

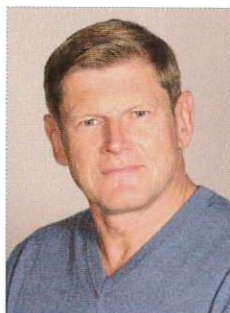
Energieversorgung auf dem Land

Komplexe Erdfehlerortung in gemischten Mittelspannungsnetzen

Die Erdfehlerortung ist vor allem für ländliche Energieversorger mit gemischten Netzen seit jeher eine Herausforderung. Die Gründe liegen vorrangig in der Tatsache, dass sich Kabel- und Freileitungsfehler unterschiedlich darstellen und oft komplexe Netzstrukturen mit Verzweigungen vorliegen, somit mehrdeutige Fehlerorte existieren. Dadurch lässt sich der Fehlerort erst durch die Kombination mehrerer Verfahren eingrenzen. Des Weiteren wächst mit der fortschreitenden Alterung der Betriebsmittel die Wahrscheinlichkeit von Doppelerdschlüssen, was die verfügbare Zeit zur Suche zunehmend einschränkt. Die Verfasser konzentrieren sich im Folgenden auf die Methodik der Suche. Verwandte wichtige Themen wie die Funktion der Grobortung oder die Bestimmung der Erdströme zur Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen sind nicht Gegenstand der Publikation.

Motivation und Hintergründe

Die KWH Netz GmbH versorgen ausgedehnte gemischte 20-kV-Mittelspannungsnetze mit rd. 280 km Freileitung und rd. 240 km Kabel. Die Netze werden mit Resonanzsternpunktterdung (Respe) betrieben. Bisher versorgte je Umspannwerk jeweils ein Transformator das gesamte Netzgebiet, wodurch die



Dr.-Ing. **Alexander Zeh** (l.), KWH Netz GmbH, Haag;
Dipl.-Ing. **Hagen Grünert**, GSC Power Engineering GmbH,
Erlangen

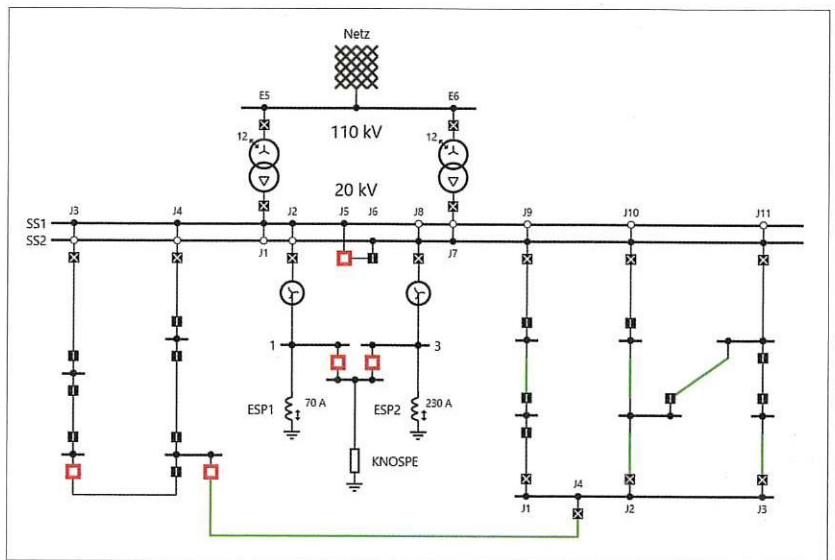


Bild 1. Vereinfachte Darstellung der Netzstruktur

am häufigsten auftretenden Freileitungsfehler das gesamte Netz belasteten. Mit der Einführung des Zwei-Transformatorbetriebs je Umspannwerk, werden künftig für den Normalschaltzustand das Kabelnetz und das gemischte Netz mittelspannungsseitig galvanisch getrennt versorgt.

Im Falle des Ein-Transformatorbetriebs oder bei Trennstellverlegungen, muss dennoch jedes Feld wieder mit der gemischten Betriebsweise zurechtkommen. Bild 1 zeigt das Prinzip, wobei Freileitungen grün markiert sind. Das Kabelnetz befindet sich an Sammelschiene 1, das Freileitungsnetz an Sammelschiene 2.

Da im reinen Kabelnetz bzgl. der Sternpunktbehandlung sowie der Ortungsverfahren bekannterweise unterschiedliche Strategien gegenüber dem Freileitungsnetz verwendet werden können, galt es für jedes Netz ein Optimum zu finden, ohne den gemischten Betrieb aufzugeben. Es sei betont, dass eine fixe Trennung zu bevorzugen ist, insofern es die örtlichen und wirtschaftlichen Aspekte gestatten. Ebenso wird die Verwendung von zwei fest zugeordneten Widerständen empfohlen.

Verwendete Sternpunktbehandlung und Ortungsverfahren

Die mit Respe unumgehbare manuelle Erdschlusssuche ist im beschriebenen Netz sehr zeitaufwendig und gestaltet sich vor allem nachts schwierig. Die bei Leiterkurzschlüssen im Freileitungsbereich erfolgreich praktizierte automatische Wiedereinschaltung (AWE) soll möglichst auch bei Erdfehlern angewendet werden. Die in reinen Kabelnetzen einsetzbare niederohmige Sternpunktterdung (Nospe) ist in dieser Form für Freileitungsnetze ungeeignet. Daher wird die Verwendung der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktterdung (Knospe) als Lösungsansatz gesehen. Die Dauer der Knospe-Erdstromspeisung mit $I_{k1, pol. max} = 1,6 \text{ kA}$, wurde auf der Basis von lokal durchgeführten Erdungsmessungen gemäß DIN VDE 0101-2 für maximal 800 ms festgelegt.

Jedem Sternpunktbildner ist eine Steuerung zugeordnet, die unterschiedliche Parametersätze für die Betriebsart »Kabel« oder »gemischt« verwendet. Der Modus »manuell« ist generell möglich. Nach einer Knospe-Einschaltung, blockiert die

Steuerung jede weitere Einschaltung des Widerstands bis zum manuellen Rücksetzen.

Infolge der Tatsache, dass jedes Feld sowohl ein reines Kabel- als auch ein gemischtes Gebiet versorgen kann, werden alle Felder mit den gleichen Ortungsverfahren ausgestattet:

- transiente Grobortung,
- wattmetrische Feinortung,
- Erdkurzschlusschutz mit Meldung »Anregung vorwärts« und ggf. Auslösung durch Überstromzeit- oder Distanzschutz,
- AWE im Freileitungsnetz.

Versuche zur Systemverifikation

Das Konzept wurde nach Implementierung durch Erdfehlerversuche auf dessen korrekte Funktion getestet, die Ergebnisse werden im Weiteren diskutiert. Die Ausdehnung des Versuchsnetzes wurde begrenzt, um im Falle eines Doppelerdschlusses die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten.

Kapazitiver Erdschlussstrom: j18 A
 Kompensationsstrom: -j71 A
 Strom an der Fehlerstelle: -j53 A

Kabelnetz

Im reinen Kabelnetz stellt jeder Kabelfehler einen irreparablen Fehler dar. Der Vorteil der Selbstheilung (abgesehen von immer weniger werdenden Massekabeln) existiert nicht. Die Verfasser favorisieren hier die Nospe mit automatischer Abschaltung des fehlerbehafteten Strangs. Aufwendige Suchschaltungen entfallen und die Gefahr des Doppelerdschlusses wird minimiert. Durch die Verwendung von ferngemeldeten Erd- und Kurzschlussanzeigern sowie »intelligenten Ortsnetzstationen« mit fernsteuerbaren Lasttrennschaltern, hält sich die Dauer der Unterbrechung der Stromversorgung in Grenzen. Wichtig ist hier ebenfalls eine geringe Vermaschung, was jedoch generell für alle Mittelspannungsnetze gelten sollte, wo nicht jedes Betriebsmittel an allen Enden mit Schutz und Leistungsschalter versehen ist.

- Mit der Erdfehlererkennung über U0>, wird nach 1 s der Knospe-Widerstand automatisch für maximal 0,8 s eingeschaltet.
- Der Überstromzeit- bzw. Distanzschutz schaltet den fehlerbehafteten

ten Strang selektiv je nach Staffelzeit ab.

- Steht der Erdschluss noch an, z. B. infolge einer Systemfehlerklärungszeit die höher als die maximale Einschaltdauer ist, muss er wie gehabt gesucht werden. Hierfür liefern die Anzeigen der Grobortung die wichtigen und zuverlässigen Anzeigen über den fehlerbehafteten Abzweig. Mögliche widersprüchliche Fehlanzeigen der wattmetrischen Verfahren auf fehlerfreien Feldern können mit dem Wissen der Grobortung ignoriert werden. Die Anwendung der manuellen Suche kann auf Erfahrungen basierend im Kabelnetz als unwahrscheinlich eingestuft werden.

Der initial durchgeführte Versuch für einen widerstandslosen Leiter-Schirm-Kabelfehler bestätigte die ordnungsgemäße Ausführung der Primärtechnik sowie die Funktion der Steuerung (Tafel 1).

Beim zweiten Versuch wurde das Kabel angebohrt und ein Kupferdraht zur Einleitung des Erdfehlers eingebracht (Bild 2, Bild 3).

Am Stromverlauf des fehlerbehafteten Felds mit einem dominanten Gleichanteil ist zu erkennen, dass die Zuschaltung auf den Fehler nahe dem Spannungsnulldurchgang erfolgte (Bild 4). Nach rd. 40 ms existierte der Zünddraht nicht mehr, was am periodischen Wiederzünden des fehlerbehafteten Leiters L2 zu erkennen ist.

Mit der Knospe-Zuschaltung (Bild 5) wurde der Fehler abgeschaltet. Trotz des geringen kapazitiven Erdschlussstroms, sind die typischen Zündspitzen in der Spannung des fehlerbehafteten Leiters sichtbar (Bild 6), die die Funktion der entfernungs-proportionalen Distanzmessung stark einschränken. Daher sind die selektive Staffelung der gerichteten Endzeiten bzw. die Verwendung von Signalvergleichsverfahren bei mehrseitig gespeisten Schutzobjekten entscheidende Eckdaten für den Selektivschutz.

Gemischtes Netz

Diese Netzform stellt die wesentliche Herausforderung dar. Als problematisch gelten:

| Zustand | | U0 | | 3I0_Abzweig | | 3I0_STPB | |
|------------|-----------|----------|-------|-------------|-----|----------|-------|
| Erdschluss | gemessen | 11,60 kV | -90° | 53 A | 3° | 71 A | -178° |
| | berechnet | 11,60 kV | -90° | 53 A | 3° | 71 A | -178° |
| KNOSPE | gemessen | 9,78 kV | -112° | 1550 A | 57° | 1574 A | -123° |
| | berechnet | 9,80 kV | -111° | 1540 A | 59° | 1540 A | -122° |

Tafel 1. Kabelfehler Leiter-Schirm

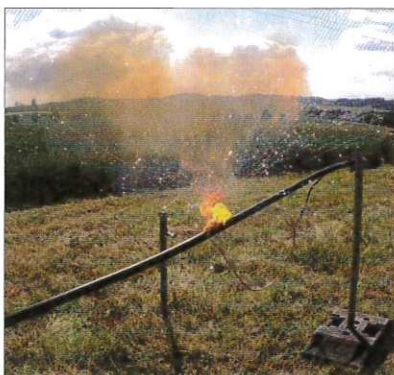


Bild 2. Erdfehlerversuch im Kabelnetz



Bild 3. Fehlerstelle NA2XS(F)2Y 1x150 RM/25

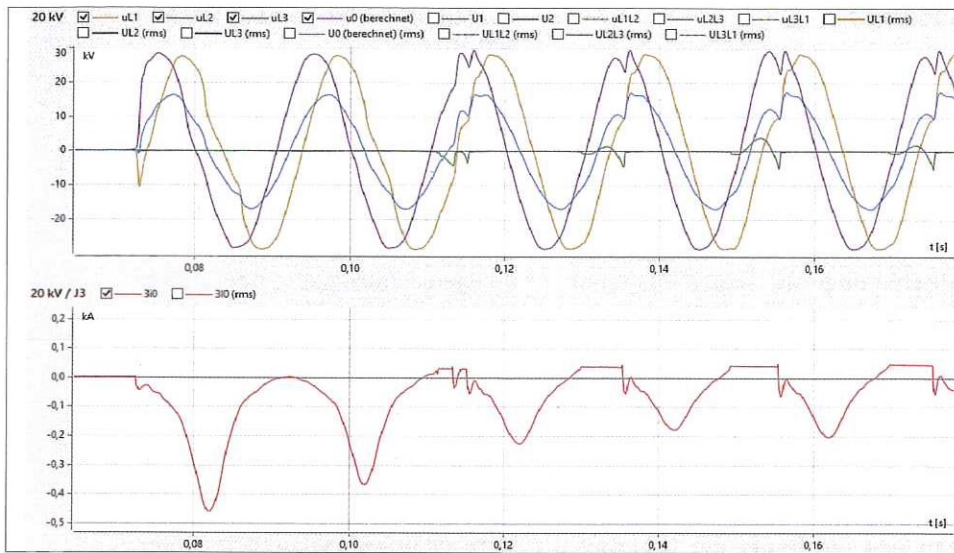


Bild 5. Kabelfehler, Größen bei Knospe

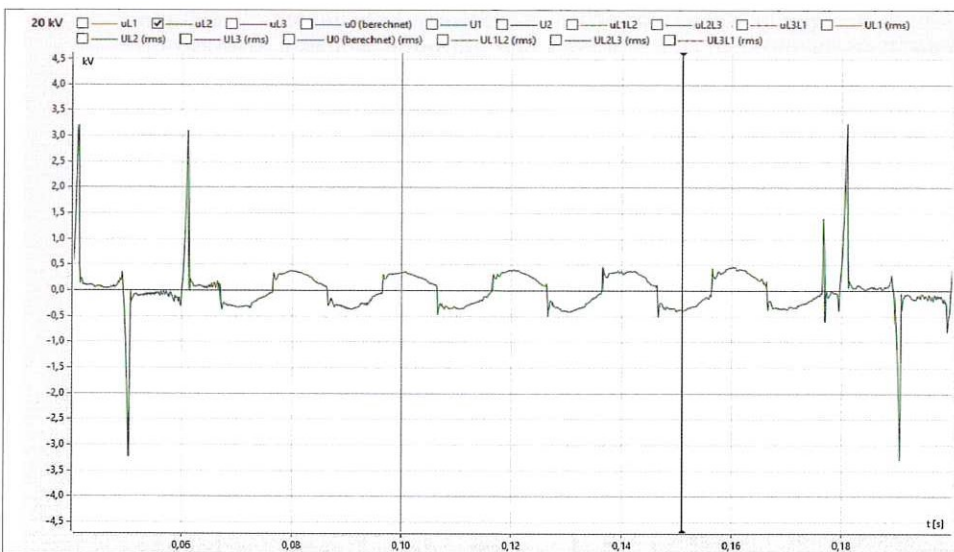


Bild 6. Nicht sinusförmige Spannung L2



Bild 7. Seilabriss im Freileitungsnetz

- vermaschte Netzstruktur mit weiten Netzausläufern und fehlenden Erd- und Kurzschlussanzeigern sowie nicht fernsteuerbaren Trennschaltern;
- hochohmige Erdfehler.

Folgende Verfahrensweise wird verwendet:

- Mit der Erdschlusserkennung über U_0 , wird nach 10 s der Knospe-Widerstand automatisch für maximal 0,1 s eingeschaltet.
- Der Distanzschutz schaltet den fehlerbehafteten Strang mit der für die AWE benutzten Übergreifzone aus, insofern genügend Strom fließt.
- Wiedereinschaltung und selektive Auslösung für Nahfehler bei erfolgloser AWE.
- Steht der Erdschluss noch an, muss er wie gehabt mit der Feinortung gesucht werden. Es gilt das Gleiche wie vorstehend im Kabelnetz ausgeführt.

Während im Kabelnetz der letzte Punkt kaum eintreten dürfte, ist dieser im vermaschten Freileitungsnetz sehr wahrscheinlich. Zunächst werden im Falle einer mehrseitigen Speisung nicht alle Schutzgeräte anregen und die AWE durchführen, womit der Fehler auch bei endgültiger Abschaltung einiger Seiten weiter gespeist werden kann. Hier gilt es für die Netzplanung, mehrseitige Fehlerspeisung zu vermeiden, was durch leistungsstarke Direktverbindungen und offene Ringe erreicht wird.

In Mittelspannungsnetzen mit Holzmasten und ohne Erdseile stellen sich einpolige Freileitungsfehler oft als hochohmige Fehler dar. Dies gilt für Baumbewuchs gleichermaßen wie für gerissene Leiterseile (Bild 7). Da bezüglich der Höhe des Widerstands kaum Erfahrungen vorliegen, wurde mit dem nächsten Versuch der Leiterseilriss analysiert.

Das transiente und das wattmetrische Verfahren erkennen den Fehler zuverlässig (Bild 8, Tafel 2). Die Nachberechnung mit »PasGrid« ergibt einen Fehlerübergangswiderstand von $R_f = 65 \Omega$ durch das auf rd. 10 m aufliegende Leiterseil.

Die Einschaltung des Widerstands wäre hier nicht von Nutzen, da der Nullstrom 3I0 nur noch 165 A und eine Nullspannung U_0 nur rd.

1 kV betragen würden (Tafel 3). Der Kurzschlusschutz wird folglich nicht anregen. Baumbewuchs wird zu noch größeren Übergangswiderständen im Kiloohm-Bereich führen.

Fazit, die Einschaltung der Knospe wird im gemischten Netz nicht zwangsweise zu einer AWE oder zum Erzeugen der Meldungen des Erdkurzschlussschutzes führen. Dass sie dennoch benutzt wird, hat ihre Berechtigung, da mit der AWE bzw. dem Anregen des Kurzschlusschutzes ein widerstandsarmer Freileitungsfehler oder ein Fehler im Kabelbereich abgeleitet werden kann, was für die Suche ein wichtige Zusatzinformation darstellt. Außerdem werden auch bei älteren Relais Störschriebe generiert, die beim einfachen Erdschluss noch keine Aufzeichnung starten.

Berechnung und Systemvalidierung mit PasGrid

Berechnet und simuliert wurde dies alles mit dem Analyse- und Schutzeinstellprogramm PasGrid von GSC Power Engineering GmbH.

In der Applikation ist das komplette Netz mit all seinen Betriebsmitteln, Wandlern und Schutzgeräten abgebildet. Die Aktualisierung der Kabel, Freileitungen, Transformatoren und Einspeiser erfolgt aus dem im Unternehmen benutzten GIS-System »Gebis« über die integrierte XML-Schnittstelle. Neben der Netz- und Schutzberechnung, wird mit PasGrid auch die Verwaltung und Analyse der Netzfehler seit der Einführung des Systems im Jahre 2017 realisiert. Damit wird die in diesem Jahr im »Leitfaden für die Inbetriebnahme und den Betrieb von digitalen Netzschutzsystemen« angeregte »Qualitätskontrolle bei Netzstörungen« bereits angewendet.

Hierzu werden den relevanten PasGrid-Relais die Störschriebe der Netzstörung zugeordnet. PasGrid berechnet aus den Transienten die stationären Fehlergrößen sowie die Fehlerimpedanz. Anhand von Referenz-Kurzschlussberechnungen mit dem Netzmodell werden je nach Konfiguration des Schutzobjekts die wahrscheinlichen Fehlerorte ausgewiesen. Durch diese Funktion konnten vor allem im Freileitungsbereich Orte mit kritischem Tassenbewuchs erfolgreich lokalisiert werden.

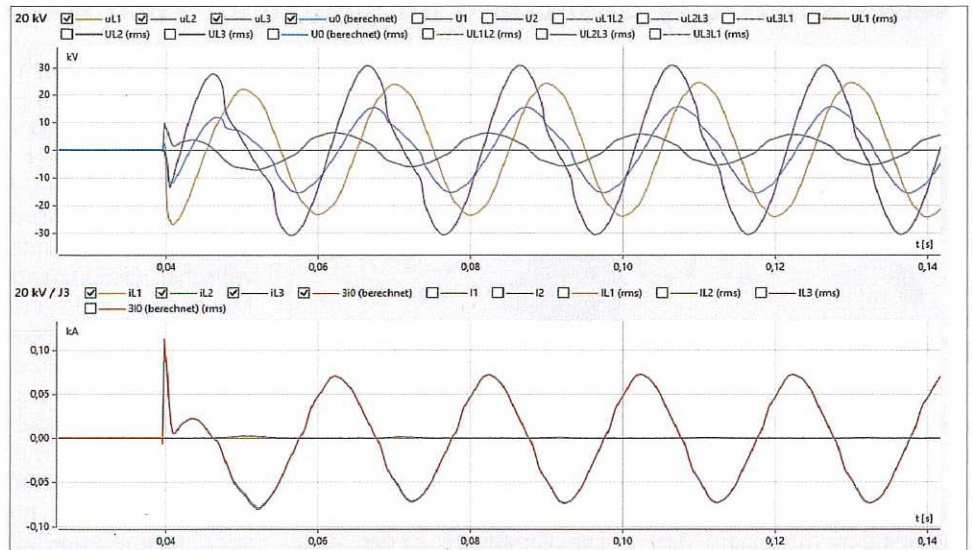


Bild 8. Freileitungsnetz, Größen beim Fehlereintritt

| Zustand | | UL1 | | UL2 | | UL3 | | U0 | |
|------------|-----------|----------|--------|---------|------|----------|-------|----------|-------|
| Erdschluss | gemessen | 17,96 kV | -114 ° | 3,29 kV | 20 ° | 21,10 kV | -51 ° | 11,05 kV | -74 ° |
| | berechnet | 17,90 kV | -114 ° | 3,23 kV | 19 ° | 21,10 kV | -51 ° | 11,00 kV | -74 ° |

Tafel 2. Spannungen bei erdfühligem Leiterseil

| Zustand | | U0 | | 3I0_Abweig | | 3I0_STPB | |
|------------|-----------|----------|-------|------------|------|----------|-------|
| Erdschluss | gemessen | 11,05 kV | -74 ° | 50 A | 18 ° | | |
| | berechnet | 11,00 kV | -74 ° | 50 A | 19 ° | | |
| KNOSPE | gemessen | | | | | | |
| | berechnet | 1,04 kV | -84 ° | 164 A | 87 ° | 165 A | -94 ° |

Tafel 3. Nullsystemgrößen bei Erdschluss und Knospe

Zusammenfassung

Der Aufsatz zeigt wie viele vorgehende Publikationen die Komplexität und Herausforderungen zur Erdfehlerortung in gemischten Mittelspannungsnetzen. Generell sollte in Netzen mit Ospe (ohne Sternpunktterdung) oder Respe, mit und ohne Knospe und ab einer gewissen Netzgröße, eine auf transienter Messung beruhende Grobortung und eine ständig messende Feinortung benutzt werden. Wichtig ist, dass die Richtungsmeldungen der Grobortung gespeichert und während des Erdfehlers nicht zurückgesetzt werden. Beide Verfahren müssen unterschiedliche Meldungen erzeugen, d. h., sie dürfen nicht als »Oder«-Meldung gemeinsam aufgelegt werden. Es sei angemerkt, dass in kleinen Netzen die Grobortung nach dem transienten

Verfahren nicht zuverlässig funktioniert, da die für die Richtungsbestimmung maßgeblich auswertbaren Größen nach Fehlereintritt sehr hohe Frequenzen haben und möglicherweise das Abtasttheorem des Relais verletzen, was die Positionierung des Messfensters erschwert. Als Schutzgeräte kommen die neuen Universalschutzgeräte 7SX85 von Siemens zum Einsatz. Mit Siprotec 5 wird nunmehr ein sehr empfindliches und genaues transientes Erdfehlerortungsverfahren einschl. hochauflösendem Störschrieb in allen Kurzschlusschutzgeräten zur Verfügung gestellt.

hagen.gruenert@gscpower.de

www.gscpower.de

www.kwh-netz.de