

Elektronische Leistungssteller

Manfred Schleicher
Winfried Schneider

1	Einleitung	3
2	Der Thyristor-Leistungssteller	5
2.1	Der Thyristor als elektronischer Schalter	5
2.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	5
2.1.2	Schutzmaßnahmen	6
2.2	Der Thyristor-Leistungssteller als Stellglied	6
2.3	Betriebsarten	7
2.3.1	Phasenanschnittsteuerung	8
2.3.2	Impulsgruppenbetrieb	10
2.3.3	Impulsgruppenbetrieb mit Phasenanschnittstart	12
3	Der IGBT-Leistungssteller	13
3.1	Der IGBT als elektronischer Schalter	13
3.2	Der IGBT-Leistungssteller als Stellglied	14
4	Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen	19
4.1	U^2-Regelung	21
4.2	I^2-Regelung	23
4.3	P-Regelung	25
5	Weitere Funktionen von Leistungsstellern	27
5.1	Lastkreisüberwachung	27
5.1.1	Teillastbruch	27
5.1.2	Überstromüberwachung	28
5.2	Ansteuerung von Leistungsstellern	28
5.2.1	Realisierung einer Grundlastvorgabe	28
5.2.2	Eingangssignalabschwächung	29
5.3	Softstart	29
5.4	Strombegrenzung	29
5.5	Sperreingang (Inhibit)	30
5.6	Istwertausgang	30
5.7	Externe Betriebsartumschaltung beim Thyristor-Leistungssteller	30

Inhalt

6	Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz	31
6.1	Der Thyristor-Leistungssteller im Einphasen- und Dreiphasennetz	32
6.1.1	Der Einphasenbetrieb Phase/N und Phase/Phase	32
6.1.2	Die Leistungssteller im Drehstromsystem	33
6.2	Der IGBT-Leistungssteller im Einphasen- und Dreiphasennetz	36
6.2.1	Der Einphasenbetrieb Phase/N und Phase/Phase	37
6.2.2	Der IGBT-Leistungssteller im Drehstromsystem	38
7	Filterung und Entstörung	39
8	Verwendete Kurzzeichen	41
	Literaturverzeichnis	43

Zur Dosierung von elektrischer Leistung stehen für einfache Anwendungen Stellglieder wie Schütze und Solid-State-Relais zur Verfügung. Mit diesen Stellgliedern kann über Variation der Ein- und Ausschaltzeit die elektrische Leistung in einen Prozess dosiert werden. Bei vielen Prozessen führt diese stoßweise eingebrachte Energie jedoch zu merklichen Schwankungen in der Ausgangsgröße. So kann beispielsweise mit diesen unstetigen Stellgliedern keine Helligkeitssteuerung vorgenommen werden. Auch anspruchsvolle Temperaturregelungen können nicht realisiert werden, da hier ein Schwanken der Regelgröße unakzeptabel ist.

Schon in der Frühzeit der Automatisierungstechnik wurden Stellglieder, wie beispielsweise Stelltransformatoren, verwendet, die eine stetige Veränderung der elektrischen Energie ermöglichten. Ein Stelltransformator arbeitet jedoch nicht verschleißfrei, benötigt lange Stellzeiten und ist sehr teuer.

Diese Broschüre soll dem Leser das Prinzip der Elektronischen Leistungssteller verdeutlichen, die verschleißfrei und mit einer sehr hohen Stellgeschwindigkeit arbeiten. Die Beschreibungen zu den Leistungsstellern sind allgemeingültig, beziehen sich stellenweise jedoch auch auf Thyristor- und IGBT-Leistungssteller aus dem Hause JUMO.

Fulda im September 2001

Manfred Schleicher

Winfried Schneider

M.K. Juchheim, Fulda im September 2001

Nachdruck mit Quellennachweis gestattet!

Teilenummer: 00398728

Buchnummer: FAS 620

Druckdatum: 09.01

ISBN 3-935742-04-5

2 Der Thyristor-Leistungssteller

2.1 Der Thyristor als elektronischer Schalter

2.1.1 Aufbau und Wirkungsweise

Das eigentliche Stellglied bei einem Thyristorsteller ist der Thyristor, ein steuerbarer Siliziumgleichrichter. Er besteht aus vier aufeinanderfolgenden Halbleiterschichten zwischen Anode und Katode, die abwechselnd p- und n-dotiert sind. Der Steueranschluss - auch als Gate bezeichnet - ist an der katodenseitigen p-Zone angebracht.

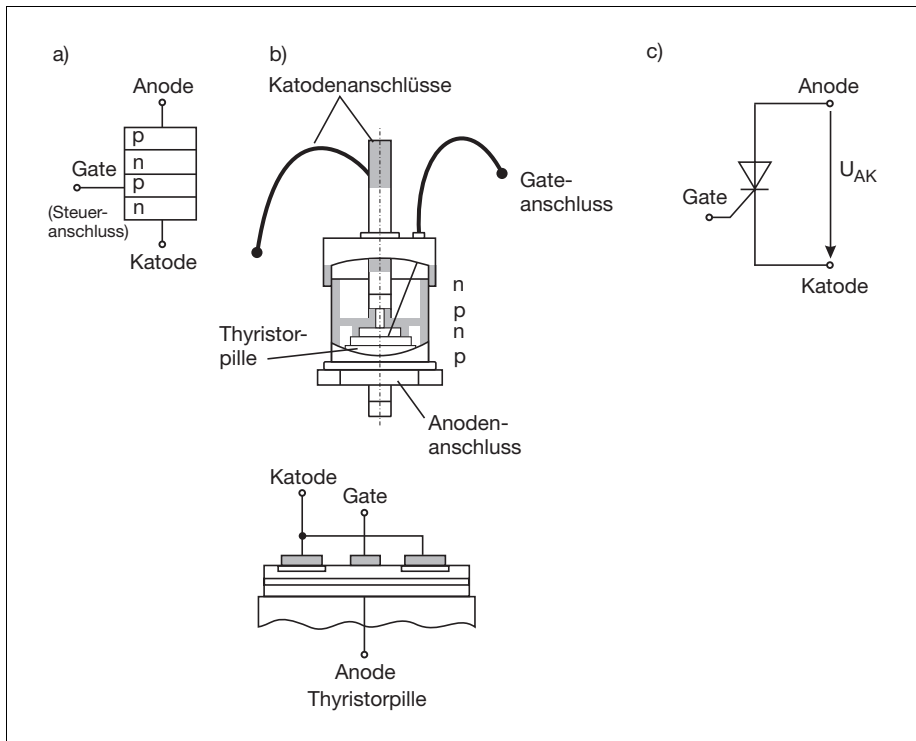


Abb. 1: a) Aufbau eines Thyristors (schematisch), b) Schnitt durch ein Thyristorgehäuse, c) Schaltzeichen des Thyristors mit Spannung U_{AK} in Schalttrichtung

Ein in Schalttrichtung betriebener Thyristor kippt beim Eintreffen eines ausreichend großen und genügend lange dauernden positiven Steuerimpulses am Steueranschluss (Gate) gegenüber der Katode vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand. Man spricht vom Zünden des Thyristors. Der gezündete Thyristor kann über den Steueranschluss nicht wieder gelöscht werden. Erst wenn der von der Anode in Richtung Katode fließende Strom einen Minimalwert, den Haltestrom, unterschreitet, sperrt er wieder. In Wechselstromkreisen passiert dies, wenn der Strom nach jeder Halbwelle der Netzperiode durch Null geht. Wird eine ohmsche Last angesteuert, sind Spannung und Strom in Phase. Bei einer ohmsch-induktiven Last ist der natürliche Stromnulldurchgang gegenüber dem der Spannung entsprechend phasenverschoben. Aufgrund der soeben geschilderten Eigenschaften kann ein Thyristor als kontaktloser, elektronischer Schalter verwendet werden.

2 Der Thyristor-Leistungssteller

Im niederohmigen Zustand fällt zwischen Anode und Katode eine Spannung, die Durchlassspannung, von 1V bis 2V ab. Dadurch entsteht eine der Stromstärke proportionale Verlustleistung, die den Thyristor aufheizt.

Im gesperrten, hochohmigen Zustand fließt über den Thyristor immer noch ein Strom, der sogenannte Sperrstrom. Er beträgt beispielsweise 20mA bei einem Thyristor mit einem Nennstrom von 100A.

Ein zu schneller Spannungsanstieg U_{AK} (hoher $\frac{du}{dt}$ -Wert) in Schaltrichtung kann zu einem Durchschalten des Thyristors führen, ohne dass ein Steuerimpuls am Gate vorhanden war. Die Ursache für dieses unkontrollierte Zünden rührt von kapazitiven Verschiebungsströmen im Thyristorkristall her.

Nach der Zündung des Thyristors darf auch der zeitliche Anstieg des Laststromes ($\frac{di}{dt}$ -Wert) einen kritischen Wert nicht überschreiten, sonst kann infolge von lokaler Überhitzung im Kristall der Thyristor zerstört werden.

2.1.2 Schutzmaßnahmen

Damit ein störungsfreier Betrieb des Thyristors gewährleistet ist, müssen verschiedene Vorkehrungen getroffen werden, die hier kurz dargestellt werden.

Die durch elektrische Verluste anfallende Wärme wird über ausreichend dimensionierte Kühlkörper vom Thyristorkristall abgeführt. Hierzu lässt sich die Verlustleistung aus dem Produkt von Durchlassspannung und Laststrom berechnen.

Ein zu steiler Spannungsanstieg lässt sich durch RC-Beschaltung und den Einsatz von Varistoren verhindern. Unter einem Varistor versteht man einen spannungsabhängig Widerstand.

Die Stromanstiegsgeschwindigkeit des Laststromes wird durch Induktivitäten in Reihenschaltung zum Thyristor begrenzt. Diese Schutzschaltung ist insbesondere für den Betrieb mit höheren Frequenzen wichtig.

Für den Fall, dass im Lastkreis ein Kurzschluss auftritt, muss eine superflinke Halbleitersicherung vorgesehen werden. Nur unter Verwendung des vom Hersteller vorgeschriebenen Sicherungstyps können Thyristoren wirksam geschützt werden.

2.2 Der Thyristor-Leistungssteller als Stellglied

Da mit einem einzelnen Thyristor der Strom nur von der Anode in Richtung Katode durchgeschaltet werden kann, sind zum Schalten von Wechselströmen zwei Thyristoren in Antiparallel-Schaltung erforderlich. Mit einem solchen Thyristor-Modul lässt sich nun der Mittelwert des Stromes in elektrischen Wechsel- bzw. Drehstromkreisen kontaktlos verstellen. Dazu werden die Thyristoren mit einer Steuerelektronik angesteuert, welche die entsprechenden Zündimpulse erzeugt.

Anhand des Blockschaltbildes (Abb. 2) wollen wir uns nun die wichtigsten Funktionen des Thyristor-Leistungsstellers verdeutlichen:

Die Phase (L1) der Spannungsversorgung wird über superflinke Halbleitersicherungen (2) an das Thyristormodul (3) geführt. Das Thyristormodul besteht aus zwei antiparallel geschalteten Thyristoren, somit können positive wie negative Halbwellen der Versorgungsspannung durchgeschaltet werden. Die RC-Schutzbeschaltung verhindert zu steile Spannungsanstiege zwischen Anode und Kathode und somit ungewollte Zündungen der Thyristoren. Die Halbleitersicherungen (2) sprechen innerhalb einer Netzspannungshalbwelle an, damit beim Auftreten eines Kurzschlusses im Laststromkreis die Thyristoren vor Zerstörung bewahrt bleiben. Die Spannung und der Strom nach den Thyristoren wird gemessen (7+8) und über die Last auf den N-Leiter geschaltet.

2 Der Thyristor-Leistungssteller

Die Ansteuerung der Thyristoren (3) wird von der Steuerelektronik (9) über einen Optokoppler (6) und eine Treiberstufe (4) vorgenommen. Der Stellgrad wird extern über Einheitssignale oder Potentiometeranschluss (15) vorgegeben.

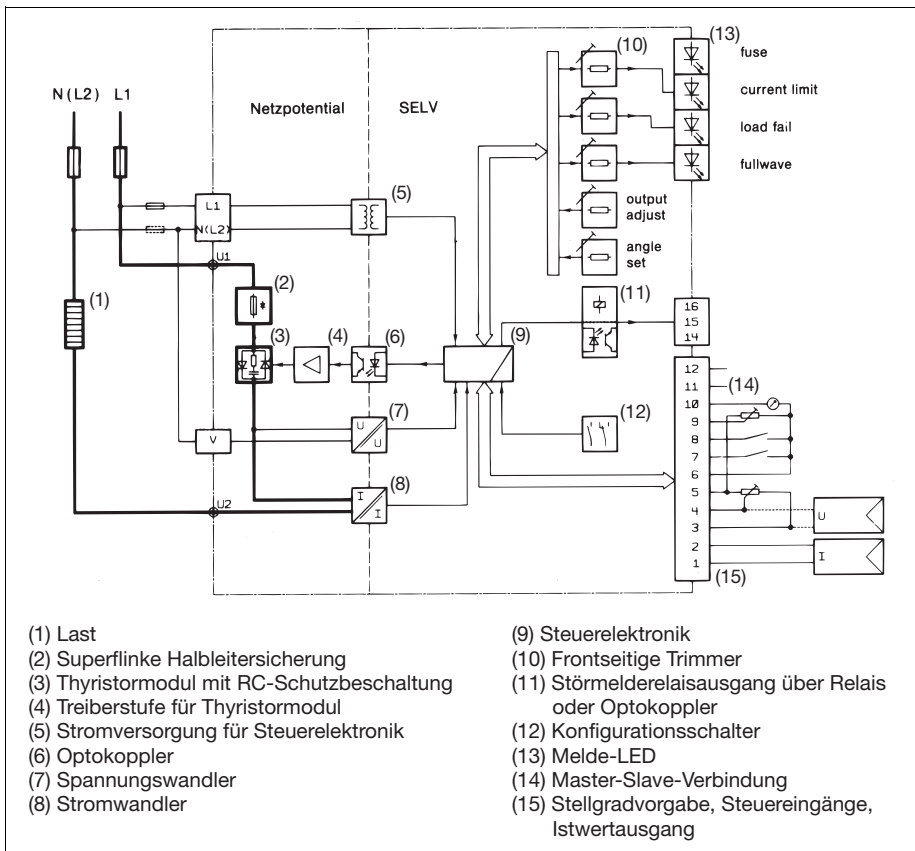


Abb. 2: Blockschaltbild des Thyristor-Leistungsstellers TYA-110/3 von JUMO

2.3 Betriebsarten

Zur stufenlosen Leistungssteuerung eines Wechselstromverbrauches über zwei antiparallel geschaltete Thyristoren gibt es zwei unterschiedliche Ansteuerprinzipien. Dabei handelt es sich um das in der Stromrichtertechnik gebräuchliche Verfahren der Phasenanschnittsteuerung und das Nullspannungstaktprinzip, bei dem der Laststrom in einem bestimmten Rhythmus jeweils im Spannungsnulldurchgang ein- bzw. ausgeschaltet wird. Das zuletzt erwähnte Verfahren ist auch unter dem Namen Impulsgruppenbetrieb bekannt.

Beim Impulsgruppenbetrieb werden immer Vollwellen der Wechselspannung durchgeschaltet. Wird beispielsweise ein Stellgrad von einem Prozent an den Steller geführt, wird eine Vollwelle durchgeschaltet und über 99 Vollwellen die Last von der Versorgungsspannung getrennt.

2 Der Thyristor-Leistungsteller

Viele Prozesse (wie beispielsweise eine Beleuchtungsanlage) können jedoch eine solch stoßweise zugeführte Energie nicht glätten, es kommt zu Schwankungen in der Regelgröße (wie beispielsweise der Lichtstärke).

Da im Phasenanschnittbetrieb jeweils ein Ein- und Ausschalten innerhalb einer Halbwelle der Versorgungsspannung stattfindet, ist hier am wenigsten ein merkliches Schwanken der Regelgröße zu erwarten. Überall da, wo ein Impulsgruppenbetrieb die Energie in die Regelstrecke nicht fein genug dosiert, kommt der Phasenanschnittbetrieb zum Einsatz.

2.3.1 Phasenanschnittsteuerung

Beim Phasenanschnittbetrieb findet während jeder Netzspannungshalbwelle ein Stromfluss über die angesteuerte Last statt. Dabei fließt der Strom jeweils vom Zündzeitpunkt bis zu seinem natürlichen Nulldurchgang (Abb. 3).

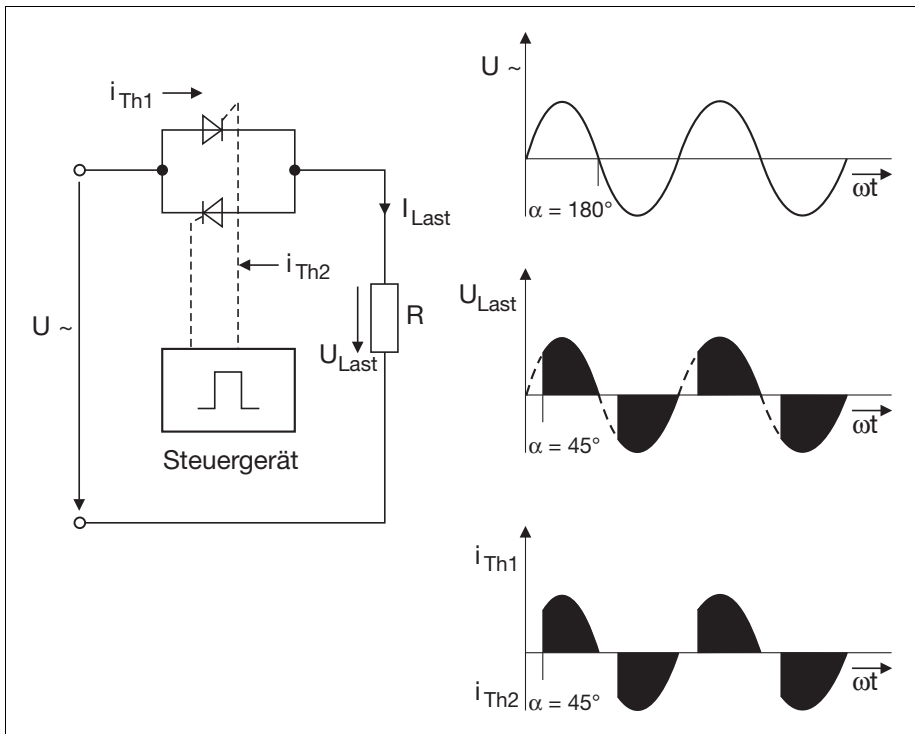


Abb. 3: Strom- und Spannungsverlauf bei Ansteuerung einer ohmschen Last durch Phasenanschnitt

$U \sim$ = Netzspannung

U_{Last} = Lastspannung

I_{Last} = Laststrom

i_{Th1} = Laststrom über Thyristor 1

i_{Th2} = Laststrom über Thyristor 2

α = Phasenanschnittwinkel

ωt = zeitabhängiger Phasenwinkel

2 Der Thyristor-Leistungssteller

Man bezeichnet den Winkel zwischen dem Nulldurchgang der Netzspannung und dem Zünden der Thyristoren als Phasenanschnitt- oder Steuerwinkel α . Durch Verändern des Steuerwinkels kann der Mittelwert der Wechselspannung am Lastwiderstand R stufenlos zwischen ihrem Maximalwert bei $\alpha = 0^\circ$ el und 0V bei $\alpha = 180^\circ$ el variiert werden.

In Abb. 3 sind die Verhältnisse für den Steuerwinkel $\alpha = 45^\circ$ el dargestellt. Bei $\alpha = 0^\circ$ el liegt Vollaussteuerung vor, d. h. die Netzspannung liegt ohne Unterbrechung am Verbraucher an. Im Gegensatz dazu fällt bei $\alpha = 180^\circ$ el die Spannung während der ganzen Halbwelle als Sperrspannung über dem Thyristormodul ab. Bei einem Winkel von 45° el kennzeichnet die gestrichelte Linie des Spannungsverlaufs den hochohmigen Zustand des Thyristors.

Geeignet ist die Betriebsart für ohmsche, induktive und ohmsch-induktive Lasten. Im ersten Fall sind Laststrom und -spannung phasengleich, in den beiden anderen Fällen eilt der Strom der Spannung nach. Für Transformatorenlasten sowie die Strombegrenzungsfunktion ist beim Thyristorsteller von JUMO ein sogenannter Softstart eingebaut, der sicherstellt, dass beim allerersten Einschalten der Last keine unzulässig hohen Ströme fließen. Hierbei wird der dem Reglersignal entsprechende Phasenanschnittwinkel von $\alpha = 180^\circ$ el ausgehend langsam erreicht.

Die Vorteile der Phasenanschnittsteuerung liegen in der feinen Energiedosierung und einer kurzen Reaktionszeit, womit sie für extrem schnelle Regelstrecken eingesetzt werden kann. Ferner lässt sich hier eine Strombegrenzung durchführen.

Nachteilig bei dieser Betriebsart sind die durch den steilen Flankenanstieg der angeschnittenen Netzspannungshalbwellen entstehenden Oberwellen und die damit verursachten HF-Störungen. Das Auftreten einer Blindleistung, selbst bei ohmscher Last, stellt einen weiteren Nachteil dar. Sie wird bei Widerstandslasten allein durch die Anschnittsteuerung hervorgerufen und wird folglich als Steuerblindleistung bezeichnet.

Das Entstehen der Steuerblindleistung wird verständlich, wenn man einmal die Fourier-Zerlegung der angeschnittenen Stromhalbwellen betrachtet. Diese können als Überlagerung von Sinusfunktionen unterschiedlicher Frequenz - einer Grundschiwingung und Oberschwingungen - dargestellt werden. Die Phasenverschiebung der Grundschiwingung des Stromes gegenüber der Lastspannung führt zur erwähnten Blindleistung.

2 Der Thyristor-Leistungssteller

2.3.2 Impulsgruppenbetrieb

Bei dem Impulsgruppenbetrieb werden komplette Sinuszüge der Netzspannung durchgeschaltet bzw. gesperrt. In dieser Betriebsart wird die Leistung am Verbraucher über das Taktverhältnis dosiert, welches von einem stetigen Ausgangssignal eines Ansteuergerätes (z. B. elektronischer Regler) beeinflusst wird.

Das Taktverhältnis ist wie folgt definiert (Abb. 4):

$$\text{Taktverhältnis} = \frac{\text{Einschaltzeit } T_e}{\text{Taktzeit } T} \quad (1)$$

Daraus lässt sich mit $P = P_{\text{max}} \cdot \frac{T_e}{T}$ die der Last zugeführte Leistung ermitteln.

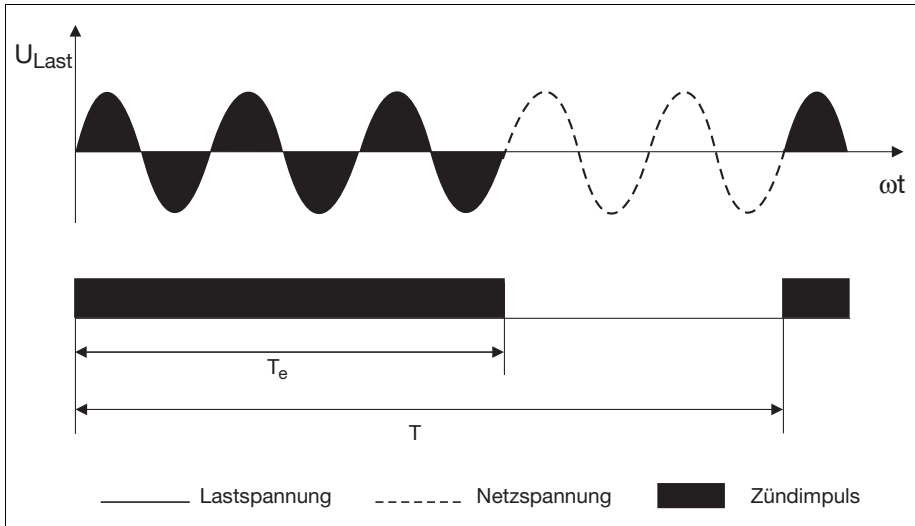


Abb. 4: Impulsgruppenbetrieb

Thyristor-Leistungssteller von JUMO bieten die Möglichkeit, zwischen einer festen Taktzeit von 500ms und einer variablen Taktzeit auszuwählen, wobei im zweiten Fall von der Thyristorelektronik stets die zum geforderten Stellgrad schnellstmögliche Taktzeit realisiert wird.

Bei einer getakteten Leistung von 50 % beispielsweise bedeutet dies, dass jeweils auf einen Sinuszug Stromfluss ein Sinuszug Pause folgt. Unter der Annahme einer Netzfrequenz von 50Hz ergibt sich daraus eine Taktfrequenz von 25Hz, was einer Taktzeit von 40 ms entspricht.

Der Phasenanschnittsteuerung kommt die Betriebsart mit variabler Taktzeit wegen der kurzen Impulsgruppen am nächsten. Durch die Wahl einer variablen Taktzeit kann der Thyristorsteller die Leistung fein dosieren und schnell reagieren. Deshalb ist sie für schnelle Regelstrecken geeigneter als die feste Taktzeit.

Die feste Taktzeit wird hauptsächlich bei Trafolast und in der Master-Slave-Sparschaltung (Abschnitt 6.1.2.3) angewendet.

Beim Einsatz von Leistungsstellern, die nach dem Nullspannungstaktprinzip arbeiten, sollte man darauf achten, dass immer vollständige Sinuszüge geschaltet werden.

2 Der Thyristor-Leistungssteller

Damit ist sichergestellt, dass keine Gleichstromanteile auftreten, welche das Netz oder vorgeschaltete Transformatoren stark belasten würden.

Gegenüber dem Phasenanschnittverfahren ergeben sich folgende Vorteile.

- Da die Thyristoren bei Widerstandslasten stets im Spannungsnulldurchgang gezündet werden, kommt es nur zu minimalen Funkstörungen.
- Der Laststrom ist rein sinusförmig und daher werden keine Oberwellen erzeugt.
- Das Netz wird nicht - wie im Fall des Phasenanschnittbetriebes - induktiv belastet, wenn ausschließlich ohmsche Verbraucher angesteuert werden. Hier ergibt sich kein nachteiliger Blindstrom, der eine Blindleistung hervorrufen kann.

Als Nachteil sind die durch getaktete Verbraucher entstehenden Spannungsschwankungen auf der Netzleitung zu erwähnen, welche bei einem zu schwach ausgelegten Netz auftreten können. Dieser als Spannungsflicker bezeichnete Sachverhalt bewirkt bei am gleichen Netz angeschlossenen Beleuchtungsanlagen unangenehme Lichtintensitätsschwankungen. Grenzwerte hierzu sind der EN 61 000-3-3 zu entnehmen.

Durch das Schalten im Nulldurchgang kommt es bei Trafolasten zum sogenannten „Rush-Effekt“. Bei diesem Effekt kommt das Eisen des Transformators in die magnetische Sättigung, wodurch der Primärstrom im wesentlichen nur noch durch den ohmschen Anteil der Primärwicklung begrenzt wird. Der Einschaltstrom erreicht dabei Werte von ungefähr dem 50fachen des Nennstromes.

Um auch bei Trafolast die Vorteile des Impulsgruppenbetriebes zu nutzen - beispielsweise die geringe Blindleistung - ist die Betriebsart „Impulsgruppenbetrieb mit Anschnitt der ersten Netzspannungshalbwelle“ möglich (Abb. 5). Der Ansteuerwinkel für die jeweils erste Halbwelle einer zusammenhängenden Impulsgruppe - man bezeichnet ihn deshalb auch α_{Start} - kann zwischen 0° el und 90° el eingestellt werden, um eine optimale Anpassung an den verwendeten Transformator zu erzielen.

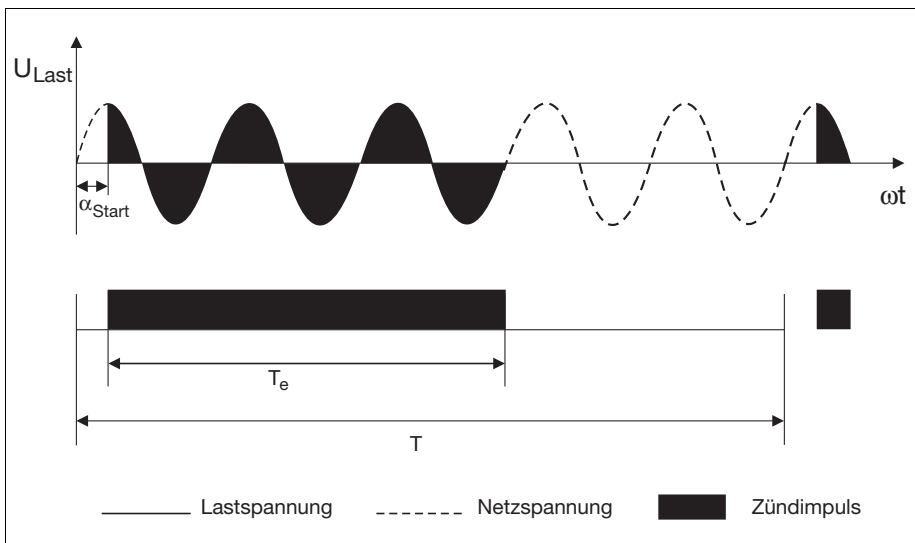


Abb. 5: Impulsgruppenbetrieb mit Anschnitt der ersten Netzspannungshalbwelle

2 Der Thyristor-Leistungssteller

2.3.3 Impulsgruppenbetrieb mit Phasenanschnittstart

Diese Betriebsart beginnt mit Softstart bei Phasenanschnittbetrieb. Nach Erreichen einer vollen Netzhalbwellen wird automatisch auf Impulsgruppenbetrieb umgeschaltet.

Ist der Thyristor-Leistungssteller zusätzlich mit einer automatischen Strombegrenzung ausgestattet, wird er solange im Phasenanschnittbetrieb gefahren, bis er beim automatischen Umschalten auf Impulsgruppenbetrieb den einstellbaren Grenzwert des Stromes nicht überschreitet. Für den anschließenden Impulsgruppenbetrieb bei Trafolast lässt sich auch hier durch Einstellung eines Startwinkels α_{Start} zwischen 0° und 90° ein Anschnitt der jeweils ersten Halbwellen eines jeden Impulspaketes durchführen.

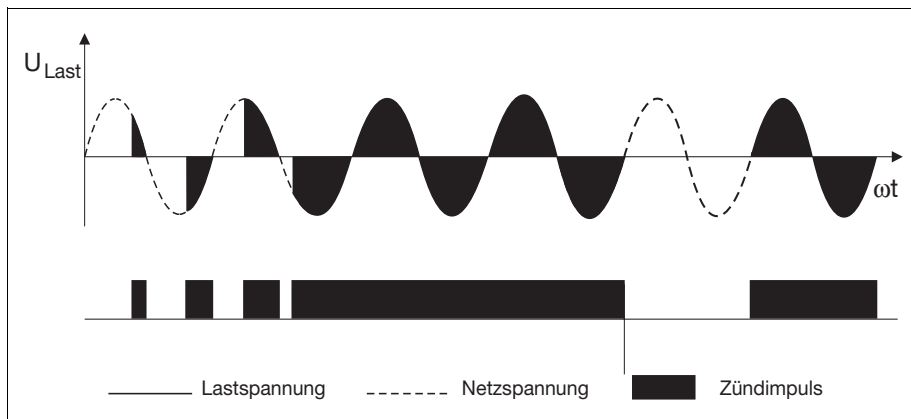


Abb. 6: Impulsgruppenbetrieb mit Phasenanschnittstart

Weiterhin wird beim Impulsgruppenbetrieb die maximale Ausschaltdauer überwacht. Im Falle einer längeren Impulspause beginnt der Thyristor-Leistungssteller beim erneuten Einschalten wieder mit Softstart bei Phasenanschnittbetrieb. Ihren Einsatz findet diese Betriebsart bei der Ansteuerung von Trafolasten und ohmschen Verbrauchern, deren Widerstand sich stark mit der Temperatur ändert (z. B. $R_{\text{kalt}} : R_{\text{warm}} \approx 1 : 16$ bei Kanthal Super Heizelementen).

3.1 Der IGBT als elektronischer Schalter

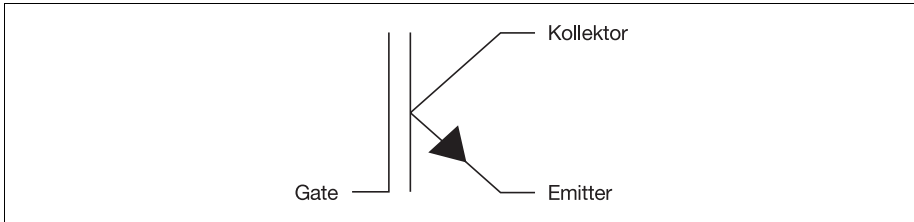


Abb. 7: Schaltsymbol eines IGBT

Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) verhält sich wie ein NPN-Transistor mit einem isolierten MOSFET-Gate als Steuerzone. Konsequenterweise wird der dem Drain des MOSFET's entsprechende Anschluss als Kollektor und der dem Source entsprechende Anschluss als Emitter bezeichnet. Bei einem in Schaltichtung betriebenen IGBT wird nach Anlegen einer positiven Spannung zwischen Gate und Emitter die Strecke Kollektor-Emitter leitend. Die Strecke kann durch Anlegen einer negativen Spannung zwischen Gate und Emitter gesperrt werden, auch wenn in diesem Fall noch ein Strom zwischen Kollektor und Emitter fließt. Der IGBT wird lediglich als Schaltelement genutzt. Ein Betrieb als Linearverstärker ist nicht vorgesehen.

Der IGBT besitzt eine sehr hohe Spannungsfestigkeit und die Sättigungsspannung (Spannung zwischen Kollektor und Emitter im leitfähigen Zustand) ist relativ gering. Er kann an seinem Gate sehr einfach angesteuert werden und seine Umschaltverluste sind akzeptabel.

3 Der IGBT-Leistungssteller

3.2 Der IGBT-Leistungssteller als Stellglied

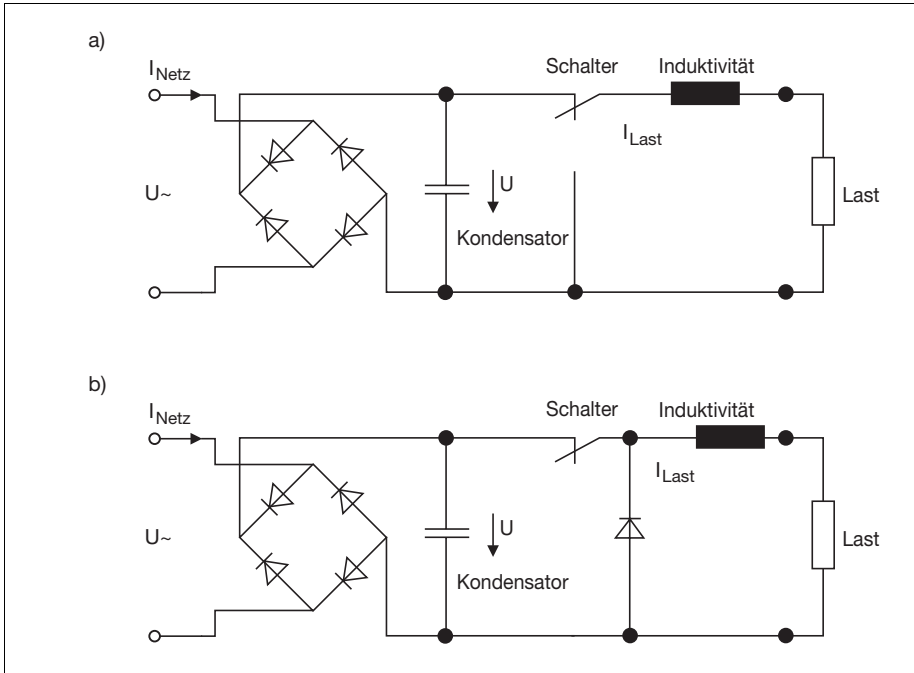


Abb. 8: Schaltungsprinzip des IGBT-Leistungsstellers

Der in Abb. 8a) gezeichnete Wechselschalter lässt sich durch einen einfachen Ausschalter ersetzen, wenn man, wie in b) gezeichnet, eine Diode in die Schaltung integriert.

Für die Zeit, wo der Schalter geschlossen ist, steigt der Strom mit einer durch die Induktivität begrenzten Steilheit an. Wenn er sich öffnet, behält der Drosselstrom seine Richtung und fließt nun über die eingebaute Freilaufdiode. Während dieser Zeit sinkt der Strom solange, bis der Schalter wieder geschlossen wird. Das Ein-Aus-Schaltverhältnis des Schalters bestimmt also den Verlauf des Laststromes.

Anstelle des in b) gezeichneten mechanischen Schalters wird in der Praxis ein IGBT als sogenannter Leistungsschalter eingesetzt.

3 Der IGBT-Leistungssteller

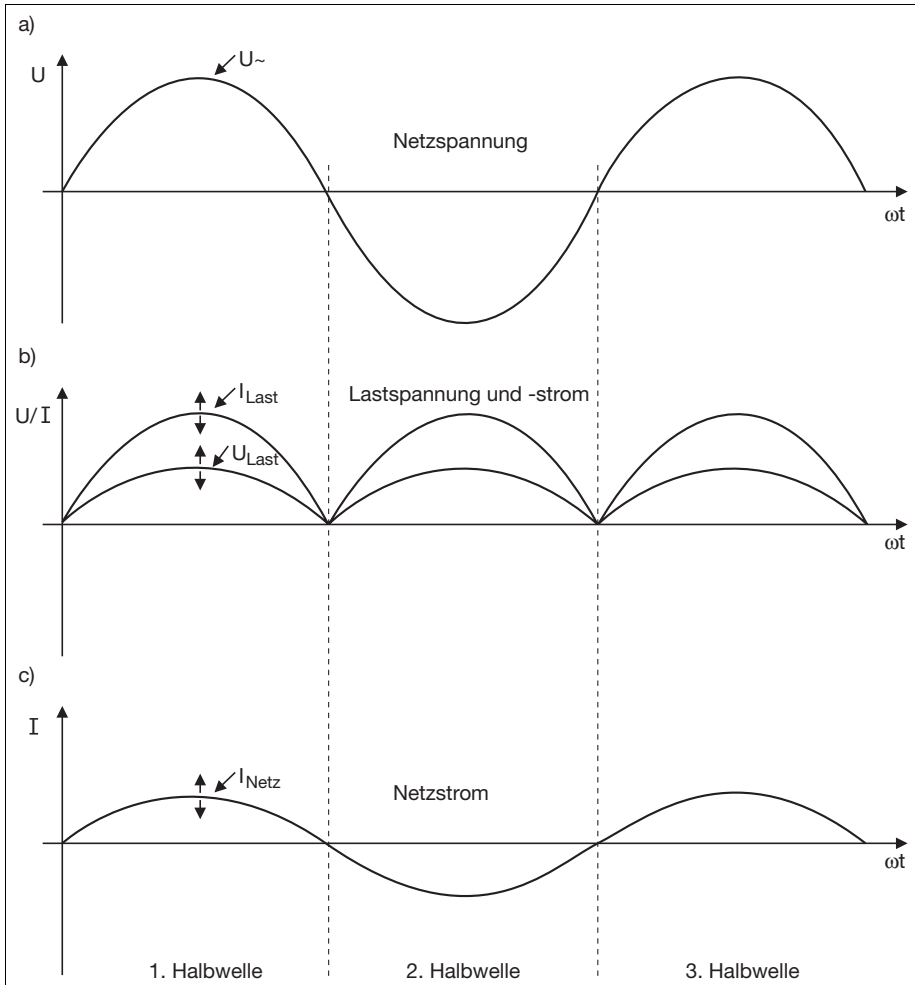


Abb. 9: Netzspannung/-strom und Lastspannung/-strom beim IGBT-Leistungssteller

Der in Abb. 9 b) gezeigte Verlauf für die Lastspannung ist idealisiert. In der Praxis wird ein Toleranzband um den gewünschten Verlauf der Lastspannung gelegt und die tatsächliche Lastspannung durch eine Pulsweitenmodulation in diesem Toleranzband gehalten. Aus diesem Grund ergibt sich ein verrauschtes Signal der Lastspannung, die Amplituden der entstehenden Oberwellen sind aber relativ klein.

Der IGBT-Leistungssteller hat nur eine Betriebsart, nämlich die der Amplitudenregelung. Vereinfacht betrachtet bedeutet dies, der Anwender gibt ein Steuersignal (beispielsweise 0...20 mA) vor und der IGBT-Leistungssteller gibt eine pulsierende Gleichspannung aus, deren Amplitude proportional zu diesem Steuersignal ist. Eine pulsierende Gleichspannung mit einem Effektivwert von 230V wird wie folgt gekennzeichnet: DC230V $\approx$.

3 Der IGBT-Leistungssteller

Bemerkung: Aufgrund des Gleichanteils der Ausgangsspannung darf diese auf keinem Fall einem Transformator als Last aufgeschaltet werden.

Der JUMO IPC ist ein Leistungsumsetzer für die Ansteuerung von Heizlasten, die bislang einen Transformator (Stelltransformator oder Kombination eines Thyristorleistungsstellers mit Trafo) benötigen haben. Bedingt durch seine Arbeitsweise spricht man von einem elektronischen Transformator mit einer pulsierenden Gleichspannung am Ausgang.

Er verbindet die Vorteile eines herkömmlichen Stelltransformators, wie z.B. die Amplitudenregelung, die sinusförmige Netzbelastung, mit den Vorteilen eines Thyristor Leistungsschalters, z.B. Strombegrenzung, Lastüberwachung, unterlagerte Regelungen, u.s.w.

Zwischen Spannungsversorgung und Lastspannung besteht keine galvanische Trennung.

Einsatzgebiete des Umsetzers sind überall dort zu finden, wo große ohmsche Lasten zu schalten sind. Bedingt durch die sogenannte Amplitudenregelung (immer sinusförmige Netzstromaufnahme) werden Synchrontaktsteuerungen (bei Impulsgruppenbetrieb) sowie Blindstromkompensationsanlagen (wegen Steuerblindleistung bei Phasenanschnittbetrieb) überflüssig.

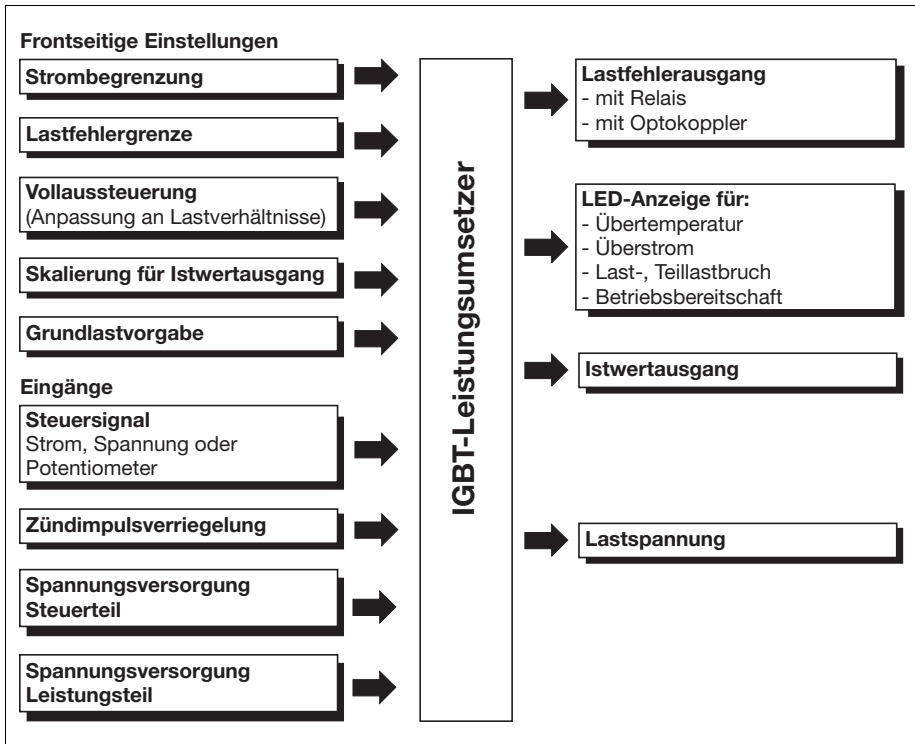


Abb. 10: Blockstruktur

3 Der IGBT-Leistungssteller

Besonderheiten des IGBT-Leistungsstellers:

- Schonender Netzbetrieb bei großen ohmschen Lasten (Flicker)
- Betrieb von Niedervolt-Heizelementen direkt am Versorgungsnetz ohne Anpassungstransformator
- Minimale Oberwellen im Netz der Anlage und geringes Gewicht (Leistungstransformator entfällt)
- Kurzschlussfest beim Einschaltvorgang
- Netzstrom proportional der geforderten Leistung (Amplitudenregelung)
- Ansteuerung unabhängig von Widerstandscharakteristik der Heizelemente
- Ausgleich des Alterungsprozesses bei SIC-Heizstäben
- Minimale Steuerblindleistung
- Kompakte Abmessungen
- Freie Wahl der unterlagerten Regelung U^2 , P , I^2

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

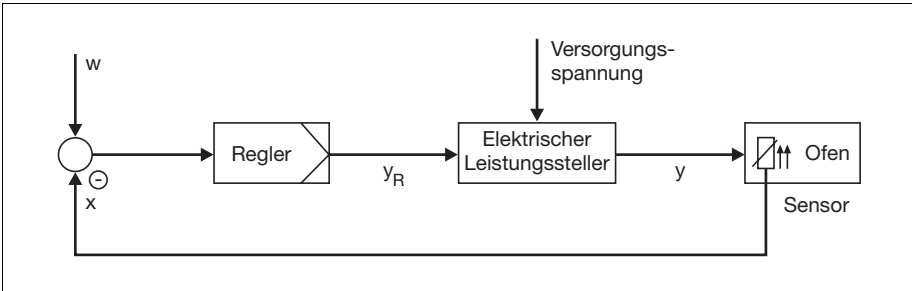


Abb. 11: Regelkreis mit elektronischem Leistungssteller

In diesem Kapitel möchten wir uns einen Elektrischen Leistungssteller im geschlossenen Regelkreis am Beispiel einer Ofenregelung anschauen. An den Leistungssteller ist die Versorgungsspannung angeschlossen. Der Regler bildet aus der Differenz des Sollwertes w der Ofentemperatur und dem Istwert x (dieser wird durch den Sensor im Ofen ermittelt) den Reglerstellgrad y_R . Der Reglerstellgrad kann im Bereich von 0 ... 100 % liegen und wird am Ausgang des Reglers als Einheitssignal, beispielsweise 0 ... 10 V, ausgegeben. Der Reglerstellgrad wird an den Leistungssteller geführt.

Der Leistungssteller hat nun die Aufgabe, dem Heizstab im Ofen Energie zuzuführen und zwar proportional dem Reglerstellgrad:

- Für den **Thyristor-Leistungssteller** im **Phasenanschnittbetrieb** bedeutet dies, er verändert seinen Ansteuerwinkel im Bereich von 180° bis 0° bei einem Reglerstellgrad von 0 ... 100 %
- Wird der **Thyristor-Leistungssteller** im **Impulsgruppenbetrieb** eingesetzt, erhöht er sein Taktverhältnis T von 0 ... 100 % bei einem Reglerstellgrad von 0 ... 100 %
- Ein **IGBT-Leistungssteller** erhöht die Amplitude der Lastspannung von 0 V ... $U_{\text{Last max}}$ bei einem Reglerstellgrad von 0 ... 100 %

Schauen wir uns nun einmal an, wie ein in Abb. 11 gezeigter Elektronischer Leistungssteller auf Spannungsschwankungen im Netz reagiert. Wir möchten diese Betrachtung für einen Thyristor-Leistungssteller anstellen, der im Impulsgruppenbetrieb arbeitet:

Der Regler steuert den Thyristor-Leistungssteller beispielsweise mit $y_R = 50\%$ an. Für den Leistungssteller ergibt sich somit ein Tastverhältnis von 50 %, das bedeutet, er schaltet für die Hälfte der Taktzeit die Vollwellen der Versorgungsspannung auf die Last. Die somit durch den Leistungssteller an den Ofen abgegebene Leistung (beispielsweise $y \triangleq 5\text{ kW}$) reicht gerade aus, um die gewünschte Ofentemperatur (zum Beispiel 250°C) zu halten.

Nun kommt es zu einer Absenkung der Netzspannung von 230 V AC um 10 % auf 207 V AC. Der Thyristor-Leistungssteller erhält weiterhin seinen Reglerstellgrad von 50 % und hat weiterhin das Tastverhältnis von 50 %. Die Netzspannung die nun auf die Last aufgeschaltet wird, ist jedoch um 10 % kleiner. Daraus folgt, dass die in den Ofen geführte Leistung um 19 % kleiner ist, was mit folgender Gleichung gezeigt werden kann:

$$P_{230\text{ V AC}} - \Delta P = \frac{(U_{\sim} - 0,1 \cdot U_{\sim})^2}{R} = \frac{(0,9 U_{\sim})^2}{R} = 0,81 \cdot P_{230\text{ V AC}} \quad (2)$$

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

$P_{230V AC}$: Leistung im Lastwiderstand bei einer Netzspannung U von 230V AC

ΔP : Leistungsabsenkung durch verminderte Netzspannung

R : ohmscher Widerstand der Last

Die um 19 % kleinere Energiezufuhr bewirkt nun ein Absinken der Ofentemperatur.

Eine stetige Temperaturkonstanz ist nicht mehr gegeben. Der Regler erkennt über den relativ trägen Temperaturregelkreis die Regelabweichung und erhöht seinen Stellgrad (y_P) solange, bis die ursprüngliche Temperatur des Ofens (250°C) wieder erreicht ist.

Um die Leistungsschwankungen bei variierender Netzspannungen **zu verhindern**, ist in den Leistungsstellern eine **unterlagerte Regelung** vorhanden. Sie gleicht Schwankungen in der Energiezufuhr sofort aus. Dies hat zur Folge, dass der Steller an seinem Ausgang (y) stets eine Leistung abgibt, die seinem Eingangssignal (y_P) proportional ist. Das Prinzip der unterlagerten Regelung ist in Abb. 12 gezeigt.

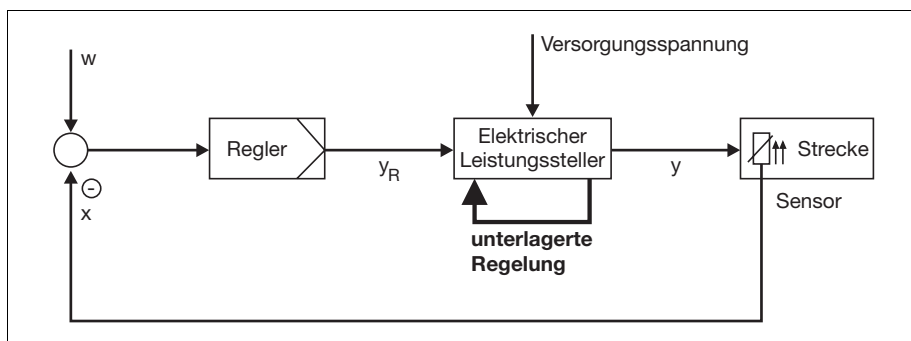


Abb. 12: Prinzip der unterlagerten Regelung

Man unterscheidet zwischen U^2 -, I^2 - und P -Regelung. In den meisten Anwendungen wird die U^2 -Regelung angewandt. Jedoch gibt es in manchen Anwendungen regelungstechnische Vorteile, wenn man die I^2 - bzw. P -Regelung anwendet.

Die drei verschiedenen Arten der unterlagerten Regelung werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

4.1 U²-Regelung

Betrachtet man die Leistung P_{Last} an einer ohmschen Last, ergibt sich diese aus der Lastspannung U_{Last} und dem ohmschen Widerstand R wie folgt:

$$P_{\text{Last}} = \frac{U_{\text{Last}}^2}{R} \quad (3)$$

Aus Gleichung 3 ist ersichtlich, dass sich bei einem konstanten Lastwiderstand die Leistung am Lastwiderstand proportional zu U_{Last}^2 verhält.

$$P_{\text{Last}} \sim U_{\text{Last}}^2 \quad (4)$$

Nun regelt ein Leistungsteller mit U²-Regelung das Quadrat der Lastspannung proportional zu seinem Eingangssignal (z. B. 0 ... 20 mA).

$$U_{\text{Last}}^2 \sim \text{Eingangssignal des Leistungsstellers} \quad (5)$$

Gleichung 5 eingesetzt in 4 zeigt, dass die Leistung am Lastwiderstand proportional zum Eingangssignal des Leistungssteller ist.

$$P_{\text{Last}} \sim \text{Eingangssignal des Leistungsstellers (0 ... 20 mA)} \quad (6)$$

Bei Heizelementen mit positivem Temperaturkoeffizienten (TK), bei denen der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur größer wird, setzt man bevorzugt einen Leistungsteller mit einer unterlagerten Spannungsregelung (U²-Regelung) ein (Abb. 13).

Solche Widerstandsmaterialien sind z. B.

- Kanthal-Super
- Wolfram
- Molybdän
- Platin
- Quarzstrahler

Ihr Kaltwiderstand ist wesentlich geringer als ihr Warmwiderstand (Faktor 6 ... 16). Die Heizelemente werden meist bei Temperaturen über 1000°C eingesetzt.

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

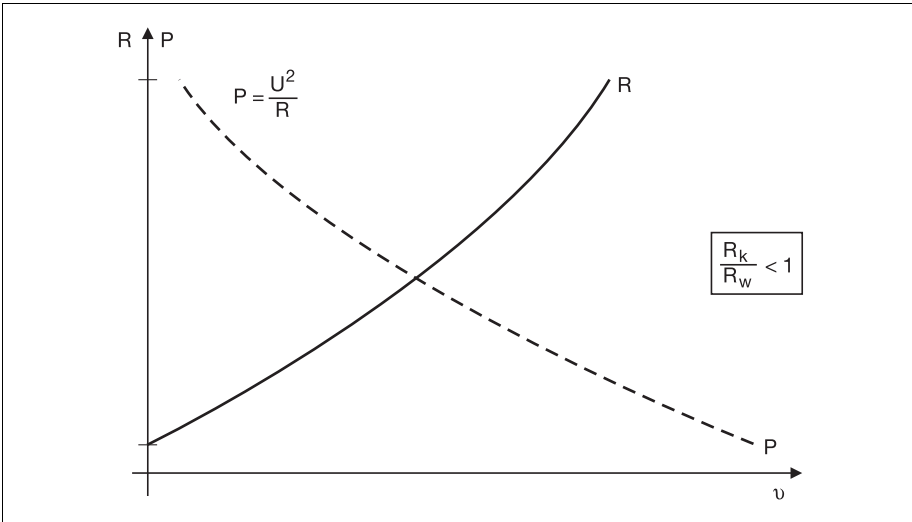


Abb. 13: Heizelement mit positivem TK

Für den Anfahrvorgang benötigen Leistungssteller eine Strombegrenzung. Durch den konstanten Strom und den steigenden Widerstand steigt zunächst die dem Heizelement zugeführte Leistung proportional zu R ($P = I^2 \cdot R$).

Wenn der Strom den eingestellten Grenzwert unterschreitet, tritt die automatische Strombegrenzung außer Kraft und der Steller arbeitet mit der unterlagerten U^2 -Regelung, d. h. mit zunehmendem Widerstand wird bei konstanter Spannung die dem Heizelement zugeführte Leistung

$P_{\text{Last}} = \frac{U_{\text{Last}}^2}{R}$ automatisch verringert.

Dieser Effekt wirkt sich unterstützend auf den gesamten Regelkreis aus. Je mehr sich die Ofentemperatur dem eingestellten Sollwert nähert, desto geringer wird die dem Ofen zugeführte Leistung (bei gleicher Lastspannung). Allein durch den Steller geschieht somit das Anfahren an den Sollwert gebremst. Ein eventuell starkes Überschwingen der Temperatur wird gedämpft.

Weitere Anwendungen der U^2 -Regelung sind Beleuchtungsanlagen: hier ist die Lichtstärke proportional zu U^2 .

Widerstandsmaterialien mit einem TK von ungefähr 1. Dazu gehören Heizelemente aus Nickel/Chrom, Konstantan usw. Es bestehen hier keine speziellen Anforderungen an den Thyristorsteller (z. B. Strombegrenzung). Die Kennlinie eines Heizelementes mit $TK \approx 1$ zeigt Abb. 14.

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

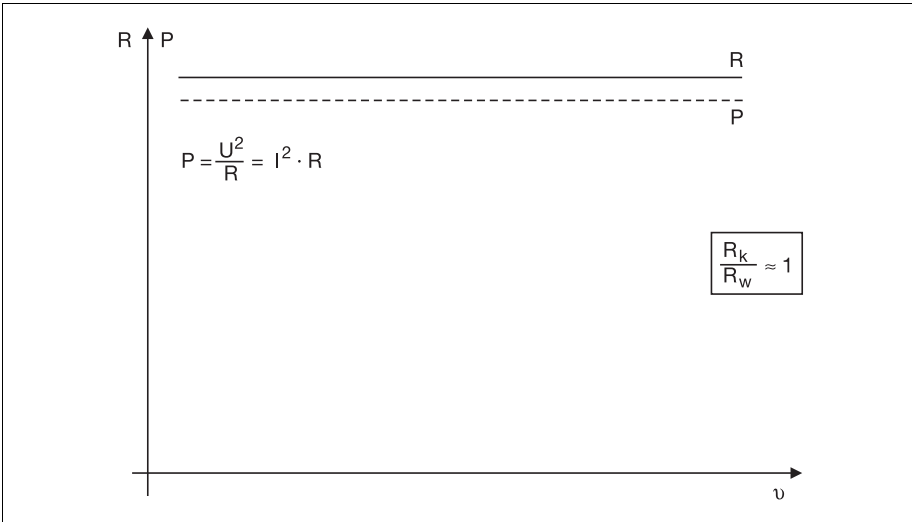


Abb. 14: Heizelement mit $TK \approx 1$

4.2 I^2 -Regelung

Betrachten wir nun die Leistung P_{Last} an einer ohmschen Last in Abhängigkeit des Laststromes I_{Last} und dem ohmschen Widerstand R , ergibt sich folgende Gleichung:

$$P_{\text{Last}} = I_{\text{Last}}^2 \cdot R \quad (7)$$

Aus Gleichung 7 ist ersichtlich, dass sich bei einem konstanten Lastwiderstand die Leistung am Lastwiderstand proportional zu I^2 verhält.

$$P_{\text{Last}} \sim I_{\text{Last}}^2 \quad (8)$$

Nun regelt ein Leistungsteller mit I^2 -Regelung das Quadrat der Lastspannung proportional zu seinem Eingangssignal.

$$I_{\text{Last}}^2 \sim \text{Eingangssignal des Leistungsstellers} \quad (9)$$

Gleichung 9 eingesetzt in 8 zeigt, dass die Leistung am Lastwiderstand proportional zum Eingangssignal des Leistungsstellers ist.

$$P_{\text{Last}} \sim \text{Eingangssignal des Leistungsstellers (0 ... 20 mA)} \quad (10)$$

Die Stromregelung (I^2 -Regelung) erweist sich als vorteilhaft bei Heizelementen mit negativem TK, bei denen der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur kleiner wird (Abb. 15).

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

Dieses Verhalten zeigen beispielsweise Nichtmetalle wie Graphit oder Glasschmelzen. Eine Glasschmelze wird meist nicht über Heizstäbe erwärmt, sondern man lässt einen Strom durch das Schmelzgut fließen, wobei die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme direkt im zu schmelzenden Material geschieht. Dabei erfolgt die Stromzuführung über Elektroden.

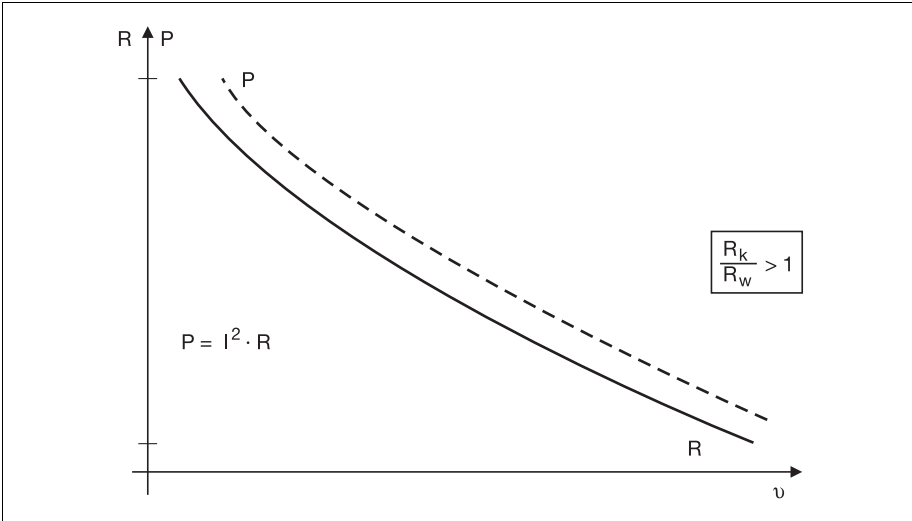


Abb. 15: Hezelement mit negativem TK

Durch die Leistungsbeziehung $P = I^2 \cdot R$ kann man hier durch die I^2 -Regelung den gleichen reglerunterstützenden Effekt erzielen, wie bereits bei der U^2 -Regelung beschrieben. D. h. bei konstantem Strom wird mit steigender Temperatur die dem regelungstechnischen Prozess zugeführte Leistung durch den abnehmenden Widerstand automatisch verringert.

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

4.3 P-Regelung

Bei der Leistungsregelung (P-Regelung) wird stets das Produkt aus $U \cdot I$ ausgeregelt. Hierbei besteht ein exakt linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsleistung und der Eingangssignalsteuerung (z. B. 0 ... 20mA) des Thyristor-Leistungsstellers.

Ein typisches Einsatzgebiet dieser unterlagerten Regelung sind Heizelemente mit Langzeitalterung und gleichzeitig temperaturabhängiger Widerstandsänderung, wie dies bei Siliziumkarbid der Fall ist (Abb. 16).

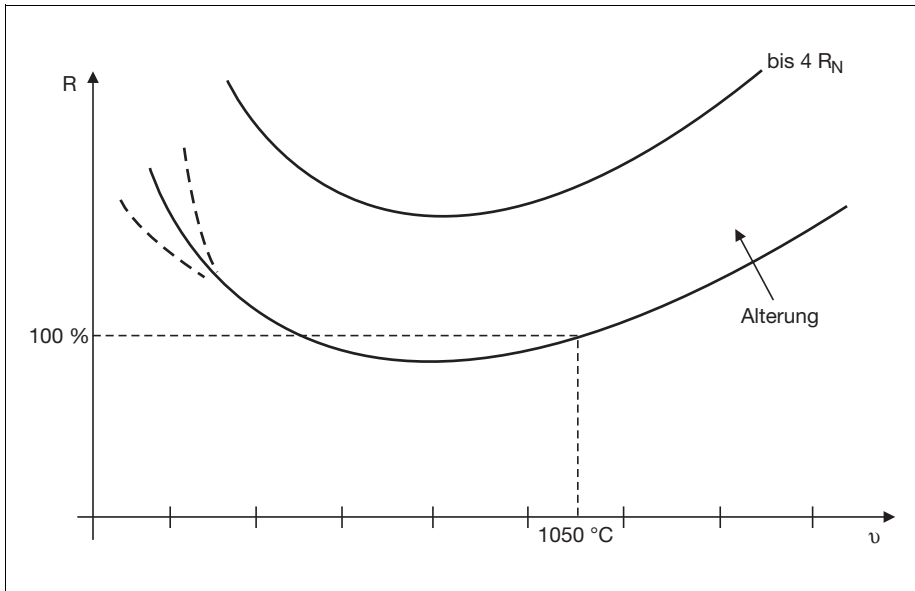


Abb. 16: Widerstandsänderung bei Siliziumkarbid

Bei Siliziumkarbid-Heizstäben vergrößert sich der Nennwiderstand durch Langzeitalterung bis zum Faktor 4. Bei der Dimensionierung muss hier der Steller (Thyristor-Leistungssteller wie auch IGBT-Steller) für die doppelte Leistung der Heizelemente ausgelegt werden.

Beim **Thyristor-Leistungssteller** ist zu beachten, dass er für einen aus der Ofenleistung berechneten doppelten Betriebsstrom geeignet ist.

Dies wird im folgenden näher erläutert. Da die Leistung des Heizelementes während des Alterungsprozesses konstant sein soll, gilt

$$(1) \quad P_{Alt} = P_{Neu} = \text{konstant}$$

Alt $\triangleq$ Altzustand des Heizelementes

Neu $\triangleq$ Neuzustand des Heizelementes

weiterhin gilt:

$$(2) \quad P_{Alt} = U_{Alt} \cdot I_{Alt}, R_{Alt} = \frac{U_{Alt}}{I_{Alt}}$$

$$(3) \quad P_{Neu} = U_{Neu} \cdot I_{Neu}, R_{Neu} = \frac{U_{Neu}}{I_{Neu}}$$

4 Geschlossener Regelkreis und unterlagerte Regelungen

Zwischen dem Widerstand im Alt- und Neuzustand besteht die Beziehung

$$(4) \quad R_{\text{Neu}} = \frac{R_{\text{Alt}}}{4}$$

Daraus ergibt sich mit (2) und (3)

$$(5) \quad \frac{U_{\text{Neu}}}{I_{\text{Neu}}} = \frac{U_{\text{Alt}}}{4I_{\text{Alt}}}$$

Damit 1) erfüllt ist, muss also

$$U_{\text{Neu}} = \frac{U_{\text{Alt}}}{2}, \quad I_{\text{Neu}} = 2I_{\text{Alt}} \quad (11)$$

sein, d. h.

$$P_{\text{Neu}} = U_{\text{Neu}} \cdot I_{\text{Neu}} = \frac{U_{\text{Alt}}}{2} \cdot 2I_{\text{Alt}} = U_{\text{Alt}} \cdot I_{\text{Alt}} = P_{\text{Alt}} \quad (12)$$

Der Laststrom des IGBT-Stellers wird für die Stromaufnahme der SiC-Heizung im Neuzustand ausgelegt.

Bei der Lastspannung des Stellers hingegen muss die Spannungsreserve für den Alterungsausgleich berücksichtigt werden. Bei dem zuvor gewählten Beispiel ist dies der Faktor 2.

Beim IGBT-Steller fließt **im Netz** immer ein der tatsächlichen Leistung entsprechender, sinusförmiger Strom. Er ist unabhängig vom Alterungszustand der SiC-Heizung.

Die P-Regelung wird außerdem bei der freitaktenden Sparschaltung im Dreileiternetz (siehe Abschnitt 6.1.2.3) eingesetzt oder wenn Lastwiderstandsänderungen, bedingt durch Teillastbruch, ausgegeregelt werden müssen.

5 Weitere Funktionen von Leistungsstellern

In den vorherigen Kapiteln haben wir den Thyristor- und den IGBT-Leistungsteller und deren Grundfunktionen kennengelernt. Die vielschichtigen Industrie- und Regelprozesse fordern jedoch weitere Funktionen, um beispielsweise den sicheren Betrieb des entsprechenden Anlagenteiles zu gewährleisten. Im folgenden Kapitel werden einige dieser Funktionen beschrieben. Es handelt sich dabei um Funktionen, die, nach jahrelanger Erfahrung bei der Entwicklung von Leistungsstellern und Rückmeldung von Kunden, beim JUMO-Thyristor-Leistungsteller TYA-110 und JUMO-IGBT-Steller IPC, realisiert wurden. Einige Funktionen sind in der Standardversion der Geräte nicht enthalten, sondern als Option erhältlich.

5.1 Lastkreisüberwachung

5.1.1 Teillastbruch

Die Teillastbrucherkennung überwacht den Lastkreis und ist beispielsweise dort sinnvoll, wo mehrere Heizstäbe parallel geschaltet sind (Abb. 17). Bei Defekt (Bruch) eines Heizstabes wird die auftretende Widerstandsänderung durch den elektronischen Vergleich von Spannung und Strom erfasst. Der Schwellenwert dieser Lastfehleranzeige wird üblicherweise durch einen Trimmer eingestellt.

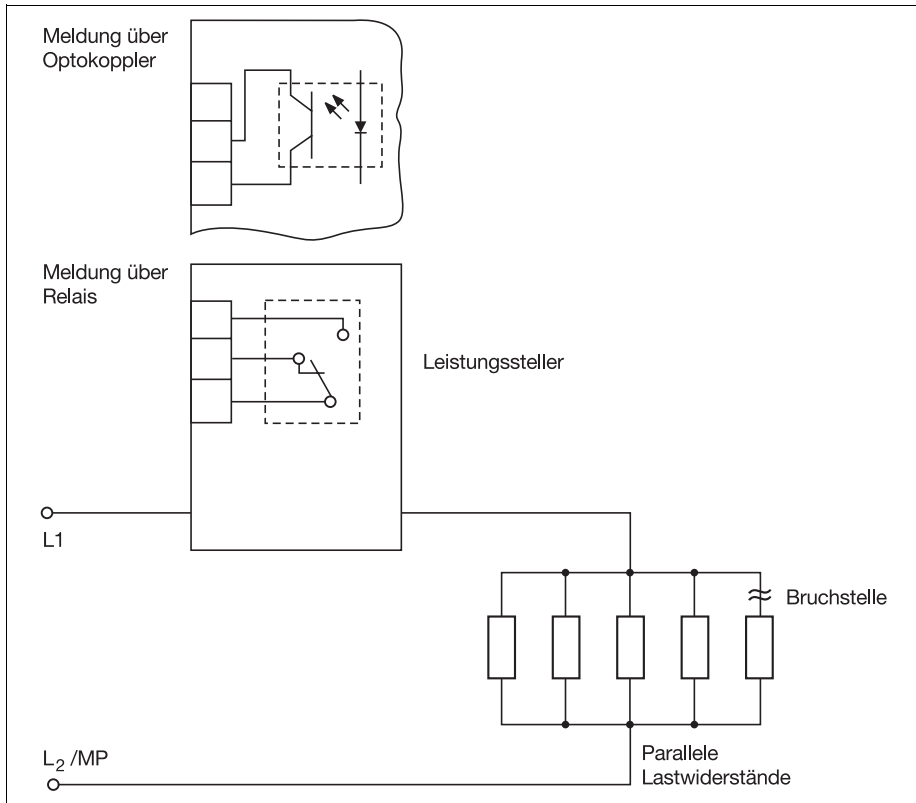


Abb. 17: Überwachung auf Teillastbruch

5 Weitere Funktionen von Leistungsstellern

Der Störfall wird meist frontseitig über die jeweilige LED optisch angezeigt. Als Meldeausgang stehen oft entweder ein potentialfreier Relaiskontakt oder ein Optokopplerausgang zur Verfügung.

5.1.2 Überstromüberwachung

An Stelle der Teillastbruchüberwachung (Unterstromüberwachung) bieten einige Leistungssteller die Möglichkeit, über interne Schalter auf Überstromüberwachung umzuschalten. Damit lässt sich die Überwachung einer Reihenschaltung von mehreren Heizstäben auf Kurzschluss eines oder mehrere Elemente realisieren.

5.2 Ansteuerung von Leistungsstellern

Leistungssteller können entweder mit einem stetigen Stromsignal (z. B. 0 ... 20mA) oder mit einem stetigen Spannungssignal (z. B. 0 ... 10V) angesteuert werden. Oft kann auch ein externes Potentiometer angeschlossen werden, mit dem ein Stellgrad vorgegeben wird.

Üblicherweise wird ein Leistungssteller durch ein Regelgerät mit stetigem Ausgang (Gleichstrom oder -spannung) angesteuert. Genormte Signale sind z. B. 0 ... 20mA, 0 ... 5V, 0 ... 10V oder die sogenannten „Life Zero“-Signale 4 ... 20mA, 1 ... 5V, 2 ... 10V.

5.2.1 Realisierung einer Grundlastvorgabe

Bei einigen thermischen Prozessen ist es unzulässig, dass diese bis auf Umgebungstemperatur abkühlen, folglich muss auch immer elektrische Energie in diese Anlage geführt werden. Zu diesem Zweck realisiert man eine Grundlastvorgabe. Die Grundlast (beispielsweise 33 % der Gesamtleistung) wird in diesem Fall auch dann in die Anlage geführt, wenn keine Ansteuerung durch das vorgeschaltete Regelgerät erfolgt. Über ein internes Potentiometer oder die Ansteuerung eines Eingangs erfolgt meist die Dimensionierung der Grundlast.

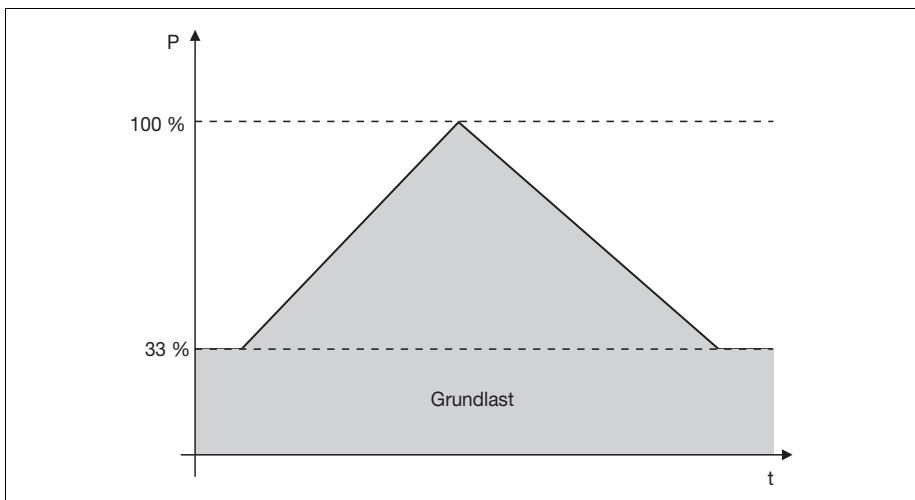


Abb. 18: Darstellung der Grundlast

Mit dem Potentiometer gibt man den Grundlastanteil vor und über den stetigen Eingang lässt sich der verbleibende Stellbereich von der Grundlastvorgabe bis zum Maximum variieren (Abb. 18).

5 Weitere Funktionen von Leistungsstellern

5.2.2 Eingangssignalabschwächung

Durch diese Funktion wird die maximale Leistungsabgabe des Stellers verringert, somit kann die Leistungsabgabe des Stellers dem Ausgangssignal des vorgeschalteten Reglers angepasst werden.

Die Einstellung wird in der Weise durchgeführt, dass dem Steller 100 % Stellgrad vom Regler vorgegeben werden (beispielsweise 10V oder 20mA). Nun wird die abgegebene Leistung des Stellers (meist durch ein Potentiometer am Steller) soweit verringert, bis dieser gerade die gewünschte maximale Leistung abgibt.

5.3 Softstart

Über die Softstartfunktion ist sichergestellt, dass die Last beim ersten Einschalten nicht abrupt mit einer hohen Leistung durch den Steller beaufschlagt wird. Die Leistung wird von 0 bis zum entsprechenden Stellgrad kontinuierlich ansteigend auf die Last gegeben. Diese Funktion bietet zusätzliche Betriebssicherheit bei Trafolast. Der Transformator wird vormagnetisiert und kann anschließend mit der vollen Leistung betrieben werden $\Rightarrow$ der Rush-Effekt wird unterdrückt.

Realisiert wird der Softstart beim **Thyristor-Leistungssteller** im **Phasenanschnittbetrieb**, in dem die Last von einem Ansteuerwinkel $\alpha=180^\circ$ ausgehend mit kleiner werdenden Ansteuerwinkeln ans Netz geschaltet wird.

Ist der Thyristor-Leistungssteller im **Impulsgruppenbetrieb** konfiguriert, schneidet er die ersten Halbwellen der Sinuszüge ebenfalls an, bis er einen Ansteuerwinkel von 0° erreicht hat. Erst die folgenden Sinuszüge werden durchgeschaltet (siehe auch Kapitel 2.3.3).

Der **IGBT-Steller** verändert seinen Stellgrad bekanntlich durch Variation der Spannungs- oder Stromamplitude. Der Softstart ist so realisiert, dass, bei plötzlicher Vorgabe eines veränderten Stellgrades am Stellereingang, die entsprechende Amplitude von 0 auf die entsprechende Größe gebracht wird, die dem Stellgrad entspricht.

5.4 Strombegrenzung

Für Heizelemente, deren Warmwiderstand R_w einem Vielfachen des Kaltwiderstands R_k entspricht (wie beispielsweise Kanthal-Super Elemente mit $\frac{R_w}{R_k} = \frac{15}{1}$), ist die Strombegrenzung unumgänglich.

Der Laststrom nimmt, bei Verwendung der bei diesen Elementen sinnvollen U^2 -Regelung und kaltem Heizelement, einen unzulässig hohen Wert an (dies gilt ebenfalls bei der P-Regelung). In der Praxis wird der maximal zulässige Effektivstrom über einen Trimmer eingestellt und eine LED signalisiert, ob sich der Steller in der Strombegrenzung befindet.

Für den **Thyristor-Leistungssteller** existiert die Strombegrenzung lediglich im Phasenanschnittbetrieb: wenn der Steller sich in die Strombegrenzung bewegt, wird der Ansteuerwinkel nicht weiter verkleinert.

Der **IGBT-Leistungssteller** lässt im Fall einer eintretenden Strombegrenzung seine Stromamplitude de am Ausgang nicht weiter anwachsen.

5 Weitere Funktionen von Leistungsstellern

5.5 Sperreingang (Inhibit)

Bei Ansteuerung dieses binären Eingangs wird der Ausgang des Stellers leistungsfrei geschaltet. Beim **Thyristor-Leistungssteller** geschieht dies, indem die Thyristoren nach der nächsten Halbwelle nicht mehr gezündet werden. Der **IGBT-Leistungssteller** steuert das Gate des IGBT's mit einer negativen Spannung an. Diese sperrt praktisch sofort die Kollektor-Emitter Strecke. Nach der Freigabe durch den externen Kontakt tritt entsprechend wieder die Softstartfunktion in Kraft.

Um jedoch eine Anlage spannungsfrei zu schalten, muss einem elektrischen Leistungssteller generell ein Schütz- oder Hauptschalter vorgeschaltet werden, da andernfalls über die Halbleiterbauelemente (Thyristor oder IGBT) ein minimaler Sperrstrom fließt.

5.6 Istwertausgang

Für den Anschluss eines externen Messinstrumentes ist bei Leistungsstellern oft ein Istwertausgang vorhanden. Mit diesem kann die Größe des Leistungsstellerausganges (U^2 , I^2 oder P) als Einheitssignal ausgegeben werden.

5.7 Externe Betriebsartumschaltung beim Thyristor-Leistungssteller

Über die externe Betriebsartumschaltung hat man die Möglichkeit, den Thyristorsteller durch Schließen eines externen Kontaktes vom Impulsgruppenbetrieb in den Phasenanschnittbetrieb umzuschalten. Hierbei treten automatisch, wenn im Gerät eingestellt, die Softstartfunktion sowie die Strombegrenzung in Kraft. Der Steller bleibt nun, solange wie der externe Kontakt geschlossen gehalten wird, in der Betriebsart Phasenanschnitt. Nach Öffnen des Kontaktes schaltet er auf Impulsgruppenbetrieb, falls es eine aktive Strombegrenzung nicht verhindert.

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

Im folgenden Kapitel möchten wir uns den Einsatz der Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz anschauen. Ausgehend von den Kenndaten der Heizelemente, Nennspannung und Nennleistung, soll weiterhin eine Hilfestellung bei der Dimensionierung der Steller gegeben werden.

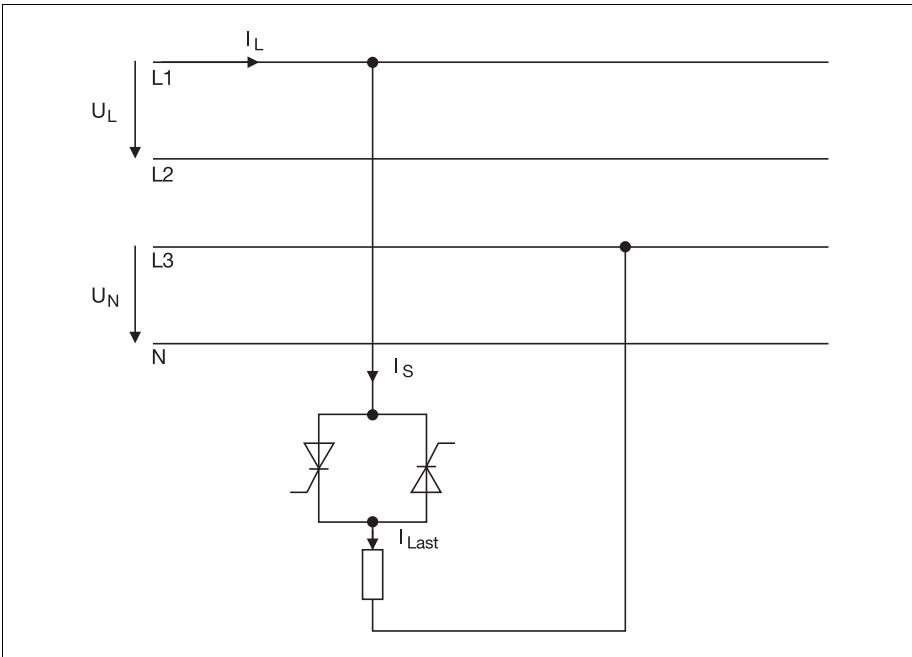


Abb. 19: Die Kenngrößen im Dreiphasensystem

Zu Beginn möchten wir eine einheitliche Verwendungsweise der Kurzzeichen für Ströme und Spannungen in einem Dreiphasensystem definieren (Abb. 19):

U_N : Strangspannung (Spannung zwischen einem Außen- und Nullleiter)

U_L : Leiterspannung (Spannung zwischen zwei Außenleitern)

I_L : Strom im Außenleiter

I_S : Strom über den Steller

I_{Last} : Laststrom

Bemerkung:

In einem Dreiphasennetz 3~/N/400/230V beträgt die Leiterspannung 400V und die Strangspannung 230V.

Weiterhin werden wir in diesem Kapitel die folgenden Abkürzungen verwenden:

$P_{nenn/Last}$: Nennleistung der Last(en)

$U_{nenn/Last}$: Nennspannung der Last(en)

$I_{nenn/Last}$: Nennstrom der Last(en)

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

6.1 Der Thyristor-Leistungssteller im Einphasen- und Dreiphasennetz

Beim Thyristor-Leistungssteller sind die wichtigsten Kenngrößen die Lastnennspannung und der Laststrom. Um uns der Bedeutung dieser Größen bewusst zu werden, schauen wir uns den Einphasenbetrieb an (Abb. 21).

6.1.1 Der Einphasenbetrieb Phase/N und Phase/Phase

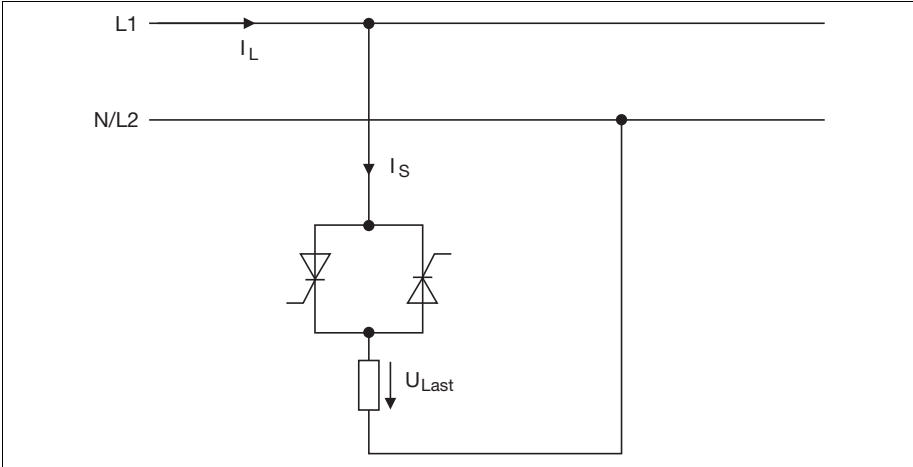


Abb. 20: Einphasenbetrieb (Phase/N oder Phase/Phase)

Abb. 20 zeigt den Einphasenbetrieb eines Thyristor-Leistungsstellers. Betreibt man den Steller zwischen Phase und N, liegt am Steller, und somit an der Last, die Strangspannung an. Schliesst man den Steller zwischen zwei Phasen an, wird die Last mit der Leiterspannung beaufschlagt. Die Lastnennspannung des Thyristor-Leistungssteller muss der Strangspannung bzw. der Leiterspannung des Systems entsprechen.

Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes kann aus der Nennspannung ($U_{\text{nenn/Last}}$) und der Nennleistung ($P_{\text{nenn/Last}}$) der Heizelemente der Laststrom berechnet werden. Der Laststrom des Thyristorleistungsstellers I_S muss mindestens dem Nennstrom des Heizelementes entsprechen.

Last zwischen zwei Außenleitern (400V):

$$I_S = \frac{P_{\text{nenn/Last}} [\text{W}]}{U_L} \quad I_L = I_S \quad (13)$$

Last zwischen Außenleiter und Nullleiter (230V):

$$I_S = \frac{P_{\text{nenn/Last}} [\text{W}]}{U_N} \quad I_L = I_S \quad (14)$$

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

6.1.2 Die Leistungssteller im Drehstromsystem

Sehr oft werden Drehstromsteuerungen aus 3 Einphasengeräten aufgebaut. Die möglichen Schaltungsvarianten sollen in diesem Kapitel beschrieben werden.

6.1.2.1 Die 4-Leiterschaltung (Sternschaltung mit herausgeführten Mittelpunkt)

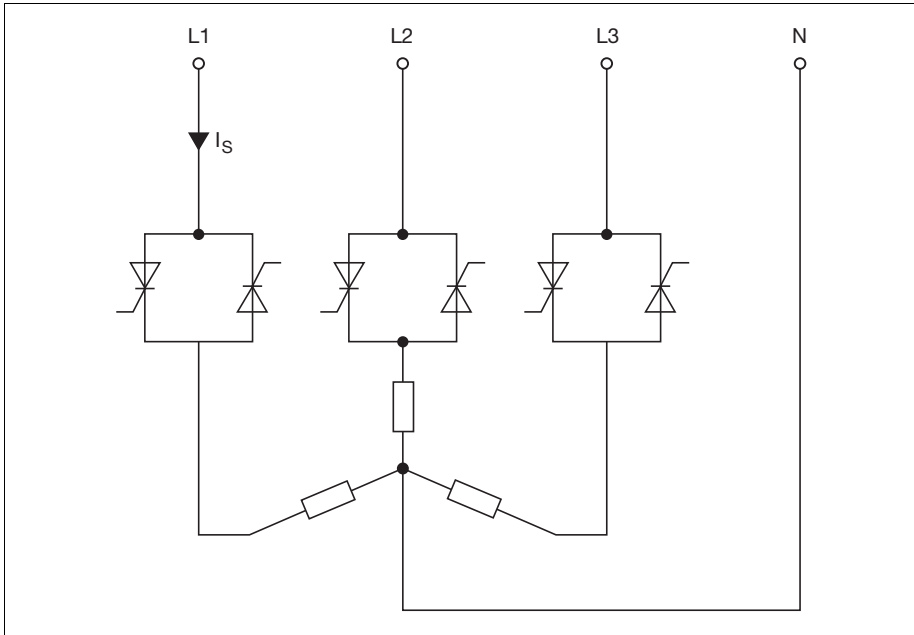


Abb. 21: Die 4-Leiterschaltung

Jeder Thyristor-Leistungssteller schaltet die Strangspannung U_N auf die entsprechende Last. Aus diesem Grund sind Steller mit einer Lastnennspannung in Höhe der Strangspannung zu wählen. Der Lastnennstrom, den jeder Steller liefern muss, berechnet sich wie folgt:

$$I_S = \frac{P_{\text{nenn/Last}}[\text{W}]}{3 \cdot U_N} \quad U_S = U_N \quad (15)$$

Bemerkung: Wie wir bereits definiert haben, ist für $P_{\text{nenn/Last}}$ die Summe der 3 Lasten einzusetzen.

Bei dieser Schaltung kann es unter ungünstigen Umständen, wie Sicherheitsausfall, defekter Heizstab, unsymmetrische Belastung oder Phasenanschnittsteuerung zum Stromfluss im Nullleiter N kommen. Insbesondere bei der Phasenanschnittsteuerung mit Strombegrenzung und einem Phasenwinkel von $\alpha \geq 60^\circ$ el. (z. B. 90° el.) kann der Strom im Nullleiter bis zum zweifachen Wert des Phasenstromes betragen.

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

6.1.2.2 Die 6-Leiterschaltung (Offene Dreieckschaltung)

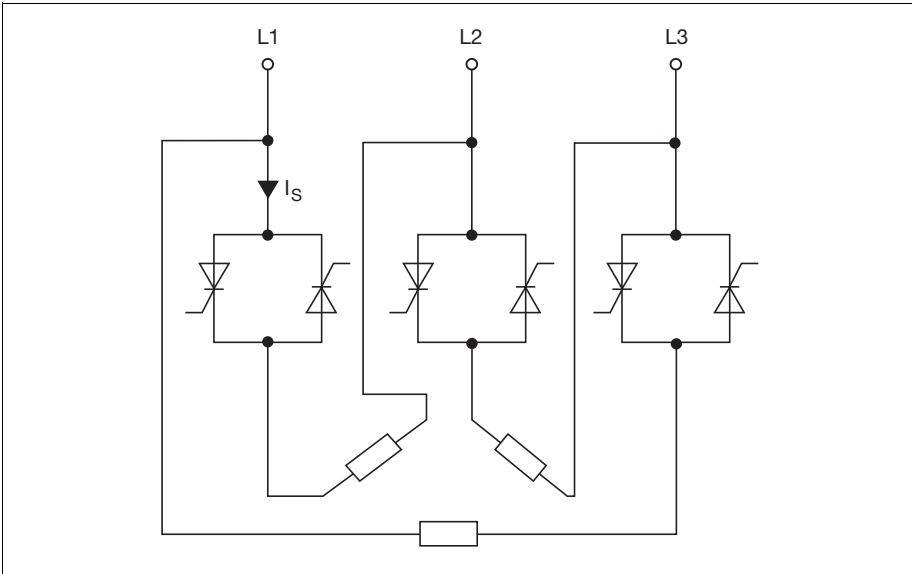


Abb. 22: Die 6-Leiterschaltung

Bei der 6-Leiterschaltung sind die Thyristor-Leistungssteller mit der Last zu einem Dreieck zusammengeschaltet. Auch in dieser Schaltungsvariante können die Steller im Phasenanschnitt- und Impulsgruppenbetrieb eingesetzt werden

An jedem Thyristor-Leistungssteller und an der Last liegt die Leiterspannung U_L an, aus diesem Grund ist ein Steller mit einer Lastnennspannung in Höhe der Leiterspannung zu wählen. Der Lastnennstrom, den der Steller liefern muss, berechnet sich wie folgt:

$$I_S = \frac{P_{\text{nenn/Last}} [\text{W}]}{3 \cdot U_L [\text{V}]} \quad U_S = U_L \quad (16)$$

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

6.1.2.3 Die Sparschaltungen

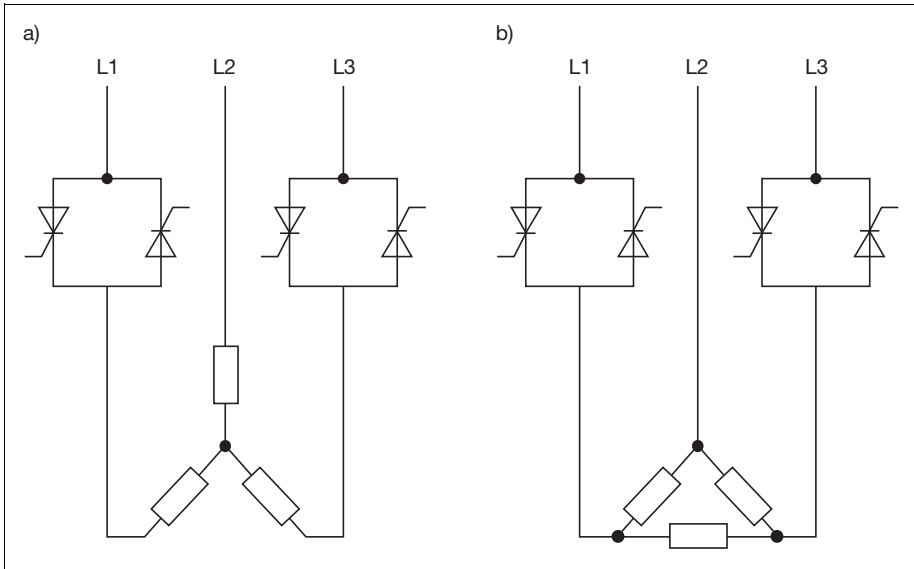


Abb. 23: Sparschaltung für Lasten in Stern a) und Dreieck b)

In einem Dreiphasensystem ohne MP besteht die Möglichkeit, mit zwei Einphasen-Thyristor-Leistungsstellern eine sogenannte Sparschaltung aufzubauen, man kann sich somit den dritten Thyristor-Leistungssteller sparen. Die Last (Stern oder Dreieck) wird an Phase 1 und 3 jeweils über einen Thyristor-Leistungssteller betrieben. Die Phase 2 wird direkt an die Last gelegt (Abb. 23).

Unabhängig davon, ob die Last in Stern oder Dreieck geschaltet ist, müssen die Thyristorsteller immer für die Leiterspannung ausgelegt sein.

Die Thyristor-Leistungssteller müssen im Impulsgruppenbetrieb eingesetzt werden.

Für die Ansteuerung der Sparschaltung gibt es zwei Prinzipien:

Bei der **Master-Slave-Sparschaltung** übernimmt die Ansteuerelektronik des Master-Stellers die eigentliche Stellfunktion und lässt den Slave-Steller synchron dazu takten. In Verbindung mit der festen Taktzeit, der U^2 -Regelung und der Dreieckschaltung der Last lässt sich eine gute Spannungs Konstanz der einzelnen Lastwiderstände, selbst bei Teillastbruch, erzielen. Als Beispiel sei hier die Anwendung in Backautomaten (für Pfannkuchen, Pizza etc.) erwähnt.

Bei der Master-Slave-Version besteht die Möglichkeit, Trafolast zu takten. Der Anschnitt der ersten Netzhälfte (α_{Start}) lässt sich zwischen 0° und 90° el am Mastersteller einstellen. Bei Trafolast empfiehlt es sich weiterhin für das allererste Einschalten die Softstartfunktion zu aktivieren. Als unterlagerte Regelung sollte die U^2 -Regelung gewählt werden.

Obwohl bei der Sparschaltung nur mit zwei Thyristorstellern im Drehstromsystem gearbeitet wird, lässt sich auch hier die Teillastbrucherkennung ohne Einschränkung realisieren. Diese Funktion wird jedoch meist optional angeboten.

Die **freitaktende Version der Sparschaltung** hingegen muss mit einer P-Regelung betrieben werden. Beide Steller erhalten das gleiche Signal des Reglers und regeln die geforderte Leistung aus.

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

Die Steller zünden ihre Thyristoren unabhängig und somit auch nicht unbedingt gleichzeitig voneinander. Aus diesem Grund ist die Leistungsaufteilung auf die 3 Lastwiderstände nicht immer gleichmäßig (auch wenn diese den gleichen ohmschen Widerstand aufweisen). Die Schaltung kommt somit nur für Anwendungen in Frage, bei denen eine stetige symmetrische Lastverteilung nicht erforderlich ist. Ein eventueller Teillastbruch hat mitunter keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Temperaturkonstanz des Regelkreises.

Eine Verwendung bei Trafolast ist nicht möglich.

Der Nennstrom der Thyristor-Leistungssteller beim Einsatz in den beschriebenen Schaltungen muss mindestens

im Stern:

$$I_S = \frac{P_{ges}[W]}{3 \cdot U_N[V]}$$

(17)

bzw.

im Dreieck:

$$I_S = \frac{P_{ges}[W]}{\sqrt{3} \cdot U_L[V]}$$

betragen.

(18)

6.1.2.4 Tabelle zur Dimensionierung von Thyristor-Leistungsstellern im Drehstromsystem

Die folgende Tabelle soll behilflich sein, Ströme, Spannungen und Leistungen am Thyristor-Leistungssteller in einem Dreiphasensystem zu bestimmen. In den **schattiert Feldern** sind die entsprechenden Formeln für ein Dreiphasennetz 3~/N/400/230V angegeben.

	Schaltung				
	2-Leiter L1/L2	2-Leiter L1/N	4-Leiter	6-Leiter	3-Leiter Stern/Dreieck-Sparschaltung
Anzahl der Steller	1	1	3	3	2
Lastnennspannung Thyristorsteller	U _L	U _N	U _N	U _L	U _L
3~/N/400/ 230V	400V	230V	230V	400V	400V
Formel für Thyristorstellerstrom	$I_S = \frac{P_{nenn/Last}}{U_L}$	$I_S = \frac{P_{nenn/Last}}{U_N}$	$I_S = \frac{P_{nenn/Last}}{3 \cdot U_N}$	$I_S = \frac{P_{nenn/Last}}{3 \cdot U_L}$	$I_S = \frac{P_{nenn/Last}}{3 \cdot U_N}$
3~/N/400/ 230V	$I_S(A) = \frac{2,5P_{nenn/Last}(kW)}{U_L}$	$I_S(A) = \frac{4,35P_{nenn/Last}(kW)}{U_N}$	$I_S(A) = \frac{1,45P_{nenn/Last}(kW)}{3 \cdot U_N}$	$I_S(A) = \frac{0,83P_{nenn/Last}(kW)}{3 \cdot U_L}$	$I_S(A) = \frac{1,45P_{nenn/Last}(kW)}{3 \cdot U_N}$
Formel für maximale Leistung	U _L • I _S	U _N • I _S	3 • U _N • I _S	3 • U _L • I _S	3 • U _N • I _S
P _{max} bei 3~/N/400/ 230V und I _S = 150A	60kW	34kW	103kW	180kW	103kW

6.2 Der IGBT-Leistungssteller im Einphasen- und Dreiphasennetz

Beim IGBT-Leistungssteller sind die wichtigsten Kenngrößen die Spannungsversorgung Steuerteil, die Spannungsversorgung Leistungsteil, die Lastspannung und der Laststrom. Um uns der Bedeutung dieser Größen bewusst zu werden, schauen wir uns den Einphasenbetrieb an (Abb. 24).

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

6.2.1 Der Einphasenbetrieb Phase/N und Phase/Phase

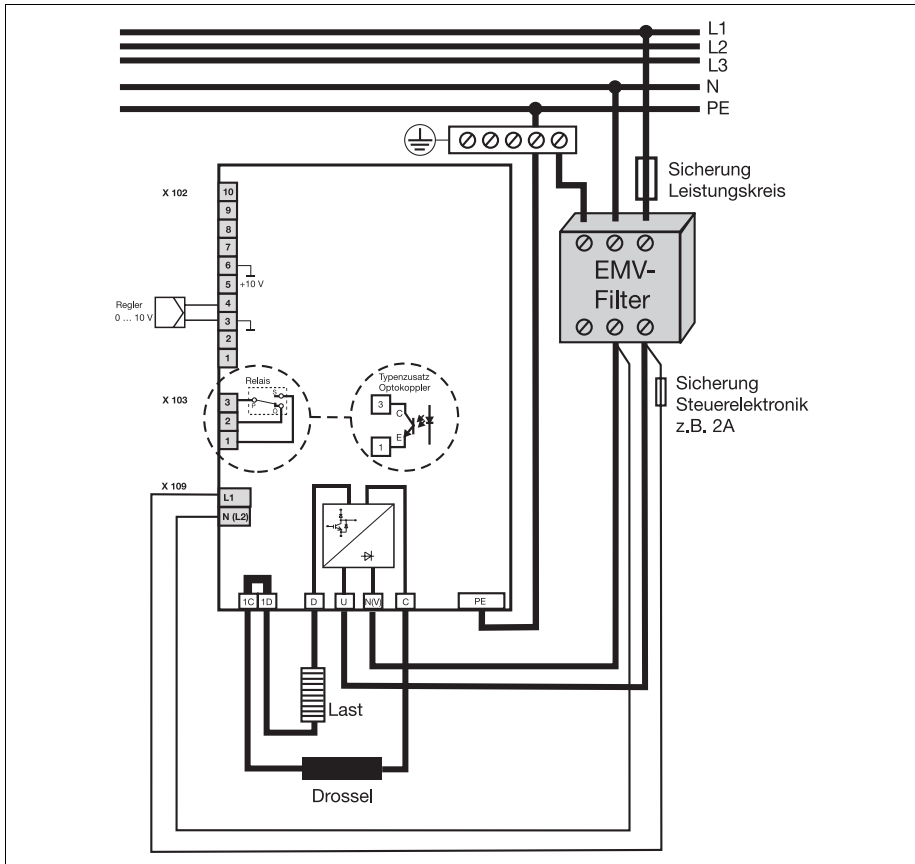


Abb. 24: Einphasenbetrieb (Phase/N) des IPC

Abb. 24 zeigt den Einphasenbetrieb des IGBT-Leistungsstellers IPC. Vor dem Anschluss des IGBT-Leistungssteller muss am Gerät geprüft werden, für welche Spannungen (Spannungsversorgung Steuerteil, Spannungsversorgung Leistungsteil, Lastspannung) und für welchen Strom (Laststrom) dieser ausgelegt ist. In Abb. 25 werden Steuerelektronik und Lastkreis jeweils mit der Strangspannung beaufschlagt. Der IGBT wird nun so angesteuert, dass an der Last die gleichgerichtete Sinusspannung (Klemme 1D gegen D) vorliegt, deren Amplitude über eine Ansteuerung (Klemme 3 gegen 4) verändert werden kann.

Beim IGBT-Leistungssteller ergibt sich im Netz ein anderer Strom als an der Last. Der maximale Netzstrom berechnet sich unter Vernachlässigung der Stellerverluste wie folgt:

$$I_{\text{Netz}} = \frac{P_{\text{nenn/Last}}[\text{W}]}{\text{Spannungsversorgung Leistungsteil}} \quad (19)$$

6 Die Steller im Einphasen- und Dreiphasennetz

Der maximale Laststrom ergibt sich nach der Gleichung

$$I_{\text{Last}} = \frac{P_{\text{nenn/Last}} [\text{W}]}{\text{Lastspannung}} \quad (20)$$

Beispiel: Ein Heizstab mit einer Nennleistung von 5000W und einer Nennspannung von AC 120V wird über einen IGBT-Leistungssteller betrieben, wobei die Spannungsversorgung des Lastkreises 230V AC beträgt.

Der Strom durch den Heizstab beträgt:

$$I_{\text{Last}} = \frac{5000 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 41,7 \text{ A} \quad (21)$$

Der Strom, der im Netz fließt beträgt jedoch:

$$I_{\text{Netz}} \approx \frac{5000 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 21,74 \text{ A} \quad (22)$$

6.2.2 Der IGBT-Leistungssteller im Drehstromsystem

Auch IGBT-Leistungssteller können, um eine symmetrische Lastverteilung auf allen drei Phasen zu erreichen, in einem Drehstromsystem Einsatz finden. Schaltungstechnisch bedeutet dies nichts anderes als 3x Einphasenbetrieb (Phase/N oder Phase/Phase) im Drehstromnetz.

7 Filterung und Entstörung

Zur Vermeidung von Funkstörungen, wie sie z. B. beim Thyristor-Leistungssteller im Phasenanschnittbetrieb entstehen, müssen elektrische Betriebsmittel und Anlagen funkentstört sein.

Die Steuerelektronik der JUMO-Leistungssteller entspricht den EMV-Anforderungen EN 61 326.

Baueinheiten, wie Thyristor-Leistungssteller oder IGBT-Steller haben jedoch für sich alleine keinen Verwendungszweck. Sie erfüllen eine Teilfunktion einer Anlage. Aus diesem Grund muss der Lastkreis des Leistungsstellers mit geeigneten Filtern durch den Errichter der Anlage entstört werden.

Bei Fragen zu Entstörfiltern stehen auf diesem Gebiet spezialisierte Firmen mit entsprechenden Entstörfilterprogrammen zur Verfügung. In der Regel werden die Filter als anschlussfertige Baugruppen angeboten.

8 Verwendete Kurzzeichen

i_{Th1}	= Strom durch Thyristor 1
i_{Th2}	= Strom durch Thyristor 2
I_{Alt}	= Strom durch altes Heizelement
I_{Neu}	= Strom durch neues Heizelement
I_L	= Strom im Außenleiter
I_{Last}	= Laststrom
I_{Netz}	= Netzstrom
I_{Last}	= Amplitude des Laststroms
I_S	= Strom über den Steller
P_{Alt}	= Leistung in altem Heizelement
P_{Last}	= Leistung an der Last
P_{Neu}	= Leistung in neuem Heizelement
R_K	= Kaltwiderstand eines Heizelementes
R_W	= Warmwiderstand eines Heizelementes
T_K	= Temperaturkoeffizient von Heizelementen
U_{Alt}	= Spannung am alten Heizelement
U_N	= Strangspannung
U_L	= Leiterspannung
U_{Last}	= Lastspannung
$U_{Last\ max}$	= Maximale Lastspannung
U_S	= Lastspannung des Stellers
$U_{\sim}$	= Netzspannung
$\hat{U}_{\sim}$	= Amplitude der Netzspannung
W	= Sollwert
x	= Istwert
y	= Stellgrad
y_R	= Reglerstellgrad
α	= Phasenanschnittwinkel
α_{Start}	= Ansteuerwinkel der ersten Halbwelle im Impulsgruppenbetrieb
ωt	= zeitabhängiger Phasenwinkel

Literaturverzeichnis

- [1] F. Blasinger, Thyristorsteller: Das perfekte Stellorgan für elektrische Heizungen; elektrowärme international 50 (1992) B3
- [2] K. Heumann, Grundlagen der Leistungselektronik; Teubner 1989
- [3] M. Burmeister, Thyristor-Steller: Technik und Anwendung; Firmenschrift der Firma M. K. JUCHHEIM GmbH & Co, 1990
- [4] K. Heumann, C. Stumpe, Thyristoren: Eigenschaften und Anwendungen; Teubner 1974
- [5] W. Keuter, Das Stellen und Schalten von Wechselgrößen; Hüthig-Verlag 1982

