

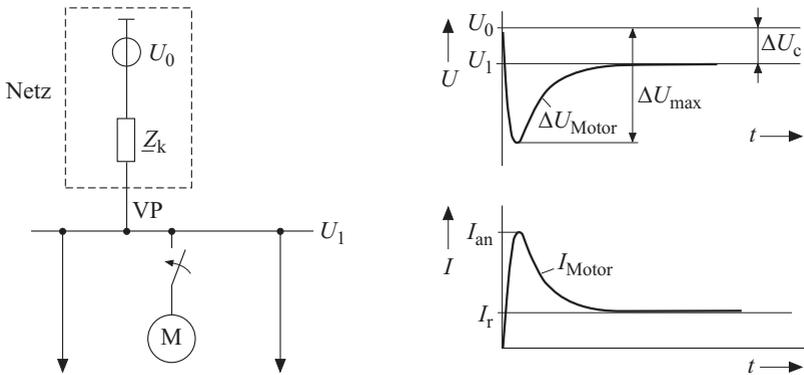
# 6 Spannungsschwankungen und Flicker

## 6.1 Einführung

Die Betriebsspannung am Anschlusspunkt einer Kundenanlage ist nicht konstant; sie ist zeitlichen Schwankungen unterworfen. Ursache dafür ist der an der endlichen Innenimpedanz des Netzes durch den Laststrom hervorgerufene Spannungsfall. Die wirksame Innenimpedanz ist die Kurzschlussimpedanz  $Z_k$ .

Bei der Zuschaltung einer Last, beispielsweise eines Motors, ruft dessen Anlaufstrom  $I_{Motor}(t)$  an der Kurzschlussimpedanz  $Z_k$  des vorgeschalteten Netzes einen Spannungsfall  $\Delta U_{Motor}(t)$  hervor, von dem alle am selben Verknüpfungspunkt VP angeschlossenen Verbraucher beeinflusst werden (**Bild 6.1**). Vor dem Zuschalten des Motors war die Spannung am Verknüpfungspunkt gleich der ungestörten Spannung  $U_0$ . Während des Motoranlaufs ist die Spannung am Verknüpfungspunkt  $U_1(t)$  zeitlich veränderlich. Im stationären Betrieb ist  $U_1$  konstant, jedoch kleiner  $U_0$ . Die bleibende Spannungsabweichung beträgt

$$\Delta U_c = U_1 - U_0 \tag{6.1}$$



**Bild 6.1** Spannungsschwankung beim Motoranlauf

Für die maximale Spannungsänderung gilt:

$$\Delta U_{max} = I_{an} |Z_k| \tag{6.2}$$

$I_{an}$  ist der Maximalwert des Anlaufstroms  $I_{Motor}(t)$ . Für Flickerbetrachtungen rechnet man mit den Halbschwingungseffektivwerten von Strom und Spannung.

Man unterscheidet:

- Spannungsänderung  $\Delta U$   
das ist eine einzelne Änderung des Spannungseffektivwerts, ermittelt über eine Halbperiode
- Spannungsschwankung  $\Delta U(t)$   
das ist eine regelmäßige oder unregelmäßige Folge von Spannungsänderungen

Als Höhe der Spannungsänderung  $\Delta U$  wird die Differenz zwischen den Effektivwerten der Netzspannung vor und nach einer Spannungsänderung verstanden. Im Falle von sinus- oder rechteckförmigen Spannungsänderungen ist  $\Delta U$  die Variationsbreite der Spannungsschwankung. Durch Bezug von  $\Delta U$  auf den ungestörten Effektivwert der Netzspannung  $U$  vor Beginn einer Spannungsänderung erhält man die relative Spannungsänderung  $\Delta U/U$ . Als Bezugswert kann je nach Anwendungszweck auch die Nennspannung  $U_n$  oder die vereinbarte Spannung  $U_c$  gewählt werden.

Spannungsschwankungen können im Drehstromnetz sowohl symmetrisch als auch unsymmetrisch auf die drei Außenleiter verteilt sein. Während der Anlauf oder Betrieb eines Drehstrommotors die drei Außenleiter annähernd symmetrisch belastet, stellen Widerstandsschweißmaschinen meistens und Lichtbogenöfen vornehmlich unsymmetrische Belastungen dar. Symmetrische Lasten bewirken an der Kurzschlussimpedanz des Netzes in allen drei Außenleitern dieselben Spannungsfälle.

Spannungsschwankungen werden u. a. verursacht durch:

- Ein- und Ausschaltvorgänge größerer Lasten
- Motoren größerer Leistung beim Anlauf und bei Laständerungen
- gepulste Leistungen
- Schwingungspaketsteuerungen, Thermostatsteuerungen  
Schwingungspaketsteuerungen werden in einer Vielzahl von Haushaltsgeräten, z. B. in elektronischen Durchlauferhitzern und in Kochstellen zur Leistungssteuerung bzw. -regelung eingesetzt
- Lichtbogenöfen
- Schweißmaschinen
- Windenergieanlagen im Netzparallelbetrieb

In Abhängigkeit vom Betriebsverhalten der Geräte und Einrichtungen ist zu unterscheiden zwischen

- seltenen Spannungsänderungen, z. B. beim Anlauf von Motoren und beim Einschalten größerer Lasten
- häufigen Spannungsänderungen

Hier ist zu unterscheiden zwischen

- regelmäßigen Spannungsänderungen, z. B. beim Betrieb von Direktumrichtern oder beim Betrieb von Schweißmaschinen
- unregelmäßigen Spannungsänderungen, z. B. beim Betrieb von Aufzuganlagen und Kränen oder während der Einschmelzphase beim Lichtbogenofen

Spannungsschwankungen stören den Betrieb empfindlicher Geräte und Einrichtungen. Insbesondere rufen sie Helligkeitsschwankungen in Beleuchtungseinrichtungen, sogenannte Flicker, hervor. „Flicker ist der subjektive Eindruck von Leuchtdichteänderungen.“ Für die nachfolgenden Betrachtungen ist diese Definition der Definition im IEC 161-08-13 „Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung“ vorzuziehen, da die Modellbildung im Flickermeter (Lampen-, Augen/Gehirn-Modell) bereits aus der Definition hervorgeht.

Die Störwirkung von Spannungsschwankungen hängt von der Höhe, der Wiederholrate und der Kurvenform der Spannungsänderungen ab. Ein Maß für die Störwirkung von Helligkeitsschwankungen ist die Flickerstärke  $P_{st}$ . Die Flickerstärke wird mit einem Flickermeter gemessen.

## 6.2 Flickererzeugende Lasten

### 6.2.1 Motoren

Induktionsmotoren erzeugen beim Direkt-Anlauf und bei größeren Laständerungen Leiterströme, die größer als der Nennstrom sind. Für den Anlaufstrom eines Drehstrom-Asynchronmotors gilt beispielsweise  $I_{an}/I_r = 3 \dots 8$ .

Für leicht anlaufende Motoren werden die Nennströme meist nach  $t_a < 500$  ms erreicht. Der zugehörige Spannungsänderungsverlauf kann für die analytische Berechnung (wenn keine anderen Daten bekannt sind) der Flickerstärke als dreieckförmig mit  $t_f = 20$  ms ... 100 ms und  $t_r = 100$  ms ... 400 ms angenommen werden.

Für die Berechnung der relativen Spannungsänderung sind die Scheinleistung und der Phasenwinkel im jeweiligen Lastzustand maßgebend. Die notwendigen Daten können den Herstellerangaben entnommen werden. Dies wird am Beispiel eines 200-kW-Drehstromasynchronmotors (Daten: **Bild 6.2**) erläutert:

Aus der Strom-Drehmoment-Kennlinie (Bild 6.2) erhält man für

$$n/n_{syn} = 0 \text{ (Anlauf)} \quad \Rightarrow \quad I/I_r = I_{an}/I_r = 4,6$$

und damit