

Energieeffiziente Leistungsversorgung induktiver Härte- und Erwärmungsprozesse

von **Edmund Zok, Dirk M. Schibisch**

Die induktive Erwärmung ist ein etabliertes, hoch energieeffizientes industrielles Verfahren. Zu den traditionellen Einsatzgebieten gehören unter anderem induktives Härten, Schmiedeerwärmen, Rohrschweißen und -glühen sowie Erwärmen und Vergüten von Bandstahl. Es kommen immer noch neue Applikationen hinzu, da angesichts der Verknappung fossiler Brennstoffe mehr und mehr Erwärmungsprozesse von Öl oder Gas auf Elektrowärme umgestellt werden. Das muss nicht immer zum Ersatz konventioneller Öfen führen, sondern kann auch das intelligente Nebeneinander von Verbrennungsöfen und Induktionstechnik bedeuten.

Energy efficient power supplies for induction hardening and heating processes

Induction heating is an established and energy-efficient industrial process. Traditional applications include induction hardening, forge heating, tube welding and annealing as well as the heating and annealing of strip steel. More and more new applications are being added since, in view of the lack of fossil fuels, electrical heat is being used more and more instead of heating processes using oil and gas. That does not always have to mean the replacement of conventional ovens, rather the intelligent combination of combustion and induction technologies.

Bei der induktiven Erwärmung wird die Energie vom Induktor in das zu erwärmende Gut (Werkstück) elektromagnetisch übertragen. Der Induktor wird im einfachsten Fall als zylindrische Spule ausgeführt, anwendungsabhängig kann er jedoch sehr unterschiedliche Formen haben. Wird der Induktor an eine Wechselstromquelle angeschlossen, entsteht in seiner Umgebung ein elektromagnetisches Wechselfeld. Dieses Feld induziert im elektrisch leitenden Material eine Wechselspannung, deren Folge sogenannte Wirbelströme im oberflächennahen Bereich des Werkstücks sind. Auf Grund des elektrischen Widerstandes des Materials entsteht im Werkstück Wärme. Durch Wärmeleitung homogenisiert sich im Laufe der Zeit die Temperatur des Werkstücks von außen nach innen.

Die Leistungsversorgung für die induktive Erwärmung muss diverse Anforderungen der Prozesse erfüllen. Betrachtet man die typischen Anwendungen nur unter dem Aspekt der benötigten Leistungen und Frequenzen, fällt auf, dass sich sowohl der Leistungs- als auch der Frequenzbereich über 3 bis 4 Größenordnungen erstrecken. Im **Bild 1** sind einige weit verbreitete Anwendungen der induktiven Elektrowärme im Frequenz-Leistungs-Diagramm eingetragen. Der umrandete Bereich zeigt die Schwerpunkte der Applikationen. Es gibt noch zahlreiche Anwendungen, die außerhalb dieses markierten Bereiches liegen.

Es liegt nahe, dass für die Vielfalt der Applikationen mehrere, unterschiedliche Energieversorgungen erforderlich sind. Der Unterschied liegt nicht nur in den elektrischen Daten der Geräte, sondern vor allem in den gewählten Schaltungstopologien.

Dennoch lassen sich gemeinsame Merkmale bei fast allen eingesetzten Energieversorgungen erkennen, die in

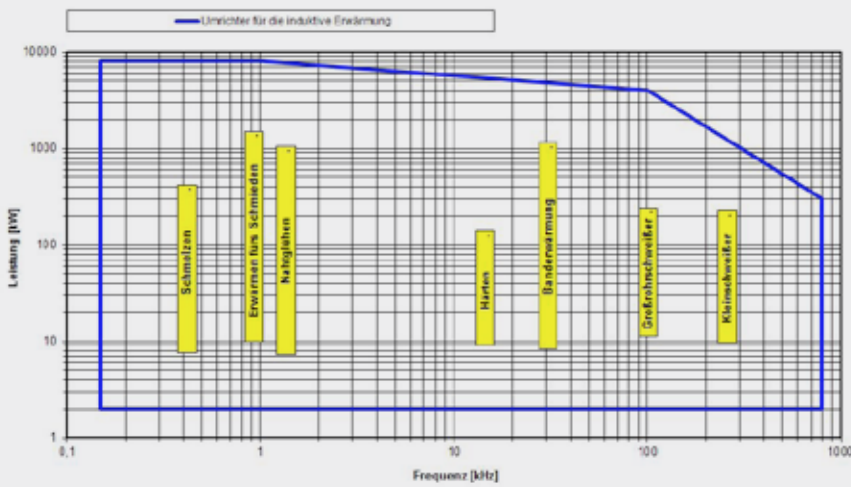


Bild 1: Leistungs- und Frequenzspektrum der Energieversorgung für induktive Erwärmungsprozesse

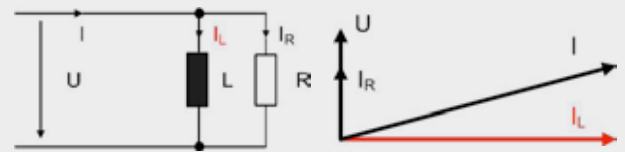


Bild 2: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Induktor-Werkstück-Anordnung

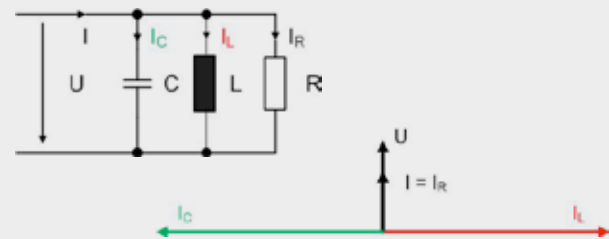


Bild 3: Parallelschwingkreis und Zeigerdiagramm

den physikalischen Eigenschaften der Induktor-Werkstück-Anordnung ihren Ursprung haben.

EIGENSCHAFTEN DER INDUKTOR-WERKSTÜCK-ANORDNUNG

Die Induktor-Werkstück-Anordnung entspricht ungefähr einem Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung. Im vereinfachten Ersatzschaltbild kann sie grob gesehen als Parallel- oder Reihenschaltung von einem Wirkwiderstand und einer Induktivität dargestellt werden. Für die weitere Betrachtung wird die Parallelschaltung der Komponenten gewählt, wie in **Bild 2** gezeigt.

Es ist theoretisch möglich, den Induktor mit Werkstück direkt an eine Wechselspannungsquelle anzuschließen. Vorausgesetzt, die Frequenz der Spannungsquelle lässt sich an die Anforderungen des Verfahrens anpassen. Bei den meisten praktisch vorkommenden Anordnungen wird sich hierbei zeigen, dass der induktive Blindstrom I_L , welcher der speisenden Spannung um 90° nacheilt, mehrfach (um Faktor 3 bis 10) größer sein wird, als der mit der Spannung in Phase liegende Wirkstrom I_R . Dieser Sachverhalt ist im rechten Teil von Bild 2 als Zeigerdiagramm dargestellt.

Nur der Wirkstrom I_R verursacht die Erwärmung des Werkstücks. Der induktive Blindstrom I_L ist für den Aufbau des magnetischen Wechselfeldes zwar zwingend erforderlich, trägt aber zum Leistungsumsatz im Werkstück nichts bei. Da er aber die Energiequelle und die Übertragungswege auf Grund seiner Stärke enorm belastet, ist ein direkter Anschluss des Induktors an die Stromquelle für die Energiebilanz denkbar ungünstig. Die Stromquelle und die Übertragungswege müssten mehrfach überdimensioniert

werden, um den Blindstrombedarf decken zu können.

VORTEILE EINER SCHWINGKREISLAST

Die Blindleistung des Induktors muss nicht zwangsläufig von der Energiequelle geliefert werden, sondern kann auch innerhalb der Last erzeugt werden. Eine einfache, seit Jahren bewährte Lastkonfiguration, die diesen Ansatz möglich macht, ist der sogenannte Schwingkreis. Ein Schwingkreis entsteht, wenn parallel oder in Reihe zum Induktor ein Kondensator geschaltet wird. Im Weiteren wird einfachheitshalber nur der Parallelschwingkreis behandelt, siehe **Bild 3**, ein Serienschwingkreis verhält sich dual zum Parallelschwingkreis.

Der Kondensatorstrom I_C eilt der am Kondensator anliegenden Wechselspannung U um 90° voraus. Er ist genauso ein Blindstrom, wie der Induktorblindstrom I_L , allerdings ist seine Phase gegenüber der Phase des Induktorblindstroms I_L stets um 180° verschoben. Die Beträge beider Blindströme sind frequenzabhängig. Während jedoch der Kondensatorblindstrom mit steigender Frequenz größer wird, verringert sich der Induktorblindstrom bei höher werdender Frequenz. Es gibt für die im **Bild 3** gezeigte Anordnung genau eine Frequenz, bei der die Beträge beider Blindströme gleich sind, wie im Zeigerdiagramm rechts dargestellt. Diese Frequenz heißt Resonanzfrequenz.

Weil die Phasen beider Blindströme in Opposition sind, wird im Resonanzfall der Induktorblindstrom vollständig vom Kondensatorblindstrom kompensiert. Die Energiequelle muss nur den Wirkstrom $I = I_R$ liefern, sie wird nicht mit Blindleistung belastet.

Das beschriebene Verhalten des Schwingkreises hat

dazu geführt, dass sich der Schwingkreis in fast allen Anwendungen der induktiven Erwärmung durchgesetzt hat. Im Folgenden werden einige charakteristische Größen des Schwingkreises angegeben [1].

(1) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ Kennkreisfrequenz

(2) $d = \frac{R}{2L \cdot \omega_0}$ Dämpfung

(3) $\omega_e = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - d^2}$ Resonanzkreisfrequenz

Bei der induktiven Erwärmung ändert sich die Resonanzfrequenz während des Heizvorgangs. Die im Werkstück induzierte Wirbelstromdichte nimmt von der Materialoberfläche hin zum Materialinnern ab. Die Eindringtiefe [2] ist der Abstand δ von der Oberfläche, bei dem die Stromdichte auf den 1/e-fachen Betrag der Oberflächenstromdichte abgefallen ist. Sie hängt von der Frequenz ab, sowie von der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Werkstückmaterials:

(4) $\delta = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot \kappa \cdot \mu}}$

δ = Eindringtiefe

κ = spezifische elektrische Leitfähigkeit des Materials

μ = magnetische Permeabilität des Materials

ω = induzierte Kreisfrequenz

Da sich die Materialparameter mit der Temperatur und mit der Feldstärke ändern, ändert sich auch die Induktivität der Induktor-Werkstück-Anordnung und folglich sowohl die Resonanzfrequenz als auch die Dämpfung des Schwingkreises. Diese Änderung der Resonanzfrequenz muss von der Stromquelle erkannt und ausgewertet werden, damit die Betriebsfrequenz der Stromquelle kontinuierlich der Resonanzfrequenz des Schwingkreises folgen kann.

SCHWINGKREISUMRICHTER

Für die induktive Erwärmung wurden im Laufe der Zeit verschiedene Arten von Frequenzumrichtern entwickelt, die den Netzstrom in Wechselstrom mit den für das Verfahren geeigneten Parametern umwandeln. Die meisten sind Schwingkreisumrichter.

Schwingkreisumrichter, siehe **Bild 4**, sind eine Klasse von Frequenzumrichtern, die für die Energieversorgung einer als Schwingkreis geschalteten Last vorgesehen sind. Die meisten Schwingkreisumrichter sind Zwischenkreisumrichter, bei denen der Front-End-Gleichrichter und der Back-End-Wechselrichter entweder durch einen induktiven oder durch einen kapazitiven Energiezwischenspeicher (Zwischenkreis) verbunden sind. Bei allen Schwingkreisumrichtern wird der Blindleistungsbedarf des Induktors lokal von den Kondensatoren des Schwingkreises geliefert.

Die universellsten Umrichter dieser Klasse sind der Parallel- und der Serienschwingkreisumrichter. Es werden jedoch auch komplexere Resonanzschaltungen eingesetzt, wie zum Beispiel die sogenannte L-LC-Topologie. PWM (Pulsweitenmodulierte) Umrichter können ebenfalls in Verbindung mit einem Schwingkreis genutzt werden. Auch ein Direktumrichter wurde früher zur Speisung eines Schwingkreises eingesetzt.

Die komplexeren Schaltungen sind generell nicht so universell einsetzbar, wie der einfache Parallel- oder Serienschwingkreisumrichter. Die Einschränkungen beruhen meist auf einem begrenzten Frequenzbereich bei einer gegebenen Konfiguration des Umrichters. Breitbandige Applikationen sind mit diesen Schaltungen nicht möglich bzw. nur schwer zu realisieren.

PARALLELSCHWINGKREISUMRICHTER

Der Parallelschwingkreisumrichter ist ein Zwischenkreisumrichter, aufgebaut aus einem voll gesteuerten, netzgeführten Gleichrichter, einem induktiven Zwischenkreis und einem lastgetakteten, selbst- oder lastgeführten Wechselrichter. An den Ausgang des Wechselrichters wird ein parallel kompensierter Induktor angeschlossen. **Bild 5** zeigt einen Parallelschwingkreisumrichter mit einem IGBT-Wechselrichter.

Im Wechselrichter eines Parallelschwingkreisumrichters sind rückwärts sperrende Schalter erforderlich. Deswegen werden in Reihe zu den IGBTs bzw. MOSFETs schnelle Dioden mit Soft-Recovery-Charakteristik geschaltet. Ein Thyristor ist von Natur aus rückwärtssperrend. Ein Parallelschwingkreisumrichter mit Thyristorwechselrichter war deshalb besonders einfach aufgebaut.

Ein Parallelschwingkreisumrichter hat, bedingt durch den induktiven Zwischenkreis, die Charakteristik einer Stromquelle. Sein Ausgangstrom hat annähernd eine Rechteckform, die am Schwingkreis entstehende Spannung ist sinusförmig.

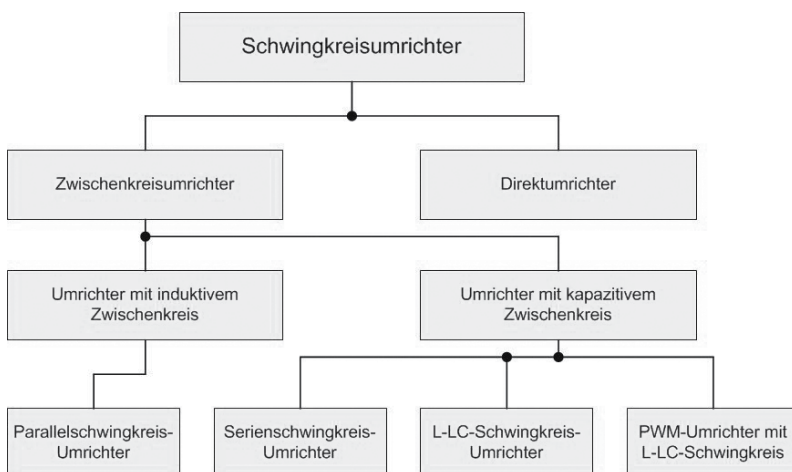


Bild 4: Schwingkreisumrichter für die induktive Erwärmung

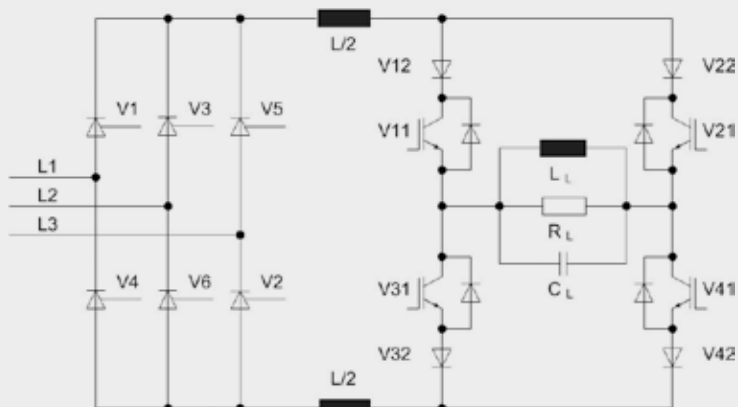


Bild 5: Parallelschwingkreisumrichter mit IGBT Wechselrichter



Bild 6: Parallelschwingkreisumrichter 800 kW, 450 V, 200 kHz, MOSFET-Wechselrichter (Werksfoto: SMS Elotherm)

Die Taktfrequenz des Wechselrichters wird durch die Resonanzfrequenz der Last vorgegeben und muss bei Laständerungen schnell nachgeregelt werden. Die Leistungssteuerung erfolgt gewöhnlich über den voll gesteuerten Gleichrichter. Der netzseitige Leistungsfaktor des Umrichters hängt von seiner Ausgangsspannung ab und wird im Teillastbereich zunehmend schlechter.

Lange Zeit wurden Parallelschwingkreisumrichter für die induktive Materialerwärmung bevorzugt eingesetzt. Bei Verwendung von Thyristoren ermöglichte eine aufwendige Löschwinkelregelung ein Maximum an erreichbarer Leistung. Abschaltbare Leistungsbaulemente, wie zum Beispiel MOSFET-Transistoren (**Bild 6**), ermöglichen den Betrieb sowohl im Resonanzpunkt, als auch mit leicht kapazitivem oder induktivem Winkel am Wechselrichteranschluss [2].

Parallelschwingkreisumrichter können in einem sehr großen Frequenzbereich eingesetzt werden und erreichen bei dynamisch optimierter Kommutierungsregelung [3] einen sehr guten Wirkungsgrad. Die Schaltung ist robust, Kurzschlüsse am Induktor sind gut beherrschbar. In der Regel ist kein Ausgangstransformator erforderlich. Nur bei sehr kurzen Induktoren, die zum Beispiel beim induktiven Härten oft verwendet werden, ist ein Transformator unmittelbar vor dem Induktor zur Impedanzanpassung erforderlich. Die Verschlechterung des netzseitigen Leistungsfaktors im Teillastbereich ist ein Nachteil des Parallelschwingkreisumrichters.

SERIENSCHWINGKREISUMRICHTER

Die Induktorspule L_L kann mit dem Kondensator C_L auch zu einem Serienschwingkreis geschaltet werden, der als Last eines Serienschwingkreisumrichters eingesetzt werden kann, siehe **Bild 7**.

Der Serienschwingkreisumrichter ist ein Spannungszwischenkreisumrichter. Sein Wechselrichter arbeitet lastge-

taktet und kann entweder selbstgeführt oder lastgeführt betrieben werden. Die Leistungssteuerung kann durch die Änderung der Taktfrequenz des Wechselrichters [4], durch eine Modulation der Wechselrichter-Steuerpulse oder durch eine Änderung der Zwischenkreisspannung erfolgen.

Serienschwingkreisumrichter sind ebenfalls für einen großen Frequenz- und Leistungsbereich verfügbar, siehe **Bild 8**. Weil mit Hilfe der Serienresonanz hohe Spannungen am Induktor relativ einfach erreicht werden können, sind sie prädestiniert für leistungsstarke Schmelzofenanlagen und generell dort, wo eine hohe Induktorspannung erforderlich ist. Bei einer kleineren zulässigen Induktorspannung sowie bei kurzen Induktoren muss ein Ausgangstransformator eingesetzt werden.

Serienschwingkreisumrichter haben einen guten Wirkungsgrad, weil der Aufbau eines transistorisierten Wechselrichters nur wenige Komponenten erfordert und die Schaltverluste im lastgeführten Wechselrichter durch optimierte Kommutierung [5] effektiv reduziert werden können. Wird die Leistungssteuerung mit Hilfe des Wechselrichters realisiert, kann sogar ein ungesteuerter Gleichrichter eingesetzt werden. Dadurch wird ein guter Netzleistungsfaktor in allen Betriebszuständen erreicht.

UMRICHTER MIT L-LC-LASTSCHALTUNG

Die Entwicklung der Leistungselektronik wird zum großen Teil durch die Technologie der Antriebsumrichter angetrieben. Diese Umrichter haben einen Spannungszwischenkreis, einen ungesteuerten Gleichrichter und einen IGBT-Wechselrichter. Der ungesteuerte Gleichrichter hat günstigere Netzrückwirkungen als der gesteuerte Gleichrichter, dessen Grundschiebungsfaktor aussteuerungsabhängig ist. Er zeichnet sich durch einen guten, unabhängig von der Belastung und fast konstanten

Grundswingungsleistungsfaktor aus. Damit sind Topologien mit ungesteuertem Gleichrichter die bevorzugte Variante im Bereich der Antriebsumrichter.

Ein ungesteuerter Gleichrichter und ein Spannungszwischenkreis gehören ebenfalls zur Grundschaltung eines Serienschwingkreisumrichters. Da jedoch ein Parallelschwingkreis dem Serienschwingkreis vorgezogen wird, wurde nach Lösungen gesucht, die es möglich machen, den Parallelschwingkreis vom Spannungszwischenkreisumrichter speisen zu können. Dies geht nicht direkt. Die Aufgabenstellung lässt sich jedoch durch Hinzufügen einer Koppelinduktivität L_s am Ausgang des Wechselrichters lösen (**Bild 9**). Diese Topologie wird in der Fachliteratur oft als L-LC-Schaltung bezeichnet. Nachteile der Schaltung sind eine höhere Komplexität des Systems und, was schwerer wiegt, eine erhebliche Einschränkung des nutzbaren Frequenzbereiches. Der Wert von L_s muss nämlich für die Betriebsfrequenz des Umrichters relativ eng bemessen sein.

Die L-LC-Schaltung weist zwei Resonanzstellen auf: eine mit Parallel- und eine mit Serienresonanz. Beide können, abhängig von den angestrebten Eigenschaften der Schaltung und der Applikation, genutzt werden. Zur Steuerung des Wechselrichters müssen spezielle Algorithmen eingesetzt werden, um die gewünschte Resonanzstelle (parallel oder seriell) zu finden und den Arbeitspunkt eindeutig festzulegen. Dafür hat die Schaltung den Vorteil, dass sich sowohl Frequenz, als auch Leistung über den Wechselrichter steuern lassen. Diese Technologie hat in den letzten Jahren recht große Verbreitung gefunden, obwohl ein L-LC-Umrichter nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich genutzt werden kann. Es gibt viele Applikationen, bei denen ein kleiner Bereich der Betriebsfrequenz ausreichend ist.

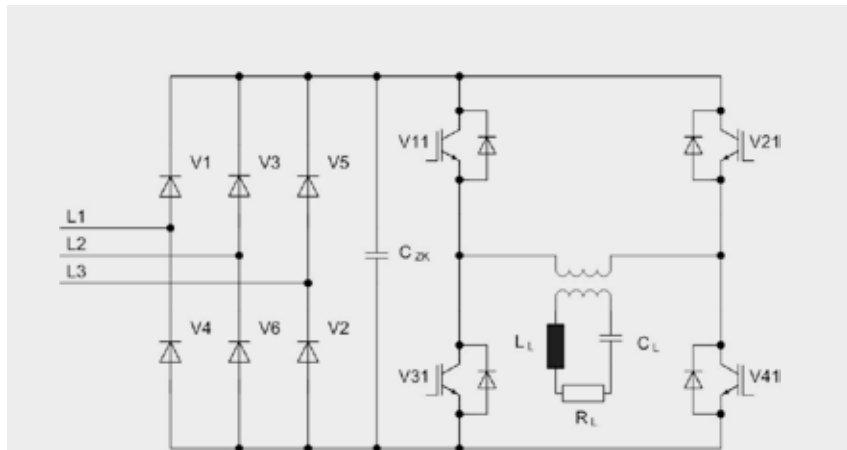


Bild 7: Serienschwingkreisumrichter mit IGBT-Wechselrichter

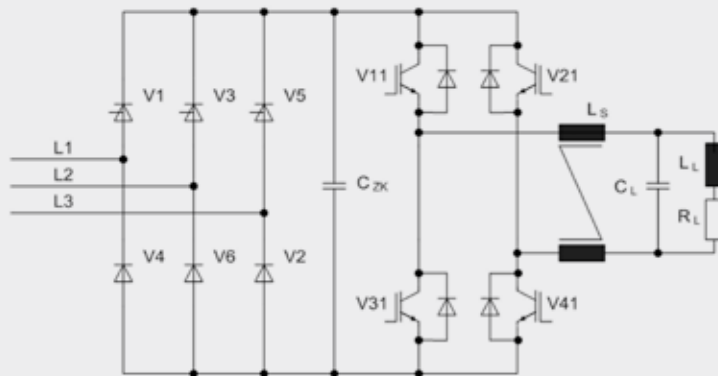


Bild 9: Umrichter mit L-LC-Lastschaltung

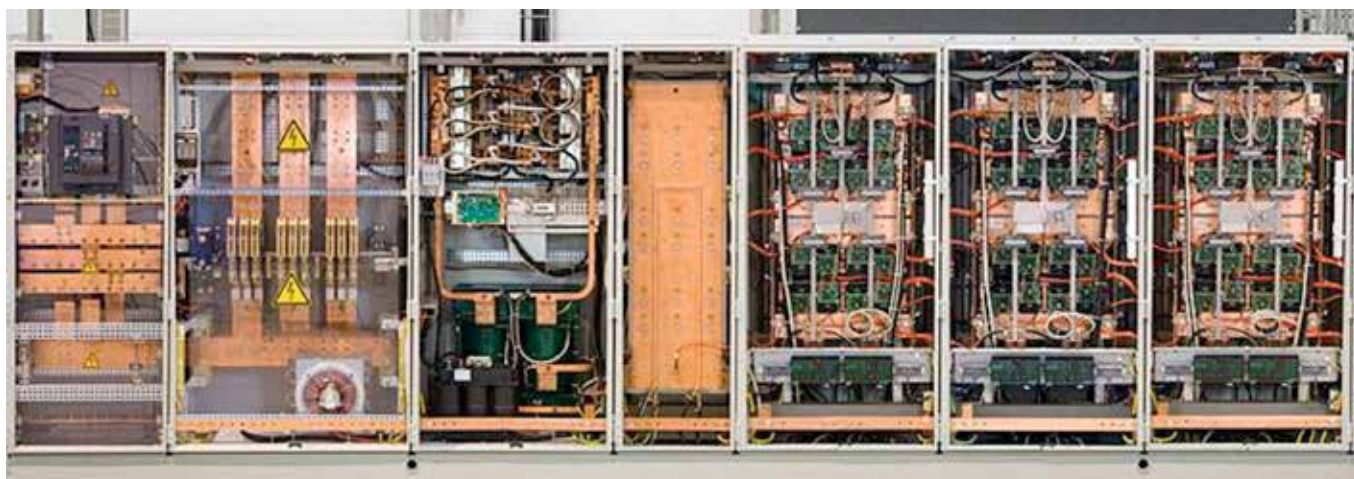


Bild 8: Serienschwingkreisumrichter 2400kW, 800V, 150kHz, IGBT-Wechselrichter (Werkfoto: SMS Elotherm)

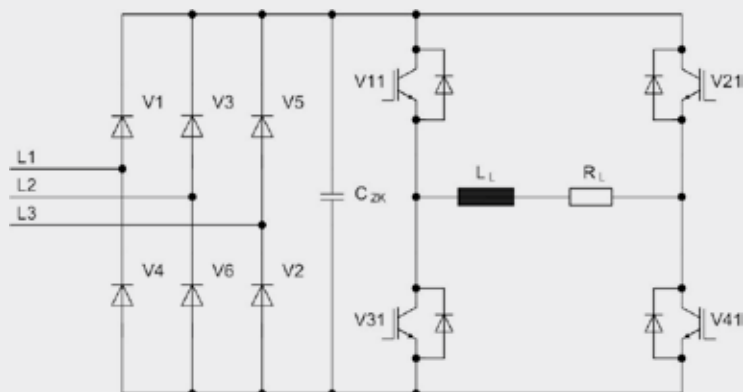


Bild 10: Schwingkreisloser Direktumrichter

UMRICHTER MIT PWM-MODULIERTEM WECHSELRICHTER

In einem Spannungszwischenkreisumrichter entsprechend Bild 9 kann der Wechselrichter nach unterschiedlichen Algorithmen gesteuert werden. Die IGBTs müssen nicht zwingend, wie bei dem L-LC-Umrichter, einmal pro Periode geschaltet werden. Bei sehr niedrigen Betriebsfrequenzen, wie z.B. unter 200 Hz, kann es daher vorteilhaft sein, den Wechselrichter mit einem sinusbewerteten Pulsmuster anzusteuern, wobei die Modulationsfrequenz der Resonanzfrequenz des Parallelschwingkreises gleicht.

Unter dieser Bedingung liegt der Ausgangsstrom des Wechselrichters in Phase mit der Grundschwingung der Ausgangsspannung und belastet den Wechselrichter kaum mit Blindleistung. Die Lastspannung ist sinusförmig, genauso wie der Induktorstrom. Mit dem beschriebenen Steuerungsverfahren lassen sich Applikationen mit Betriebsfrequenzen bis unter 50 Hz abdecken.

SCHWINGKREISLOSER UMRICHTER (DIREKTUMRICHTER)

Ein Spannungszwischenkreisumrichter mit einem PWM-modulierten Wechselrichter kann den Induktor direkt speisen, (Bild 10). Die Ausgangsfrequenz des Umrichters kann während des Betriebs frei verändert werden. Es gibt in einem solchen System keinen Schwingkreis und somit auch keine Resonanzfrequenz, an die sich die Steuerung des Wechselrichters synchronisieren müsste. Dies kann für bestimmte Applikationen einen Vorteil darstellen [6]. Die Ausgangsleistung des Direktumrichters kann über die Breite der Wechselrichterimpulse gesteuert werden.

Diese Schaltung hat jedoch einen gravierenden Nachteil: der komplette Induktorstrom, einschließlich des vollen Blindstromanteils, fließt durch den Wechselrichter und die Verbindungsleitungen Induktor – Wechselrichter.

Bei dieser Topologie muss der Wechselrichter stark überdimensioniert werden. Da die Verluste in den Verbindungsleitungen quadratisch mit dem Strom ansteigen, ist der energetische Wirkungsgrad des Systems insgesamt schlechter, verglichen mit Schwingkreisumrichtern gleicher Leistung. Allein die aus dem Verfahren resultierende Notwendigkeit, die Betriebsfrequenz während des Erwärmungsvorgangs kontinuierlich verändern zu müssen, kann den Einsatz dieser Schaltung rechtfertigen.

FAZIT

Schwingkreisumrichter werden ihre Stellung als hocheffiziente Standard-Stromversorgungen für Induktionserwärmungsanlagen auch künftig behaupten können. Die Parallel- und Serienschwingkreisumrichter werden weiter als universelle Schaltungen eingesetzt. Moderne Leistungshalbleiter sowie optimierte Steueralgorithmen werden zur weiteren Reduktion der frequenzabhängigen Schaltverluste im Wechselrichter führen. Dadurch können die maximalen Betriebsfrequenzen dieser Umrichter noch weiter angehoben werden.

Neue Umrichtertopologien, wie der Spannungszwischenkreisumrichter mit einem L-LC-Schwingkreis, haben stark an Bedeutung gewonnen, trotz einiger Einschränkungen im Vergleich zum Parallel- und Serienschwingkreisumrichter. Sie sind systembedingt ohne Komponentenänderung nur in einem engen Frequenzbereich einsetzbar. Zusätzliche Komponenten, wie die erforderliche Koppeldrossel, tragen zur Erhöhung der Verluste bei.

Der schwingkreislose Direktumrichter wird auch weiter nur dort Anwendung finden, wo eine kontinuierliche Verstellung der Frequenz während des Betriebs erforderlich ist. Sonst ist er den Schwingkreisumrichtern in Bezug auf den Wirkungsgrad so stark unterlegen, dass er im Hinblick auf die Energieeffizienz keine echte Alternative darstellt.

Der Verringerung der Netzurückwirkungen von Frequenzumrichtern kommt ein immer höherer Stellenwert zu. Nicht nur der Grundschwingungsleistungsfaktor $\cos \varphi$ spielt dabei eine wichtige Rolle. Auch die Belastung des Netzes mit Stromharmonischen kann zu diversen Problemen führen und muss kontrolliert werden. Hier können höher gepulste Gleichrichter, leistungsfaktorkorrigierende Schaltungen oder aktive Filtertechnologien helfen. Die Verbesserung des $\cos \varphi$ und die Reduktion der Stromharmonischen tragen gleichzeitig zur Erhöhung der Energieeffizienz der Stromversorgung bei.

Frequenzthyristoren, deren weitere Entwicklung praktisch eingestellt wurde, werden nur noch von wenigen Firmen in Wechselrichtern großer Leistung und bei niedrigen Betriebsfrequenzen eingesetzt. Immer mehr Frequenzthyristoren werden von den Herstellern abgekündigt, so dass ihr Einsatz langfristig noch weiter schwinden dürfte.

IGBTs sind auf Grund ihrer vorteilhaften Eigenschaften prädestiniert für den Einsatz in Spannungszwischenkreis-

umrichtern. Diese Topologie bildet die Grundlage für viele der beschriebenen Umrichtertypen. Die bekanntesten sind der Serienschwingkreisumrichter und der Umrichter mit der L-LC-Lastschaltung. Umrichter mit sinusbewerteter PWM-Modulation des Wechselrichters können ebenfalls zur Speisung eines Parallelschwingkreises über eine Koppeldrossel eingesetzt werden.

IGBTs und MOSFETs sind zum Teil konkurrierende Halbleitertechnologien. Im Bereich von sehr hohen Frequenzen sind MOSFETs immer noch vorteilhafter als IGBTs, auch wenn der Einsatzbereich der IGBTs ständig größer wird.

Der Einsatz von Leistungshalbleitern aus Siliziumcarbid (SiC) wird in Frequenzumrichtern mittlerer und großer Leistung noch länger auf sich warten lassen. Die auf Siliziumbasis gefertigten IGBTs und MOSFETs werden noch lange Zeit die Bauelemente der Wahl bleiben. Künftige Einsatzgebiete für SiC-Komponenten dürften zunächst in hochfrequenten Umrichtern entstehen.

LITERATUR

- [1] Fricke, H. / Vaske, P.: Grundlagen der Elektrotechnik Teil 1. Elektrische Netzwerke, B. G. Teubner Verlag Stuttgart 1982
- [2] Dede, E.: Static Inverters for Induction Heating: From the Fundamentals to the Analysis and Design. PCIM International Conference 1998 Seminar Notes

[3] Patent DE 101 15 326 B4 2009.10.15 Verfahren zur Ansteuerung eines Schwingkreis-Wechselrichters. Schwingkreis-Wechselrichter und Regler.

[4] Mohan / Undeland / Robbins: Power Electronics. Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons, Inc. 1995

[5] Zok, E. / Matthes, H.G.: Kritische Halbleiterbelastungen im Schwingkreisumrichter, VDE Konferenz Leistungselektronik und ihre Bauelemente in Bad Nauheim 2002

[6] Nuding, M.: MF-Umrichtertechnologie zur Vereinfachung induktiver Erwärmprozesse, Elektrowärme International Heft 1/2009

AUTOREN



Dipl.-Ing. **Edmund Zok**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191/891-639
e.zok@sms-elotherm.de



Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Dirk M. Schibisch**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191/ 891-300
d.schibisch@sms-elotherm.de

Powered by



ITPS INTERNATIONAL
**THERM
PROCESS
SUMMIT**

Organized by



The Key Event
for Thermo Process Technology

Congress Center
Düsseldorf, Germany

09-10 July 2013

www.itps-online.com

WISSEN für die ZUKUNFT

Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Praxishandbuch Feuerfeste Werkstoffe

Aufbau · Eigenschaften · Prüfung

Dieses Taschenbuch vermittelt einen detaillierten Überblick über Aufbau, Eigenschaften, Berechnungen, Begriffe und Prüfung feuerfester Werkstoffe und gibt wertvolle Tipps für die tägliche Arbeit.

In der Neuauflage dieses Klassikers wurden einige Kapitel von neuen Autoren grundlegend überarbeitet, der Anhang ergänzt, Normen- und Literaturlisten auf den neuesten Stand gebracht und das Stichwortverzeichnis deutlich erweitert. Dadurch wird der Nutzwert des Werks für die tägliche Berufspraxis eindeutig erhöht. Für jeden, der beruflich mit der Feuerfestindustrie oder der Thermoprozesstechnik zu tun hat, ist dieses kompakte Buch, mit seiner Fülle von Informationen, ein unersetzliches Nachschlagewerk.

Für den komfortablen Gebrauch mit dem Notebook unterwegs oder mit dem Computer am Arbeitsplatz sorgt die DVD, die neben ergänzenden Zusatzinformationen das e-Book mit dem gesamten Buchinhalt enthält.

Hrsg. G. Routschka / H. Wuthnow

5. Auflage 2011, 500 Seiten mit vielen farbigen Abbildungen, DVD, Hardcover



Buch + DVD mit Zusatzinhalten und vollständigem e-Book

 Vulkan-Verlag
www.vulkan-verlag.de

Vorteilsanforderung per Fax: +49 (0) 201 / 82002-34 oder im Fensterumschlag einsenden

Ja, ich bestelle gegen Rechnung 3 Wochen zur Ansicht

___ Ex. Praxishandbuch Feuerfeste Werkstoffe + DVD
5. Auflage 2011 – ISBN: 978-3-8027-3161-7
für € 100,- (zzgl. Versand)

Die bequeme und sichere Bezahlung per Bankabbuchung wird mit einer Gutschrift von € 3,- auf die erste Rechnung belohnt.

Antwort

Vulkan-Verlag GmbH
Versandbuchhandlung
Postfach 10 39 62
45039 Essen

Firma/Institution

Vorname/Name des Empfängers

Straße/Postfach, Nr.

Land, PLZ, Ort

Telefon

Telefax

E-Mail

Branche/Wirtschaftszweig

Bevorzugte Zahlungsweise

Bankabbuchung

Rechnung

Bank, Ort

Bankleitzahl

Kontonummer

Datum, Unterschrift

PAPFW52011

Widerrufsrecht: Sie können Ihre Vertragserklärung innerhalb von zwei Wochen ohne Angabe von Gründen in Textform (z.B. Brief, Fax, E-Mail) oder durch Rücksendung der Sache widerrufen. Die Frist beginnt nach Erhalt dieser Belehrung in Textform. Zur Wahrung der Widerrufsfrist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs oder der Sache an die Vulkan-Verlag GmbH, Versandbuchhandlung, Huyssenallee 52-56, 45128 Essen.

Nutzung personenbezogener Daten: Für die Auftragsabwicklung und zur Pflege der laufenden Kommunikation werden personenbezogene Daten erfasst, gespeichert und verarbeitet. Mit dieser Anforderung erkläre ich mich damit einverstanden, dass ich vom Oldenbourg Industrieverlag oder vom Vulkan-Verlag per Post, per Telefon, per Telefax, per E-Mail, nicht über interessante Fachangebote informiert und beworben werde. Diese Erklärung kann ich mit Wirkung für die Zukunft jederzeit widerrufen.