

Zustandsbasierte Selbstanpassung der Schutzfunktionen - eine Chance für bessere Empfindlichkeit und Sicherheit bei Differentialschutzeinrichtungen

Tammam Hayder, Ulrich Schärli
und Kurt Feser

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart, Deutschland
tammam.hayder@ieh.uni-stuttgart.de

Waldemar Rebizant

Wroclaw University of Technology
Wybrzeze Wyspianskiego 27
50-369 Wroclaw, Polen
rebizant@pwr.wroc.pl

Ludwig Schiel

SIEMENS AG
Wernerwerkdam 5
13623 Berlin, Deutschland
ludwig.schiel@siemens.com

Kurzfassung

Die rasante Weiterentwicklung der Mikroprozessortechnik in Rechenleistung und Verarbeitungsgeschwindigkeit ermöglicht die Einführung neuer komplexer Schutzalgorithmen. Zu diesen gehören adaptive Schutzalgorithmen, welche die Anpassung der Schutzaufgaben an den Netzzustand in Echtzeit und automatisch gestatten, was zu sicheren und empfindlichen Schutzfunktionen führt.

In dem Beitrag werden die Möglichkeiten und die Vorteile eines adaptiven Schutzsystems anhand zweier Beispiele erläutert, einmal die Adaptierung der Differentialschutzkennlinie während der Stromwandlersättigungszeit bei stromschwachen externen Fehlern mit Gleichstromglied längerer Zeitkonstante, zum anderen die Adaptierung der Differenzialschutzkennlinie bei Regeltransformatoren.

1 Einleitung

Mit der Einführung der Digitaltechnik Mitte der siebziger Jahre hat eine neue Ära in der Schutztechnik begonnen, die seitdem das Gebiet durch die vielfältigen Möglichkeiten der Digitaltechnik dauerhaft neu belebt. Neue Entwicklungen, welche die Selektivität und die Sicherheit des Schutzes wesentlich verbesserten, sind hinzu gekommen. Eine der diesbezüglichen Hauptentwicklungen ist die numerische Adaption der Arbeitskennlinien der Schutzgeräte.

Formal wurde der adaptive Schutz von CIGRE, 1988 Session 34-03 wie folgt definiert [1]:

“Der adaptive Schutz ist eine Schutzphilosophie, welche ermöglicht (sogar bestrebt), eine Anpassung verschiedener Schutzfunktionen an den aktuellen Netzzustand vorzunehmen“.

In der Literatur [2], [3] und [4] wird dies als offizielle Definition für den adaptiven Schutz verwendet.

Verstärkt wurde die weitere Entwicklung adaptiver Algorithmen durch die Integration der Mikroprozessortechnik in die Leittechnik. Dies hat Mitte der achtziger Jahre dazu beigetragen, eine Integration der Schutz und Leittechnik zu schaffen [5], als man anfang, an der rückkopplungsbasierten Schutzadaption zu arbeiten.

Die weiteren Entwicklungen auf dem Gebiet der Informationsübertragung und die Kombination des Digitalschutzes mit der digitalen Signalübertragung

hat im weiteren eine Vielzahl neuer Möglichkeiten geboten. Seit Anfang der neunziger Jahre sind Begriffe wie flexible Zoneneinstellung und Kennlinienschaltung keine Seltenheit mehr [6].

In [7] ist eine neue Definition der adaptiven Schutzfunktion festgelegt worden: “eine Funktionalität, die die Arbeitskennlinie des Schutzsystems als Reaktion auf eine Änderung des Systemzustandes automatisch ändert (Parameter- oder Zustandsänderung), als adaptive Funktion bezeichnet werden“.

In der Schutztechnik kann man die adaptiven Algorithmen in drei Kategorien einteilen:

1. Algorithmen, bei denen eine automatische Anpassung auf eine Rückmeldung erfolgt:

Dazu kann man verschiedene Verfahren im Bereich Distanzschutz zählen, die Kennlinienwahl im verzweigten Radialnetz und bei Dreibeinleitungen, wo die Zonen nach jeder Aktion (An- oder Abschalten einer Leitung) umgestellt werden und auch eine Adaption des Koppelfaktors bei Parallelleitungen, wenn eine Leitung ausgeschaltet wird [3], [6]. Beim Differentialschutz von Sammelschienen wird die Schutzkennlinie an den Schaltzustand (zugeschaltete Ein- und Ausgänge) angepasst. Die Adaption in den erwähnten Beispielen erfolgt auf die Rückmeldung der entsprechenden Leistungsschalter.

2. Algorithmen, bei denen eine Entscheidung auf Grund einer Softwareroutine oder einer Teilfunktion des Algorithmus getroffen wird:

Unter dieser Kategorie kann man den sogenannten intelligenten Schutz (neuronalen Netze, Fuzzy-Logik) einordnen. Auch andere „moderne“ Algorithmen in der Schutztechnik, welche auf den neuen hochentwickelten Kommunikationssystemen basieren, gehören zu dieser Gruppe. Beispiele sind die in [8] und [9] vorgeschlagenen Algorithmen, bei denen die Messwerte mit Hilfe des GPS-Systems synchron übertragen und durch adaptive Prozeduren bearbeitet werden. Dies ermöglicht eine sehr große Genauigkeit und Sicherheit bei Fehlererkennung und -lokalisierung.

3. Die adaptiven Meßverfahren:

Mit digitalen Filtern lassen sich flexible digitale Messalgorithmen realisieren, z. B. die schnelle Messung mit kurzem Datenfenster und vereinfachten Verfahren bei einem eindeutigen Fehlerbild, die Verlängerung des Datenfensters und die zusätzliche Filterung bei gestörten Messgrößen, die automatische Anpassung der Abtastrate bei der Analog-Digital-Umsetzung an die Netzfrequenz [5].

2 Anpassung der Differentialschutzkennlinie während der Stromwandlersättigungszeit bei stromschwachen externen Fehlern

2.1 Die Problematik und der Adaptionsprozess

Der Kurzschluß in einem Netz hat neben dem Kurzschlußstrom im allgemeinen ein Gleichstromglied zur Folge.

Die Amplitude des Fehlerstromes hängt vom Fehlerort im Netz ab, die Amplitude und Zeitkonstante des Gleichstromgliedes vom Schaltzeitpunkt (Zeitpunkt, in dem der Kurzschluß auftritt), von der Höhe des Dauerkurzschlußstromes und von den Impedanzwinkeln des Netzes.

Die generatornahen Fehlerströme haben relativ kleine Amplitude ($I_K < 3I_n$), besitzen aber ein Gleichstromglied längerer Zeitkonstante.

Dieser Fehlerstrom kann unter Umständen zur Sättigung der Stromwandler nicht direkt in der ersten Periode, sondern mit Zeitverzögerung führen (Bild 1-a). Physikalisch kann man dieses Phänomen an Hand des Verlaufs der magnetischen Flußdichte im Stromwandlerkern erklären (Bild 1-b), welche den Sättigungswert nicht direkt nachdem Fehlereintritt erreicht. Dieses Stromwandlerverhalten führt bei einem Differentialschutzgerät speziell bei Einsatz an Generatoren, im Fall eines äußeren Fehlers in Generatornähe zur Bildung eines Differenzstromes, der im Vergleich zum Haltestrom groß genug sein kann, um eine falsche Auslösung hervor zu rufen (Bild 1-c).

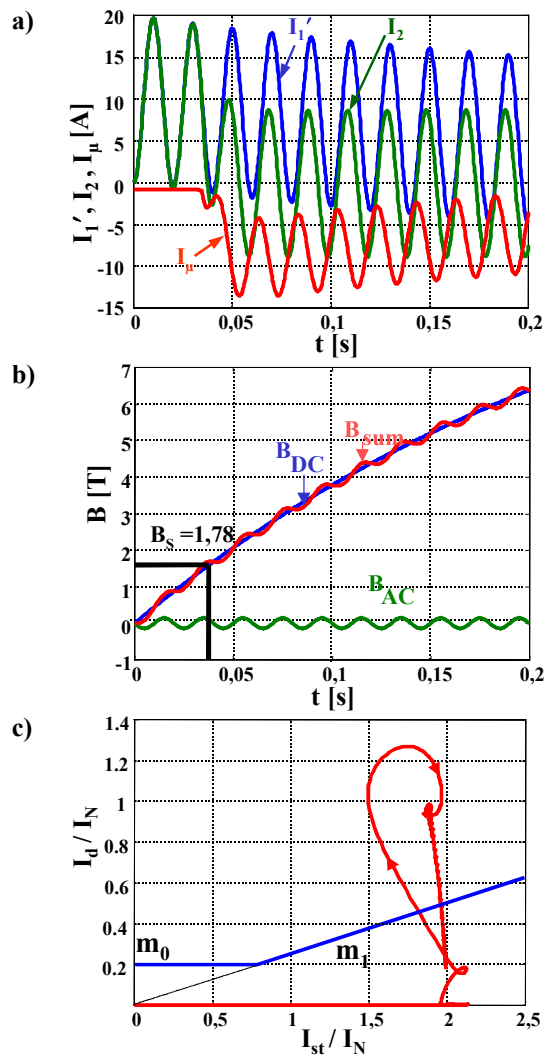


Bild 1: Sättigung eines Stromwandlers bei vollverlängerter Kurzschlußstrom mit kleiner Fehleramplitude und langer Zeitkonstante ($I_1=2I_n$, $I_{DC}=I_1$, $T_N=300$ ms)
a- Primär-, Sekundär- und Magnetisierungsstrom
b- Magnetische Flußdichte im Kern (B_{AC} und B_{DC} sind die Wechsel- und die Gleichkomponente)
c- Verlauf des Fehlers in der Auslösekennlinie des Differentialsschutzes

Da bei einem solchen Fehler der Stromwandler mit Zeitverzögerung in die Sättigung gerät und für eine bestimmte Zeit darin verbleibt, bevor er in den linearen Arbeitsbereich zurückkehrt, kann das Schutzgerät eine Berechnung der Kurzschlussparameter durchführen und nach der Bewertung des Falles vorbeugend eine adaptive Anpassung der Auslöse für den Sättigungszeitraum veranlassen und so eine falsche Auslösung wird vermieden

Eine grobes Schema der durchzuführenden Schritte ist in Bild (2) dargestellt. Ein weiteres Kriterium für Start dieses Prozesses ist eine kleine Stromamplitude ($I_K < 3 I_n$).

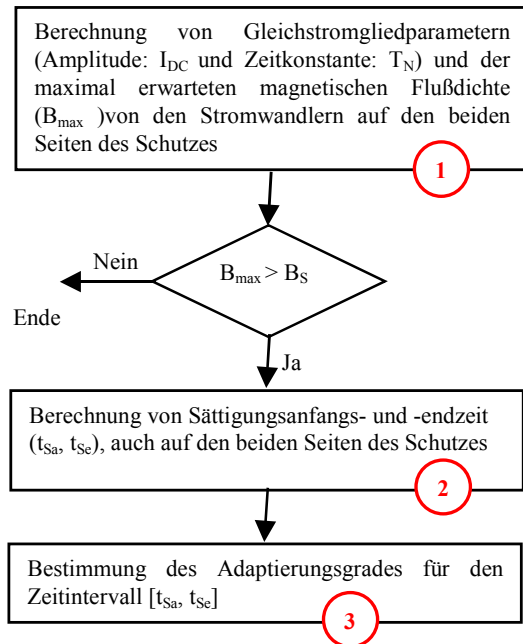


Bild 2: Ablauf des vorgeschlagenen Adaptierungsprozesses

2.1.1 Die Berechnung der Gleichstromgliedparameter

Dazu wurden mehrere Algorithmen untersucht, die von Fourier- und Walsh- Funktionen, Halb- und Vollzyklus- Filter abgeleitet sind. Die Untersuchung wurde mit mehreren Signalen unterschiedlicher Qualität und Herkunft durchgeführt (mit Matlab erzeugte, einfache Signale, Simulationsergebnisse von ATP-EMTP und ein reales Signal eines Störschreibers eines Differentialschutzrelais.) Die Berechnung mit dem vom Walsh-Vollzyklus-Filter abgeleiteten Algorithmus ist immer fehlerbehaftet, aber bei ATP-EMTP-Signalen und beim real gemessenen Fall ist der Fehler am kleinsten, während die modifizierten Fourier-Filter mit Halb- und Vollzyklus-Periode zwar sehr genaue Ergebnisse bei den synthetischen Matlab-Signalen liefern, aber bei den anderen Stromverläufen schlechter sind. In [10] sind die mathematischen Gleichungen des auf Walsh-Filter beruhenden Berechnungsalgorithmus beschrieben. Für weitere Betrachtung werden diese verwendet.

2.1.2 Die Abschätzung der Sättigungsanfangs- und -endzeit

Für die Abschätzung der Sättigungsanfangszeit wird die in [10] vereinfachte Formel verwendet:

$$t_{Sa} = -T_N \cdot \ln \left(1 - \frac{B_S \cdot q}{T_N \cdot R_2 \cdot I_2} \right) \quad (1)$$

mit:

I_2 : Amplitude der Grundschiwingung des sekundärseitigen Wandlerstromes

T_N : Zeitkonstante des Netzes

Die Sättigungsendzeit kann einfacher abgeleitet werden:

$$t_{Se} = T_N \ln \left(\frac{\mu w_2 I'_{DC}}{l B_S} \right) \quad (2)$$

wobei:

μ : magnetische Permeabilität des Eisenkernes

w_2 : sekundärseitige Windungszahl

l : mittlerer Kraftlinienweg im Eisenkern

Die Sättigungsinduktion B_S und die zu erwartende maximale Induktion B_{max} im Wandlerkern können wie folgt berechnet werden [3]:

$$B_S = \frac{\mu w_1 K_n I_{n1}}{l \omega T_w} \quad (3)$$

$$B_{max} = \frac{\mu}{l} w_2 I_2 \left[\left(\frac{T_N}{T_w} \right)^{\frac{T_w}{T_w - T_N}} + \frac{1}{\omega T_w} \right] \quad (4)$$

Die Zeitkonstante des Wandlers T_w wird aus den Wandlerparametern ermittelt:

$$T_w = \frac{L_w}{R_w} = \frac{L_0 + L_s + L_b}{R_2 + R_s + R_b} \quad (5)$$

wobei:

L_0 : Hauptinduktivität des Wandlers

L_s : Induktivität der Zuleitungen

2.1.3 Die Bestimmung des Adaptionsgrades

Dazu sind 3 Möglichkeiten entwickelt worden:

1- Die Verschiebung der Kennlinie nach oben (m_0 und m_1) (Bild 1-c)

2- Die Vergrößerung der Steigung m_1 der Schutzkennlinie, ohne Änderung von m_0 (Bild 1-c)

3- Die Sperrung des betroffenen Bereiches auf der Schutzkennlinie

Die Möglichkeiten 1 und 2 sind in [10] ausführlich diskutiert und die erforderlichen Gleichungen abgeleitet und untersucht worden. In diesem Beitrag wird die Idee der Methode 3 erklärt.

Sie beruht auf der Berechnung des ungünstigsten Falles nach der abgeschätzten Sättigungsanfangszeit. Dies ist der Fall einer vollkommenen Stromwandler-sättigung, d. h. der Strom fließt komplett als Magnetisierungsstrom. Dann besteht die Möglichkeit, ausgehend von den berechneten Fehlerstromparametern den Bereich der Schutzkennlinie vorherzusagen, auf dem die Funktion $I_{Sr} = f(I_D)$ verlaufen würde. Dieser Bereich hat folgende Koordinaten (Bild 3):

Punkt (1): (der kleinstmögliche Stabilisierungsstrom, die Schutzkennlinie)

Punkt (2): (der kleinstmögliche Stabilisierungsstrom, die maximal mögliche Stromdifferenz)

Punkt (3): (der maximal mögliche Stabilisierungsstrom, die maximal mögliche Stromdifferenz)

Punkt (4): (der maximal mögliche Stabilisierungsstrom, die Schutzkennlinie)

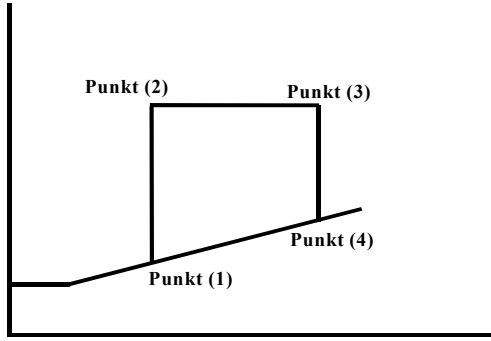


Bild 3: Die Grenzkoordinaten des zu sperrenden Bereichs auf der Auslösekennlinie des Schutzes

Die theoretischen Betrachtungen ergeben, dass im Fall einer Sättigung auf Grund des Gleichstromgliedes die negative Halbwelle und eine entsprechende Fläche der positiven Halbwelle im Sekundärstrom getreu abgebildet [11]. Der ungünstigste Fall ergibt sich, wenn auf der einen Seite des Differentialschutzsystems positive Stromhalbwelle vollständig verschwindet, während sie auf der anderen Seite richtig übertragen wird. Dann entsteht der größtmögliche Differenzstrom.

Die maximal erwartete Stromdifferenz ist die positive Halbwelle des Fehlerstromes (50-Hz-Komponente). Dies kann mit folgender Beziehung beschrieben werden:

$$I_{diff} = A \cos(2\pi ft) + B e^{-\alpha t} \quad (6)$$

mit der analytischen Formel des Fourier-Integrals

$$H(f) = \frac{1}{2T} \int_{t_1}^{t_2} h(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

kann man die Amplitude der 50-Hz-Komponente des Differenzstroms I_{diff} wie folgt schreiben

$$I_{diff} = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} \quad (8)$$

wobei:

$$Re = \left\{ B \left[\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2 + (2\pi f)^2} [\alpha \cos(2\pi ft) + (2\pi f) \sin(2\pi ft)] \right] \right\}_{t_1}^{t_2} + \left\{ A \left[\frac{t}{2} + \frac{\sin(4\pi ft)}{8\pi f} \right] \right\}_{t_1}^{t_2} \quad (9)$$

und

$$Im = \left\{ -B \left[\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2 + (2\pi f)^2} [\alpha \sin(2\pi ft) - (2\pi f) \cos(2\pi ft)] \right] \right\}_{t_1}^{t_2} + \left\{ A \left[\frac{\sin^2(2\pi ft)}{4\pi f} \right] \right\}_{t_1}^{t_2} \quad (10)$$

mit $f = 50 \text{ Hz}$ (die Grundschwingung)

Der minimal mögliche Stabilisierungsstrom ist dann:

$$I_{st} = \frac{(I_1 + I_2)}{2} = \frac{I_{f(50 \text{ Hz})} + I_{f(\text{negative Halbwelle})}}{2} \quad (11)$$

$$I_{f(\text{negative Halbwelle})} = I_{f(50 \text{ Hz})} - I_{diff} \quad (12)$$

während der maximal mögliche Stabilisierungsstrom der Stabilisierungsstrom bei Stromdifferenz = Null ist, das heißt:

$$I_{st} = \frac{(I_1 + I_2)}{2} = I_{f(50 \text{ Hz})} \quad (13)$$

2.2 Simulationsergebnisse

Anhand eines Stromwandler-Simulationsprogrammes, welches auf der numerischen Lösung der Wandler-Differentialgleichungen basiert, wurde die entwickelte Methode getestet. Als Beispiel wurde ein Stromwandler mit folgenden Nenndaten untersucht und simuliert: Typenreihe C-200, $V_{sat} = 200 \text{ V}$, $I_{n1}/I_{n2} = 800/5$. Die Berechnung der Gleichstromparameter mit dem auf Walsh-Filter beruhenden Algorithmus erfolgte mit sehr großer Genauigkeit, auch die Übereinstimmung zwischen den mit Gleichung (1) bzw. (2) abgeschätzten Sättigungsanfangs- und -endzeiten und der Simulierten war gut. Die präsentierte Methode der Sperrung des betroffenen Bereichs in der Schutzkennlinie lieferte zufriedenstellende Ergebnisse. Die Koordinaten I_d der Punkte 2 und 3 bzw. I_s der Punkte 3 und 4 wurden bei einigen Simulationen leicht unterschätzt, der maximale Fehler lag jedoch bei max. 10% von I_d und I_s , was mit Korrekturfaktoren ausgeglichen werden kann. Die Adaptierung des in Bild 1 präsentierten Falles ist in Bild 4 dargestellt. Für diesen Fall wurden die Gleichstromparameter $I'_{DC} = 10.030 \text{ A}$, $T_N = 0.284 \text{ s}$ berechnet. Die abgeschätzte Sättigungsanfangs- und -endzeiten lagen bei $t_{sa} = 0.0363 \text{ s}$, $t_{se} = 1.3712 \text{ s}$, die simulierte bei $t_s \cong 0.04 \text{ s}$, $t_{se} \cong 1.12 \text{ s}$.

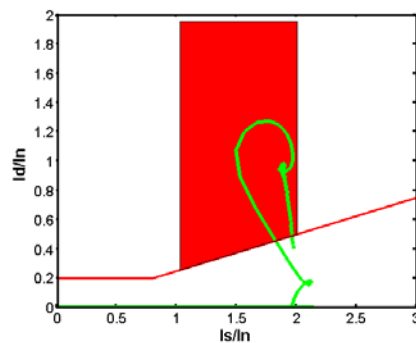


Bild 4: Der zu sperrende Bereich bei dem in Bild 1 dargestellten Fehlerfall

3 Adaptierung der Differenzschutzkennlinie bei Regeltransformatoren

3.1 Die mathematische Beschreibung der Problematik und Verbesserungsmöglichkeit

Beim Transformatorschutz wird intensiv an der Integration von Schutz- und Monitoringsystemen gearbeitet. Dies erfordert eine Verbesserung der Schutzempfindlichkeit, so dass nicht nur im Falle von "schweren" Fehlern mit großen Strömen eine Auslösung des Schutzes erfolgt, sondern auch in Fällen mit "stromschwachen" Fehlern eine Warnmeldung ausgegeben wird.

Eine der Fehlertoleranzzonen im Auslöse diagramm des Transformatorvergleichschutzes ist bei Regeltransformatoren die Zone, welche die verschiedenen Stufenschalterstellungen berücksichtigt. Die Regeltransformatoren sind bezüglich ihrer Funktion in Quer-, Längs- und Schräg regler unterteilt. Gemäß der Bauart können hauptsächlich zwei Ausführungen unterschieden werden:

1- Ausführung mit indirekter Spannungseinstellung: Bei dieser Bauart sind separate Zusatztransformatoren in Serie zum Haupttransformator angeordnet.

2- Ausführung mit direkter Spannungseinstellung: Hierbei sind die Regelwicklungen im Haupttransformator integriert.

Infolge der Vielfalt in der Bauart von Regeltransformatoren benötigt man eine detaillierte Analyse, welche die Transformatorbauart und die Regelfunktion berücksichtigt. Basierend auf dieser Analyse werden adaptive rechnerunterstützte Anpassungssätze der Meßgrößen zwischen Primär- und Sekundärseite in Abhängigkeit von der Stufenschalterstellung ermittelt. Dies führt zur Verkleinerung der Toleranzzone und einer Verbesserung der Empfindlichkeit des Transformatorvergleichschutzes.

3.2 Simulationsergebnisse

Als Beispiel wird hierder in [12] beschriebene Typ eines Regeltransformators, Ausführung mit indirekter Spannungseinstellung, verwendet. Dieser Typ besteht aus zwei Transformatoren, dem Haupttransformator und dem Zusatztransformator (Bild 5). In den meisten Fällen ist der Haupttransformator ein Spartransformator mit Tertiärwicklung. Durch die serielle Wicklung des Zusatztransformators und mit Hilfe des Stufenschalters kann man die Spannung in der Amplitude verändern. Die Primärwicklung des Zusatztransformators eines Stranges kann wahlweise allen drei Tertiärsträngen des Haupttransformators zugeordnet werden, sodass eine Schrägregelung realisiert werden kann.

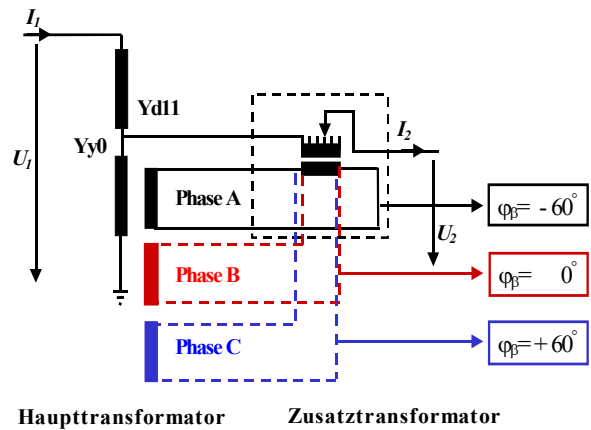


Bild 5: Einphasige Darstellung eines Transformatorsatzes mit indirekter Spannungseinstellung.

Für diesen Typ konnte ein Ersatzschaltbild entwickelt werden, welches aus dem Ersatzschaltbild des Spartransformators und einer gesteuerten Spannungsquelle mit einer Impedanz besteht, die den Zusatztransformator darstellt. Die weitere mathematische Bearbeitung führt zu einem einfachen dreiphasigen Transformator mit zwei Wicklungen für jede Phase. Für diesen Transformator ist das Übersetzungsverhältnis durch folgende Gleichung gegeben:

$$\underline{\ddot{U}} = \underline{\ddot{U}} \cdot e^{j\varphi} = \frac{\underline{\ddot{U}}_2}{1 + \underline{\beta}} \quad (14)$$

$$\underline{\beta} = \beta_0 \cdot e^{j\varphi_\beta} = \frac{N_3 N_5}{N_2 N_4} \cdot e^{j60^\circ} \cdot e^{j\varphi_\beta} \quad (15)$$

$$\underline{\ddot{U}}_2 = \underline{\ddot{U}}_2 \cdot e^{j0.30^\circ} \quad (16)$$

mit:

N_2 und N_3 : Windungszahl der Sekundär- und Tertiärwicklung des Haupttransformators

N_4 und N_5 : Windungszahlen der Primär- und Sekundärwicklung des Zusatztransformators

φ_β : Phasenwinkel, wird von den Schaltgruppen des Haupt- und Zusatztransformators bestimmt.

Anhand des in [13] für Regeltransformatoren entwickelten Modells wurde ein Transformatorsatz mit folgenden Nenndaten simuliert: Haupttransformator 220/66/66 MVA, 400/231/30 kV, Yy0d11, und Zusatztransformator 40 MVA, 30 KV/24 kV, Regelwicklung mit 15 Stufen.

In Bild 6 ist die Verminderung des Differenzstromes durch Anwendung der adaptiven Anpassung (Gleichung (14)) ersichtlich, was zu einer erheblichen Verbesserung der Sensitivität des Differenzschutzes am Transformator führt.

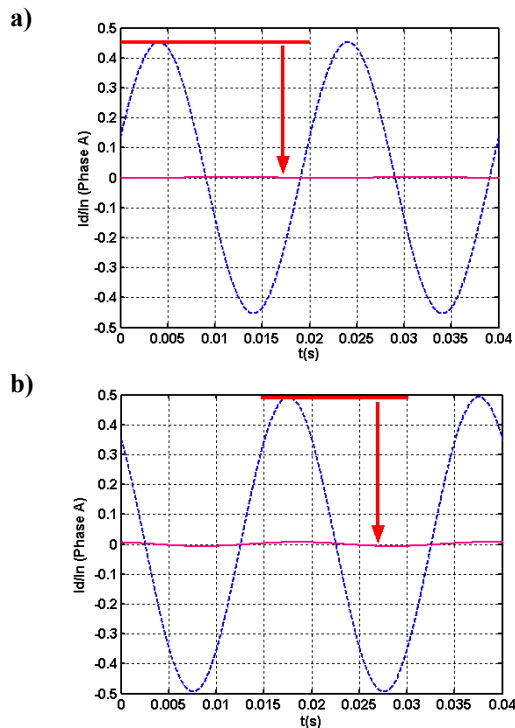


Bild 6: Verminderung des Differenzstromes am Differentialschutzgerät bei adaptiver Anpassung (..... Differenzstrom ohne adaptive Anpassung, _____ mit adaptive Anpassung)

a- bei Längsregelung, b- bei Schrägregelung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand von zwei Beispielen wurde gezeigt, wie vorteilhaft es ist, in Differentialschutzgeräten adaptive Algorithmen einzusetzen. Beim Einsatz als Generatordifferentialschutz kann man durch einen adaptiven Algorithmus im Falle von äußeren Fehlern bei Sättigungseintritt des Stromwandlers durch Fehlerströme mit Gleichstromglied großer Zeitkonstante falsche Auslösungen verhindern. Ebenso wurde in einem zweiten Beispiel gezeigt, dass man durch adaptive Anpassungsalgorithmen in Differentialschutzgeräten von Regeltransformatoren die Sensitivität des Schutzes erheblich verbessern kann. Dadurch können auch stromschwache Fehler erkannt werden. Mit der Verbesserung der Digitaltechnik in den letzten Jahren ist es nun möglich, auch kompliziertere Adaptionsalgorithmen zu realisieren. Adaptive Algorithmen und Messverfahren werden in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da sich das Schutzgerät mit deren Hilfe ohne komplizierte Parametrierung wesentlich besser an die Einsatzbedingungen selbst anpasst.

5 Literatur

- [1] J.S. Thorp; S.H. Horowitz; A.G. Phadke: The application of an adaptive technology to power system protection and control. CIGRE, 1988 Session, 34-03.
- [2] Sader, B; Läderach, S; Ungrad, H; Ilar, F; De mesmaecker, I: Adaptive protections based on interaction between protection and control. CIGRE, 1994 Session 34-205.
- [3] Wang, J; Gajic, Z; Holst, S: The multifunctional numerical transformer protection and control system with adaptive and flexible features. Developments in Power System Protection, IEE (2001), S. 165-168.
- [4] Gajic, Z; Zakonjsek, J: Capabilities of modern numerical differential protections. PSP (2002), Bled, Slovenia, S. 121-134.
- [5] Inan, A.; Lemmer, S.; Ziegler, G.: Stand und Trends bei der digitalen Schutztechnik. ETZ 112 (1991), S. 600-605.
- [6] Funk, H-W; Sterner, A; Ziegler, G: Digitaler Schutz mit Informationsübertragung, Stand und Entwicklungstrend. Elwtrizitätswirtschaft, Heft 14, 1993, S. 870-874.
- [7] Thorp, J. S.: Feasibility of adaptive protection and control. IEEE Transactionns on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993, S. 975-983.
- [8] Brahma, S. M.; Girgis, A. A: Development of Adaptive Protection Scheme fo Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation. IEEE Transactionns on Power Delevery, VOL. 19, NO. 1. January 2004, S. 56-63.
- [9] Jiang, J-A; Chen, C-S; Liu, C-W: A new Protection Scheme for Fault Detection, Direction Discrimination, Classification, and Location in Transmission Lines. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, S.34-42.
- [10] Rebizant, W; Hayder, T; Feser, K; Schiel, L.: Adaptive differential protection with regard to CT saturation during close generator faults, Paper accepted for the Power System Protection Conference PSP'04, Bled, Slovenia, September 2004.
- [11] Zahorka, Rudolf: Das Verhalten von Stromwandlern bei Einschwingvorgängen mit Gleichstromgliedern unter Berücksichtigung der Sättigung. AEG-Mitteilungen 57 (1967), S.19-27.
- [12] Dobsa, J; Transformatoren für Längs-, Schräg- und Querregelung. Brown Boveri Mitteilungen, No. 8,1972, S. 376-383.
- [13] Hayder, T; Schaerli, U; Feser, K; Schiel, L: New algorithms to improve the sensitivity of differential protection of regulating transformers. IEEE Bologna Powertech, (2003), Paper No. 295, Catalog Number 03EX719C.