

26 Gesteuertes Schalten

Durch gesteuertes Schalten lassen sich unzulässig hohe Überspannungen beim Schalten von Induktivitäten, Kapazitäten und unbelasteten Freileitungen vermeiden. Dazu wird der Augenblick der Stromunterbrechung bzw. der Zuschaltung entsprechend den Schaltbedingungen auf den optimalen Momentanwert der anstehenden sinusförmigen Spannung abgestimmt.

Zum betriebsmäßigen Schalten wird, wie aus **Bild 26.1** zu entnehmen ist, ein Schaltimpuls zunächst auf ein Steuergerät gegeben. Das Steuergerät ermittelt den für den jeweiligen Schaltfall günstigsten Moment der Kontakttrennung oder des Kontaktschließens des Leistungsschalters und löst, unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenzeit des Schalters, den Schaltvorgang zu einem geeigneten Zeitpunkt aus. Um diesen Zeitpunkt zu ermitteln, verfolgt das Steuergerät ständig – oder nach Eingang des Schaltimpulses von der Schaltwarte – den sinusförmigen Verlauf der Leiterspannung. Ist der Leistungsschalter offen und handelt es sich um einen Schließbefehl, so wird der zeitliche Verlauf der Spannung an beiden Klemmen des Schalters registriert.

Da die mechanische Eigenzeit des Schalterantriebs gegebenenfalls von Parametern wie Umgebungstemperatur, Hydraulikdruck oder Federvorspannung, Löschmitteldruck, am Auslöser anstehende Betätigungsspannung etc. abhängig ist, ist das von diesen Parametern abhängige Verhalten des Leistungsschalters dem Steuergerät einprogrammiert. Die jeweiligen Daten werden ihm kontinuierlich zugeführt.

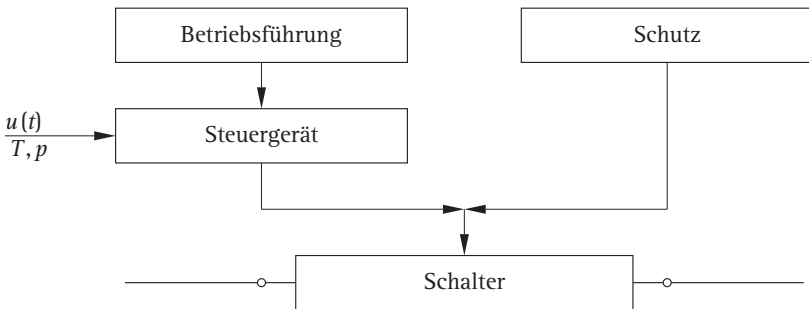


Bild 26.1 Anordnung für gesteuertes Schalten

Einflussgrößen:

p Druck des Lichtbogen-Löschgases bzw. Antriebsdruck

T Umgebungstemperatur

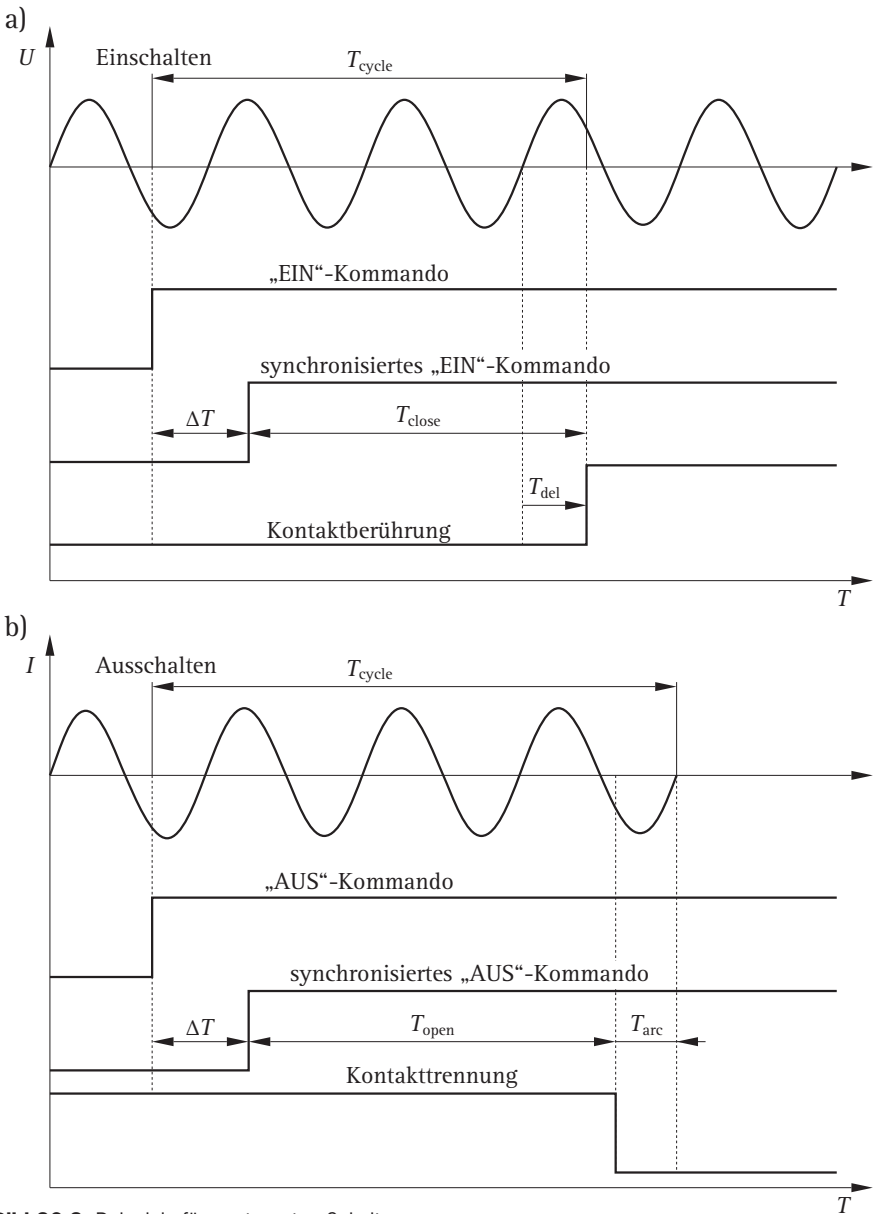


Bild 26.2 Beispiele für gesteuertes Schalten

- a) Ablauf einer Einschaltung
- b) Ablauf einer Ausschaltung

Das Ermitteln und das Warten auf den für den Schaltvorgang günstigsten Zeitpunkt führt zu einer Verzögerung des gesamten Schaltvorgangs um einige Millisekunden. Diese Verzögerung ist im **Bild 26.2** durch die Angabe von ΔT gegenüber dem Ein- bzw. Ausschaltkommando gekennzeichnet. Sie ist für das betriebsmäßige Schalten irrelevant. Da jedoch im Fall eines Fehlers der Leistungsschalter möglichst schnell den Fehlerstrom unterbrechen soll, wird das im Fehlerfall den Schalter auslösende Schutzsignal am Steuergerät vorbeigeführt.

Einen detaillierten Überblick über den Einsatz des gesteuerten Schaltens bieten [79 und 83]. CIGRÉ empfiehlt spezielle Prüfbedingungen für Leistungsschalter, die synchron mit dem Spannungs- oder Stromverlauf schalten [108].

In den Abschnitten 26.1 und 26.2 werden nur die derzeit üblichen Anwendungen diskutiert. Das gesteuerte Schalten von Transformatoren zum Vermeiden von Inrush-Strömen ist bei Transformatoren mit kaltgewalzten Blechen nicht erforderlich, da die Inrush-Ströme heute gebauter Transformatoren keine die Konstruktion gefährdenden Amplituden erreichen.

26.1 Abschalten von Drosselspulen

Wie in den Abschnitten 18.1 und 18.4 dargestellt, treten beim Abschalten von Drosselspulen Überspannungen als Folge von Stromabriss und Wiederzündungen auf.

Die Neigung eines Leistungsschalters, den induktiven Laststrom vor dem natürlichen Nulldurchgang abzureißen, und die Höhe des Abreißstroms nehmen mit wachsender Lichtbogenzeit zu. Daher wäre es angebracht, den Schalter so anzusteuern, dass er Drosselspulen mit einer möglichst kurzen Lichtbogenzeit abschaltet.

Andererseits kommt es bei kurzen Lichtbogenzeiten häufig zum Durchzünden der Schaltstrecke, da der geringe Kontaktabstand nicht ausreicht, die Potentialdifferenz zwischen der netzseitig betriebsfrequent verlaufenden Spannung und der Einschwingspannung der abgeschalteten Drosselspule zu beherrschen. Der Leistungsschalter ist, um eine Wiederzündung zu vermeiden, so anzusteuern, dass die Lichtbogenzeit und damit der Abstand zwischen den öffnenden Kontakten genügend groß ist. Dies ist im Allgemeinen der Fall, wenn die Kontakte sich ≥ 5 ms vor dem natürlichen Stromnulldurchgang trennen.

Für das Abschalten von Drosselspulen werden, um beide Bedingungen zu erfüllen, bei gesteuertem Schalten Leistungsschalter so ausgelöst, dass die Lichtbogenzeiten zwischen 5 ms und 10 ms liegen.

26.2 Aus- und Einschalten von Kapazitäten, Zuschalten langer Freileitungen

Das Abschalten einer kapazitiven Last fällt einem Leistungsschalter zunächst sehr leicht, da ein relativ kleiner Strom zu unterbrechen ist und anschließend die Spannung über die offene Schaltstrecke nur entsprechend dem $(1 - \cos \omega_N t)$ -Verlauf (ω_N Netzfrequenz) ansteigt. Daher wird der Strom häufig unmittelbar nach der Kontakttrennung unterbrochen (Abschnitt 22.1). Eine netzfrequente Halbperiode später steht jedoch über der Schaltstrecke die Spannungsamplitude $\geq 2 \cdot \hat{u}_N$ an. Der Anstieg der Spannung auf diesen Wert kann wegen der eventuell noch zu geringen Kontaktentfernung zu Wieder- oder Rückzündungen führen.

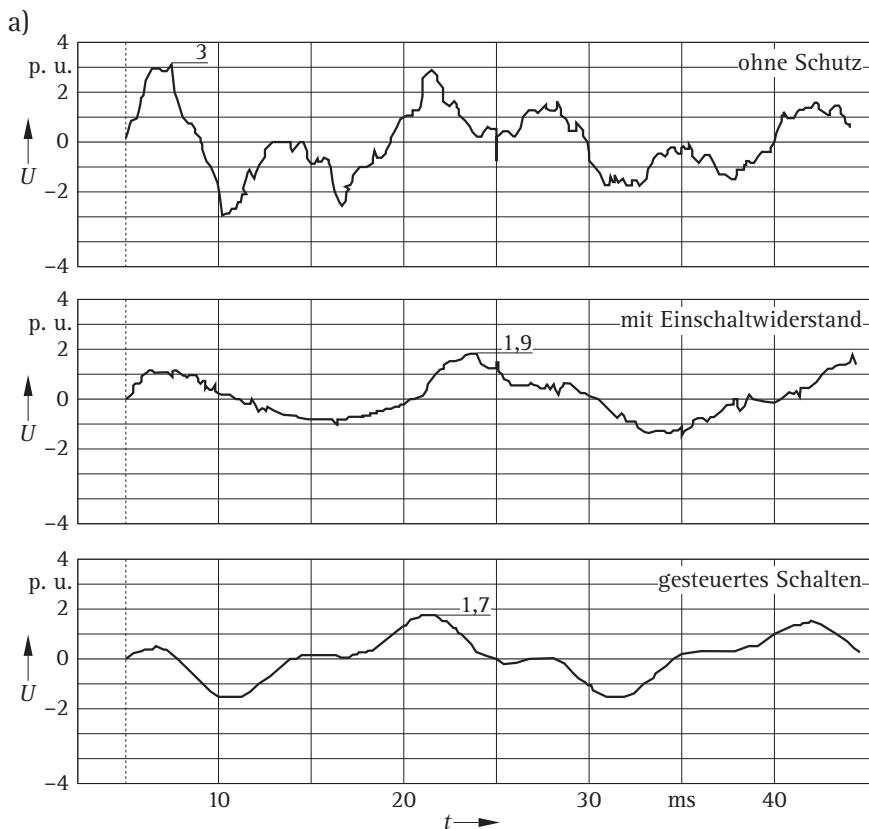


Bild 26.3a Wirkung des gesteuerten Einschaltens kapazitiver Lasten; Einschalten einer unbelasteten 550-kV-Freileitung

Wie in Abschnitt 22.2 gezeigt wird, verursachen Rückzündungen Überspannungen.

Für Leistungsschalter, die erfolgreich nach Klasse C2 geprüft worden sind (Abschnitt 22.6), trifft dies nicht zu. Sie beherrschen die genannte Spannungsamplitude auch dann, wenn die Stromunterbrechung unmittelbar nach der Kontakttrennung erfolgt.

Um bei einem weniger leistungsfähigen Schalter Rückzündungen zu vermeiden, kann zum gesteuertem Ausschalten kapazitiver Lasten der Schalter so angesteuert werden, dass die Schaltstrecke weit genug geöffnet ist, wenn die hohe Spannungsamplitude auftritt. Das bedeutet, dass die Kontakttrennung eine entsprechend lange Zeit vor dem Nulldurchgang des kapazitiven Laststroms erfolgen soll.

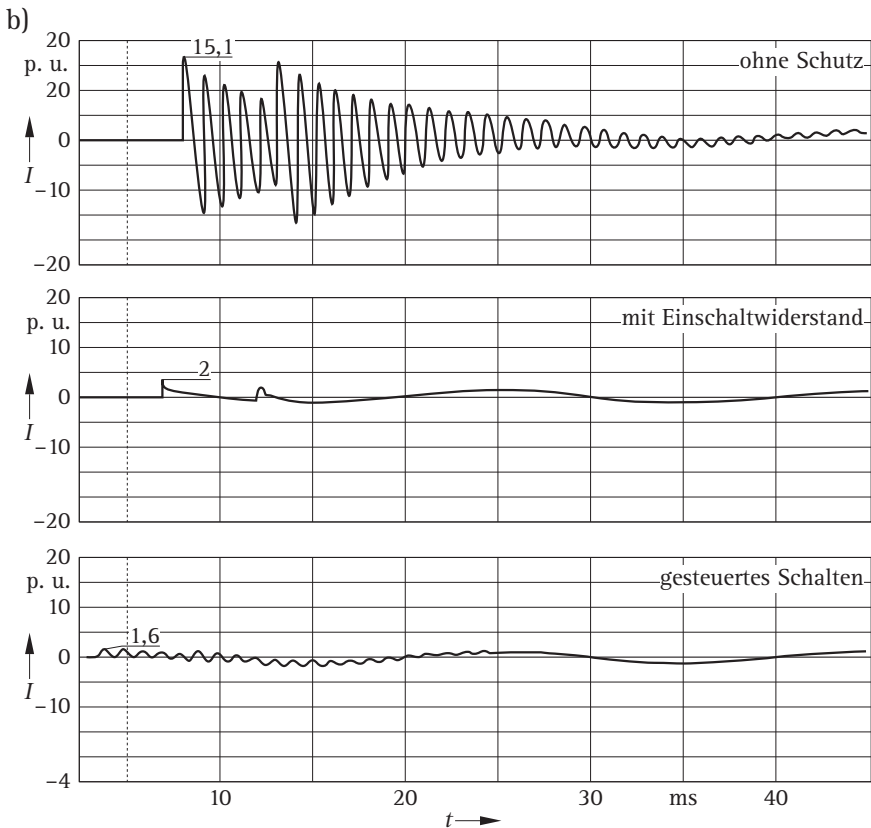


Bild 26.3b Wirkung des gesteuerten Einschaltens kapazitiver Lasten; Einschalten einer ungeerdeten Kondensatorbank

Wird ein ungeladener Kondensator bei einem Momentanwert > 0 der Netzspannung u_N eingeschaltet, tritt ein hochfrequenter Ausgleichstrom mit unter Umständen erheblicher Amplitude auf (Abschnitt 23.1). Beim Zuschalten im Nulldurchgang der Netzspannung beginnt der Strom lediglich mit dem Scheitelwert des betriebsfrequenten Laststroms.

Ist die Kapazität aufgeladen, so ist die Potentialdifferenz u_S zwischen Kapazität und Netz zum Zeitpunkt der Zuschaltung, also des Vor-Überschlags, entscheidend für die Höhe des Ausgleichstroms. Ist diese Potentialdifferenz null, so fließt kein Ausgleichstrom.

Daraus folgt, dass bei gesteuertem Einschalten von Kapazitäten die Spannung an beiden Klemmen des Schalters zu registrieren ist, um den optimalen Einschaltzeitpunkt zu ermitteln. Theoretisch ist es der Nulldurchgang der Potentialdifferenz u_S über den Schalter.

Die im Bild 26.3 gezeigten Beispiele machen deutlich, dass durch gesteuertes Einschalten kapazitiver Lasten das Auftreten von unzulässigen Überspannungen vermieden wird. Es werden Überspannungsfaktoren < 2 erreicht. Damit ist es möglich, die entsprechenden Schalter ohne Einschaltwiderstände einzusetzen.

Ein Zuschalten im Spannungsnulldurchgang setzt voraus, dass die Vor-Überschlagskennlinie des Schalters mindestens so steil verläuft wie der Spannungsgradient du_S/dt unmittelbar vor dem Nulldurchgang der über den Schalter anstehenden Spannung (Bild 26.4). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass beim Einschalten, ebenso wie beim Ausschalten, der Schalterantrieb mechanisch streut, sodass der Zeitpunkt der Kontaktberührung vom idealen Zeitpunkt abweichen kann. Im Bild 26.4 ist diese mechanische Streuung mit $\pm 0,8$ ms angenommen. Würde der Schalter so angesteuert werden, dass die Kontaktberührung ohne Berücksichtigung der Streuung im gleichen Moment erfolgt wie der Spannungsnulldurchgang, so würde bei einer durchaus möglichen, um 0,8 ms vorzeitigen Kontaktbewegung ein Vor-Überschlag schon bei der Spannung 0,85 p. u. auftreten. Der Effekt wäre ähnlich wie bei einer Zuschaltung im Scheitel der über den offenen Kontakten anstehenden Potentialdifferenz.

Um dies zu vermeiden und die Zuschaltung im oder nahe des Spannungsnulldurchgangs nicht zu gefährden, wird der Schalter so angesteuert, dass seine Vor-Überschlagskennlinie in diesem Fall erst 0,8 ms nach dem Spannungsnulldurchgang die Nulllinie erreicht. Verhält sich der Schalter ideal, so tritt, wie Bild 26.3 zeigt, ein Vor-Überschlag bei der Spannung 0,15 p. u. ein. Schließen die Kontakte um 0,8 ms vorzeitig, so wird bei der Potentialdifferenz null zugeschaltet. Ist die Kontaktbewegung um 0,8 ms verzögert, so kommt es zu einem Vor-Überschlag bei 0,3 p. u. Diese Werte sind klein genug, dass der Ausgleichvorgang beim Einschalten einer Kapazität vernachlässigbar bleibt.

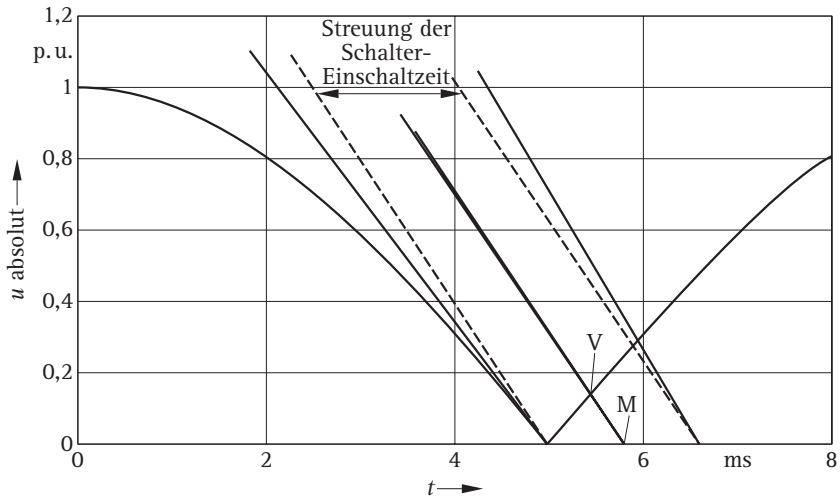


Bild 26.4 Anpassung der Einschaltbewegung an Spannungsverlauf und Vor-Überschlagskennlinie
 V Zeitpunkt des Vor-Überschlags und damit Schließen des Stromkreises
 M Zeitpunkt des mechanischen Berührens der Kontakte

Wie aus Gl. (25.2) hervorgeht, treten beim Zuschalten einer langen unbelasteten Freileitung keine Wanderwellen auf, wenn die Zuschaltung bei der Potentialdifferenz null erfolgt, also $u_N = u_L$. Wird der Leistungsschalter wie in Bild 26.4 angesteuert, läuft in die Leitung eine Wanderwelle mit der maximalen Amplitude $0,3 \cdot (u_N - u_L)$ ein. Selbst bei vollständiger Reflexion am offenen Leitungsende verursacht diese Wanderwelle keine Überspannung. Für einen derartig gesteuerten Leistungsschalter sind Einschaltwiderstände nicht erforderlich.