MEISTERWISSEN

Stromverdrängung in massiven Leitern

Wenn leistungselektronische Einrichtungen höherfrequente Oberschwingungen in 50-Hz-Wechselstromnetzen verursachen, tritt auch in Leitungen der Energieversorgung Stromverdrängung auf. Nachfolgend werden die Ursache des Skineffektes, sich ergebende Wirkungen und daraus resultierende praktische Maßnahmen in vereinfachter Form erläutert.

Problemstellung

Wird ein massiver elektrischer Leiter von einem Gleichstrom durchflossen, so teilt sich der Strom gleichmäßig über den gesamten Leiterquerschnitt auf. Das ist gleichbedeutend mit einer über den Leiterquerschnitt konstanten Stromdichte

$$G = I/A \qquad (1).$$

Je nach spezifischem elektrischen Widerstand des verwendeten Leitermaterials ergibt sich ein Leitungswiderstand

$$R = \rho\, l/A \qquad (2).$$

Dieser Leitungswiderstand hat bei Stromfluss gemäß

$$P_V = R \cdot I^2 \qquad (3)$$

eine Verlustleistung (Leitungsverluste) zur Folge. Da diese vom Leiterquerschnitt und dem konkreten Stromfluss abhängige Erwärmung je nach

- Verlegeart der elektrischen Leitung,
- Anzahl der in einem Kabel vorhandenen belasteten Adern,
- verwendetem Isolationsmaterial usw.

in bestimmten Grenzen gehalten werden muss, resultieren daraus die bekannten Angaben zur zulässigen Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen, Leitungsseilen, Sammelschienen u. ä.

Diese Zusammenhänge gelten weitestgehend auch für niederfrequente Wechselströme, wie z. B. 50-Hz-Wechselströme, die in Anlagen der Energieversorgung dominieren. Aber bereits bei hohen Strömen und demzufolge großen Leiterquerschnitten wird infolge des Skineffektes der Querschnitt eines massiven elektrischen Leiters nicht mehr exakt gleichmäßig vom Strom durchsetzt. Diese Wirkungen treten bei 50-Hz-Wechselströmen insbesondere dann spürbar auf, wenn zunehmend eingesetzte leistungselektronische Einrichtungen höherfrequente Oberschwingungen verursachen.

Skineffekt

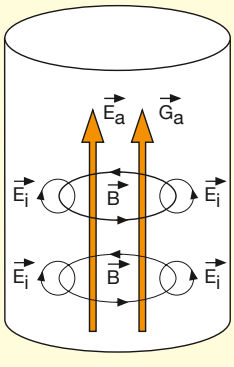
Ursache des Skineffektes sind Wechselwirkungen zwischen elektrischen und magnetischen Wechselfeldern im Innern von massiven Leitern. In einem Leiterteilstück nach Bild ❶ bewirkt eine äußere Wechselspannung $u_a(t)$ eine elektrische Feldstärke $\vec{E}_a$, die einen Stromfluss hervorruft. Teilt man den Leiterquerschnitt gedanklich in eine Vielzahl von „Stromröhren“ auf, so erzeugt der Stromfluss in jeder dieser Stromröhren eine Stromdichte $\vec{G}_a$. Jede der Stromröhren ist von einem Magnetfeld umhüllt (magnetische Feldstärke und Flussdichte). Daraus resultiert das in Bild ❶ angedeutete magnetische Wechselfeld $\vec{B}$, das die Induktion einer inneren elektrischen Feldstärke $\vec{E}_i$ hervorruft. Diese innere elektrische Feldstärke treibt Wirbelströme an. Diese führen zu zusätzlichen Verlusten.

Die innere elektrische Feldstärke ist der durch die äußere Spannung hervorgerufenen äußeren elektrischen Feldstärke zum Leiterinneren hin stets entgegengerichtet. Das führt zu einer Abschwächung der resultierenden Feldstärke. Infolge gleichgerichteter Feldgrößen zum Leiteräußeren hin kommt es dort zu einer Erhöhung der resultierenden Feldstärke. Daraus folgt, dass letztlich die Amplituden aller im Inneren eines massiven Leiters wirksamen Feldgrößen (elektrische Feldstärke und Stromdichte, magnetische Feldstärke und Flussdichte), ausgehend von Maximalwerten an der Leiteroberfläche, zum Leiterinneren hin sinken. Für den Strom durch den massiven Leiter bedeutet das, dass ein Verdrängen in Richtung Leiteroberfläche erfolgt (Effekt der Stromverdrängung).

Für das Absinken der Amplituden der Feldgrößen zum Leiterinneren hin kann mit guter Näherung ein exponentieller Verlauf entsprechend $\exp(-x/\Delta)$ angenommen werden. Dabei ist x der Abstand von der Leiteroberfläche, Δ wird als Eindringtiefe bezeichnet. Bei $x = \Delta$ sind die Amplituden der Feldgrößen bereits auf das 1/e-fache, d. h. auf etwa ein Drittel abgefallen. Bei $x = 3\,\Delta$ sind sie praktisch nicht mehr vorhanden. Die Dichte des Leistungsumsatzes, der gemäß $\exp(-2x/\Delta)$ sinkt, fällt zum Leiterinneren hin noch rascher ab.

Die Erscheinungen des Skineffektes treten mit wachsender Frequenz der Wechselgrößen verstärkt auf. Daraus folgt, dass die Eindringtiefe eines Wechselstromes in einen massiven Leiter mit wachsender Frequenz immer weiter sinkt. Wenn aber im Leiterinneren letztendlich kein Strom mehr fließt, entsteht dort auch kein Magnetfeld, d. h., der Effekt der Stromverdrängung ist stets mit einer Verdrängung auch der magnetischen Feldgrößen verbunden (Effekt der Flussverdrängung). Daraus resultieren sowohl eine Erhöhung des elektrischen als auch des magnetischen Widerstandes der Leiteranordnung. Die Erhöhung des wirksamen elektrischen Widerstandes ergibt sich näherungsweise aus einer quasi reduzierten vom Strom durchsetzten Fläche, Gl. (2). Diese Widerstandserhöhung geht einher mit erhöhten Verlusten, Gl. (3). Solche zusätzlichen Verluste, hervorgerufen durch den Skineffekt (Strom- und Flussverdrängung) werden auch als Skinverluste bezeichnet. Die Erhöhung des magnetischen Widerstandes hat eine vergleichsweise geringfügig reduzierte Induktivität der Leiteranordnung zur Folge und kann für praktische Überlegungen meist vernachlässigt werden.

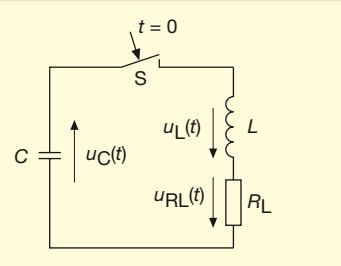
Die beschriebenen Effekte sind auch für benachbarte Leiter, z. B. bei einer Spulenanordnung, von Bedeutung, da das Magnetfeld einer Windung zugleich die Leiter der Nachbarwindungen mit durchflutet. Auch daraus resultiert eine Stromverdrängung und damit eine Erhöhung der Verluste. Dieser als Nähewirkung bezeichnete Effekt ist insbesondere für moderne DC/DC-Wandler, die mit sehr hohen Schaltfrequenzen und damit räumlich sehr kleinen induktiven Bauteilen arbeiten, von zunehmender Bedeutung.



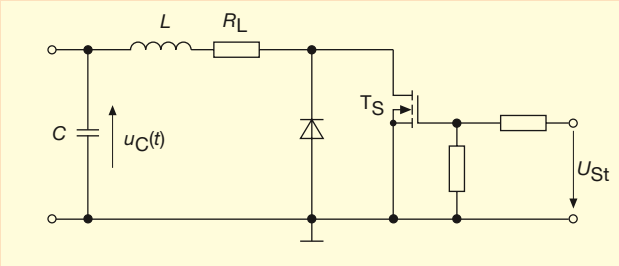
❶ **Verkettung von magnetischen und elektrischen Wechselfeldern im Innern eines massiven Leiters**

Praktische Maßnahmen

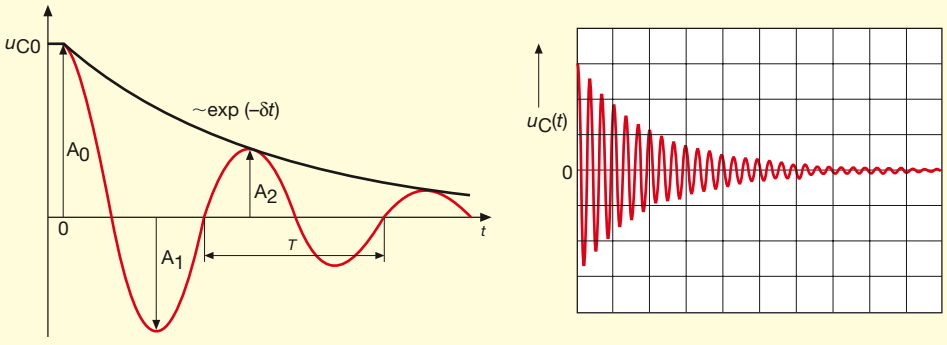
Den Erscheinungen des Skineffektes, insbesondere der hauptsächlichen Wirkung als Stromverdrängung in massiven elektrischen Leitern, wird in technischen Anordnungen in vielfältiger Hinsicht Rechnung getragen. So sind z. B. in Verbindung mit hochfrequenten Wechselströmen sowohl oberflächenveredelte (versilberte) als auch aufgelitzte Leiter Gegenmaßnahmen. Aus der klassischen Rundfunktechnik sind versilberte massive Kupferdrähte bekannt, oberflächenveredelte Bauteile treten in modernen Stromrichtern mit „verschienter Verdrahtung“ auf. Im Bereich der Energieversorgung sind aufgelitzte Leiter keine Seltenheit mehr. Bei extrem hohen Strömen können auch Stromschienen in Röhrenform als Alternative in Betracht kommen.



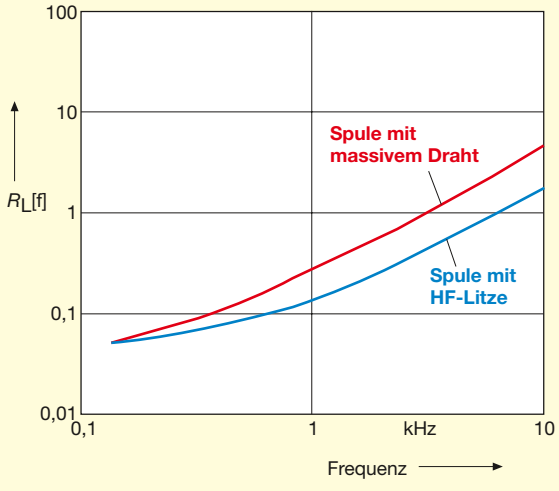
❷ **Prinzip der Versuchanordnung**



❸ **Modifizierte Schaltung mit Power-MOSFET**



❹ **Spannung am Schwingkondensator**
a) prinzipieller Verlauf
b) oszillografisches Bild



❺ **Typische Widerstandsänderung als Funktion der Frequenz**

Neben den schon erwähnten DC/DC-Wandlern sind Netzwerke zur Schaltentlastung elektronischer Leistungsschalter, die mit hohen Pulsfrequenzen betrieben werden, (vor allem MOSFET, aber auch IGBT), bei denen der Skineffekt bei der Bemessung eine mitentscheidende Bedeutung erlangt, zu beachten.

In immer größerem Umfang wird auch der Service-Bereich betroffen. So ist es beispielsweise nicht mehr zeitgemäß, einen defekten elektronischen Leistungsschalter einfach durch einen anderen zu ersetzen, ohne evtl. notwendige Konsequenzen bei der Schaltentlastung zu prüfen. Auch sollten Änderungen der Leitungsführung oder gar der Ersatz aufgelitzter Leitungen durch massive stets kritisch hinterfragt werden.

In diesem Zusammenhang spielen auch Fragen der elektromagnetischen Verträglichkeit eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Nachweis des Skineffektes

Für den Nachweis des Skineffektes in massiven Leitern wird eine Methode ohne ausführliche theoretische Begründungen vorgestellt, die sich besonders für experimentelle Demonstrationen eignet.

Untersuchungsgegenstand sind zwei im Auftreten des Skineffektes zu vergleichende Luftspulen gleicher Geometrie und gleicher Windungszahl mit etwa gleichem Leiterquerschnitt und annähernd gleicher Induktivität ($L_{01} \approx L_{02}$; $R_{L01} \approx R_{L02}$), jedoch unterschiedlicher Aderzahl (massiver Leiter bei Spule 1, Auflitzung von Spule 2). Um die Frequenzabhängigkeiten der wirksamen ohmschen Spulenwiderstände und der Induktivitäten ermitteln zu können, sind Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen notwendig. Da Induktivitäten der Energietechnik üblicherweise sehr geringe Spulenwiderstände aufweisen, ist es vorteilhaft, ihre Wirkung auf die Dämpfung eines Schwingkreises zu untersuchen.

Die prinzipielle Struktur der Versuchsschaltung zeigt Bild ❷. Durch Variation der Kapazität des Kondensators kann die Eigenfrequenz der Anordnung verändert werden. Vor jedem Messvorgang wird der Kondensator auf die Spannung U_{C0} aufgeladen. Danach wird der Schalter, unter der Voraussetzung einer vorher stromlosen Induktivität, geschlossen. Die im Kondensator gespeicherte Energie

$$W_{C0} = 1/2\ C \cdot U_{C0}^2 \qquad (4)$$

bewirkt einen Spannungssprung an der Induktivität auf U_{C0} und danach den Start einer gedämpften Schwingung. Zu deren Auswertung ist eine möglichst genaue Kenntnis der Kapazität des Kondensators notwendig. Verlustwiderstand und Induktivität des Kondensators (parasitäre Größen) sind bei Nutzung von z. B. MKV-Kondensatoren vernachlässigbar. Wird als Schalter ein prellfrei schaltender Power-MOSFET mit einem EIN-Widerstand R_{DSon} von wenigen mΩ und einer parasitären Antiparalleldiode eingesetzt (Bild ❸), wird die Dämpfung der Schwingung praktisch nur noch vom wirksamen ohmschen Widerstand der untersuchten Spule bestimmt.

Eine oszillografische Darstellung der mit dem Einschalten des MOSFET einsetzenden gedämpften Schwingung $u_C(t)$ entspricht den auf Bild ❹ gezeigten Verläufen. Aus den Größen

C Kapazität des Kondensators
T Periodendauer der gedämpften Schwingung
A auftretende Amplitudenwerte gleichen Vorzeichens

können gemäß

$$R_L(f) = \frac{2T}{C} \ln\frac{A_n}{A_{n+2}} \frac{1}{4\pi^2 + \left(\ln\frac{A_n}{A_{n+2}}\right)^2} \qquad (5)$$

$$L(f) = \frac{T^2}{C} \frac{1}{4\pi^2 + \left(\ln\frac{A_n}{A_{n+2}}\right)^2} \qquad (6)$$

die interessierenden Frequenzabhängigkeiten ermittelt werden. Die Anteile des Skineffektes lassen sich folgendermaßen errechnen.

$$R_{LSkin}(f) = R_L(f) - R_{L0} \qquad (7)$$

$$L_{Skin}(f) = L(f) - L_0 \qquad (8)$$

Für die praktische Durchführung der Messungen ist die Nutzung der Amplitudenwerte $A_0 = U_{C0}$ und A_2 sinnvoll. A_0 kann sehr genau vor dem Schließen des Schalters bestimmt werden. Negative Amplitudenwerte sollten aufgrund des schwieriger zu kalkulierenden Einflusses der dann stromführenden Antiparalleldiode des MOSFET nicht genutzt werden.

Im Bild ❺ sind nach dem beschriebenen Verfahren ermittelte Änderungen des wirksamen Spulenwiderstandes zweier Vergleichsspulen in Abhängigkeit von der Frequenz aufgezeichnet. Die Wirkungen des Skineffektes bei Spule 1 tritt mit massivem Draht vergleichsweise früher, d. h. bei niedrigeren Frequenzen, und verstärkt auf. Die Kurve für Spule 2 zeigt, dass der Skineffekt mit wachsender Aderzahl später einsetzt.

G. Graichen