



Thema: Selektiver 90%iger Ständererdschluss, Funktionserklärung und Inbetriebnahme

Subject:

Datum: 04.11.2023

Date:

1. Allgemeines

So wie in den bisherigen Themenschriften werde ich aus diesmal versuchen, die vorstehenden Begriffe allgemeinverständlich zu beschreiben, so dass auf komplizierte mathematische und physikalische Voraussetzungen sowie Herleitungen verzichtet werden kann.

Ein Ständererdschluss an den Wicklungsbaugruppen einer elektrischen Maschine ist dann eingetreten, wenn die Isolation zwischen dem metallischen Wicklungsmaterial und dem Blechpaket, bzw. den im Wickelkopf befindlichen Stützelementen, durch die elektrische Feldstärke der anstehenden Betriebsspannung, oder durch mechanische Beschädigung des Isolationsmaterials selbst, perforiert worden ist.

Infolgedessen erzwingt die, an dieser Stelle bestehende elektrische Feldstärke einen Spannungsüberschlag mit anschließenden lichtbogenartigen Stromfluss, so dass im weiteren Verlauf die eingetretene „Verkohlung“ der Durchschlagstelle, eine permanente „halbleitende“ Verbindung zwischen der Wicklung und den auf Massepotential befindlichen Baugruppen herstellt.

Da eine elektrische Maschine in diesem Zustand nur noch bedingt betriebstüchtig ist, muss das eingetretene Ereignis von den peripheren Schutzeinrichtungen erkannt werden, die infolgedessen ereignisorientierte Schaltvorgänge ausführen.

Die Erkennungs- Methodik eines eingetretenen Ständererdschlusses umfasst im Wesentlichen drei unterschiedliche und nachfolgend genannten Verfahren.

- Ständererdschluss mit Überwachung des 90%igen Wicklungsbereiches. Zur Funktion benötigt dieses Verfahren eine erregte und auf Nenndrehzahl laufende Maschine.
- Ständererdschluss mit 100%iger Überwachung des Wicklungsbereiches. Bei diesem Verfahren erfolgt die Erdschluss-Überwachung durch eine externe, mit 20 Hz arbeitende Messeinrichtung. Die Erdschlussmessung erfolgt daher permanent, unabhängig davon, ob sich das Messobjekt in Betrieb befindet oder nicht.
- Ständererdschluss mit theoretisch 100%iger Überwachung des Wicklungsbereiches durch Auswertung der 3. Harmonischen. In der praktischen Anwendung wird jedoch der Überwachungsbereich wegen der Wirk- und Blindleistungs- Abhängigkeit dieses Verfahrens, aus Stabilitätsgründen eingeschränkt und wird daher auch selten in der angewendet.

In der Praxis finden überwiegend nur die erstgenannten beiden Verfahren ihre Anwendungen. In Energieerzeugungsanlagen im kleineren und mittleren Leistungsbereichen findet vornehmlich der 90%ige Ständererdschluss Verwendung.

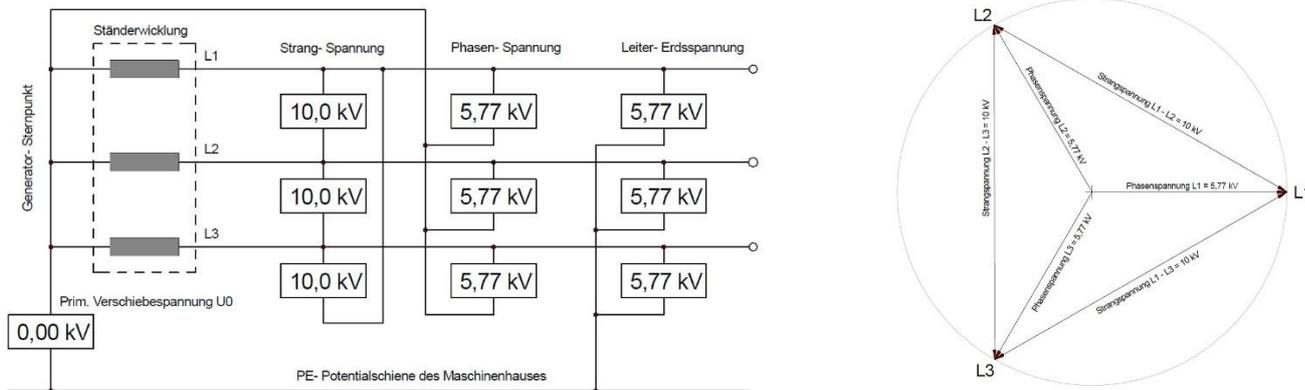
Aus diesem Grund wird in dieser Themenschrift auch nur dieses Ständererdschluss- Überwachungsverfahren beschrieben.

Wie bereits angedeutet, benötigt dieses Messverfahren, die von der Synchronmaschine selbst erzeugten dreiphasigen Strang- und Phasenspannungen, aus denen die sogenannte Nullspannung U_0 , oft auch als Sternpunkt- Verlagerungsspannung bezeichnet, durch vektorielle Addition der Leiter – Erdspannungen bestimmt werden. Die nachfolgende mathematischen Beziehung beschreibt den Lösungsweg.

$$U_0 = \frac{U_{1-E} + U_{2-E} + U_{3-E}}{3}$$

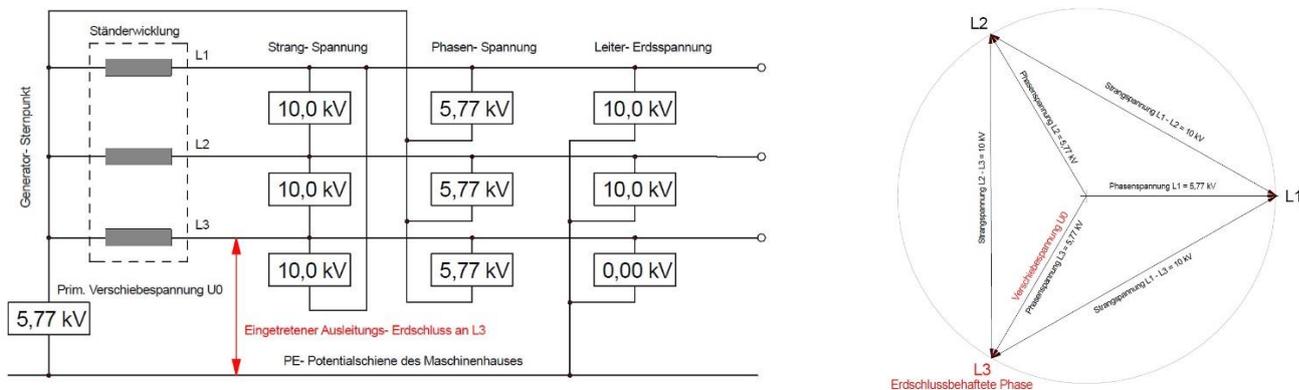
2. Strang- und Phasenspannungen an einem fehlerfreien Synchrongenerator

Die nachfolgende Skizze zeigt die messbaren Spannungen an den Klemmen eines fehlerfreien, erregten 10 kV-Synchrongenerators sowie deren vektorielle Darstellung.



Darin ist zu erkennen, dass die Strang- und Phasenspannungen jeweils gleich große Beträge aufweisen, also absolut symmetrisch sind. Gleiches bestätigt auch das nebenan dargestellte Vektor-Diagramm. Auch die drei Leiter-Erdspannungen, aus denen, nach der vorstehenden Formel die Nullspannung berechnet wird, zeigen gleich große Beträge. Aus diesem Grund ist das Ergebnis der vektoriellen Addition auch $U_0 = 0 \text{ V}$, bzw. es ist am Generatorsternpunkt keine Spannung messbar.

Das nachfolgende Bild zeigt den gleichen erregten Synchrongenerator, jedoch mit einem, ausleitungsseitig an L3 eingeleiteten Erdschluss.

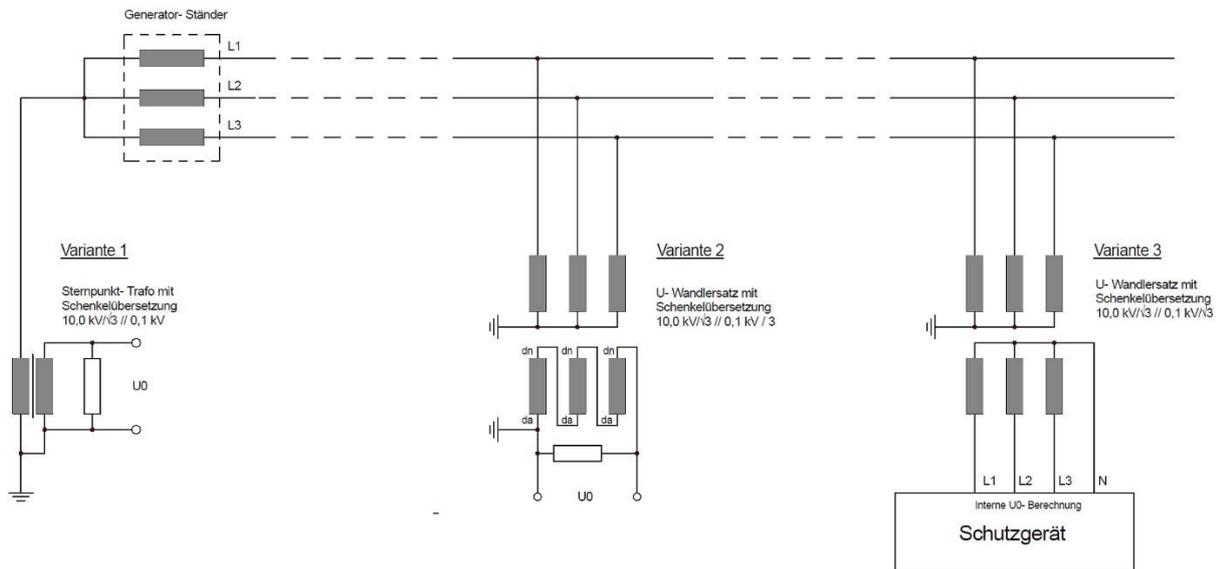


Dabei fällt auf, dass die Strang- und Phasenspannungen nach wie vor symmetrische Beträge aufweisen. Die Ursache dafür ist die geometrische Anordnung der drei Wicklungsstränge im Generatorständer welche jeweils um 120° versetzt angeordnet sind und der drehende Läufer in allen drei Wicklungssträngen die gleichen Phasenspannungen induziert.

Allerdings sind die Leiter – Erdspannungen nicht mehr symmetrisch. Der Ausleitungsanschluss L3 liegt nun durch den eingetretenen Erdschluss auf Erdpotential. In der Wicklung der Phase L3 wird aber vom rotierenden Läufer nach wie vor die Phasenspannung $U_g / \sqrt{3}$ induziert, so dass dadurch die Sternpunktseite der Wicklung L3 und damit der Sternpunkt selbst, vom virtuellen Erdpotential, auf das Potential $U_g / \sqrt{3}$ angehoben wird. Diese Potentialverschiebung kann nun am Sternpunkt als so genannte Verschiebespannung U_0 gemessen bzw. als Identifikation für einen eingetretenen Erdschluss ausgewertet werden.

Auf diese Sternpunkt- Verschiebespannung von $U_g / \sqrt{3}$ addieren sich nun die Phasenspannungen „gesunden“ Phasen vektoriell dazu. Dadurch werden die Leitererdspannungen der Phasen L1 und L2 auf das $\sqrt{3}$ -fache ihres ursprünglichen Betrages angehoben. In dem vorstehenden Vektor- Diagramm kann das vorstehend beschriebene grafisch nachvollzogen werden.

Wie kann man nun diese Spannungen in der Praxis messen. Da es sich hierbei um eine Mittelspannungsmaschine handelt, wäre ein direktes Antasten der menschlichen Gesundheit nicht dienlich. Um derartige Spannungen auf ein ungefährliches Niveau zu reduzieren und mit nachgeschalteter Messtechnik zu verarbeiten, kommen die nachfolgend dargestellten Varianten zur Anwendung.



Die **Variante 1** zeigt die einfachste Methode, um eine auftretende Verschiebespannung am Generatorsternpunkt gefahrlos zu messen. Die vektorielle Addition der drei Leiter- Erdspannungen resultiert aus der internen Verschaltung der Maschine. Der dargestellte Belastungswiderstand dient in erster Linie als Stabilisierungselement, könnte aber bei entsprechender Leistungsgröße auch als so genannter Erdstromerzeuger eingesetzt werden, doch dazu später.

Die **Variante 2** zeigt eine, aus drei Einzelwandlern bestehenden Wandler- Satz. Die einzelnen Spannungs- Wandler verfügen in der Regel über mindestens zwei Sekundärwicklungen mit unterschiedlichen Schenkelübersetzungen. Eine Wicklung ist beispielsweise als Messwicklung ausgeführt. Durch die Verschaltung der da – dn – Wicklung in einer offenen Dreieckschaltung erfolgt die vektorielle Addition der drei Leiter- Erdspannungen. Die resultierende Spannung am offenen Dreieck wird als Null- oder Verschiebespannung ausgegeben wird. Auch hierbei dient der ohmsche Abschluss- Widerstand wieder der Stabilisierung, kann aber unter Beachtung der max. Wandler- Bürden sowie der Belastbarkeit des Widerstandes als Erdstromerzeuger eingesetzt werden.

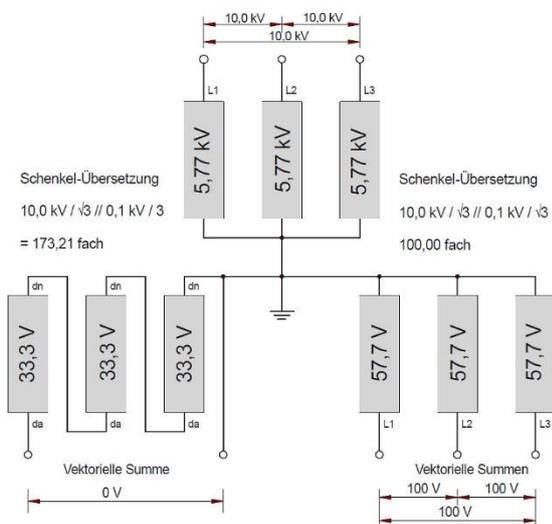
Die **Variante 3** zeigt eine Möglichkeit, die U_0 - Berechnung nicht in externen Wandler- Baugruppen, sondern direkt vom Schutzgerät ausführen zu lassen. Die vektorielle Addition der drei Leiter- Erdspannungen wird dabei von der Geräte- Software ausgeführt und intern weiterverarbeitet. Sollte jedoch zum Aufbau eines selektiven Erdschluss- Schutzes außer der Verschiebespannung U_0 noch eine zusätzliche Erdstrom- Komponente I_0 erforderlich sein, muss die entsprechende Hardware eines Erdstromerzeugers nachgesetzt werden.

Nach meiner Erfahrung kommen in Energieerzeugungsanlagen kleiner und mittlerer Leistungsgrößen überwiegend die Varianten 2 und 3 zur Anwendung.

Da, wie bereits erwähnt, in der Variante 3 die Vektoraddition geräteintern erfolgt, möchte ich nachfolgend die vektorielle Addition in der Variante 2 etwas ausführlicher betrachten.

Die nachfolgenden Skizzen zeigen jeweils die Funktions- Spannungen an den einzelnen Wicklungen im fehlerfreien und erdschlussbehafteten Zustand.

Die Wandler- Gruppe enthält jeweils eine dreiphasige Messwicklung und eine offene Dreieckswicklung.



Das nebenstehende Bild zeigt die Spannungsverhältnisse an einer Wandler- Gruppe am erdschlussfreien 10 kV Netz.

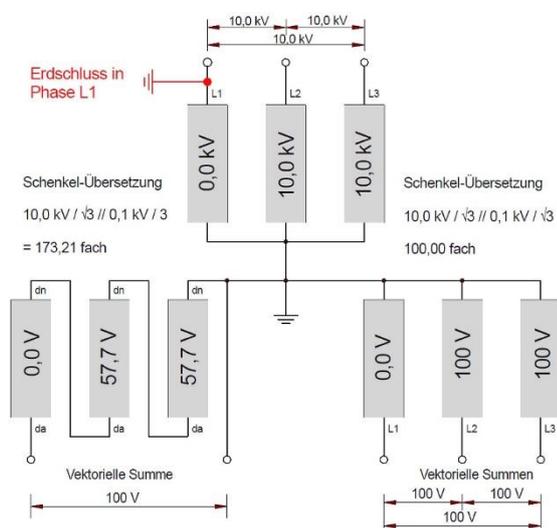
Die Leiter- Leiter- und auch die Leiter- Erdspannungen sind absolut symmetrisch, so dass auch die Spannungen in den Sekundärwicklungen symmetrisch sind.

Auffällig sind die unterschiedlichen Schenkelübersetzungen zwischen den da – dn – Wicklungen und den Messwicklungen.

Grundsätzlich besteht aus technischer Sicht kein physikalischer Zwang, die Schenkelübersetzungen in der ausgewiesenen Form festzulegen.

Historisch gewachsen, hat sich die Schutztechnik darauf geeinigt, dass die Schenkelübersetzung so zu wählen ist, dass bei einem Leitererdschluss, an der offenen Dreieck- Wicklung, die vektorielle Summe der drei Leiter- Erdspannungen, der sekundären Nennspannung der Wandler, also 100 V entsprechen soll.

Da aber, wie vorstehend begründet, die Leitererdspannung der nicht erdschlussbehafteten Phasen bei einem Ausleitungserdschluss auf das $\sqrt{3}$ fache der ehemaligen Leiter- Erdspannung ansteigt, muss die Schenkelübersetzung der Dreieckswicklungen nochmals durch $\sqrt{3}$ dividiert werden. Damit würde die Schenkel- Übersetzung der Unterspannungsseite wie folgt lauten $\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}}$. Mathematisch fällt damit das Wurzelsymbol weg und es bleibt der Ausdruck $\frac{100 \text{ V}}{3}$, wie er auch auf dem Leistungsschild eines jeden Wandlers mit da – dn - Wicklung zu dargestellt ist.



Das nebenstehende Bild zeigt die Spannungsverhältnisse an einer Wandler- Gruppe am erdschlussbehafteten 10 kV Netz.

Wie bereits vorstehend ausgeführt, wird bei einem Erdschluss des Leiters L1 dessen Leitererdspannung zu Null und entsprechend auch die zugeordnete Sekundärspannung des gleichen Schenkels.

Gleichzeitig erhöhen sich die Leiter- Erdspannung der nicht betroffenen Phasen auf das $\sqrt{3}$ fache des Originalwertes.

Daraus resultiert die vektorielle Summe an der offenen Dreieck- Wicklung zu einem sekundären U_0 - Wert von 100 V.

Die Leiter- Erdspannungen an den sekundären Messwicklungen des Wandleratzes zeigen das gleiche Bild, wobei die sekundären Leiter- Leiterspannungen nach wie vor symmetrisch sind, siehe vorstehendes Vektor- Diagramm.

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, dass bei Eintreten eines einpoligen Erdschlusses an einer beliebigen Ausleitung, die Strang- und Phasenspannungen weiterhin symmetrische Größen aufzeigen. Lediglich die Leiter- Erdspannungen verschieben sich dementsprechend.

3. Erdschlusserkennung auf der Basis der Verschiebespannung U_0

Die vektorielle Summe der drei Leiter- Erdspannungen U_0 , ist bei Erdschlusseintritt nicht mehr Null, sondern nimmt den Wert der Leiter- Erdspannung der erdschlussbehafteten Phase an.

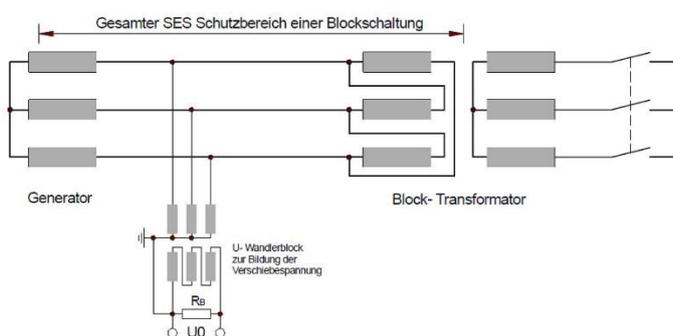
Somit ist diese Null- oder Verschiebespannung ein Kriterium dafür, ob ein Erdschluss in dem Generator selbst, oder dem galvanisch mit dem Generator verbundenen Netzabschnitt vorliegt.

Das bedeutet allerdings, dass der Generator- Erdschluss- Schutz auch einen Erdschluss in einer entfernten Netzposition erkennt und den Generator abschalten würde, was natürlich nicht erwünscht ist.

Eine Netztrennung sollte daher nur bei einem generatorinternen Erdschluss erfolgen.

Eine Selektivität auf Basis der U_0 - Auswertung ist nur gegeben, wenn die Energie- Erzeugungseinheit in einer so genannten Blockschaltung ausgeführt wird.

Dabei ist die in Stern geschaltete Generator- Wicklung untrennbar mit einer, in Dreieck geschalteten Trafowicklung verbunden. Der Leistungsschalter dieser Energie- Erzeugungseinheit befindet sich auf der in Stern geschalteten Trafo-Seite, die in der Regel auch die Oberspannungsseite darstellt.



Die nebenstehende Skizze zeigt das Prinzip einer Blockschaltung.

Es ist deutlich erkennbar, dass zwischen der Generator- Wicklung und dem gespeisten Verbrauchernetz, auch bei eingeschalteten Leistungsschalter, eine galvanische Trennstelle besteht.

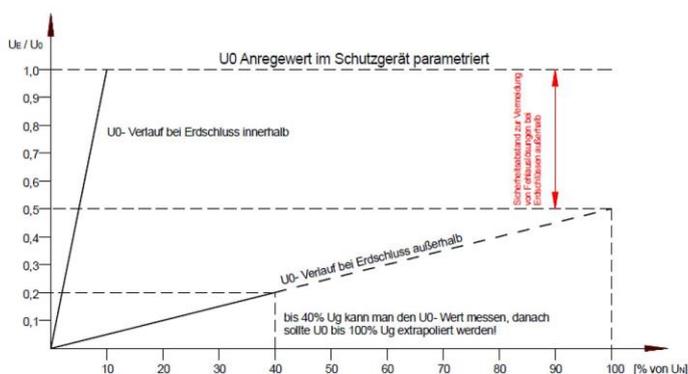
Sollte also in der Trafo- Oberspannungsseite oder im angeschlossenen Verbrauchernetz ein einpoliger Erdschluss eintreten, würde dieses Ereignis theoretisch auf der Generatorseite nicht zum Ausbilden einer Verschiebespannung U_0 führen.

Das bedeutet, dass durch die galvanische Trennung im Inneren des Blocktransformators, bereits eine Selektivität der SES- Schutzfunktion darin besteht, dass nur mit der Überwachung der Verschiebespannung U_0 keine Abschaltung der Energie- Erzeugungseinheit erfolgt, wenn im angeschlossenen Verbrauchernetz ein Erdschluss eintritt.

In der Praxis müssen im Rahmen der Inbetriebnahme einige Randbedingungen beachtet werden, damit die Selektivität auch wirksam werden kann.

Der Eintritt eines einpoligen Erdschlusses im Verbrauchernetz führt zur Ausbildung gewisser Störspannungen. Diese können sich über die innere Koppelkapazität des Block- Transformators auch auf die Generatorseite übertragen und dort eine gewisse Verschiebespannung erzeugen.

Im Rahmen der Inbetriebnahme- Tätigkeit ist daher nachzuweisen, dass die Verschiebespannung bei einem Erdschluss auf der Leistungsschalter- Seite noch hinreichend gering gegenüber der Verschiebespannung ist, die bei einem Erdschluss auf der Generatorseite entsteht.



Die nebenstehende Grafik zeigt die Verläufe der messbaren Verschiebespannung U_0 bei einem Erdschluss auf der Generatorseite (innerhalb) und bei einem Erdschluss auf der Leistungsschalter- Seite (außerhalb).

Der Nachweis besteht darin, dass der Anstieg der Verschiebespannung bei einem Erdschluss „außerhalb“ des Schutzbereiches wesentlich flacher verläuft, als bei einem Erdschluss „innerhalb“ des Schutzbereiches. Damit ergibt sich bei Generatornennspannung eine Differenz zwischen den beiden U_0 - Werten.

Gemäß einer Siemens- Empfehlung sollte der U_0 - Anregerwert in der SES- Schutzfunktion den doppelten

Betrag aufweisen, wie er bei einem Erdschluss „außerhalb“ gemessen bzw. extrapoliert worden ist.

Die vorstehende Grafik sollte Bestandteil eines jeden Inbetriebnahme- Berichtes an einem, in Blockschaltung arbeitenden Turbosatzes sein.

Für alle weiteren Energie- Erzeugungseinheiten, die nicht im Blockbetrieb, sondern direkt auf eine Sammelschiene eines Verbrauchernetzes arbeiten, bzw. mehrere Generatoren, die eine gemeinsame Sammelschiene speisen, kann mit der alleinigen Überwachung der Verschiebespannung U_0 keine Selektivität erreicht werden.

Dazu bedarf es neben der Verschiebespannung U_0 noch eines zweiten Kriteriums, dem so genannten Erdstrom I_0 . Dabei wirkt U_0 nur noch als Funktionsfreigabe und die Größe und Richtung von I_0 liefert die Information, ob sich der Erdschluss innerhalb oder außerhalb des Schutzbereiches befindet.

Dieser Erdstrom muss durch zusätzliche Komponenten generiert und auch messtechnisch erfasst werden. Wie dies im Detail realisiert wird, wird auf den nachfolgenden Seiten dieser Themenschrift erklärt.

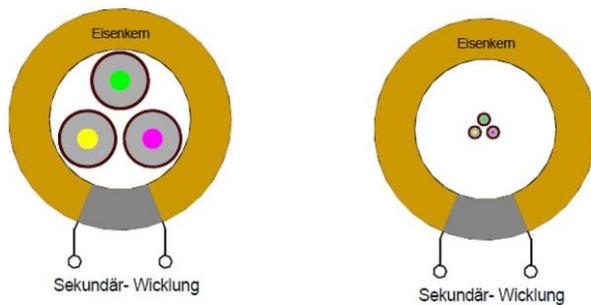
4. Möglichkeiten zur Erfassung des Erdstromes I_0

Bei Eintritt eines Erdschlusses an beliebiger Stelle des galvanisch verbundenen Drehstromsystems wird zunächst eine Verschiebespannung U_0 generiert. Überschreitet deren Amplitude einen definierten Ansprechwert, wird ein sogenannter Erdstromerzeuger für ein begrenztes Zeitfenster aktiviert, welcher dann einen definierten Erdstrom I_0 in das Drehstrom- System einspeist. Zur betragts- und phasenrichtigen Erfassung dieses Erdstroms I_0 , bezogen auf die Verschiebespannung U_0 , kommen im Wesentlichen die beiden nachfolgend dargestellten Verfahren zur Anwendung.

4.1. Messung des Erdstromes I_0 durch Kabelumbauwandler

Ein Kabelumbauwandler besteht aus einem geschlossenen, ringförmigen oder rechteckigen Eisenkern, der mit verschiedenen Innendurchmessern geliefert werden kann. Die sogenannte Sekundärwicklung ist dabei direkt auf den Eisenkern aufgebracht, Die Primärwicklung wird in Form eines oder mehrerer Leiter durch die Öffnung des Blechpaketes hindurchgeführt. Insofern ist diese Anordnung nicht neu und entspricht der eines „Durchsteck- Stromwandlers“.

Werden aber durch die Kernöffnung alle drei Leiter eines symmetrischen Drehstromsystems hindurchgeführt, wird aus dem Stromwandler ein Summationswandler, welcher im Bereich seiner Primärwicklungen, auf magnetischer Basis eine vektorielle Addition der drei Leiterströme durchführt. Bei idealer, symmetrischen Stromverteilung auf allen drei Leitern, wird das Wandler- Blechpaket gar nicht durchflutet, so dass auch in der Sekundärwicklung des Wandlers kein Strom induziert wird. Obwohl in den Drehstromleitern der gesamte Generatorstrom fließt, wird über dessen Blechpaket nur der asymmetrische Erdstrom I_0 übertragen und steht an dessen Sekundärklemmen zur Verfügung.



Die nebenstehenden Skizzen zeigen den prinzipiellen Aufbau. Die Kabelumbauwandler haben in der Regel ein Übersetzungsverhältnis von 60 A / 1 A und nur relativ wenig Kernleistung, in der Größenordnung von 1 bis 5 VA.

Damit diese elektromagnetische Konstruktion möglichst über den gesamten Übertragungsbereich korrekt funktioniert, sind natürlich von der Anlagenprojektierung, bestimmte physikalische Regeln einzuhalten, die bei der Ausführung nicht immer berücksichtigt werden..

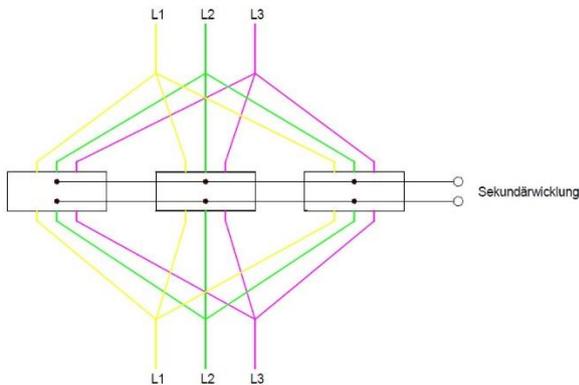
Ein erstes Beispiel zeigen die beiden nebenstehenden Bilder.

Wie bei jedem Trafo ist die so genannte Streuung am geringsten, je dichter die Primär- und Sekundärwicklungen beieinander liegen bzw. am Blechpaket anliegend sind. Während das linke Bild eine optimale Ausnutzung des Durchführungsraumes und damit die Voraussetzung für eine geringe Streuung zwischen beiden Wicklungen erwarten lässt, zeigt das rechte Bild das genaue Gegenteil. Durch den großen Abstand der beiden Wicklungen wird die Streuung sehr groß und der Wandler ist nicht mehr über den gesamten, auf dem Leistungsschild angegebenen Arbeitsbereich einsetzbar.

Mal unwissenschaftlich ausgedrückt, wie soll denn ein Erdstrom von wenigen mA in den Primärleitern noch vom Eisenkern des Umbauwandlers erkannt und übersetzungsgerecht in die Sekundärwicklung transformiert werden, wenn zwischen der Primärwicklung und dem Eisenkern ein so großer Luftspalt besteht?

Derartige Anordnungen zeigen in der Praxis mit kleiner werdenden Strömen stetig zunehmende Übersetzungsfehler, die beispielsweise beim Einsatz in einer Erdstrom- Differentialschaltung dann fehlerhafte I0- Messwerte ergeben und damit die gesamte Funktion in Frage stellen.

Die Industrie bietet Kabelumbauwandler mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen an, so dass bei entsprechender Projektierungs- Sorgfalt meistens eine optimale Lösung zwischen den Kabeldurchmessern und der Öffnung der Umbauwandler gefunden werden kann.



Falls dies Verhältnis nicht optimal realisiert werden kann, oder mehrere parallele Energie- Kabel den Generator mit dem Leistungsschalter verbinden, ist es auch möglich, den Erdstrom I0 mit mehreren, parallel geschalteten Kabelumbauwandlern zu erfassen.

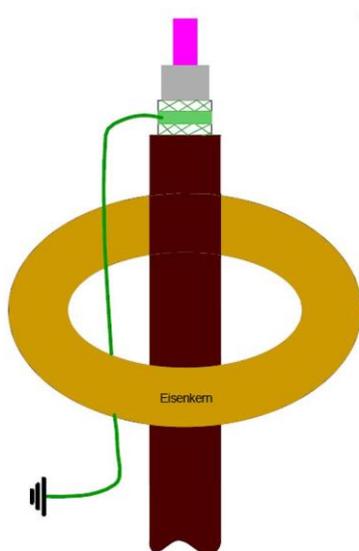
Wichtig dabei ist, dass durch jeden Umbauwandler immer alle drei Phasen des Drehstrom- Systems geführt werden.

Die nebenstehende Skizze zeigt das Prinzip der Parallelschaltung mehrerer kleinerer Kabel- Umbauwandler.

Der zweite, häufig auftretende Installationsfehler bei der Vorort- Installationen wird dadurch begangen, dass die Verlegung von Schirmleitungen nicht mit der erforderlichen Sorgfalt erfolgt.

Diese Kabel können im Kraftwerk territorial größere Abschnitte verbinden, wobei die Kabel- Schirme beidseitig auf die jeweilige Potentialerde am Ort des Kabelendes aufgelegt sind.

Da ortsbedingt, die Spannungspotentiale von weit auseinander liegenden Erdpunkten, niemals gleich sind, fließen über die Schirmleitung der Kabel immer Ausgleichsströme unterschiedlicher Größenordnungen.



Werden diese Energiekabel nun durch einen Umbauwandler geführt, würde der im Kabelschirm fließende Ausgleichsstrom ebenfalls in die Sekundärwicklung übertragen und das Nutzsignal in der Kabel- Seele verfälschen.

Damit dies nicht passiert, muss die Schirmleitung in richtiger Richtung wieder durch den Umbauwandler zurückgeführt werden.

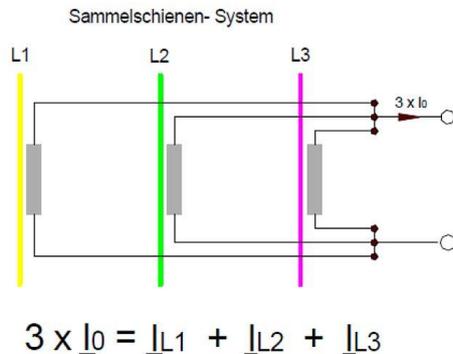
Dadurch werden die im Kabelschirm vorhandenen Ausgleichsströme innerhalb des Wandlers magnetisch subtrahiert und können somit nicht in die Sekundärwicklung übertragen werden.

Meine Erfahrung belegt, dass die nicht korrekte Rückführung der Schirmerden, eine der häufigsten Fehler beim Einsatz von Kabelumbauwandlern, im Zusammenhang mit der Erdstrom- Erfassung für SES- Funktionen sind.

4.2. Messung des Erstroms I_0 durch Stromwandler in Holmgreen- Schaltung

Als so genannte Holmgreen- Schaltung wird eine besondere Verbindung der Sekundärwicklungen von Stromwandlern bezeichnet.

Bei dieser Variante die Sekundärwicklungen der drei Phasenstromwandler parallelgeschaltet.



Im Unterschied zum Kabelumbauwandler, findet hier die vektorielle Addition der drei Phasenströme erst im Parallelschaltpunkt der Sekundärwicklungen statt.

Daraus resultiert, dass bei einem Erdschluss auftretende Erdströme ebenfalls zunächst über das Übersetzungsverhältnis der Wandler reduziert werden muss.

Die nebenstehende Formel zeigt auch, dass die sekundär aus der Holmgreen- Schaltung ausgegebenen Erdströme den dreifachen Wert des real fließenden Erdstroms haben. Bei einer weiteren digitalen Verarbeitung der I_0 - Größe, kann dies durch entsprechende Programmierung ausgeglichen werden.

Wird die I_0 - Größe aber analog weiterverarbeitet, ist der Holmgreen- Gruppe meist noch ein zusätzlicher Stromwandler mit einer Übersetzung von 3 A / 1 A nachgeschaltet.

Zur Frage, was sind die Vor- und Nachteile beider Messverfahren, kann festgestellt werden, dass die Methode der Kabelumbauwandler zwar einen zusätzlichen Hardware- Aufwand darstellt, da ja bereits die in Holmgreen- Schaltung verwendeten Teilwicklungen der Phasenstromwandler sowieso in den Generator- Ausleitungen vorhanden sind. Der Vorteil eines Kabelumbauwandlers besteht jedoch darin, dass nur der real fließende Erdstrom I_0 mit dem Verhältnis 60/1 übertragen wird und sich somit eine deutlich höhere Genauigkeit ergibt als mit einer Holmgreen- Gruppe, die auch den Erdstrom durch das deutlich höhere Übersetzungsverhältnis „runterteilen“ muss.

5. Unterschiedliche Verfahren zur Erdstromerzeugung

Es entspricht dem physikalischen Grundprinzip, dass zur Generierung eines Stromes zunächst eine Spannung vorhanden sein muss, welche in Form eines geschlossenen Stromkreises, beidseitig mit einem Widerstand verbunden ist.

Dabei bestimmt der Quotient aus den Größen der Spannung und des Widerstandes den fließenden Strom.

Dieses Prinzip wirkt auch bei der Erzeugung eines Erdstromes in der Funktion des 90%igen Ständererdschluss- Schutzes.

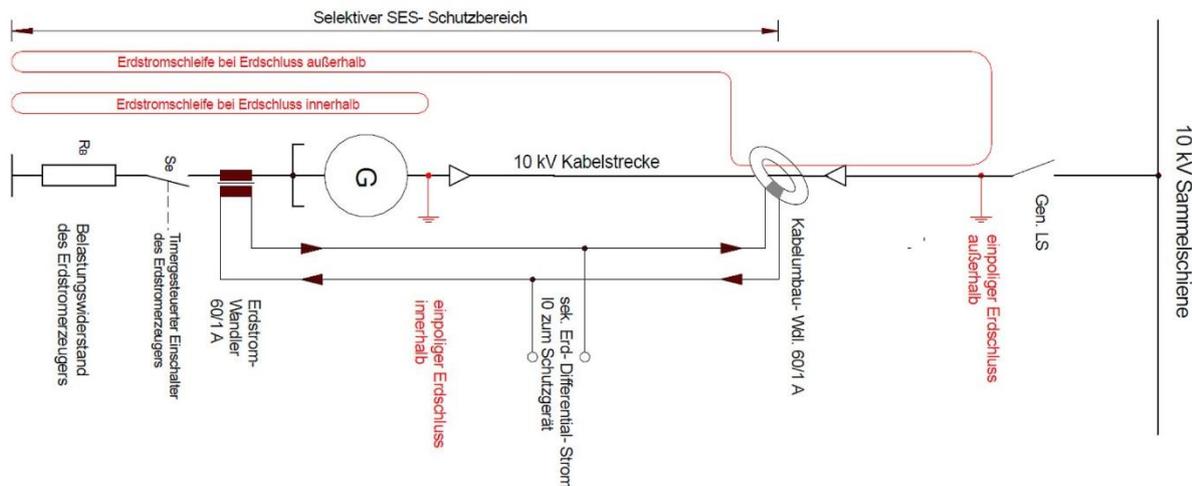
Nach Eintreten eines einpoligen Erdschlusses an einer Drehstrommaschine, oder im angeschlossenen Verbraucher- Netz entsteht zunächst kein Erdstromfluss, da eine Erdverbindung allein noch keinen geschlossenen Stromkreis ergibt.

Durch diese einpolige Erdverbindung erfolgt lediglich eine Potentialverschiebung an dem zuvor auf virtuellen Nullpotential befindlichen Sternpunkt, auf das Potential der so genannten Verschiebespannung, mit der Größe $U_0 = U_g / \sqrt{3}$.

Diese Spannung kann nun dazu verwendet werden, um in Verbindung mit einem, im so genannten **Erdstromerzeuger** vorhandenen Belastungswiderstandes, einen Erdstrom I_0 in definierter Größe zu generieren.

Bei allen nachfolgend dargestellten Varianten der Erdstromerzeugung gilt immer das vorstehend beschriebene physikalische Grundprinzip.

5.1. Erdstromerzeugung mittels Sternpunkt-widerstand



In der vorstehenden Schaltungs- Skizze wird der Erdstromerzeuger durch einen im Sternpunktkreis befindlichen Widerstand realisiert.

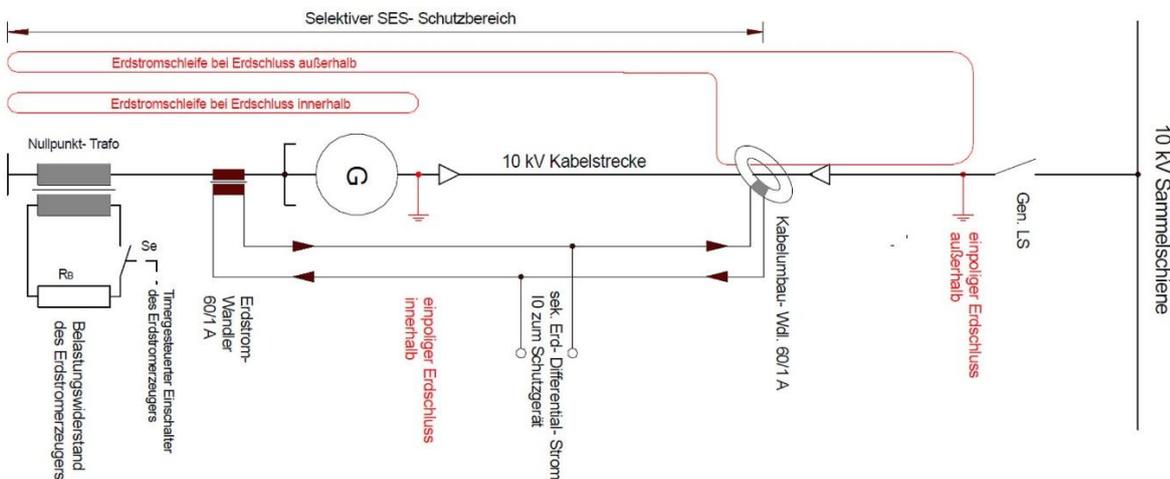
Im Fall eines eingetretenen einpoligen Erdschlusses liegt die am Generatorsternpunkt anstehende Verschiebespannung über die Primärwicklung eines Erdstrom- Wandlers und einem, in diesem Fall geschlossenen Schaltkontakte, direkt am Belastungs- Widerstand R_B an. Da ein Erdstromerzeuger einseitig immer geerdet sein muss, bildet die eingetretene Erdschluss- Stelle eine zweite Erdverbindung, so dass in diesem Moment der Erdstromkreis geschlossen ist und ein Erdstrom fließen kann. Die Höhe des über die eingetretene Erdschluss- Stelle fließenden primären Erdstromes kann nach der Beziehung

$$I_{0 \text{ prim.}} = \frac{U_g}{\sqrt{3} \times R_B} \text{ [A]} \quad \text{berechnet werden.}$$

Der Schaltkontakt Se dient dazu, dass der Generatorsternpunkt erst nach dem Erdschluss- Eintritt bzw. dem Auftreten der Verschiebespannung mit dem Belastungswiderstand verbunden wird. Zusätzlich wird durch einem im Schutzgerät programmierten Timer die Einschaltzeit auf ca. 20s begrenzt, um den Widerstand nicht thermisch zu überlasten.

Da sich der Erdstrom bestimmende Belastungswiderstand im Primärkreis der elektrischen Maschine befindet, muss der Schaltkontakt Se als Hochspannungs- Schaltgerätes ausgeführt sein, was wahrscheinlich den kostenbestimmenden Faktor des Erdstromerzeugers darstellt.

5.2. Erdstromerzeugung mittels Nullpunkt- Transformator



In dieser dargestellten Schaltungs- Skizze wird der Erdstromerzeuger unter Einbeziehung eines Einphasentransformator realisiert. Damit ist der strombestimmenden Belastungswiderstand nicht mehr im Mittelspannungs- Primärkreis der elektrischen Maschine, sondern im Sekundärkreis des Nullpunkt- Trafos angeordnet.

Dadurch können der Schalter S_e und der Belastungswiderstand R_B Niederspannungsbaugruppen sein, was sich möglicherweise positiv auf die Herstellungskosten auswirkt.
 Das physikalische Wirkprinzip entspricht aber dem unter Pos. 5.1. beschriebenen.

Zur Berechnung des bei einem Erdschlusseintritt fließende Erdstrom, sollte zunächst die Schenkelübersetzung \ddot{U}_T des eingesetzten Nullpunkt- Transformators bestimmt werden.

Aus den Beispieldaten eines Nullpunkt- Trafos: $10 \text{ kV} / \sqrt{3} // 500 \text{ V}$ ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von $\ddot{U}_T = 11,55$.

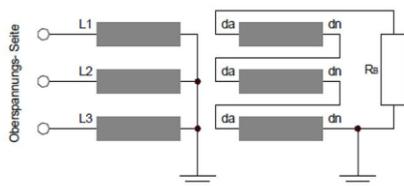
Mit einem Belastungswiderstand von $R_B = 5 \Omega$ würde bei einem Ausleitungs- Erdschluss ein sekundärer Strom von $500 \text{ V} / 5 \Omega = 100 \text{ A}$ durch den Belastungswiderstand fließen.
(Widerstands- und Trafo- Daten beachten, damit diese nicht thermisch überlastet werden!!)

Mit den vorstehenden Daten des Erdstromerzeugers würde sich ein Strom I_0 über die Erdschluss- Stelle von

$$I_{0\text{prim.}} = \frac{U_g}{\sqrt{3} \times \ddot{U}_T \times \ddot{U}_T \times R_B} = \frac{10000 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 11,55 \times 11,55 \times 5 \text{ Ohm}} = 8,66 \text{ A} \quad \text{ergeben.}$$

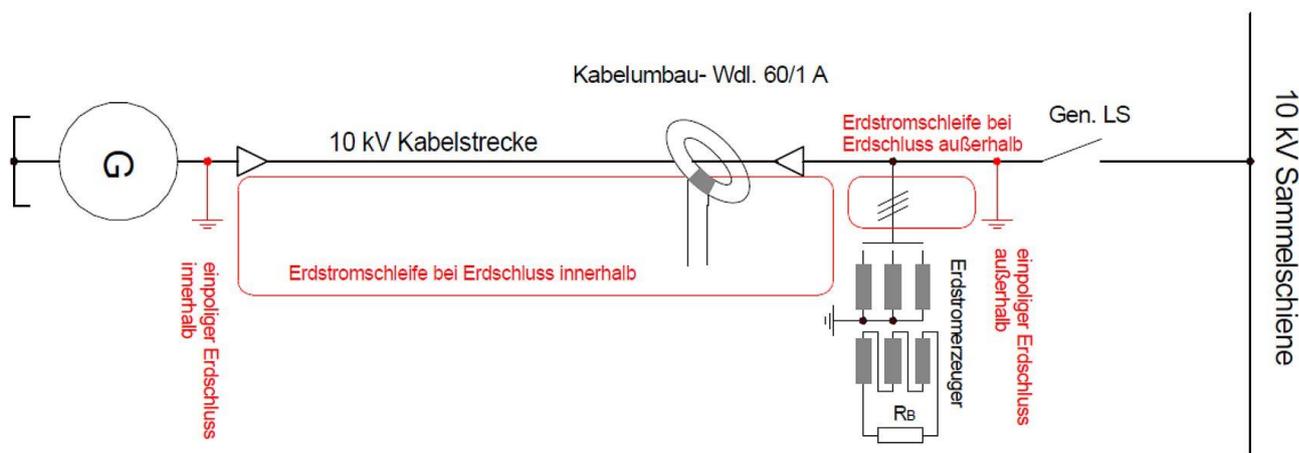
5.3. Erdstromerzeugung mittels Erdungs- Transformator für einen einzelnen Generator an einer Sammelschiene

Der so genannte Erdungs- Transformator in einem Erdstromerzeuger besteht in der Regel aus einem Drehstrom- Transformator, oder drei Einphasen- Transformatoren (z.B. Spannungswandlern mit hinreichender Kernleistung). Dabei sind die drei Oberspannungs- Wicklungen in Stern geschaltet, wobei der Sternpunkt massiv geerdet sein muss.
 Die drei Sekundärwicklungen sind in Form einer offenen Dreieck- Wicklung verschaltet, die einen angeschlossenen Lastwiderstand R_B speist.



Die nebenstehende Skizze zeigt die vorstehend beschriebene Anordnung. Eine typische Angabe der Leistungsdaten für die Schenkel- Übersetzung, die auch auf jedem Spannungswandler zu finden ist, der eine da – dn – Wicklung aufweist, lautet beispielsweise: $10,0 \text{ kV} / \sqrt{3} // 0,1 \text{ kV} / 3$
 Damit beträgt die Schenkel- Übersetzung: $\ddot{U}_{\text{Schenkel}} = 173,2$ fach.

Die nachfolgende Skizze zeigt die Anordnung des Erdstromerzeugers im Übersichts- Schaltbild eines Energie- Erzeugers. Voraussetzung für die korrekte Funktion einer Selektivität ist es, dass der Erdstromerzeuger immer außerhalb des SES- Schutzbereiches, also vom Generator aus gesehen, nach dem Kabelumbauwandler angeschlossen wird.



In der vorstehend dargestellten Schaltung fällt auf, dass im Vergleich zu den Versionen unter den Positionen 5.1. und 5.2. der Generator- Sternpunkt in diesem Beispiel nicht beschaltet ist. In den Versionen unter den Positionen 5.1. und 5.2. wurde die Selektivität der SES- Funktion durch eine Erdstrom- Differential- Schaltung realisiert.

Die Selektivität in der Version, Pos.5.3. wird dadurch erreicht, dass bei einem Erdschluss innerhalb, der generierte Erdstrom I₀ durch den Kabelumbau- Wandler fließen muss und bei einem Erdschluss außerhalb nicht. Wenn also die im Schutzgerät parametrisierte Bedingung: $U_0 > I_0$ mit Erreichen der parametrisierten Ansprechwerte erfüllt ist, erfolgt die SES- Funktionsanregung.

Die in der Skizze rot dargestellten Linien zeigen die Erdstrom- Verläufe in beiden Fällen.

Zur Bestimmung der entsprechenden Ansprechwerte für U₀ und I₀ ist es im Rahmen der Inbetriebnahme erforderlich, diese zu berechnen bzw. experimentell zu ermitteln.

Ausgangspunkt dafür ist abermals die Berechnung des im Erdschlussfall vom Erdstromerzeuger in das System eingespeisten Erdstroms.

Mit den angenommenen Daten des Erdungs- Trafos $10,0 \text{ kV} / \sqrt{3} // 500 \text{ V} / 3$ ergibt sich eine Schenkel- Übersetzung von $\ddot{U}_{\text{Schenkel}} = 34,64$ fach.

Mit einem Belastungswiderstand von $R_B = 5 \Omega$ ergibt sich bei einem Ausleitungs- Erdschluss ein sekundärer Strom von $500 \text{ V} / 5 \Omega = 100 \text{ A}$. (*Widerstands- und Trafo- Daten beachten, damit diese bei den Inbetriebnahme- Messungen nicht thermisch überlastet werden!!*)

Mit den vorstehenden Daten des Erdstromerzeugers würde sich ein Strom I₀ über die Erdschluss- Stelle von

$$I_{0\text{prim.}} = I_{RB} \times 3 / \ddot{U}_{\text{Trafo}} = 100 \text{ A} \times 3 / 34,64 = 8,66 \text{ A} \quad \text{ergeben.}$$

5.4. Erdstromerzeugung mittels Erdungs- Transformator für mehrere Generatoren an einer gemeinsamen Sammelschiene

Während in den vorstehenden Versionen die Erdstromerzeuger immer den einzelnen Generatoren zugeordnet, also unterhalb der jeweiligen Leistungsschalter angeordnet waren, kann der Erdstromerzeuger auch direkt am Sammelschienen- System integriert sein.

Damit muss nicht jeder, der parallel auf diese Sammelschiene arbeitenden Generatoren einen eigenen Erdstromerzeuger haben, sondern alle mit dieser Sammelschiene galvanisch verbundenen Generatoren können im Erdschluss- Fall von diesem Erdstromerzeuger mit einem Erdstrom versorgt werden. Es kann aber nur zu dem Generator ein Erdstrom fließen, dessen Leistungsschalter auch eingeschaltet ist.

Daher muss im Schutzgerät der Sonderfall programmiert werden, dass bei ausgeschalteten Leistungsschalter die SES- Auslösung nur mit U₀ erfolgt.

Diese Variante hat zweifellos bei der Anlagenerrichtung ökonomische Vorteile, aber bei der SES- Inbetriebnahme einer einzelnen Maschine müssen die Parallelmaschinen vom Netz gehen und darüber hinaus der Erdstromerzeuger temporär mit der betreffenden Maschine verbunden werden, was einen bedeutenden IBS- Mehraufwand und eine temporär eingeschränkte Verfügbarkeit der restlichen Energieerzeuger bedeuten würde.

Die nachfolgende Skizze zeigt diesen Einsatzfall.



Bezüglich der Arbeitsweise und der Berechnung des im Erdschluss- Fall fließenden Erdstroms ist diese Schaltung mit der unter Pos.5.3. vergleichbar.

6. Durchzuführende Messungen während der Inbetriebnahme eines selektiven 90%igen Ständererdschluss- Schutzes

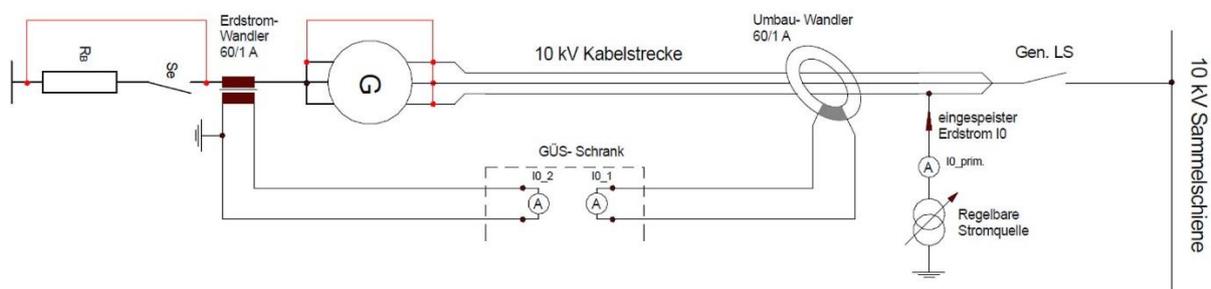
Wie aus den vorstehenden Darlegungen abgeleitet werden kann, besteht der Hauptteil einer selektiven 90%igen SES- Inbetriebnahme nicht darin, Messungen an der drehenden Maschine durchzuführen, sondern im Maschinenstillstand die peripheren Baugruppen auf korrekte Verdrahtung und Funktion zu prüfen.

Nachfolgend werden die einzelnen Prüfschritte am Beispiel eines selektiven 90%igen SES- Schutzes mit Erdstrom- Differentialschaltung und einem Erdstrom- Erzeuger am Generatorsternpunkt erläutert.

6.1. Messungen im Stillstand des Turbosatzes

Da sich die Erdstrom- Differential- Schaltung außerhalb des Schutzgerätes befindet, erfolgen die ersten Messungen zur Überprüfung der korrekten Hardware- Verbindung.

Die nachfolgende Skizze zeigt die Schaltungsanordnung mit den temporär einzubauenden Verbindungen, Instrumenten und der regelbaren Stromquelle zur Einspeisung eines Erdstromes I_0 in das System.



Zu Beginn der Prüfungen werden die sekundären Ausgangsströme der beiden Erdstrom- Wandler gemessen, ohne dass dabei ein Erdstrom aus der regelbaren Stromquelle in das System eingespeist wird.

Werden in diesem Zustand bereits Sekundärströme gemessen, so weisen diese möglicherweise auf Erdstromschleifen, falsche Verlegung der Schirmerden in den Umbauwandlern oder auf dem Kabelweg eingekoppelte EMV- Störungen von benachbarten Energie- Kabeln hin.

In diesem Fall macht es keinen Sinn mit den Messungen fortzufahren, sondern die Ursachen der bereits bestehenden Sekundärströme müssen erst beseitigt werden. Sind keine, oder keine nennenswerten Sekundärströme mehr vorhanden, kann mit der definierten Einspeisung des primären Erdstroms I_0 aus der regelbaren Stromquelle begonnen werden.

Zuvor müssen jedoch die im Erdstromkreis befindlichen induktiven und ohmschen Widerstände, wie im vorstehenden Bild rot dargestellt, überbrückt werden.

Wenn der Belastungswiderstand beispielsweise 577Ω hätte und die Generator- Nennspannung $10,0 \text{ kV}$ beträgt, würde sich ein Erdstrom von $10000 \text{ V} / \sqrt{3} / 577 \Omega = 10 \text{ A}$ einstellen. Dieser Stromwert wird nun von der regelbaren Stromquelle in das System eingespeist. Die Einspeisestelle liegt bei dieser Messung außerhalb des SES- Schutzbereiches, wie in der obigen Skizze dargestellt.

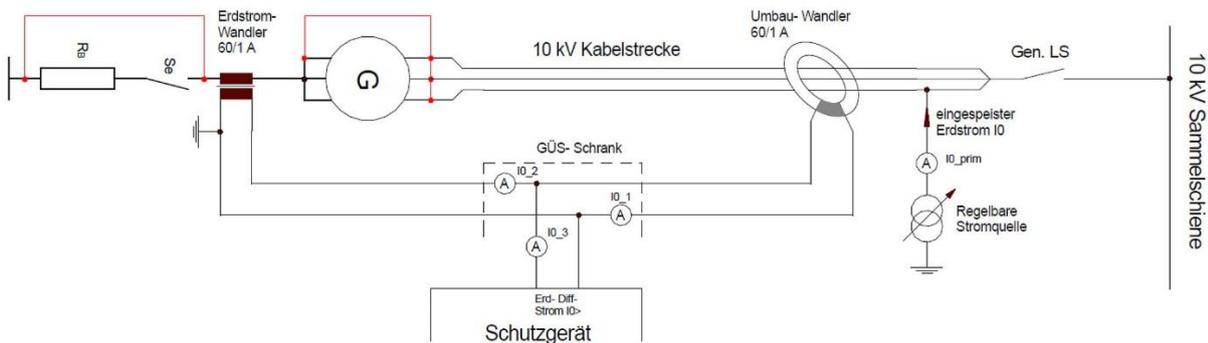
Im weiteren Verlauf wird eine Messreihe I_{0_1} und I_{0_2} als Funktion von I_{0_prim} aufgenommen. Der eingespeiste Strombereich sollte dabei 0 A bis 10 A , in Stufen von $0,5 \text{ A}$ betragen.

Theoretischer sollten die dabei gemessenen und grafisch aufgetragenen Sekundärströme absolut deckungsgleich verlaufen. Ist dies nicht der Fall, sind mögliche Ursachen dafür zu analysieren. Die häufigste in der Praxis auftretende Ursache dafür ist in der ungünstigen Auslegung der Umbauwandler (zu große Durchführungsöffnung) zu suchen.

Auf Grund der dadurch verursachten großen Streuung zwischen der Primär- und Sekundär- Wicklung wird bei kleinen Strömen die Wandler- Bürde zunehmend überschritten und der Wandler kann sein Übersetzungsverhältnis nicht mehr einhalten.

Treten derartige Erscheinungen bereits bei dieser Messung auf, ist es sehr wahrscheinlich, dass der ursprünglich vorgesehene SES- Schutzbereich von 90% der Wicklung nicht mehr eingehalten werden kann. 90% Schutzbereich bedeutet, dass ein sicheres Ansprechen des Schutzes bereits bei 10% der Verschiebespannung und damit auch nur 10% des Erdstroms erfolgen sollte. Damit sind ungünstig ausgelegte Umbauwandler in der Regel überfordert.

Nach positivem Ausgang der vorstehenden Messungen wird im weiteren Verlauf die eigentliche Erdstrom- Differentialschaltung auf phasenrichtigen Anschluss und korrekte Funktion überprüft.
 Die Strom- Messtechnik wird dazu wie nachfolgend dargestellt, angeschlossen.



Dabei wird ebenfalls eine Messreihe IO_1, IO_2 und IO_3 als Funktion von IO_prim, beginnend von 0 A bis 10 A, in Stufen von 0,5 A aufgenommen und ebenfalls grafisch dargestellt.

Das Funktionsprinzip dieser Differentialstrom- Bildung basiert auf der vektoriellen Subtraktion der beiden Sekundärströme. Da Stromwandler bekanntlich im „Stromzwang“ arbeiten, muss jeder Wandler im Rahmen seiner Bürde, den Sekundärstrom treiben, der seinem jeweiligen Primärstrom und Übersetzungsverhältnis entspricht.

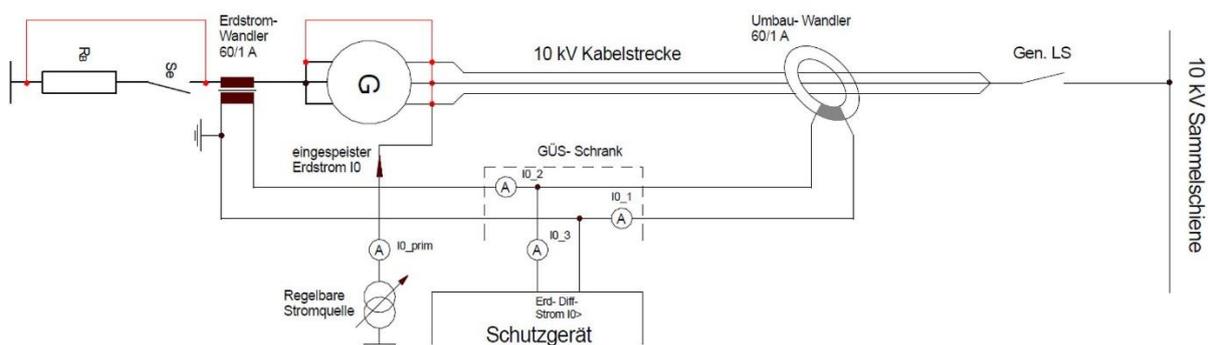
In der vorstehend dargestellten Schaltung haben beide Wandler das gleiche Übersetzungsverhältnis und werden auch vom gleichen Primärstrom durchflossen. Damit sollten theoretisch auch die Sekundärströme gleich sein, so dass kein Differenzstrom in das Schutzgerät abfließen kann.

Dabei kommt es auf die phasenrichtige Zusammenschaltung der beiden Sekundärwicklungen an. Bei korrekter Beschaltung subtrahieren sich die Sekundärströme andernfalls addieren sich die Sekundärströme.

Auch bei diesem Versuch, bei dem der Differentialstrom theoretisch über den gesamten Bereich Null ergeben soll, zeigt sich in der Praxis meistens ein mehr oder weniger großer Restbetrag, der je nach Größe den Schutzbereich ebenfalls einengen kann.

Im nächsten Versuch wird der Erdstrom aus der regelbaren Stromquelle nicht außerhalb, sondern innerhalb des Schutzbereiches eingespeist.

Die nachfolgende Skizze zeigt die entsprechende Anordnung



Dabei fließt der eingespeiste Erdstrom nicht mehr durch den Umbauwandler, sondern nur noch durch den, nach dem Generator- Sternpunkt angeordneten Erdstrom- Wandler.

Der sekundäre Erdstrom IO_2 kann, auf Grund der hohen sekundären Impedanz des Umbauwandlers, nur noch in das Schutzgerät als Erdstrom IO_3 einfließen.

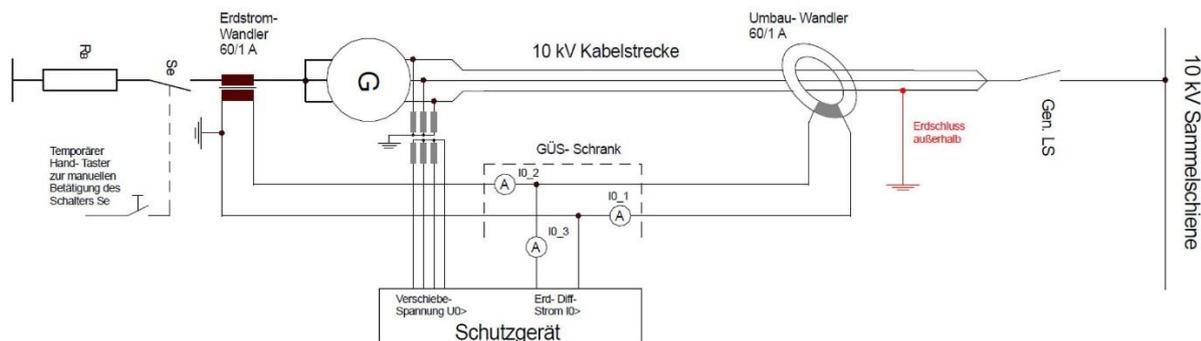
Auch bei dieser Messung sollte eine Messreihe mit 0 A beginnend bis 10 A in Stufen von 0,5 A aufgenommen werden, bei der wieder alle Sekundärströme als Funktion des eingespeisten primären Erdstromes aufgenommen und grafisch dargestellt werden.

Damit sind die Messungen im Maschinen- Stillstand abgeschlossen. Die eingebauten und in den Skizzen rot dargestellten Brücken sind zu entfernen.

Im weiteren Verlauf wird außerhalb des Schutzbereiches eine Ausleitungsphase massiv geerdet. Zusätzlich ist eine manuell zu betätigende Fernsteuerung des Schaltgerätes im Erdstromerzeuger anzubringen, damit der Schaltkontakt Se nach Bedarf ein- und ausgeschaltet werden kann, um Übererwärmungen des Belastungswiderstandes zu vermeiden. Nach Abschluss dieser Vorbereitungen kann der Turbosatz vorgewärmt und angefahren werden.

6.2. Messungen bei Nenndrehzahl des Turbosatzes

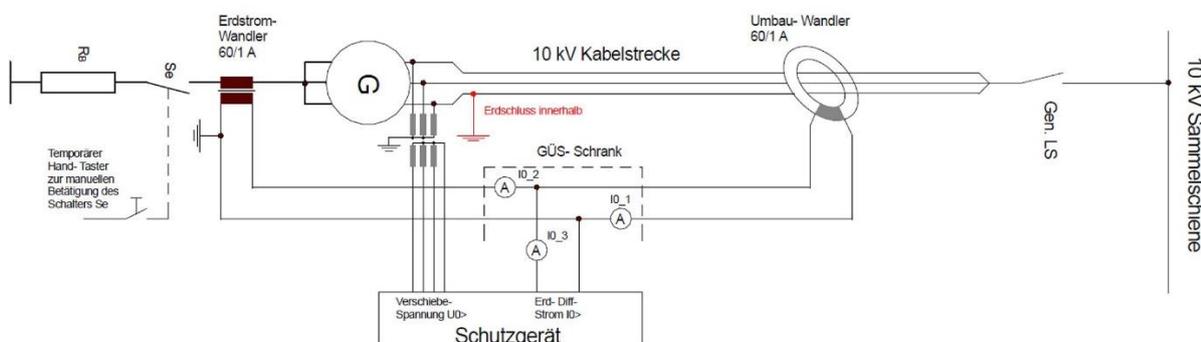
Die nachfolgende Skizze zeigt die entsprechenden Schaltbedingungen, sowie die Stelle, an der die einpolige Erde außerhalb des Schutzbereiches eingebaut ist.



Nach Erreichen der Nenndrehzahl wird der Generator auf ca. 10% der Nenn- Verschiebespannung erregt. Nach Einschalten des Schalters Se werden in zügiger Folge, die drei sekundären Strommesser abgelesen und der Schaltkontakt Se wieder ausgeschaltet (*Temperaturentwicklung des Belastungswiderstandes beachten!!*). Dabei darf die SES- Funktion des Schutzgerätes nicht ansprechen.

Im weiteren Verlauf ist die vorstehend beschriebene Messung mit 20%, 30% und 40% U_0 zu wiederholen. Durch die grafische Darstellung des sekundären Differentialstrom- Verlaufes bis 40% U_0 , ist dieser nun bis 100% der Verschiebespannung U_0 zu extrapolieren. Der Einstellwert für die sekundäre I_0 - Anregung des Schutzgerätes sollte deutlich über dem extrapolierten I_0 - Wert bei 100% U_0 liegen. Damit wird sichergestellt, dass die SES- Funktion nicht bei einem Erdschluss außerhalb auslöst und somit die Selektivität in vollem Umfang gegeben ist. Danach kann der Turbosatz abgefahren werden und der ehemals außerhalb des Schutzbereiches montierte einpolige Erdschluss kann nun innerhalb des Schutzgerätes eingebaut und der Turbosatz wieder angefahren werden.

Die nachfolgende Skizze zeigt den Einbauort der Erdverbindung.



Nach Erreichen der Nenndrehzahl wird der Generator wieder auf eine Verschiebespannung von 10% U_0 erregt und zum Ablesen der Instrumente der Kontakt Se kurzzeitig eingeschaltet.

Wenn sich der dabei fließende Differentialstrom oberhalb des im Schutzgerät parametrisierten Einstellwertes von I_0 befindet, wird das Schutzgerät auslösen und die rangierten Schaltbefehle an die Anlage senden.

Ist der zuvor extrapolierte sekundäre I_0 - Wert größer als der real bei 10% U_0 fließende I_0 - Wert, kann das Schutzgerät natürlich nicht ansprechen, so dass der Schutzbereich entsprechend verringert werden muss.

In der Praxis wird man feststellen, dass mit der Erdstrom- Differential- Schaltung nur selten ein realer Schutzbereich von 90% erreicht werden kann, sofern der sekundäre Erdstrom nur über den Amplitudenbetrag ausgewertet wird. Moderne Schutzgeräte bieten darüber hinaus noch die Möglichkeit, den Erdstrom I_0 nicht nur amplitudenorientiert, sondern auch noch nach der Phasenlage gegenüber der Verschiebespannung U_0 , also richtungsorientiert auszuwerten. Damit ist eine stabilere Arbeitsweise der SES- Schutzfunktion im unteren Grenzbereich, d.h. bei relativ kleinen Verschiebespannungen erreichbar.