Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 73 (1982)

Heft: 9

Artikel: FI-Schalter für Gleichfehlerströme

Autor: Tayefeh-Emamverdi, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904956

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

FI-Schalter für Gleichfehlerströme

M. Tayefeh-Emamverdi

621.316.9;

Durch den vermehrten Einsatz der Elektronik in Verbrauchern mit kleineren Leistungen können im Falle von Isolationsfehlern Gleichfehlerströme auftreten, welche die Funktion des FI-Schalters nachteilig beeinflussen. Obwohl bis heute kein Unfall bekanntgeworden ist, der auf Gleichfehlerströme in FI-Schaltern zurückzuführen wäre, muss dieses Problem für die Zukunft gelöst werden, um die Wirksamkeit dieser bewährten Schutzart gegen Stromunfälle weiterhin voll zu gewährleisten. In dieser Arbeit wird das methodische Vorgehen zur Lösung dieses Problems gezeigt. Dabei werden die Gründe verdeutlicht, aus denen es wenige praktisch realisierbare Lösungen zu diesem Problem gibt.

Du fait de l'emploi de plus en plus fréquent de l'électronique dans des appareils de faible puissance, il peut arriver que la composante continue des courants de défaut empêche le bon fonctionnement du disjoncteur de protection. Quoique, jusqu'ici, aucun accident pouvant être attribué à cette cause n'ait été signalé, il importe que ce problème soit résolu, afin de pouvoir garantir, à l'avenir également, la pleine efficacité de cet excellent mode de protection contre des accidents dus à l'électricité. On indique le procédé méthodique qui permet de résoudre ce problème et les raisons pour lesquelles il n'existe que peu de solutions pratiquement réalisables.

1. Einführung

FI-Schalter (Fehlerstromschutzschalter) haben zwei Aufgaben: einerseits den Schutz der Lebewesen gegen die Einwirkungen des elektrischen Stromes, anderseits den Brandschutz durch Verhinderung von Kriechströmen, die über längere Zeit 0,3 A überschreiten [1]. Sie werden in Wechsel- und Drehstromnetzen eingesetzt und sind zum Erfassen von (sinusförmigen) Wechselfehlerströmen konzipiert. In den Wechsel- und Drehstromnetzen treten aber heute durch den Einsatz von stromrichtergespeisten Antrieben und durch den verstärkten Einzug der Elektronik in Haushaltgeräten pulsierende *Gleichfehlerströme* auf, welche die Funktion des FI-Schalters nachteilig beeinflussen. Aus diesem Grund wird man an die zukünftigen FI-Schalter die Forderung stellen, auch beim Auftreten von Gleichfehlerströmen auslösen zu können.

2. Ursachen der Gleichfehlerströme

Während bisher die Gleichrichterschaltungen vorwiegend zur Umformung und Steuerung grosser Leistungen eingesetzt wurden, können sie heute infolge der neuentwickelten preiswerten Halbleiterbauelemente (Dioden, Thyristoren und Triacs) wirtschaftlicher als herkömmliche Mittel zur Regelung und Steuerung von Verbrauchern mit Leistungen unter 1,2 kW (Universalmotoren, Heizungsanlagen, Glühlampen) eingesetzt werden. In Tabelle I sind einige derartige Verbraucher zusammengestellt.

Übersicht einiger stromrichtergespeister Geräte im Bereich der kleinen Leistungen Tabelle I

Art der Last	Gerät	Stromrichterschaltung
Ohmsche Verbraucher	Dimmer	Triac (Anschnittsteuerung)
	Dämmerungsschaltung	Triac (Anschnittsteuerung)
	Kochplatte	Schwingungspaketsteuerung
	Regler für Durchlauferhitzer	Schwingungspaketsteuerung
	Fernsehgerät	Einwegschaltung
	Heimsonnen (Stellung Infrarot)	Einwegschaltung
	Geschaltete Netzgeräte	Zweiweg-Brückenschaltung mit Glättung
Induktive Verbraucher	Bohrmaschine (Universalmotoren)	Einwegschaltung
	Fluoreszenzröhren (mit induktivem Vorschaltgerät)	Triac
	Brummarmer Schütz	Einwegschaltung
	Geräte mit drehzahlgeregelten Asynchronmotoren	Zweiweg-Brückenschaltung mit Glättung

Werden stromrichtergespeiste Geräte in der Schutzklasse I ausgeführt und direkt vom Netz gespeist, dann verursachen sie im Falle von Isolationsfehlern pulsierende Gleichfehlerströme bzw. angeschnittene Wechselfehlerströme mit oder ohne Gleichstromanteil [2].

3. Form der Gleichfehlerströme

Der zeitliche Verlauf der Gleichfehlerströme hängt von der Form des im ungestörten Betrieb durch den Verbraucher fliessenden pulsierenden Stromes ab. Diese Form wird bestimmt durch die Art der Stromrichterschaltung, der Steuerung und der Last.

Figur 1 zeigt eine Systematik der Gleichrichterschaltungen, welche für die Zusammenstellung der verschiedenen Kurvenformen des Stromes zweckmässig ist. Die darin numerierten Schaltungen und ihre Stromkurvenformen sind in Figur 2 dargestellt (siehe dazu auch [3]). Aus dieser Figur ist ersichtlich:

– Bei Einwegschaltungen mit Glättungskondensator fliesst im Fehlerfall ein Gleichfehlerstrom, dessen Betrag dauernd grösser als null ist.

– Für die ungesteuerten Zweiweg-Brückenschaltungen mit oder ohne Glättungskondensator besteht kein Unterschied zur Einwegschaltung hinsichtlich der Form des Fehlerstromes. Der Grund liegt darin, dass sich bei ihnen die gleichgerichtete negative Halbwelle des Laststromes wegen des Fehlens einer Potentialdifferenz nicht ausbilden kann.

– Der gleiche Sachverhalt liegt für die symmetrisch und unsymmetrisch halbgesteuerten Zweiweg-Brückenschaltungen vor. In Figur 2 ist nur die unsymmetrische Schaltung dargestellt. Die angegebenen Stromformen gelten auch für die symmetrische Schaltung.

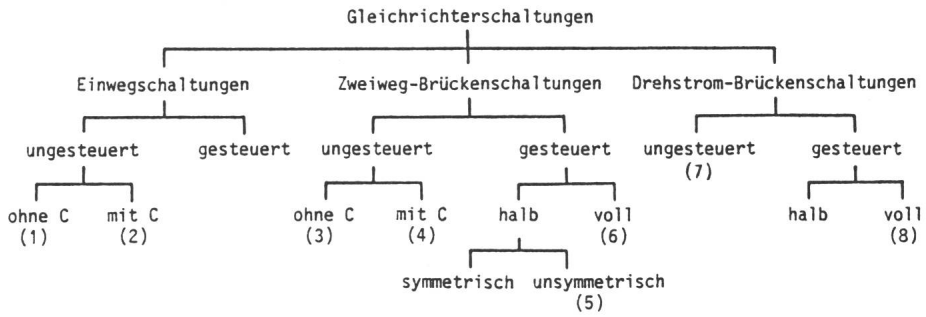
– Bei Drehstrom-Brückenschaltungen liegt der schlimmste Fall in bezug auf die Form des Fehlerstromes im Falle der ungesteuerten Brücke vor, da hier im Fehlerfall je nach Glättungsverhältnissen ein mehr oder weniger reiner Gleichstrom fliesst.

– Bei vollgesteuerten Drehstrom-Brückenschaltungen ist die Form des Last- und Fehlerstromes abhängig vom Steuerwinkel α (Steuerbereich 120°). Für $\alpha < 60°$ liegt ein ähnliches Verhalten wie für die ungesteuerte Drehstrombrücke vor, und für $\alpha > 60°$ erhält man pulsierende Gleichströme, deren Betrag zeitweise null ist.

In Figur 2 ist die halbgesteuerte Drehstrombrücke nicht dargestellt. Ihr grundsätzliches Verhalten bezüglich der Form des Fehlerstromes entspricht dem der vollgesteuerten Brücke; ihr Steuerbereich beträgt 180°.

Die in Figur 2 dargestellten Stromformen ergeben sich unter der Voraussetzung einer ohmschen Last und entsprechen bis auf Motoranwendungen den praktischen Verhältnissen der durch die FI-Schalter geschützten Objekte.

Fig. 1
Systematik der Gleichrichterschaltungen zwecks Zusammenstellung der Kurvenform der Gleichfehlerströme
C Glättungskondensator



4. Wirkungen der Gleichfehlerströme auf den FI-Schalter

Der FI-Schalter (Fig. 3) besitzt einen Summenstromwandler, der die Summe aller zu- und abfliessenden Ströme des zu schützenden Verbrauchers überwacht. Die Funktion dieses Wandlers beruht auf dem Zusammenspiel einiger physikalischer Gesetze. Aufgrund des allgemeinen Kirchhoffschen Gesetzes ist die algebraische Summe aller Ströme in einem Knoten:

$$\sum_{k} I_k = 0 \tag{1}$$

Somit ist die Durchflutung des Ringkerns (Fig. 3) unter der Voraussetzung, dass alle durch ihn hindurchgehenden Stromlinien die gleiche Neigung zur vom Kern umfassten Fläche besitzen, entsprechend dem Durchflutungsgesetz:

$$\oint_{s} \vec{H} d\vec{s} = \theta = \sum_{k} I_k = 0 \tag{2}$$

Beim Auftreten eines Isolationsfehlers fliesst ein Teil des Netzstromes – der Fehlerstrom i_F – über die Erde zurück zur Quelle. Das entsprechend dieser Abweichung im Ringkern entstehende magnetische Feld Φ_1 erzeugt nach dem Induktionsgesetz in der Sekundärwicklung des Summenstromwandlers mit N_2 Windungen eine Spannung:

$$u_2 = N_2 \, d\Phi_1/dt \tag{3}$$

Die induzierte Spannung wird ausgenützt, um den Auslöser, dessen Funktion in [4] erläutert wurde, zu betätigen. Dieser gibt das Schaltschloss frei, welches einen Freilauf besitzt und die Kontakte auch dann ausschaltet, wenn der Schalthebel in der Einschaltstellung festgehalten wird.

Aus der eben beschriebenen Wirkungsweise folgt, dass der FI-Schalter dann auslöst, wenn ein zeitlich veränderliches Magnetfeld Φ_1 im Kern des Summenstromwandlers auftritt und wenn die induzierte Spannung einen festgelegten Mindestwert erreicht. Diese Bedingungen treten bei sinusförmigen Wechselfehlerströmen auf, wenn der Summenstromwandler und der Auslöser für eine bestimmte Fehlerstromstärke (10, 30 bzw. 300 mA) dimensioniert sind. Treten aber pulsierende

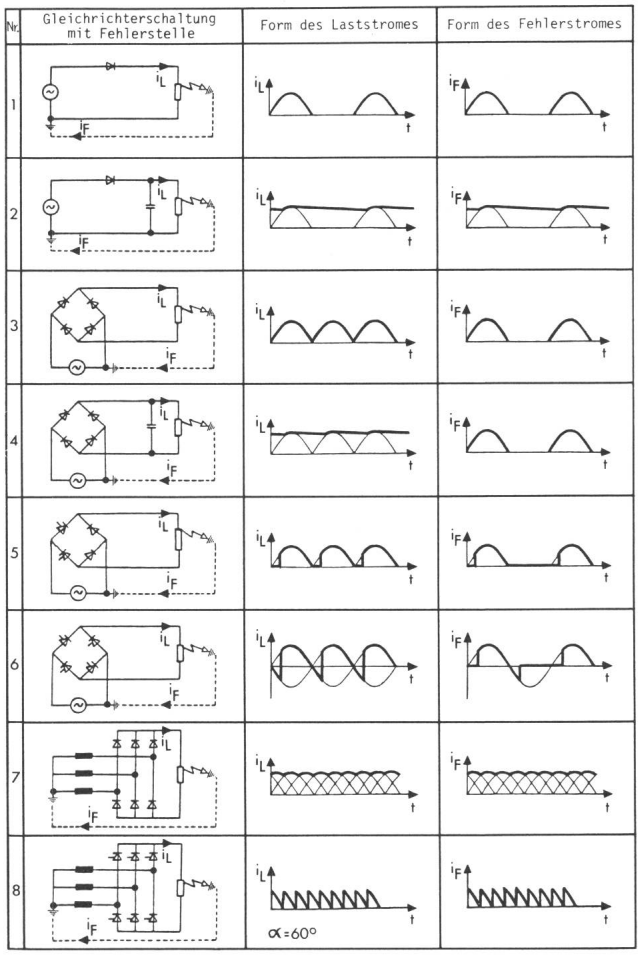


Fig. 2 Form des Last- und des Fehlerstromes bei einigen Gleichrichterschaltungen (siehe auch [3])
Die Nummern entsprechen denjenigen der Fig. 1

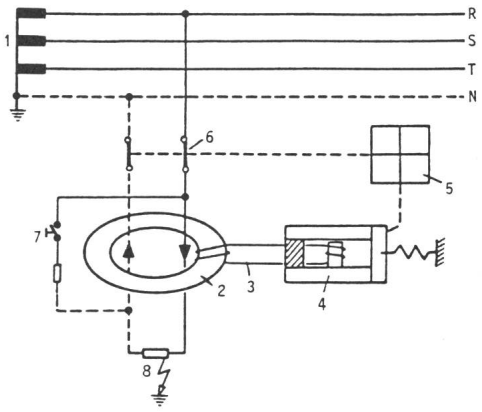


Fig. 3 Prinzip des herkömmlichen FI-Schalters
1 Transformator mit geerdetem Nulleiter
2 Summenstromwandler
3 Sekundärwicklung
4 Auslöser
5 Schaltschloss (Freilauf)
6 Schaltkontakte
7 Prüftaste
8 Verbraucher mit Fehlerstelle

Gleichfehlerströme auf, so beeinträchtigen sie die Magnetisierung des Summenstromwandlers [5, 6]. Dieser Wandler besitzt zur Erfassung sinusförmiger Fehlerströme eine steile Magnetisierungskennlinie, womit bei geringen Fehlerströmen hohe Feldänderungen $\Delta\Phi_1$ bewirkt werden (Fig. 4). Geht man von der Annahme aus, dass sich der Kern zu Beginn des Fehlers im Remanenzpunkt befindet, dann kann bei sinusförmigen Fehlerströmen die volle Hysteresisschleife durchlaufen werden, so dass ein genügend grosser $\Delta\Phi_1$-Wert entsteht [7]. Dieselbe Magnetisierungskennlinie kann sich aber für einen pulsierenden Gleichfehlerstrom als ungenügend erweisen, da wegen zu hoher Remanenz ein $\Delta\Phi_1'$-Wert entsteht, welcher nicht die notwendige Spannung induzieren kann. Aber nicht nur bei Gleichfehlerströmen, sondern auch bei phasenangeschnittenen Wechselfehlerströmen, wie sie bei Triac-Schaltungen auftreten (Fig. 5), kann die Auslösung ausbleiben, wenn die entstehende Feldänderung nicht ausreicht, um eine genügend grosse Spannung zur Betätigung des Auslösers zu induzieren.

5. Derzeitige Perspektiven zur Lösung des Problems

In den letzten Jahren hat es Bestrebungen gegeben, das Problem des Gleichfehlerstromes in den Vorschriften zu berücksichtigen. Aus [8] geht hervor, dass man durch neue Vorschriften die FI-Schalter nach der zu erfassenden Stromart klassiert. Beispielsweise unterscheidet man bei den angegebenen Formen des Fehlerstromes (Fig. 2) drei Typen:

- pulsierende Gleichfehlerströme mit Nulldurchgängen (Typ C),
- pulsierende Gleichfehlerströme, die zeitweise den Wert null aufweisen (Typ B),
- pulsierende Gleichfehlerströme, deren Wert dauernd grösser als null ist (Typ A),

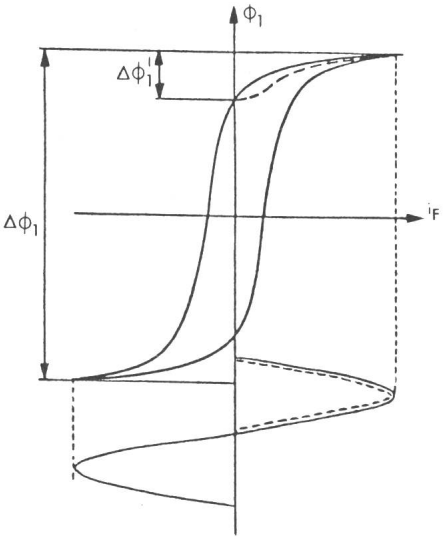


Fig. 4 Magnetisierung des Summenstromwandlers
Voll: Wechselfehlerstrom
Gestrichelt: Gleichfehlerstrom

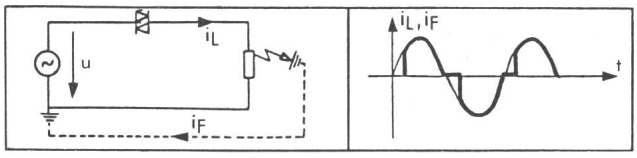


Fig. 5 Triacschaltung mit zeitlichem Verlauf des Laststromes und des Fehlerstromes

und definiert FI-Schalter, die für gewisse Stromformen sicher auslösen. Als endgültige Lösung wird eine Verbesserung des herkömmlichen FI-Schalters angestrebt, derart dass die neuen FI-Schalter Gleichfehlerströme nach Typ B und C erfassen und dass alle Verbrauchsgeräte, die Gleichfehlerströme nach Typ A erzeugen, verboten werden.

Analysiert man die angestrebte endgültige Lösung, so scheinen vor allem folgende Gründe sehr dafür zu sprechen:

- Es ist bisher bei den 40...50 · 10^6 in den CENELEC-Ländern (etwa 300000 davon in der Schweiz) installierten FI-Schaltern kein Unfall bekannt, der auf einen Gleichfehlerstrom zurückzuführen wäre.
- Das Konstruktionsprinzip des bekannten FI-Schalters ist physikalisch sehr elegant, sehr sicher bei Netzausfall, da keine elektrische Hilfsenergie verwendet wird, und es ist in der Praxis bestens bewährt.
- Es ist aus wirtschaftlichen Gründen zu berücksichtigen, dass die notwendigen Änderungen allmählich und nicht sprunghaft stattfinden, da die Unfallwahrscheinlichkeit ohnehin noch sehr gering ist.

Im Gegensatz zu den analysierten positiven Punkten ist der Gedanke des Verbietens pulsierender Gleichströme, welche dauernd einen Wert grösser als null aufweisen, unglücklich formuliert worden. Wer die heutige Entwicklung der Elektronik verfolgt, kann sich schwer vorstellen, dass sie durch Verbote in irgendeinem Sektor behindert wird. Vielmehr sollte man erwarten, dass es durchaus möglich wäre, in Zukunft in den Haushaltgeräten reine Gleichströme zu haben. Deshalb ist es sinnvoll, das Problem aus heute möglicher Sicht in seiner Ganzheit zu betrachten.

Im folgenden wird versucht, das Problem durch methodisches Vorgehen in Angriff zu nehmen, um die Konstruktionsprinzipien des FI-Schalters zusammenzustellen. Aufgrund dieser Zusammenstellung kann dann diskutiert werden, welche Entwicklungsrichtungen offen sind, bzw. kann gezeigt werden, warum es schwierig ist, für dieses Problem optimale Lösungen zu finden.

6. Methodische Konzeptentwicklung für FI-Schalter

Zu diesem Zweck wird die in [9] dargestellte Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen herangezogen, wobei aufgrund des Raummangels nur vier der dort angegebenen Schritte für die FI-Schalter dargestellt werden. Die Aufgabe wird ohne Spezifizierung der Form des Fehlerstromes formuliert:

Es sind Lösungsprinzipien für FI-Schalter zusammenzustellen, die zur Erfassung von Wechselfehlerströmen, von pulsierenden bzw. reinen Gleichströmen geeignet sind oder aber von der Kurvenform des Fehlerstromes unabhängig sind.

6.1 Analyse und Abstraktion der Aufgabe

6.1.1 Analyse der Schwachstelle

Um zu zeigen, wie sich die Art der Problemformulierung auf die Lösungssuche auswirkt, sei zuerst die bezüglich der Stromform entscheidende Schwachstelle des FI-Schalters analysiert. Diese Schwachstelle ist, wie erwähnt, das transformatorische Induktionsprinzip für den Summenstromwandler. Daher wird im folgenden vorerst die induzierte Spannung nach Gleichung (3) für den Fall eines einweggleichgerichteten Fehlerstromes (Fig. 6) berechnet und diskutiert. Der Figur 6 entspricht das Ersatzschaltbild von Figur 7, für welches folgende Differentialgleichungen im Durchlassbereich des Gleichrichters gelten:

$$R_1\, i_F + L_1\, di_F/dt = \hat{u}_1 \sin\omega t \tag{4}$$

$$M\, di_F/dt = u_2 \tag{5}$$

Den qualitativen Verlauf des Fehlerstromes, der sich aus Gleichung (4) ergibt, zeigt Figur 8. Die durch diesen Strom induzierte Spannung beträgt nach (4) und (5)

$$u_2 = M \frac{\hat{u}_1/R_1}{1 + \left(\frac{\omega L_1}{R_1}\right)^2} \cdot \omega \left(- e^{-(R_1/L_1)t} + \frac{\omega L_1}{R_1} \sin\omega t + \cos\omega t \right) \tag{6}$$

und ist abhängig von der Gegeninduktivität M sowie einem Ausdruck, der die Daten des Stromkreises beinhaltet. Mit steigendem Verhältnis $\omega L_1/R_1$ nimmt die Amplitude von i_F bei gleichzeitigem Verlängern der Stromflussdauer ab. Die Gegeninduktivität M für einen Ring ist bestimmt durch:

$$M = k\, N_1\, N_2\, \mu\, A/l \tag{7}$$

Aus dieser Beziehung folgt:

– Durch Vergrössern des Kopplungsfaktors k (d.h. eine geringere Streuung) kann die induzierte Spannung erhöht werden. Diese Massnahme hat bei herkömmlichen FI-Schaltern bereits ihre Grenzen, da es schwierig ist, die Sekundärwicklung am gesamten Umfang zu verteilen.

– Die Vergrösserung der Windungszahl N_2 der Sekundärwicklung bringt eine Verbesserung. Diese Massnahme wird bei heutigen FI-Schaltern durch die Leistungsanpassung des Wandlers an den Magnetauslöser berücksichtigt.

– Durch Vergrössern der Windungszahl N_1 der Primärwicklung kann wenig erreicht werden, da einerseits die mittlere Länge l des Kernes und anderseits die Abmessungen des Schalters erhöht werden

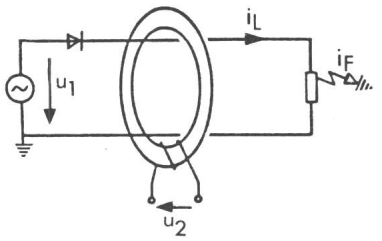


Fig. 6 FI-Schalter mit einweggleichgerichtetem Fehlerstrom

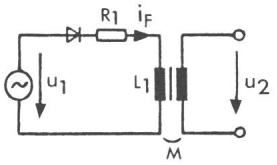


Fig. 7 Ersatzschaltbild des FI-Schalters mit einweggleichgerichtetem Fehlerstrom

R_1 beinhaltet Lastwiderstand, Leitungswiderstand, Gleichrichterwiderstand sowie den Innenwiderstand der Quelle

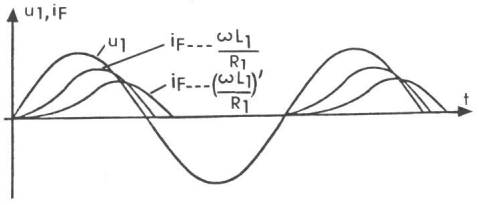


Fig. 8 Verlauf des Fehlerstromes unter Einfluss der Induktivität des Stromkreises

$(\omega L_1/R_1)' > \omega L_1/R_1$

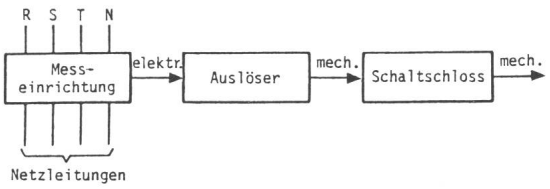


Fig. 9 Teilsysteme des herkömmlichen FI-Schalters

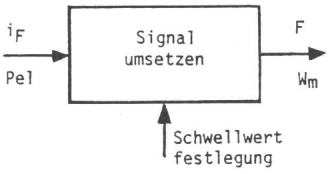


Fig. 10 1. Problemformulierung durch Abstraktion

i_F Fehlerstrom als Eingangssignalträger
P_{el} Elektrische Leistung des Fehlerstromes
F Kraft als Ausgangssignalträger
W_m Mechanische Energie zum Betätigen des Schaltschlosses

müssten. Zudem ist darauf zu achten, dass durch eine Vergrösserung von N_1 das Verhältnis $\omega L_1/R_1$ ungünstig steigt.

– Eine Vergrösserung des Ringquerschnittes A kommt aus ähnlichen Gründen nicht in Frage.

– Durch geeignete Wahl des Werkstoffes (μ) kann eine Vergrösserung der induzierten Spannung erreicht werden. Die Kennlinie des Werkstoffes muss im Gegensatz zu Figur 4 eine geringere Remanenz aufweisen, um eine höhere Feldänderung zu bewirken. Ausserdem darf die neue Kennlinie den Ansprechwert für Wechselfehlerströme und das Verhältnis $\omega L_1/R_1$ nicht unzulässig erhöhen.

Aus diesen Feststellungen folgt, dass bei einer engen Problemformulierung, nämlich das Konstruktionsprinzip des FI-Schalters sowenig wie möglich zu ändern, die Lösungsmöglichkeiten sehr beschränkt sind. Deshalb soll im folgenden eine abstrakte Formulierung der Aufgabe durchgeführt werden.

6.2.2 Abstrakte Formulierung der Gesamtfunktion

Zum Zweck dieser Formulierung seien in Figur 9 die Teilsysteme des FI-Schalters nach Figur 3 betrachtet. Darin ist der Summenstromwandler als Messeinrichtung bezeichnet, wie in der Literatur üblich. Da hinsichtlich der Form des Fehlerstromes das Schaltschloss keine Rolle spielt, wird es durch die Wahl der Systemgrenze nicht weiter betrachtet (d.h., das mechanische Kontaktsystem wird als gegeben vorausgesetzt). Für das zu betrachtende System ergibt die Analyse:

– Die Eingangsgrösse ist der Fehlerstrom.

– Die Ausgangsgrösse ist die vom Schaltschloss geforderte mechanische Energie.

– Der Summenstromwandler wird als Diskriminator dem Auslöser, einer an sich messenden Einrichtung [4], vorgeschaltet, da die zu überwachende Grösse, der Fehlerstrom, nicht direkt für den Auslöser verfügbar ist.

Die entsprechende Problemformulierung lautet dann: *Es ist eine Einrichtung zu konzipieren, welche als Bestandteil eines FI-Schalters Fehlerströme diskriminiert und beim Überschreiten eines bestimmten Wertes dieser Ströme ein Signal ausreichender Leistung an das Schaltschloss abgibt* (Fig. 10).

Fragt man sich danach, ob diese Problemformulierung sinnvoll erweitert werden kann, so stellt sich die Frage nach der Ursache der Entstehung des Fehlerstromes. Diese entsteht offensichtlich deshalb, weil an einer Stelle der überwachten Einrichtung der Leitwert gegenüber der Erde erhöht wird.

Daraus folgt:

Die eigentliche zu überwachende Grösse ist nicht der Fehlerstrom, sondern der Leitwert bzw. der Isolationswiderstand der Fehlerstelle gegenüber Erde. Aus dieser Feststellung folgt, dass die zu überwachende Grösse passiv ist und daher ohne Hilfsenergie dem Auslöser keinen Signalträger zur Verfügung stellen kann. Da aber in jedem elektrischen Kreis mit geerdeter Spannungsquelle die nicht geerdeten Leitungen gegenüber der Erde die volle Spannung aufweisen, stellt das Netz die notwendige Hilfsspannung selbst zur Verfügung. Das sollte allerdings nicht dazu führen, die Möglichkeit auszuschliessen, dass diese Spannung auch von einer Hilfsquelle zur Verfügung gestellt werden kann. Die auf diese Weise erweiterte Problemformulierung lautet: *Als Bestandteil eines Schutzschalters ist eine Einrichtung zu konzipieren, welche den Isolationswiderstand des zu schützenden Objektes gegenüber der Erde überwacht und beim Unterschreiten eines bestimmten Wertes ein Signal ausreichender Leistung an das Schaltschloss abgibt* (Fig. 11).

6.2 Erkennen der minimal notwendigen Teilfunktionen

Ausgangspunkt ist die abstrakte Formulierung der Gesamtfunktion (Fig. 11). Der Hauptfluss erstreckt sich zwischen dem Messobjekt und dem Schaltschloss. Die unmittelbar in ihm erkennbare Teilfunktion ist «entscheiden». Da wegen der unbekannten Fehlerstelle das Messobjekt und das Entscheidungselement an verschiedenen Orten liegen, ist eine Teilfunktion «Signal leiten» zwischen ihnen einzufügen. Ausser diesen Primärfunktionen gibt es Sekundärfunktionen, die in den Nebenflüssen liegen. Alle diese Teilfunktionen lassen bereits eine Funktionsstruktur sichtbar werden, die in Figur 12 dargestellt ist.

6.3 Aufsuchen von Lösungsprinzipien

Um die Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen übersichtlich zusammenzustellen, ist es sinnvoll, von vornherein zu

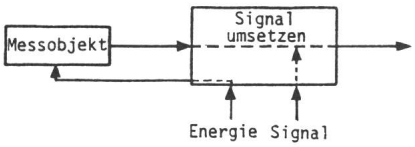


Fig. 11 2. Problemformulierung durch Abstraktion

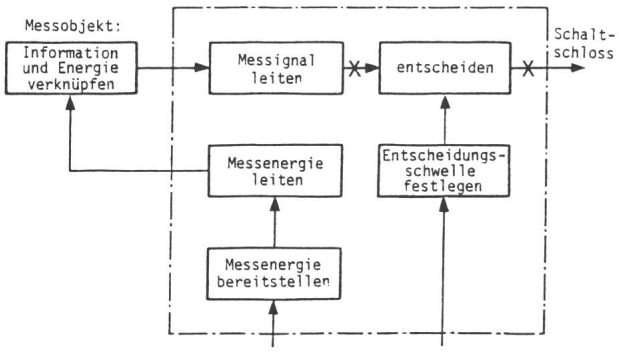


Fig. 12 Funktionsstruktur der minimal notwendigen Teilfunktionen des zu konzipierenden Systems
× Mögliche Stellen der Teilfunktion «Signalleistung vergrössern» [9]

Oberbegriff	Teilbegriffe 1. Ebene	Teilbegriffe 2. Ebene
elektrische Hilfsenergie bereitstellen	Stromart	Gleichstrom
		Wechselstrom
	Art des Anschlusses der Quelle	Im Zuge der Leiter
		zwischen Leitern und Erde

Fig. 13 Möglichkeiten der Bereitstellung der Messenergie

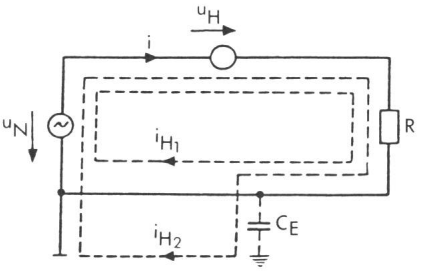


Fig. 14 Probleme des Prinzips Hilfsspannungsquelle im Zuge der Leiter
u_N Netzspannung i_{H1}, i_{H2} Indikatorteilströme
u_H Hilfsspannung C_E Erdkapazitäten

unterscheiden, ob man zum Erzeugen des Signalträgers eine Hilfsspannungsquelle heranziehen oder wie im herkömmlichen FI-Schalter die Netzspannung verwenden will. Im ersten Fall wird der Fehlerwiderstand bzw. ein Indikatorstrom und im zweiten Fall der Fehlerstrom der Signalträger sein.

6.3.1 Fehlerwiderstand als Signalträger

Innerhalb des Schutzschalters wird eine Spannungsquelle vorgesehen, die einen Strom über den Isolationswiderstand des Verbrauchers fliessen lässt, wenn eine Verbindung zur Erde auftritt. Welche Lösungsprinzipien gibt es in diesem Fall für die Teilfunktionen der Figur 12?

Mit den Teilfunktionen «Meßsignal leiten» und «Messenergie leiten» muss man sich nicht befassen. Der Signalträger (Indikatorstrom) kann nur über Netzleitungen und Erde (bzw. Schutzleiter) geleitet werden. Alternativen gibt es keine. Die Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen «entscheiden» und «Entscheidungsschwelle festlegen» sind in [4] behandelt worden.

Somit bleibt die Teilfunktion «Messenergie bereitstellen» zur weiteren Untersuchung übrig. Dabei handelt es sich konkret um das Bereitstellen elektrischer Hilfsenergie zwecks Überwachung eines Isolationsfehlers. Der Oberbegriff und die Teilbegriffe der Lösungssuche sind in Figur 13 angegeben. Der Gruppe mit Gleichstrom sind Akkumulatoren und Kondensatoren, der Gruppe mit Wechselstrom elektrische Oszillatoren zuzuordnen. Entsprechend den Kombinationsmöglichkeiten der Teilbegriffe der 2. Ebene sind vier Gruppen Lösungsprinzipien denkbar. Dabei tritt aber eine Reihe von Problemen auf, die im folgenden angedeutet werden:

a) Quelle im Zuge der Leiter:

– Der Indikatorstrom fliesst auch im fehlerfreien Betrieb (Fig. 14).

– Ist der Indikatorstrom hochfrequent, führen die Kapazitäten gegenüber Erde zu Problemen (Fig. 14).
– Im Fehlerfall fliesst ausser dem Indikatorstrom auch der Fehlerstrom.

Aufgrund dieser Probleme werden zusätzliche Teilfunktionen notwendig, beispielsweise:

– Indikatorstrom im fehlerfreien Betrieb sperren.
– Betriebsstrom über die Indikatorstromsperre leiten.
– Meßsignal für das Entscheidungselement diskriminieren.

Das Prinzip eines Konzeptes, das diese Probleme lösen könnte, wird unter 6.1 gezeigt.

b) Quelle zwischen Leitern und Erde:

Diese Probleme deutet Figur 15 an. Bisher konnte für dieses Prinzip keine auch nur theoretisch befriedigende Lösung gefunden werden. Man kann aber versuchen, dieses Prinzip in Netzen ohne geerdeten Sternpunkt einzusetzen, um auch dort bei Isolationsfehlern abzuschalten.

6.3.2 Fehlerstrom als Signalträger

In diesem Fall muss man sich entsprechend der Problemformulierung aus Figur 10 mit den in Figur 16 dargestellten Teilfunktionen befassen, so dass im folgenden nur mehr die Lösungsprinzipien der Teilfunktion «Meßsignal diskriminieren» zusammenzustellen sind:

Da zwischen dem Fehlerstrom und den Netzströmen keine Merkmalunterschiede existieren, kann diese Teilfunktion nur dadurch erfüllt werden, dass die Fehlerströme ständig zu null ergänzt werden. Hiezu erweist sich als einzige physikalische Möglichkeit das Kirchhoffsche Gesetz. Somit kann der Oberbegriff der Lösungssuche mit «Summieren der Ströme» festgesetzt werden. Die Teilbegriffe zeigt Figur 17:

a) Diese Möglichkeit erfordert eine Knotenpunktbildung. Da dies an einer beliebigen Stelle des Netzes nicht möglich ist, scheidet sie aus.

b_1) Abbilden ohne Wandlung der Energieart bedeutet hier, die Ströme in linear proportionale Spannungen zu wandeln und die letzteren zu summieren. Diese Lösung ist theoretisch dann erlaubt, wenn in den FI-Schaltern die Forderung nach galvanischer Trennung des Auslöserkreises vom Netz fallengelassen wird. Die praktische Realisation dieser Lösung stösst auf Probleme (siehe 6.4.2).

b_2) Abbilden mit Wandeln der Energieart bedeutet die Ströme in linear proportionale physikalische Grössen nichtelektrischer Art zu wandeln und die letzteren zu summieren. Tabellen zu Energieartwandlungen des Signalträgers sind in [9] zu finden. Wegen der Bedingung der Linearität (Erhalten des Vorzeichens der Ströme) stehen nur wenige Effekte zur Verfügung (siehe 6.4.2).

c) Man lässt die Summanden gleichzeitig auf eine Hilfsgrösse wirken. Die Änderung der Hilfsgrösse entspricht der Summe der Teilwirkungen (Fig. 18). Diese Möglichkeit ist heute aus Empfindlichkeitsgründen nicht realisierbar, da Fehlerströme der Grössenordnung 10...300 mA gegenüber Leitungsströmen von 40...100 A zu detektieren sind.

6.4 Bilden der Lösungskonzepte

6.4.1 Lösungskonzepte für Fehlerwiderstand als Signalträger

Hier wird anhand der Figur 19 ein Lösungskonzept erläutert, das das Prinzip einer Hilfsspannungsquelle im Zuge der Leitungen (6.3.1) verwendet. Die Spannungsquelle befindet sich

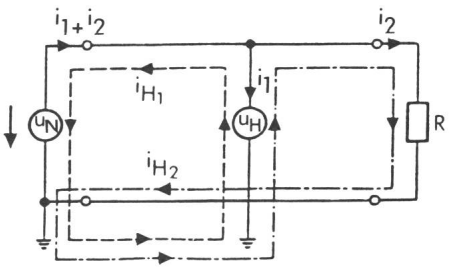


Fig. 15 Probleme des Prinzips Hilfsspannungsquelle zwischen den Leitern und der Erde
i_1, i_2 Netzteilströme
i_{H1}, i_{H2} Indikatorteilströme

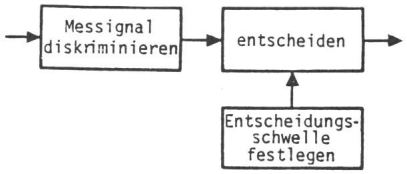


Fig. 16 Funktionsstruktur für Fehlerstrom als Signalträger

Oberbegriff	Teilbegriffe		
	1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene
Summieren der Ströme	a) direkte Summenbildung b) Bilden der Summe der Abbildungen c) Steuerung einer Hilfsgrösse	b_1) Abbilden ohne Wandlung der Energieart b_2) Abbilden mit Wandlung der Energieart	direkte Wandlung Steuerungseffekte

Fig. 17 Möglichkeiten des Summierens

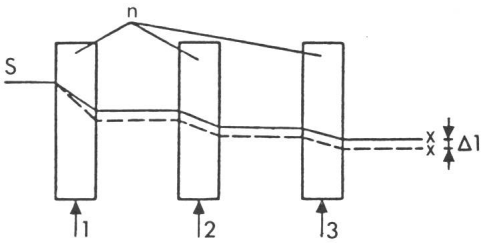


Fig. 18 Zur Erläuterung des Summierens mittels der Steuerung einer Hilfsgrösse
n Brechungsindex der Prismen
S Strahl
1, 2, 3 Summanden
——— Verlauf bei Summe null
– – – Verlauf bei Summe ≠ null

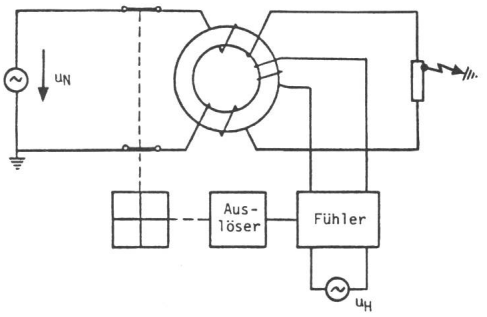


Fig. 19 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Prinzip des Fehlerwiderstandes)

auf der Sekundärseite eines Wandlers, dessen Primärwicklungen die Netzleitungen sind. Im Falle eines Fehlers wird durch Absinken des Isolationswiderstandes der Fehlerstelle gegenüber der Erde ein zusätzlicher Widerstand wirksam, der auf die Sekundärseite des Wandlers transformiert wird. Diese Änderung wird von einem Auslöser (bzw. je nach Prinzip vorerst von einem Fühler) erfasst, der beim Unterschreiten eines bestimmten Wertes des Fehlerwiderstandes das Schaltschloss freigibt. Bedenkt man, dass durch schaltungstechnische Massnahmen auf der Sekundärseite des Wandlers vermieden werden soll, dass kapazitive Ableitströme zum Auslösen führen, dann ist ersichtlich, dass derartige Konzepte zurzeit einen höheren Aufwand erfordern als die üblichen FI-Schalter.

6.4.2 Lösungskonzepte für Fehlerstrom als Signalträger

Diese Lösungskonzepte können je nach Funktionsstruktur des Auslösers [4] mit stetiger oder unstetiger Verstärkung funktionieren. In Figur 20 und 21 sind Ausschnitte aus je einer Kombinationsmatrix dargestellt.

a) Lösungskonzepte aus Kombinationsmatrix der Figur 20

Es werden drei Konzepte erläutert, um die Probleme aufzuzeigen:

– Figur 22 zeigt das Konzept 1.3 + 2.4. Die Funktionsweise beruht auf Summation direkt vom Netz abgegriffener Spannungen, welche potentialfrei verstärkt einem Differenzverstärker zugeführt werden. Die Ausgangsspannung dieses Verstärkers dient als Eingangssignal des Auslösers, welcher selbst ein unstetiger Verstärker ist [4]. Das Hauptproblem der Realisation dieses Konzeptes liegt darin, dass die Eigenerwärmung des Schalters sehr gering sein muss. Lässt man z. B. 10 W zu, dann werden in einem Zweileitersystem bei einem Betriebsstrom von 100 A zwei Widerstände von je 0,5 mΩ benötigt. Daraus folgt, dass der Verstärker die Differenz von 50 mV

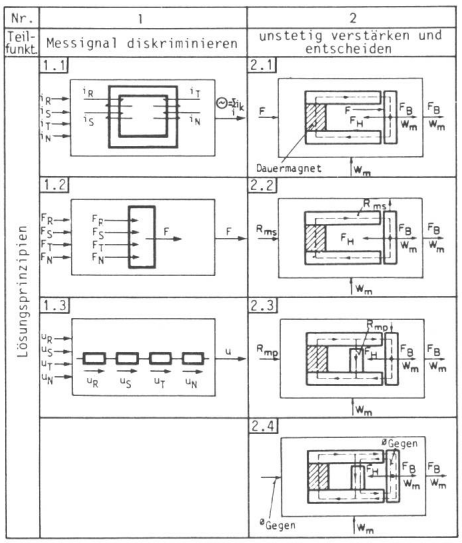


Fig. 20 Ausschnitt aus Kombinationsmatrix für FI-Schalter mit unstetiger Verstärkung

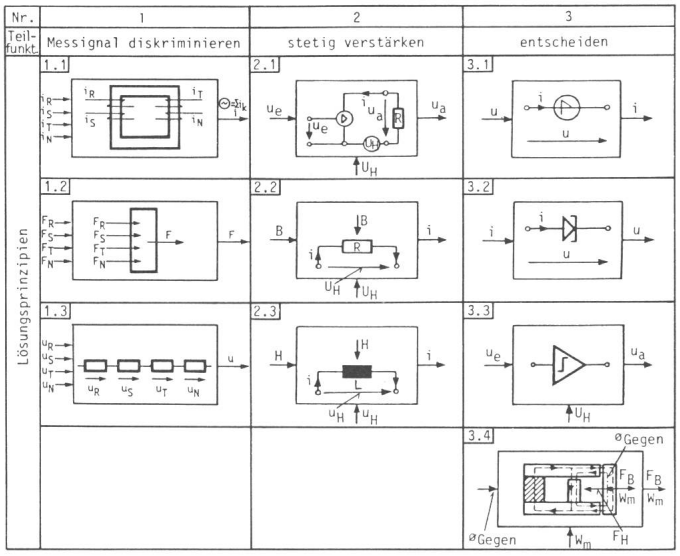


Fig. 21 Ausschnitt aus Kombinationsmatrix für FI-Schalter mit stetiger Verstärkung

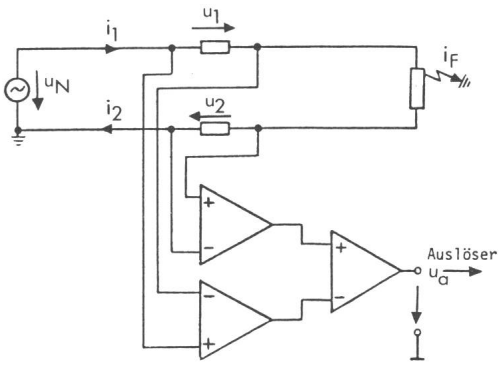


Fig. 22 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Prinzip des Summierens abgegriffener Spannungen an Widerständen)
u_a Ausgangsspannung der Summierschaltung
Auslöser nicht dargestellt (siehe [4])

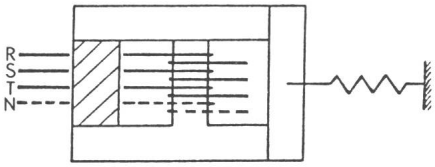


Fig. 23 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Prinzip des Zusammenfassens von Wandler und Auslöser)
Funktion des Auslösers siehe [4]

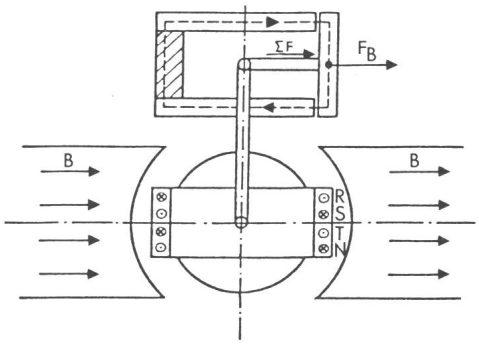


Fig. 24 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Prinzip des Summierens der Kräfte)
F_B Betätigungskraft des Auslösers
B Induktion (magnetische Hilfsenergie)

gegenüber einer Spannung, die um 5 µV kleiner ist, zu bilden hat (Empfindlichkeit 10 mA). Solche Verstärker sind heute nicht erhältlich. Die Dimension der Widerstände wäre kein Problem (z.B. Konstantan ⌀ 6 mm, $l = 30$ mm). Das Gehäuse des Schalters müsste eine Kühlung zulassen. Problematisch könnte auch die Frage des Abgriffs der zu summierenden Spannungen werden.

– Figur 23 zeigt das Konzept 1.1 + 2.4. Der magnetische Kreis des Summierers und des Auslösers sind zusammengefasst. Dieses theoretisch sehr einfache Konzept kann praktisch sehr schwer realisiert werden. Das Hauptproblem liegt in der Gestalt des magnetischen Kreises des Summierers. Die gleichmässige Aufteilung der Primärwicklungen, die beim ringförmigen Kern nahezu erreicht werden kann, ist hier nicht möglich. Anderseits sind Luftspalte vorhanden. Beide Sachverhalte bringen Probleme der Streuungen, so dass derartige Lösungsprinzipien zurzeit nicht realisierbar sind.

– Figur 24 zeigt das Konzept 1.2 + 2.1. Die Funktionsweise beruht auf Summation der Kräfte. Notwendig ist ein magnetisches Feld als Hilfsenergie. Auch dieses Konzept ist wegen Problemen der Streuung und der geringen zu erzeugenden Kraft heute nicht realisierbar.

b) Lösungskonzepte aus Kombinationsmatrix der Figur 21

Im folgenden seien zwei derartige Konzepte erläutert:

– Figur 25 zeigt das Konzept 1.1. + 2.2 + 3.1. In diesem Konzept ist die Sekundärseite des Summenstromwandlers durch einen Hallgenerator bzw. ein magnetisch steuerbares Element ersetzt worden. Das Problem der Realisation ist auch hier die Gestaltung des magnetischen Kreises.

– Figur 26 zeigt das Konzept 1.1 + 2.3 + 3.1. Die Funktion beruht auf dem Prinzip des Transduktors, d.h. der Steuerung der Permeabilität des magnetischen Kreises des Summierers. Um vom Sekundärkreis in den Primärkreis induzierte Spannungen zu vermeiden, werden entweder zwei Kerne verwendet, deren Sekundärwicklungen entgegengesetzt gewickelt sind, oder es wird ein Dreistegkern eingesetzt. Die Auslösung erfolgt durch Sättigung der Kerne infolge des Fehlerstromes [4].

7. Schlussfolgerungen

Die Fehlerstromschutzschaltung ist eine der wirksamsten Schutzarten gegen Unfälle durch den Strom. Um diese Wirksamkeit weiterhin in der Zukunft voll gewährleisten zu können, werden FI-Schalter auch bei Gleichfehlerströmen auslösen müssen.

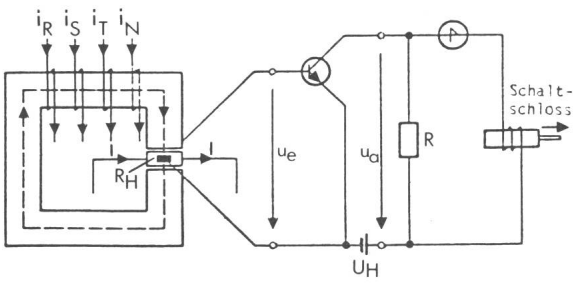


Fig. 25 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Prinzip des Hall-Effektes)
R_H Hallsonde

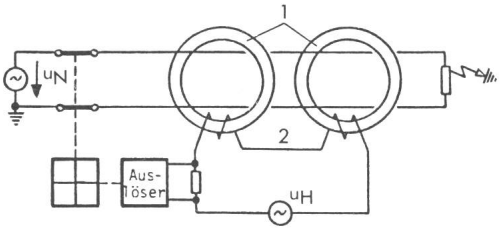


Fig. 26 FI-Schalterkonzept für Gleichfehlerströme (Transduktorprinzip)
1 Ringkerne
2 Entgegengesetzt gewickelte Sekundärwicklungen

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zeigt die Untersuchung die möglichen Entwicklungseinrichtungen der FI-Schalter für Gleichfehlerströme (Fig. 27). Es zeigt sich, dass es bei der Erfassung von Fehlerströmen sehr schwierig ist, von den Lösungen, die das magnetische Feld benützen, wegzukommen. Dementsprechend sind viele der beschriebenen Lösungskonzepte in der Patentliteratur vorhanden.

Um bei reinen Gleichfehlerströmen auslösen zu können, muss – soweit es der heutige Stand des Wissens zulässt – eine Hilfsspannungsquelle auf der Sekundärseite des Wandlers verwendet werden. Dies scheint einer der hauptsächlichen Gründe zu sein, dass mehr Tendenzen in Richtung von Lösungen bestehen, welche nur gewisse Gleichfehlerstromtypen zu erfassen haben. Man will versuchen, die Netzunabhängigkeit des FI-Schalters beizubehalten, um auch bei Netzausfall den vollen Schutz zu bieten. Obwohl dieses Anliegen berechtigt ist, könnten sich derartige Lösungen in Zukunft infolge neuer elektronischer Haushaltgeräte als halbe Lösungen erweisen. Es wäre sinnvoller, nach Massnahmen zu suchen, welche bei Netzausfall die einwandfreie Funktion der FI-Schalter, die eine Hilfs-

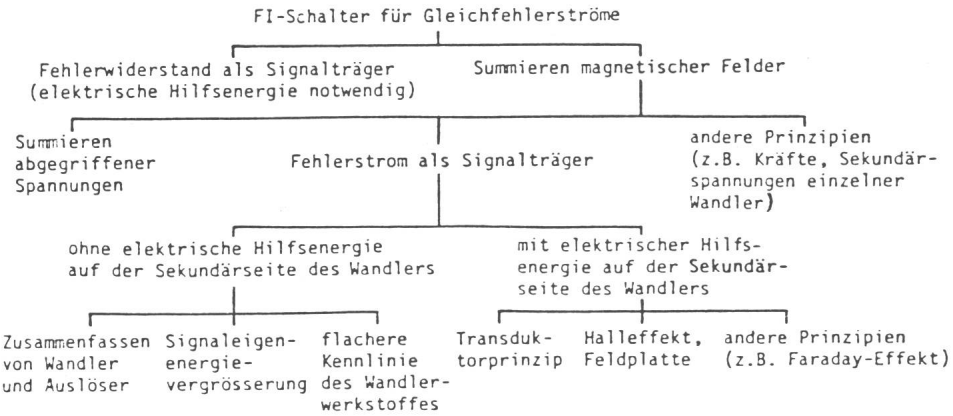


Fig. 27
Mögliche Entwicklungsrichtungen der FI-Schalter für Gleichfehlerströme

spannungsquelle verwenden, garantieren. Diese können beispielsweise darin bestehen, eine wiederaufladbare Batterie für den Fall des Netzausfalls vorzusehen oder den Auslöser so zu konstruieren, dass der zugehörige Schalter bei Netzausfall ausgeschaltet und bei Rückkehr des Netzes automatisch wieder eingeschaltet wird.

Selbstverständlich sind diese Massnahmen aus heutiger Sicht mit einem Mehraufwand und unter Umständen mit der Vergrösserung des Schalters verbunden.

Adresse des Autors

Dr. M. Tayefeh-Emamverdi, Elektrotechnische Entwickungen und Konstruktionen, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Literatur

[1] *H. Egger:* Die Fehlerstromschutzschaltung. Praktische Erfahrungen und Konsequenzen. Bull. SEV/VSE 65(1974)24, S. 1737...1744.

[2] *P. Riller:* Elektronik in Haushaltgeräten. ETZ-B 23(1971)20, S. 492...496.

[3] *L. Schreyer:* FI-Schutzschalter für Wechsel- und pulsierende Gleichfehlerströme. Siemens-Elektrodienst 23(1981)1, S. 22...23.

[4] *M. Tayefeh-Emamverdi:* Methodische Konzeptentwicklung in der Elektrotechnik. Teil 2: Konzipieren am Beispiel der Auslöser elektrischer Schaltgeräte. Bull. SEV/VSE 72(1981)17, S. 969...978.

[5] *R. Eltschka* und *H. Hofschneider:* Zum Betriebsverhalten eines Fehlerstrom-Schutzschalters in Drehstromkreisen unter Berücksichtigung einer Gleichstromvormagnetisierung. ÖZE 29(1976)9, S. 360...368.

[6] *H. Zürneck:* Wirkungen von Fehler-Gleichströmen auf FI-Schutzschalter. ETZ-B 28(1976)6/7, S. 170...172.

[7] Fehlerstromschutzschalter. Siemens-AG Berlin-West/München, BRD. Oe. Patent Nr. 315949 vom 8. 9. 1971; CH-Patent Nr. 538773 vom 13. 8. 1971.

[8] *H. Thielen* und *U. Valentin:* Beeinflussung der Fehlerstrom-Schutzschalter durch Fehlergleichströme. ETZ 100(1979)15, S. 834...836.

[9] *M. Tayefeh-Emamverdi:* Methodische Konzeptentwicklung in der Elektrotechnik. Teil 1: Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen. Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 703...711.

TECHNOLOGIE DE POINTE

10÷150kV

Câbles à haute tension
Hochspannungskabel EPR

COSSONAY

SOCIETE ANONYME DES
CABLERIES & TREFILERIES
DE COSSONAY

SOCIETE ANONYME DES

CABLERIES & TREFILERIES DE COSSONAY

CH – 1305 COSSONAY-GARE TÉL. 021/87 17 21 TÉLEX 24 199