

Schutz eines Transformators mit Stufenschalter

1. Einleitung

Transformatoren gehören zu den wichtigsten und kostenintensivsten Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung, so dass infolge von auftretenden Fehlern in diesen Komponenten nicht nur eine Unterbrechung der elektrischen Energieversorgung weiter Gebiete verbunden ist, sondern darüber hinaus auch große wirtschaftliche Einbußen verursacht werden. Im Betrieb muss daher für eine kontinuierliche Energieversorgung möglichst über Jahrzehnte hinweg fehlerfrei gesichert sein. Auftretende Fehler und damit sich ankündigende eventuelle Ausfälle der Transformatoren sollten deshalb rechtzeitig erkannt werden, um geeignete Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung einzuleiten.

Aus diesem Grund werden Transformatoren je nach Bauart und Größe mit unterschiedlichen Überwachungs- und Schutzgeräten ausgestattet. Neben dem mechanischen Schutz sollen vor allem der elektrische Schutz beleuchtet werden.

Bei kleineren Verteil-Transformatoren sind aus technisch, wirtschaftlichen Gründen Sicherungen sowie UMZ¹⁾-Relais ausreichend. Sicherungen als auch UMZ-Relais sind zeitverzögerte Schutzmaßnahmen. Für Trafos größerer Bauart in Verteilungs-, Übertragungs- und Energieerzeugungsanwendungen sind zeitverzögerte Schutzauslösungen nicht akzeptabel und müssen zur Vermeidung von Systeminstabilitäten und kostenintensiven Abschaltungen unverzüglich abgeschaltet werden.

Transformator-Fehler können generell in 5 Kategorien eingeteilt werden:

- Windungs- und Klemmenschluss
- Wicklungsschluss
- Fehler am Transformator-kessel und Hilfseinrichtungen
- Fehler am Transformatorstufenschalter
- Anormale Betriebsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Schmutz)
- Externe Fehler

Diese Applikation soll einen Einblick über den Schutz von geregelten Leistungstransformatoren mit Stufenschalterfunktion dienen.



Bild 1 SIPROTEC Transformatorschutz

2. Schutzkonzept

Je nach Bauart und Größe der Transformatoren kommen neben dem klassischen Differentialschutz (ab ca. 1 MVA) als schneller, selektiver Kurzschlusschutz der Buchholz-, Überlast- und Überstromzeitschutz zur Anwendung. Diese sollen hier nur kurz erwähnt werden, da diese in den anderen Applikationen ausführlich beschrieben werden.

2.1 Differentialschutz als Hauptschutz

Der Differentialschutz stellt die Hauptschutzfunktion für den Transformator dar und ist in den SIPROTEC-Geräten 7UT6* (Adr. 1201) und 7UM62* (Adr. 2001) implementiert. Ferner enthält dieser eine Reihe von Zusatzfunktionen (Anpassung an Übersetzung und Schaltgruppe, Stabilisierung gegen Einschalt-Rush). Im praktischen Anwendungsfall wird daher mit falschen Differentialströmen gerechnet, die durch den Übertragungsfehler der Stromwandler verursacht werden. Bei geregelten Transformatoren muss mit einem zusätzlichen Falschstrom gerechnet werden der bei Verstellung des Stufenschalters entsteht.

Die in den Geräten integrierten Zusatzfunktionen werden bei Einsatz eines Trafos mit Stufenschalter und den daraus resultierenden Korrekturwerten beeinflusst. In Kap. 4 wird dies anhand einer Beispielrechnung erläutert.

1) UMZ = Unabhängiger Maximalstromzeitschutz

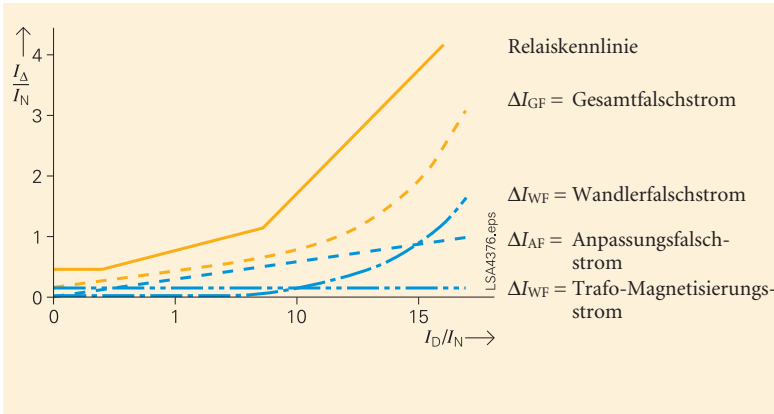


Bild 2 Falscher Differenzstrom bei Last- und Durchgangsfehlern und angepasste Relaiskennlinie

Reserveschutzeinrichtungen wie der Überstromzeitschutz sind in separaten Geräten (z. B. 7SJ602, 7SJ45/46) vorgesehen. Der im Differentialschutzgeräte enthaltene Überstromzeit – und/oder Überlastschutz dient lediglich als Reserveschutz gegen externe Fehler im angeschlossenen Netz.

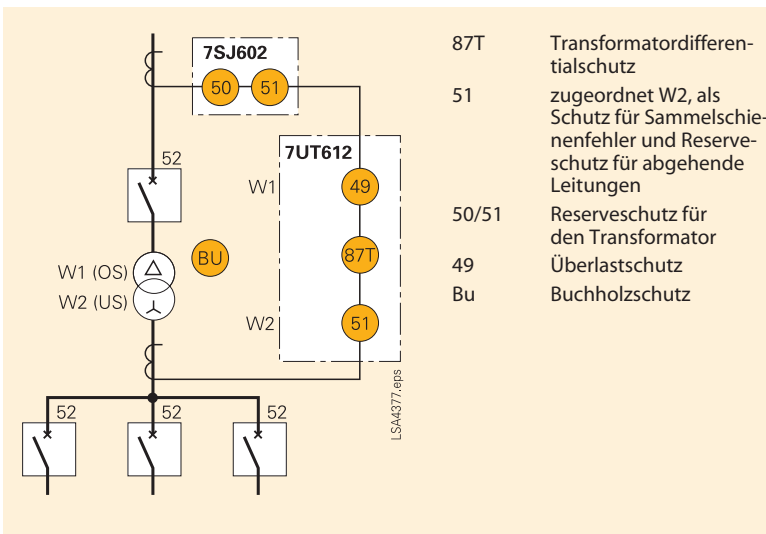


Bild 3 Schutz eines Zweiwicklertransformators

2.2 Erdstrom-Differentialschutz

Bei Transformatorwicklungen mit Sternpunktterdung über ein Impedanz (Erdstrombegrenzung) ist der Erdstrom-Differentialschutz (7UT6* Adr. 1301) eine ideale Ergänzung zum Phasenschutz um die Ansprechempfindlichkeit im Erdschluss zu erhöhen.

Bei diesem Verfahren werden der gemessene Sternpunktstrom I_0^* im Trafosternpunkt mit dem berechneten Summenstrom I_0^{**} aus den Phasenströmen verglichen.

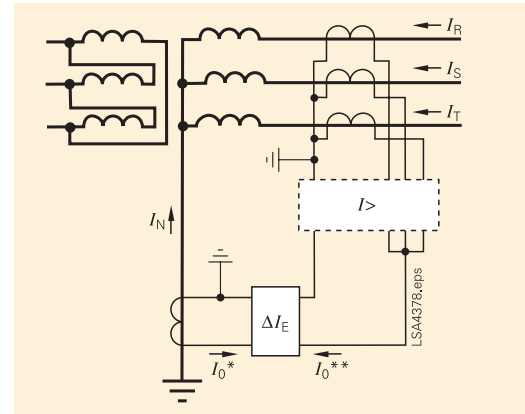


Bild 4 Erdstrom-Differentialschutz

2.3 Buchholzschutz

Der Buchholzschutz wird als externer Schutz (7UT6*, 7UM62* Adr. 8601, 8701) ins Relais (Warn-, Kessel- und Auslösemeldung) eingekoppelt und wird für flüssigkeitsgekühlte Transformatoren und Drosselspulen mit Ausdehnungsgefäß verwendet. Das Buchholzrelais spricht auf Fehler an, die eine Gasentwicklung im Kessel zur Folge haben (Windungsschluss, Wicklungsschluss, Verlust von Isolierflüssigkeit, Luftansammlung).

3. Einbindung Trafostufenschalter in Differentialschutz

3.1 Zweck eines Trafostufenschalters

Die Spannungsregelung an Transformatoren mit Laststufenschaltern ist ein wichtiges Thema von Energieversorgungsunternehmen. Gemäß DIN/IEC Norm ist es notwendig, die Spannung 230 V/400 V im öffentlichen Niederspannungsnetz mindestens zwischen $\pm 10\%$ konstant zu halten. Um die Spannung in dieser Bandbreite konstant zu halten wird über einen Trafostufenschalter angesteuert. Der Spannungsregler vergleicht laufend den Istwert U_{ist} (Ausgangsspannung am Transformator) und einen festen oder lastabhängigen Sollwert U_{soll} .

Der Spannungsregler liefert – abhängig von der Abweichung des Istwertes zum Sollwert – die Stellgröße für den Laststufenschalter des Transformators. Der Laststufenschalter schaltet, wenn die vorgegebene Bandbreite ($U_{soll} \pm B\%$) unter- bzw. überschritten wird. Somit wird die Spannung am Transformator konstant gehalten. Schwankungen innerhalb der zulässigen Bandbreite haben keinen Einfluss auf das Regelverhalten bzw. den Schaltvorgang.

Die Parameter des Spannungsreglers können dem Verhalten der Netzspannung optimal angepasst werden, so dass ein ausgewogenes Regelverhalten bei geringer Schaltzahl des Laststufenschalters erreicht wird.

diese Fehler mit berechneten Korrekturfaktoren anhand der parametrisierten Anlagendaten aus. Frühere Relais-Generationen benötigten separate Anpassungswandler, unter anderem auch zur Schaltgruppenanpassung.

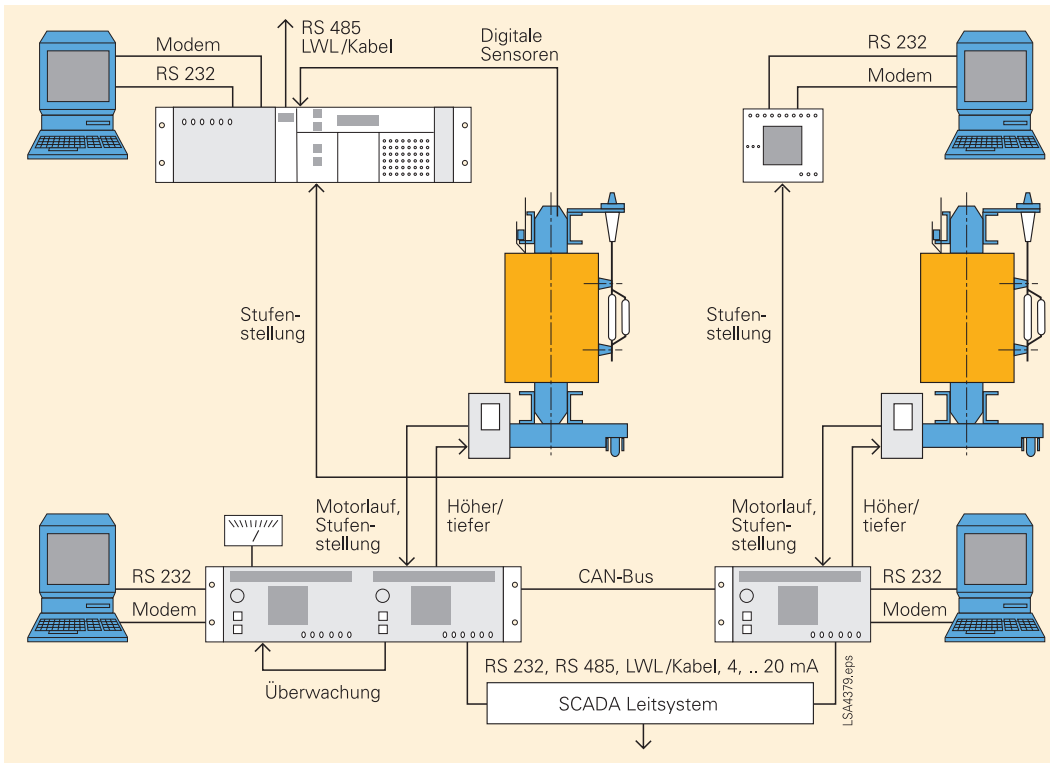


Bild 5 Spannungsregelung eines geregelten Transformators mit Hilfe eines TAPCON®-Systems

3.2 Korrektur „falscher“ Differentialströme

Die meisten Berechnungen von Differential- und Stabilisierungs-Strömen erfolgt ohne Berücksichtigung der Schalterstufenstellung. In der Praxis allerdings sind die meisten Leistungstransformatoren mit einem Stufenschalter ausgerüstet. Man unterscheidet zwei Arten:

- Stufenschaltung für Betätigung ohne Last
- Stufenschaltung für Betätigung unter Last

Während die meisten Transformatoren für Stufenschaltung ohne Last ausgerüstet sind, wird zur Spannungsregulierung in Netzwerken die Stufenschaltung unter Last verwendet. Die Schutzparametrierung muss die unterschiedlichen Stufenschalterpositionen berücksichtigen, um die Möglichkeit von Fehlauflösungen (vor allem der Extremstellungen) zu vermeiden.

Der korrekte Betrieb des Differentialsschutzes erfordert, dass unter Normallast- und Fehlbedingungen die Differentialströme auf Primär- und Sekundärseite den echten Gegebenheiten entsprechen. Die primär- und sekundärseitigen Stromwandler erfassen nicht das echte Transformatorübersetzungsverhältnis. Die heutigen digitalen Schutzgeräte wie die SIPROTEC-Serie gleichen

Hat die Wicklung einen Regelbereich, so wird als U_N der geregelten Seite nicht die tatsächliche Nennspannung verwendet, sondern die dem mittleren Strom des Regelbereichs entsprechende Spannung.

$$U_N = 2 \cdot \frac{U_{\max} \cdot U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} = \frac{2}{\frac{1}{U_{\max}} + \frac{1}{U_{\min}}}$$

mit U_{\max} , U_{\min} als Grenzen für den Regelbereich.

Beispiel:

Transformator YNd5
 35 MVA
 110 kV/20 kV
 Y-Seite geregelt $\pm 20 \%$

Daraus resultieren für die geregelte Wicklung (110 kV)

Maximale Spannung $U_{\max} = 132 \text{ kV}$
 Minimale Spannung $U_{\min} = 88 \text{ kV}$

Einzustellende Spannung

$$U_{N \text{ WICKL S1}} = \frac{2}{\frac{1}{132 \text{ kV}} + \frac{1}{88 \text{ kV}}} = 105,6 \text{ kV}$$

Parameter in relevanten SIPROTEC-Geräten

7UT612	Adr. 240
7UT613/63*	Adr. 311
7UM62	Adr. 240

■ 4. Beispielrechnung
Einfluss Stufenstellungen auf Differential- und Stabilisierungsströme

Für das folgende Beispiel wird ein Zweiwickler-Transformator mit einem Stufungsbereich von -15 % bis +5 % verwendet. Der Stufenschalter ist in der Primärwicklung zur Spannungsregulierung integriert.

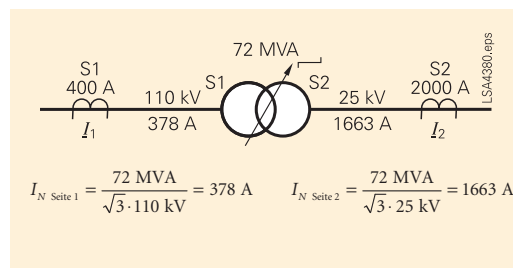


Bild 6

Transformator	YNd5
	(nicht relevant für Berechnung)
	72 MVA
	110 kV/25 kV
	Y-Seite geregelt -15 %/+5 %
	CT ₁ = 400 (1 A)
	CT ₂ = 2000 (5 A)

4.1 Berechnungen der einzustellenden Spannung, Objekt-Nennströme und Korrekturfaktoren

Die einzustellende Spannung wird gemäß der Formel im Kapitel 3.2 berechnet und als $U_{N\text{ Wickl S1}}$ in die SIPROTEC-Geräte 7UT6*. 7UM62* parametrisiert.

Für die geregelte Wicklung (110 kV) berechnen sich die

Maximale Spannung $U_{\text{max}} = 115,5 \text{ kV}$

Minimale Spannung $U_{\text{min}} = 93,5 \text{ kV}$

Einzustellende Spannung

$$U_{N1} = 2 \cdot \frac{U_{\text{max}} \cdot U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}} = \frac{2}{\frac{1}{U_{\text{max}}} + \frac{1}{U_{\text{min}}}}$$

$$= 2 \cdot \frac{115,5 \text{ kV} \cdot 93,5 \text{ kV}}{115,5 \text{ kV} + 93,5 \text{ kV}} = 103,3 \text{ kV}$$

Objekt-nennstrom der geregelten Seite

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N1}} = \frac{72 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 103,3 \text{ kV}} = 402,3 \text{ A}$$

entspricht auf der CT₁-Sekundärseite

$$I_{N1} = \frac{I_{N1}}{CT_1} = \frac{402,3 \text{ A}}{400} = 1,00575 \text{ A} \cong I_{N\text{Obj}}$$

(bezogen auf S1)

Objekt-nennstrom der unregulierten Seite (bleibt konstant)

$$I_{N2} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N2}} = \frac{72 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV}} = 1663 \text{ A}$$

entspricht auf der CT₂-Sekundärseite

$$I_{N2} = \frac{I_{N2}}{CT_2} = \frac{1663 \text{ A}}{2000} = 0,8315 \text{ A} \cong I_{N\text{Obj}}$$

(bezogen auf S2)

4.2 Berechnungen der Differential-/Stabilisierungsströme in den Stufenschalterextremstellungen

4.2.1 Stufenstellung +5 %

Objektstrom bei maximaler Stufenstellung

$$I_{N1(+5\%)} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{max}}} = \frac{72 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 115,5 \text{ kV}} = 359,9 \text{ A}$$

entspricht auf CT₁-Sekundärseite

$$I_{N1(+5\%)} = \frac{I_{N1(+5\%)}}{CT_1} = \frac{359,9 \text{ A}}{400} = 0,8997 \text{ A} \cong 0,8946 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

Differentialstrom in maximaler Stufenstellung

$$I_{\text{Diff}} = |I_{N1(+5\%)} - I_{N\text{Obj}}| = |0,8946 \cdot I_{N\text{Obj}} - I_{N\text{Obj}}| = 0,1054 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

Stabilisierungsstrom in maximaler Stufenstellung

$$I_{\text{Stab}} = |I_{N1(+5\%)}| + |I_{N\text{Obj}}| = |0,8946 \cdot I_{N\text{Obj}}| + |I_{N\text{Obj}}| = 1,8946 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

4.2.2 Stufenstellung -15 %

Objektstrom bei minimaler Stufenstellung

$$I_{N1(-15\%)} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{min}}} = \frac{72 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 93,5 \text{ kV}} = 444,6 \text{ A}$$

entspricht auf CT₁-Sekundärseite

$$I_{N1(-15\%)} = \frac{I_{N1(-15\%)}}{CT_1} = \frac{444,6 \text{ A}}{400} = 1,1115 \text{ A} \cong 1,1051 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

Differentialstrom in maximaler Stufenstellung

$$I_{\text{Diff}} = |I_{N1(-15\%)} - I_{N2}| = |1,1051 \cdot I_{N\text{Obj}} - I_{N\text{Obj}}| = 0,1051 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

Stabilisierungsstrom in maximaler Stufenstellung

$$I_{\text{Stab}} = |I_{N1(+5\%)}| + |I_{N2}| = |1,051 \cdot I_{N\text{Obj}}| + |I_{N\text{Obj}}| = 2,1051 \cdot I_{N\text{Obj}}$$

Bei der einzustellenden Spannung gemäß Kapitel 3.2 wird in den Extremstellungen jeweils vom Objektstrom der gleiche Differentialstromanteil gemessen \Rightarrow Die berechnete und einzustellende Spannung U_{N1} entspricht der Mittelstellung des Trafostufenschalters.

4.3 Abstand Betriebsstrom zum Stabilisierungsstrom

$$I_{op} = m \cdot I_{Stab}$$

Voreinstellung $m = 0,25$

$$I_{op} = 0,25 \cdot I_{Stab}$$

Bei maximaler Stufenstellung + 5 % folgt

$$I_{op} = 0,25 \cdot 1,8496 \cdot I_{NObj} = 0,4624 \cdot I_{NObj}$$

Bei minimaler Stufenstellung - 15 % folgt

$$I_{op} = 0,25 \cdot 2,1051 \cdot I_{NObj} = 0,5263 \cdot I_{NObj}$$

Aus den Berechnungen ist weiterhin zu entnehmen, dass unter Nennbedingungen und Stufen-schalterextremstellungen die Betriebsströme aufgrund der Kennliniencharakteristik nicht im Auslösebereich liegen. Somit muss die Steigung der Auslösecharakteristik (7UT6* Adr. 1241, 7UM62* Adr. 2041) nicht den Bedingungen angepasst werden. (Voreinstellung $m = 0,25$)

5. Parametrierhinweise

Eine direkte Einkopplung eines Transformatorstufenschalters in den Schutzalgorithmus ist ab V4.6 für 7UT63*-Geräte vorgesehen (voraussichtlich Mitte 2005 verfügbar). Durch Einlesen der Stufenstellungen (mit den Kodierungen BCD, Binär, 1 aus n-Tabelle) können je nach Position das Übersetzungsverhältnis angepasst und damit die fehlerhaften Differentialströme kompensiert werden. Dadurch wird sowohl die Empfindlichkeit als auch die Stabilität des Differentialsschutzes verbessert.

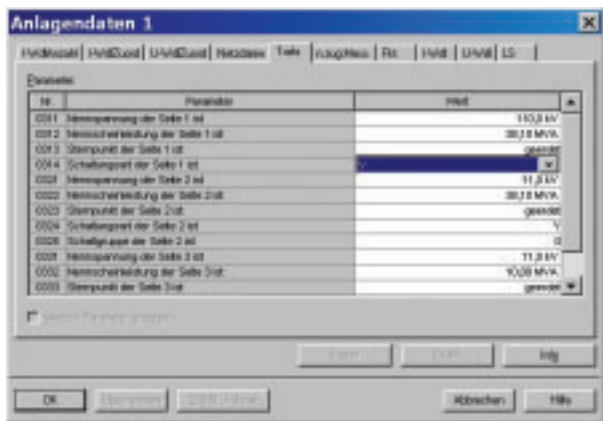


Bild 7 7UT613/63* Parametrierung in Anlagendaten – Transformator

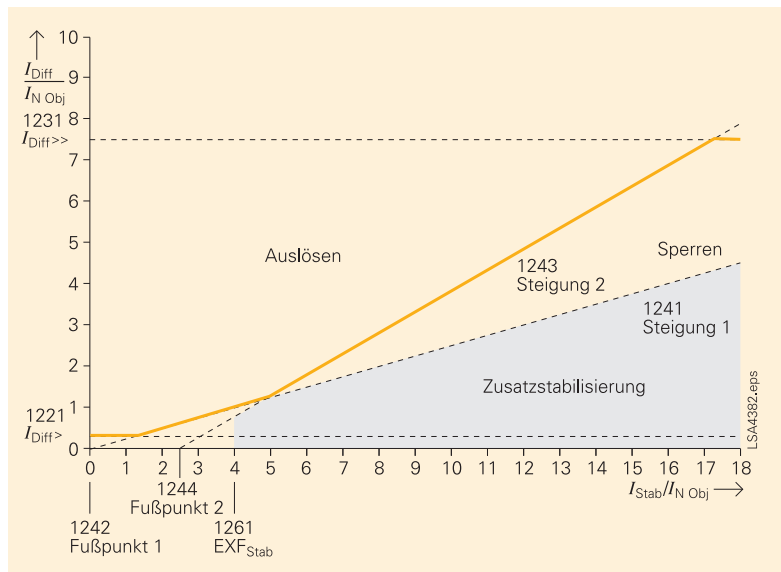


Bild 8 Auslösekennlinie des Differentialsschutzes in 7UT6* und 7UM62*

Z. Zt. erfolgt die Anpassung über die Korrektur der Primärspannung gemäß Formel Kap. 3.2 und Parametrierung durch die entsprechenden Adressen oder DIGSI.

6. Einbindung der Stufenstellungen In DIGSI

Trafostufen können entweder über den DIGSI-PC oder über das Graphik-Display des SIPROTEC-Gerätes angezeigt werden. Die Meldung der Trafostufen erfolgt über Binäreingänge am Gerät. Entsprechend des Codierungstyps und Anzahl der Trafostufen erfolgt die Belegung der Binäreingänge. (siehe Bild 9).

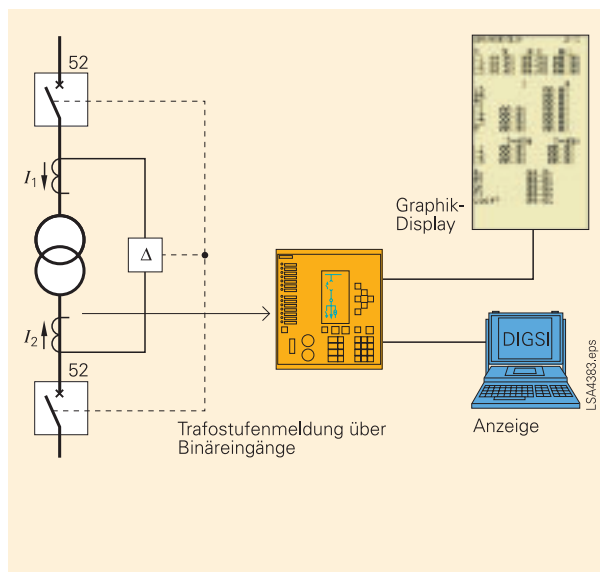


Bild 9 Schematische Darstellung – Einlesen der Stufenstellung über DIGSI oder Grafik-Display

Zur Darstellung der Trafostufen muss als erstes in der Rangiermatrix der Typ Trafostufenmeldung (TM) eingefügt werden.

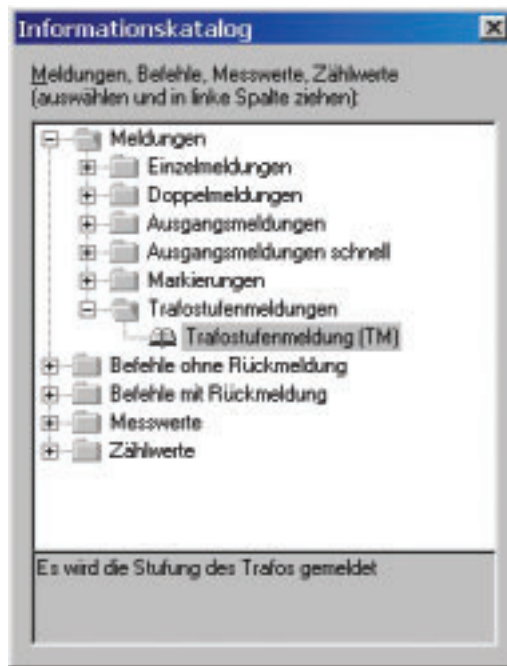


Bild 10 Aktivieren der Trafostufenmeldung im Informationskatalog

Die Trafostufenmeldung wird in die Rangiermatrix über die Konfiguration der Binäreingaben eingefügt und aktiviert.

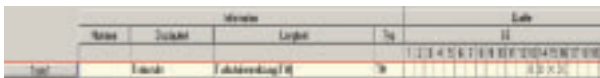


Bild 11 Einfügen der Trafostufenmeldung in die DIGSI-Rangiermatrix

Unter den Objekteigenschaften der Trafostufenmeldung sind die detaillierten Einstellungen vorzunehmen.

- Anzahl der Bits: notwendig zur Kodierung, Anzahl ist abhängig von der gewählten Kodierung
- Anzeigeeffset: der Wert, um den die Höhe des angezeigten Wertes gegenüber der Höhe des tatsächlichen Wertes in pos. oder neg. Richtung verschoben werden soll
- Laufkontakt: wenn Option Laufkontakt aktiviert wird, wird die Stufenstellung erst dann als gültig erkannt und übernommen, wenn der Laufkontakt das Erreichen der Stufen signalisiert (immer ranghöchster Kontakt)



Bild 12 Objekteigenschaften Trafostufenmeldung

7. Zusammenfassung

In den meisten Differentialschutzgeräten wird der Einfluss des Trafostufenschalters vorwiegend mit der korrigierten Eingabe der Primärspannung (ermittelt in der Mittelposition des Stufenschalters) berücksichtigt.

Aufgrund der Forderungen nach stabilisierten Spannungen und Regulierung über Stufenschalter lassen sich zukünftig durch Anpassung des Übersetzungsverhältnisses die Wahrscheinlichkeiten von Fehlauflösungen in den Extremstellungen des Stufenschalters begrenzen. Mit der Implementierung der Stufenstellung ins Schutzgerät und Berücksichtigung auf den Schutzalgorithmus in den 7UT63*-Geräten wird dem Rechnung getragen.

8. Referenzen

- Ziegler, Gerhard: Digitaler Differentialschutz – Grundlagen und Anwendung, ISBN3-89578-233-5
- SIPROTEC 7UM62 V4.0, Handbuch, C53000-G1176-C149-1
- SIPROTEC 7UT612 V4.0, Handbuch, C53000-G1176-C148-1
- SIPROTEC 7UT6 V4.0, Handbuch, C53000-G1176-C160-1
- Arbeitsrichtlinie AR505-220: Überwachungs- und Schutzgeräte an Transformatoren, ANL A4 07/1991
- Maschinenfabrik Reinhausen: Spannungsregelung an Transformatoren mit TAPCON® 240
- PTD SE: Präsentation DIGSI-Aufbaukurs, Teil 1, 2002