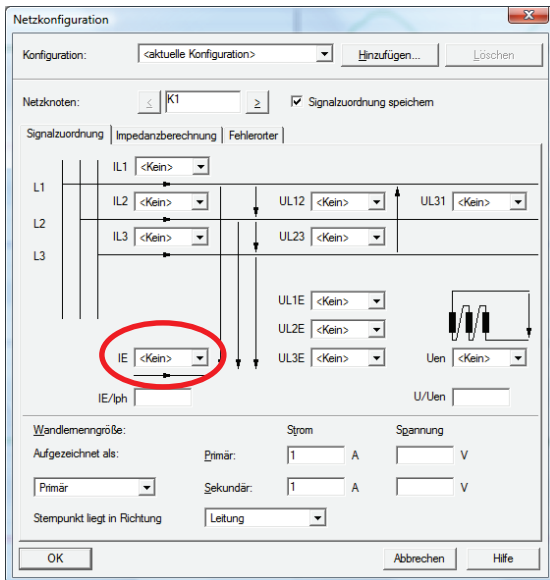


Bild 23 Konfigurationsmenü für die Prüfung

Außerdem ist zu beachten, dass bei Prüfungen in Drehstromsystemen bei der automatischen Berechnung des 4. Stromes der Erdstrom I_E und nicht der Summenstrom $3I_0$ ausgegeben wird. Per Definition der Zählrichtung ist die Richtung von I_E aber entgegengesetzt zum Summenstrom $3I_0$.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Unterschiede zwischen Nullspannung, Verlagerungsspannung, Nullstrom, Summenstrom und Erdstrom herausgearbeitet.

Es wurde gezeigt, dass die alte sekundäre Klemmenbezeichnung der offenen Dreieckswicklung U_{ne} nichts mit der primären Klemmenbezeichnung U_{NE} zu tun hat. Die Klemmenbezeichnung ist einfach aus der Norm für die zusätzliche Wicklung für die Erdschlusserfassung (e) entstanden. Die Auswirkung auf die Richtung des Spannungszeigers wurde im Beitrag ausführlich diskutiert.

Zusätzlich wurden die Auswirkungen der Erdung des Sekundärkreises der Wandler auf die Richtungserkennung genauer betrachtet.

Mit den vorliegenden Informationen ist eine schnellere und einfachere Wandlerrichtungsprüfung möglich.

5 Literatur

- [1] Clemens, H.; Rothe, K.: *Schutztechnik in Elektroenergiesystemen*, 3. Aufl., VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1991
- [2] Druml, G.: *Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen Regelung*, Trench Austria, Leonding/Linz, 2014
- [3] EN 60044-1: 1996 Messwandler, Teil 1: Stromwandler
- [4] EN 60044-2: 1999 Messwandler, Teil 2: Induktive Spannungswandler
- [5] Prüfung der Sekundärverdrahtung von Spannungswandlersätzen einschließlich Erdschlusshilfswicklung mit dem CMC 356/353. Application Note. Omicron V 1.000 APN-00008-2009-V1.000, 2010-05-12
- [6] Schossig, W.; Schossig, T.: *Netzschutztechnik*, EW Medien und Kongresse GmbH, Frankfurt a.M. / VDE Verlag, Berlin, 4. Auflage 2013
- [7] Sterr, P.v.d.: *Anordnung zum Abschalten von Erdschluß führenden Teilen eines Netzes*. DRP 393720 vom 29. August 1922