

# Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisation von Generatoren

Autor(en): **Muzaffer Canay, I. / Braun, Dieter / Köppl, Georg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 1

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902038>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Nach einer kurzen Beschreibung der Auswirkungen von Fehlsynchronisationen auf Generator und Blockgenerator wird im vorliegenden Aufsatz der Verlauf der Ströme bei Fehlsynchronisationen behandelt. Diese Ströme weisen während mehrerer Perioden sehr kleine Wechselstromanteile bei hohen Gleichstromanteilen auf und können deshalb die Ausschaltung in diesem Zeitbereich erschweren; dies gilt insbesondere für den hochspannungsseitigen Schalter.

# Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisation von Generatoren

■ I. Muzaffer Canay, Dieter Braun und Georg Köppl

In Kraftwerken kommt es gelegentlich zu Fehlsynchronisationen, das heisst zu einer Zuschaltung eines Generators an das Netz zu einem Zeitpunkt, bei dem zwischen der Generatorspannung und der Netzspannung noch eine erhebliche Winkeldifferenz (Fehlwinkel)  $\delta_0$  besteht. Einer der Hauptgründe für das Auftreten von Fehlsynchronisationen sind Verdrahtungsfehler, die bei Inbetriebsetzungs- oder Wartungsarbeiten beim Anschluss der Spannungswandler an die Synchronisierereinrichtung gemacht werden. Nur eine voll redundante Ausführung der gesamten Synchronisierereinrichtung einschliesslich der Spannungswandler kann in solchen Fällen eine Fehlsynchronisation verhindern. Bei einer Fehlsynchronisation treten erhebliche elektrische und mechanische Beanspruchungen von Generator und Blocktransformator auf, die zu einer vorzeitigen Alterung oder im Ex-

tremfall zu einem unmittelbaren Ausfall dieser Anlagenteile führen können. Dieser Schaltfall wird in den einschlägigen Normen auch als «Schalten unter Asynchronbedingungen» behandelt.

Während einer Fehlsynchronisation können die Phasenströme eines Generators fehlende Nulldurchgänge aufweisen. Diese fehlenden Stromnulldurchgänge haben völlig andere Ursachen als die bekannten fehlenden Stromnulldurchgänge bei generatorgespeisten Kurzschlüssen. Die Ursache für die fehlenden Nulldurchgänge bei Fehlsynchronisationen ist in erster Linie die Bewegung des Rotors vom Anfangsfehlwinkel  $\delta_0$  nach  $\delta=0$ . Aus diesem Grund hat auch die Trägheitskonstante von Generator und Turbine einen wesentlichen Einfluss auf das Phänomen.

Wechselstromschalter können nur im Stromnulldurchgang unterbrechen, und die Frage, ob das Auftreten von fehlenden Nulldurchgängen zu einem Problem für einen Leistungsschalter führt oder nicht, hängt auch von der Art und der Einstellung des Schutzes ab. In einigen Kraftwerken wird das Ausschalten im Falle einer Fehlsynchronisation stark verzögert oder gar verhindert. Im vorliegenden Aufsatz wird aber davon ausgegangen, dass ein schnelles Ausschalten von unter Asynchronbedingungen auftretenden Fehlerströmen im Interesse des Kraft-

## Adressen der Autoren

I. Muzaffer Canay, Consultant, 5242 Birm  
Dieter Braun, ABB Hochspannungstechnik AG  
8050 Zürich, und Georg Köppl, Dipl. Ing. SIA  
Koepl Power Experts, 5242 Lupfig



werkbetreibers liegt. In den für Generatorschalter und Hochspannungsschalter massgebenden Normen [1,2] wird die Möglichkeit des Auftretens von fehlenden Nulldurchgängen beim Schalten unter Asynchronbedingungen nicht behandelt.

**Auswirkung einer Fehlsynchronisation auf Generator und Blocktransformator**

Bei einer Fehlsynchronisation kann sowohl der Generator als auch der Blocktransformator erheblichen elektrischen und mechanischen Beanspruchungen unterworfen werden, welche zu einer vorzeitigen Alterung bzw. im Extremfall zu einem unmittelbaren Ausfall dieser Betriebsmittel führen können [3,4,5,6]. Für den Generator treten die grössten Beanspruchungen der Wickelköpfe durch elektrodynamische Kräfte bei einer 180°-Fehlsynchronisation auf [3]. Bei einer Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = \pm 120^\circ$  kommt es auf der anderen Seite zur grössten Torsionsbeanspruchung des Wellenstranges [3,4]. Beim Blocktransformator treten die grössten elektrodynamischen Beanspruchungen wiederum bei einer 180°-Fehlsynchronisation auf. Bei einer Zuschaltung auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators können die Beanspruchungen sogar grösser als bei einem Klemmenkurzschluss sein. Auf die Ursache dieser erhöhten Beanspruchung beim Synchronisieren mit dem Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators wird im Kapitel «Einfluss der Sättigung des Blocktransformators» gesondert eingegangen.

Eine Ausschaltung der bei einer Fehlsynchronisation fliessenden Fehlerströme kann das Auftreten der mit dem Stossstrom verbundenen Kraftspitzen selbstverständlich nicht verhindern. In Anbetracht der möglichen Konsequenzen erscheint aber das rasche Ausschalten der entsprechenden Fehlerströme trotzdem angezeigt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Stromunterbrechung ist, dass der eingesetzte Leistungsschalter den beim Ausschalten unter Asynchronbedingungen auftretenden Beanspruchungen gewachsen ist.

**Verlauf der Fehlerströme bei einer Fehlsynchronisation**

Der Verlauf der Fehlerströme bei einer Fehlsynchronisation und die daraus resultierende Beanspruchung des Generatorschalters bzw. des Leistungsschalters auf der Hochspannungsseite des Blocktrans-

Turbogenerator		
$x_d = 1,78 \text{ pu}$	$x_d' = 0,215 \text{ pu}$	$x_d'' = 0,145 \text{ pu}$
	$T_d' = 0,690 \text{ s}$	$T_d'' = 0,015 \text{ s}$
$x_q = 1,75 \text{ pu}$	$x_q' = 0,360 \text{ pu}$	$x_q'' = 0,145 \text{ pu}$
	$T_q' = 0,148 \text{ s}$	$T_q'' = 0,015 \text{ s}$
$r_a = 0,0012 \text{ pu}$	$x_a = 0,120 \text{ pu}$	$x_c = 0,138 \text{ pu}$
$f_n = 60 \text{ Hz}$	$H_{tot} = 5,82 \text{ s}$	
Blocktransformator		
$x_{Tr} = 0,14 \text{ pu}$	$r_{Tr(dc)} = 0,00120 \text{ pu}$	
Hochspannungsnetz		
$x_N = 0,02 \text{ pu}$	$r_{N(dc)} = 0,00133 \text{ pu}$	

Tabelle I Technische Daten der Betriebsmittel zur Systemkonfiguration von Bild 1

formators wurde anhand eines repräsentativen Beispiels untersucht.

**Systemkonfiguration und Daten**

Die Untersuchungen wurden basierend auf der in Bild 1 gezeigten Systemkonfiguration durchgeführt. Diese Konfiguration enthält alle relevanten Komponenten. Die technischen Daten der einzelnen Betriebsmittel sind in Tabelle I zusammengestellt.

**Einflussgrössen**

Bild 2a zeigt den Verlauf der Fehlerströme bei einer Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = +120^\circ$  (Generatorspannung  $u_G$  eilt der Netzspannung  $u_N$  um  $120^\circ$  voraus) und einer maximalen Stromverlagerung in Phase A. Die Fehlerströme setzen sich aus einer Wechselstromkomponente  $i_{ac}$  und einer Gleichstromkomponente  $i_{dc}$  zusammen. In [7] sind die Gleichungen für den Verlauf dieser Komponenten und des Rotorwinkels  $\delta$  angegeben.

Die Wechselstromkomponente  $i_{ac}$  wird durch die Änderung des Rotorwinkels  $\delta$  schnell reduziert, während das Gleichstromglied wesentlich langsamer abklingt. Folglich gibt es in der Phase A zwischen  $t_0$  und  $t_3$  keine Stromnulldurchgänge (Bild 2a). Wenn der Generatorschalter oder der Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktrans-

formators zum Beispiel nach 80 ms öffnet, wird der Strom in Phase B in seinem natürlichen Nulldurchgang unterbrochen (Bild 2b, Zeitpunkt  $t_b$ ). Die Gleichstromkomponente in den zwei anderen Phasen erfährt dabei eine Reduktion um 25%. Trotzdem gibt es in diesen zwei Phasen bis zum Zeitpunkt  $t_e$  keine natürlichen Stromnulldurchgänge.

Die folgenden Parameter beeinflussen das Auftreten von fehlenden Nulldurchgängen bei einer Fehlsynchronisation [7]:

- Charakteristische Daten des Generators: alle Reaktanzen  $x_d, x_d', \dots$ , alle Zeitkonstanten  $T_d', T_d'', \dots$  und der Gleichstromwiderstand der Statorwicklung  $r_a$
- Rotorwinkel  $\delta$  und Rotorbewegung: Fehlwinkel  $\delta_0$ , Abweichungen in Frequenz und Spannung, Trägheitskonstante  $H_{tot}$ , asynchrones Bremsmoment des Generators  $T_{asyn}$  (insbesondere bei Schenkelpolmaschinen)
- Daten des Blocktransformators und des Hochspannungsnetzes:  $x_{Tr}, r_{Tr}, x_N, r_N$
- Einschaltmoment, das heisst die Verteilung der Asymmetrie in den drei Phasen.

In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss dieser Parameter auf den Verlauf der Fehlerströme bei einer Fehlsynchro-

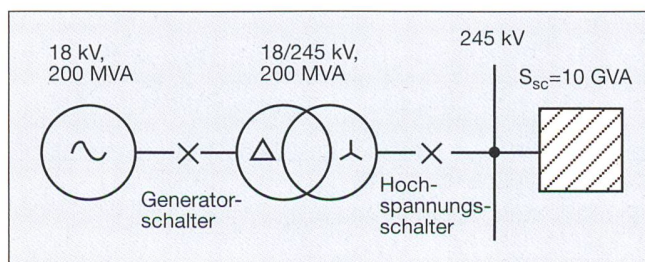
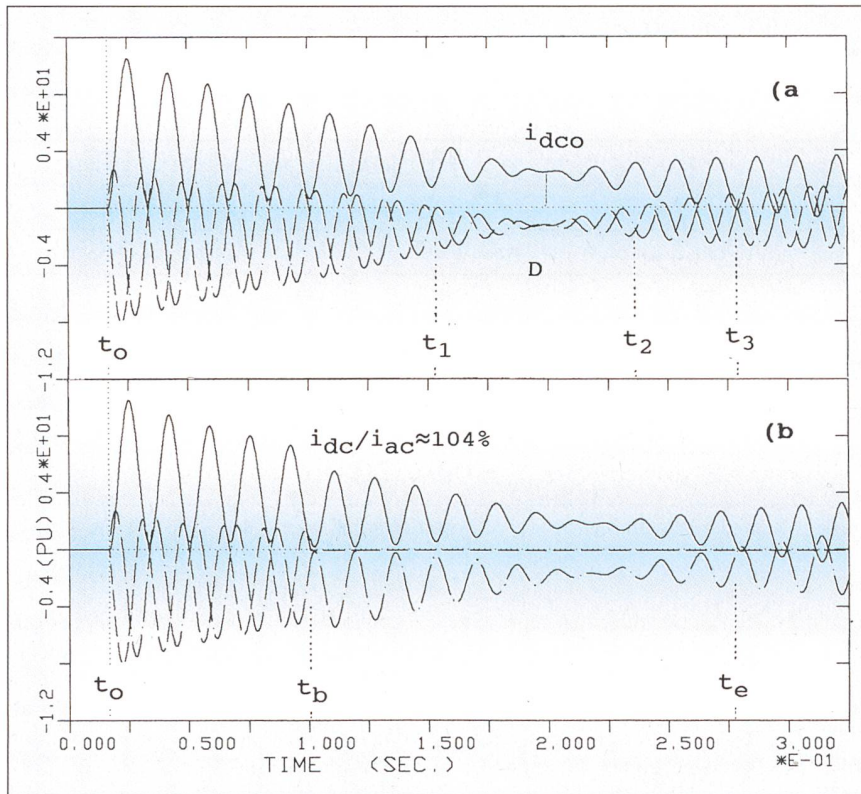
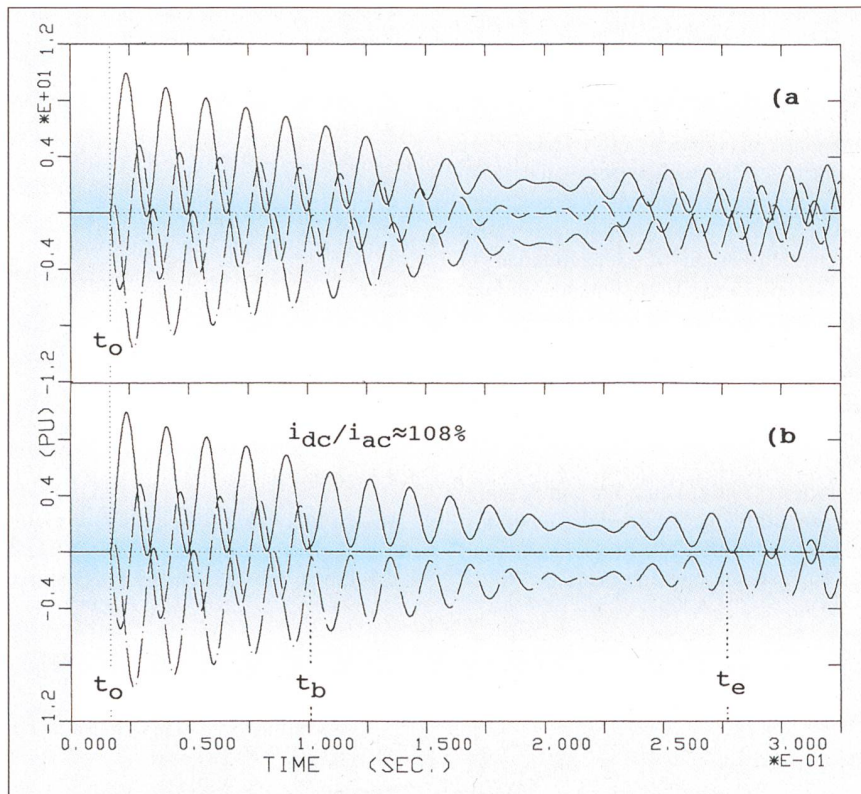


Bild 1 Einpoliges Schema für die Untersuchung von Fehlsynchronisationen





**Bild 2** Generatorströme bei Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = +120^\circ$   
 Phase A voll asymmetrisch (Schlupf = 0, Erregerspannung = const.)  
 a ohne Ausschaltung  
 b mit Ausschaltung nur in Phase B nach rund 80 ms



**Bild 3** Generatorströme bei Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = +120^\circ$   
 Phase B voll symmetrisch (Schlupf = 0, Erregerspannung = const.)  
 a ohne Ausschaltung  
 b mit Ausschaltung nur in Phase B nach rund 80 ms

nisation diskutiert. Die Resultate werden als pu-Größen angegeben und beschreiben die Stromverläufe sowohl auf der Generatorspannungs- als auch auf der Hochspannungsseite des Blocktransformers. Danach wird der Einfluss der Lichtbogenspannung von Generatorschalter und Hochspannungs-Leistungsschalter sowie der Sättigung des Blocktransformers auf die Stromverläufe untersucht.

**Einfluss des Einschaltmoments**

Die Höhe der Gleichstromkomponente der Ströme in den Statorwicklungen hängt vom Winkel  $\alpha$  ab, welcher im Einschaltugenblick zwischen der Feldachse und einer Phasenachse herrscht. Dabei gibt es eine Periodizität von  $60^\circ$ . Die folgenden zwei Fälle sind von Interesse:

- Fall 1: Der Strom in einer Phase ist voll verlagert (maximale Gleichstromkomponente), das heisst  $\alpha = 0^\circ, 60^\circ, \dots$  (s. Bild 2)
- Fall 2: Der Strom in einer Phase ist symmetrisch (Gleichstromkomponente ist Null), das heisst  $\alpha = 30^\circ, 90^\circ, \dots$  (siehe Bild 3)

Das Bild 3a zeigt den Verlauf der Fehlerströme bei einer Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = +120^\circ$ , wenn der Strom in einer Phase symmetrisch ist (Fall 2). Für das Schaltvermögen eines Leistungsschalters ist das Verhältnis  $i_{dc}/i_{ac}$  unmittelbar nach der Stromunterbrechung in der erstlöschenden Phase (Zeitpunkt  $t_b$ ) von Bedeutung. In Bild 2b (Fall 1) beträgt dieses Verhältnis 104%. Ist der Strom in einer Phase symmetrisch, so ergibt sich dagegen ein Verhältnis  $i_{dc}/i_{ac}$  von 108% (Bild 3b). Die Bedingungen zum Unterbrechen des Stromes sind also für einen Leistungsschalter im Fall 2 ungünstiger als im Fall 1. Die Resultate einer grossen Anzahl von Simulationen zeigen, dass dies oft der Fall ist. Bei kritischen Verhältnissen ist es jedoch empfehlenswert, beide Fälle zu untersuchen.

**Einfluss des Fehlwinkels  $\delta_0$**

Eine Fehlsynchronisation geht von einem Fehlwinkel  $\delta_0$  zwischen der Generatorspannung und der Netzspannung aus. Wenn die Gleichstromzeitkonstante  $T_{atot}$  im gleichen Bereich liegt wie die Zeit, die erforderlich ist, um den Winkel  $\delta = 0$  zu erreichen (Generatorspannung und Netzspannung sind erstmals in Phase), ergibt sich bei  $\delta = 0$  eine erhebliche Restgleichstromkomponente  $i_{dc0}$  (Zeitpunkt D in Bild 2a). Das Verhältnis  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  mit  $i_{dcmax} \approx u_G/x_d'$  (maximale Gleichstromkomponente beim dreiphasigen Klemmenkurzschluss des Generators) kann als qualitatives Mass für die



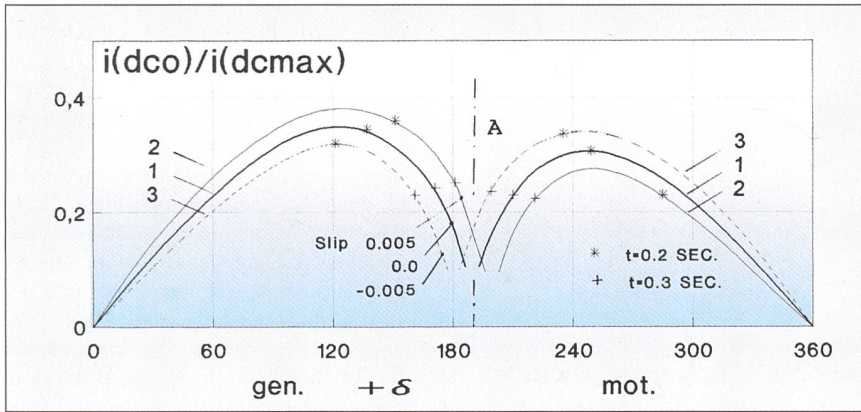


Bild 4 Relative Gleichstromkomponente  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  bei  $\delta = 0$  in Funktion des Anfangsfehlwinkels  $\delta_0$

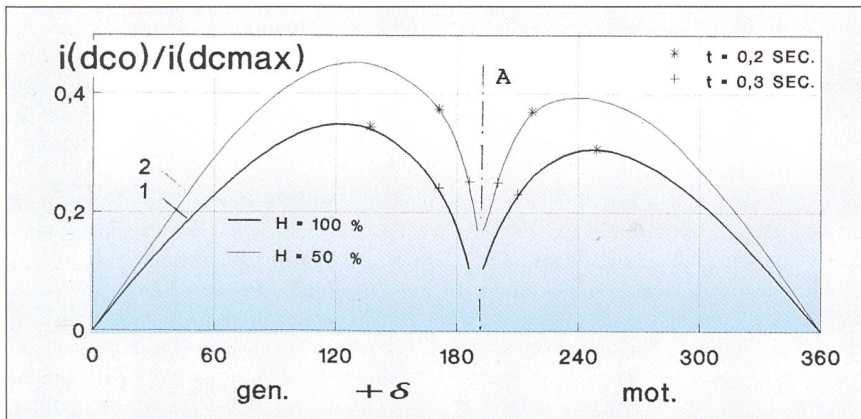


Bild 5 Einfluss der Trägheitskonstante  $H_{tot}$  auf die relative Gleichstromkomponente  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  bei  $\delta = 0$

Höhe der Gleichstromkomponente während einer Fehlsynchronisation betrachtet werden. Im folgenden wird dieses Verhältnis als relative Gleichstromkomponente bezeichnet.

In Bild 4 (Kurve 1) ist das Verhältnis  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  in Funktion des Winkels  $\delta_0$  aufgetragen. Es zeigt sich, dass die höchste relative Gleichstromkomponente bei einer Fehlsynchronisation mit  $+120^\circ$  auftritt und etwa 35% beträgt (d.h. die Gleichstromkomponente  $i_{dc0}$  bei  $\delta=0$  beträgt 35% von  $i_{dcmax}$ ). Bei Fehlsynchronisationen mit  $-120^\circ$  (Generatorspannung eilt der Netzspannung um  $120^\circ$  nach) ist die Gleichstromkomponente etwas kleiner. Der Grund dafür ist das asynchrone Bremsmoment  $T_{asyn}$ . Dieses Bremsmoment beschleunigt die Rückwärtsbewegung des Rotors im Bereich positiver  $\delta_0$  und verzögert die Vorwärtsbewegung des Rotors bei negativen  $\delta_0$ . Daher erreicht der Rotor den Zeitpunkt  $\delta=0$  bei Fehlsynchronisationen mit positiven  $\delta_0$  früher als bei Fehlsynchronisationen mit negativen  $\delta_0$ . Dies führt zu den etwas höheren Gleichstromkomponenten  $i_{dc0}$  bei Fehlsynchronisationen mit positiven  $\delta_0$ .

Bei Schenkelpolgeneratoren mit massiven Polen ist das asynchrone Brems-

moment  $T_{asyn}$  wesentlich höher als bei Turbogeneratoren. Als Folge ist die Asymmetrie der Kurven bei positiven und negativen  $\delta_0$  bei solchen Maschinen ausgeprägter, und die Achse A (Bild 4) wird nach rechts verschoben. Für die Berechnung des asynchronen Bremsmomentes  $T_{asyn}$  bei Generatoren mit massiven Polen sind die sub-subtransienten Daten zu berücksichtigen [7, 8].

Wie am Anfang berichtet, kommen Fehlsynchronisationen in der Praxis oft nach Inbetriebsetzungs- oder Wartungsarbeiten an der Synchronisierereinrichtung vor. Es kann gezeigt werden, dass gewisse Verdrahtungsfehler beim Anschluss der Spannungswandler an die Synchronisierereinrichtung zwangsläufig zu Fehlsynchronisationen bei  $\delta_0 = 180^\circ$ ,  $\pm 120^\circ$  oder  $\pm 60^\circ$  führen. Eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = 180^\circ$  führt zu den höchsten Fehlerströmen und ansonsten zu ähnlichen Verhältnissen wie bei einem dreiphasigen Klemmenkurzschluss. Bei einer  $120^\circ$ -Fehlsynchronisation resultiert die höchste Gleichstromkomponente bei  $\delta=0$ . Auf die Verhältnisse bei einer  $60^\circ$ -Fehlsynchronisation wird im Abschnitt «Spezielle Gesichtspunkte bei einer  $60^\circ$ -Fehlsynchronisation» gesondert eingegangen.

### Einfluss von Differenzen in Frequenz und Spannung

Bei einer Fehlsynchronisation können zusätzlich kleine Abweichungen in den Frequenzen auf der Generator- und Netzseite auftreten. Diese Abweichungen von der synchronen Drehzahl beeinflussen die Zeit, bis  $\delta=0$  erreicht wird, und somit das Verhältnis  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  bei  $\delta=0$ . Die Kurven 2 und 3 in Bild 4 zeigen diese Abhängigkeit. Kurve 2 entspricht einer Generator-drehzahl von 0,5% unter und Kurve 3 einer solchen von 0,5% über der synchronen Drehzahl. Es ist ersichtlich, dass eine geringere Generator-drehzahl (Schlupf+) die Asymmetrie der Kurven zwischen positiven und negativen  $\delta_0$  erhöht. Auf der anderen Seite haben Spannungsdifferenzen von bis zu 5% keinen nennenswerten Einfluss auf die Resultate der Berechnungen. Dies gilt auch für den Einfluss des Spannungsreglers.

### Einfluss der Trägheitskonstante

Aus Bild 4 geht auch die Zeit hervor, welche vergeht, bis  $\delta=0$  erreicht wird. Wenn zum Beispiel bei  $\delta_0 = +120^\circ$  und 0,5% über der synchronen Drehzahl zugeschaltet wird, beträgt die Zeit, bis  $\delta=0$  erreicht wird, rund 200 ms (Kurve 3). Die Gleichstromkomponente  $i_{dc0}$  bei  $\delta=0$  beträgt in diesem Fall 32% von  $i_{dcmax}$ . Es ist offensichtlich, dass die Verhältnisse im Bereich von Punkt D in Bild 2a (Wechselstromkomponente ist vernachlässigbar klein) für einen Leistungsschalter, der zu diesem Zeitpunkt öffnet, von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Wenn die gesamte Trägheitskonstante  $H_{tot}$  des Generators kleiner als 5,82 s ist, wird der Punkt D früher erreicht; somit liegen für den Schalter andere Verhältnisse vor. Der Einfluss der Trägheitskonstante  $H_{tot}$  ist aus Bild 5 ersichtlich. Es wurde dabei angenommen, dass wegen der Verwendung einer anderen Turbine die gesamte Trägheitskonstante  $H_{tot}$  nur noch 2,91 s beträgt (d.h. 50% des ursprünglichen Wertes). In diesem Fall führt eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$  dazu, dass nur 130 ms vergehen, bis  $\delta=0$  erreicht wird. Das Verhältnis  $i_{dc0}/i_{dcmax}$  beträgt nun 45%, das heißt, es ist um 30% höher als im Fall mit einer Trägheitskonstanten  $H_{tot}$  von 5,82 s.

Schenkelpolmaschinen haben oft kleine Trägheitskonstanten und bedürfen aus diesem Grunde einer besonderen Beachtung.

### Spezielle Gesichtspunkte bei einer $60^\circ$ -Fehlsynchronisation

Eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +60^\circ$  erscheint im Hinblick auf das Verhältnis



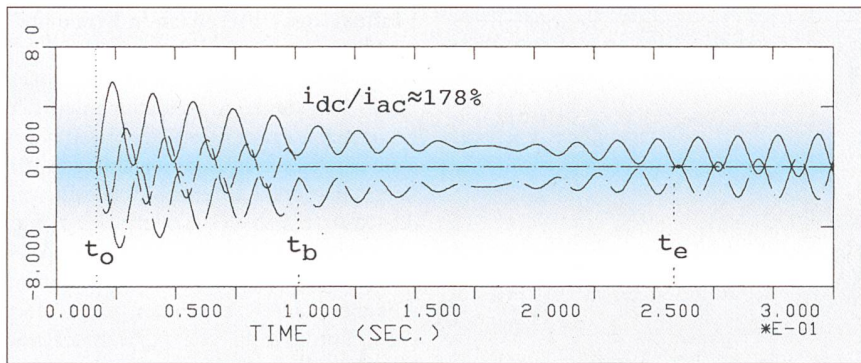


Bild 6 Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +60^\circ$ , Phase B symmetrisch (Schlupf=0, Erregerspannung = const.) mit Ausschaltung in Phase B nach rund 80 ms

$i_{dc}/i_{dmax}$  wesentlich weniger kritisch zu sein als eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$  (Bild 4). Da in diesem Fall jedoch  $\delta = 0$  früher erreicht wird, nimmt das Verhältnis  $i_{dc}/i_{ac}$  während einer längeren Zeitspanne hohe Werte an. Dies geht aus Bild 6 hervor, wo angenommen wurde, dass der Strom in Phase B nach rund 80 ms durch den Generatorschalter oder den Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators unterbrochen wird (Zeitpunkt  $t_b$ ). Das Verhältnis  $i_{dc}/i_{ac}$  in diesem Zeitpunkt beträgt 178%, und es fließt in den zwei anderen Phasen über einen längeren Zeitraum weitgehend ein Gleichstrom. Die Spannungsregelung, welche die Erregung sofort erhöht, bewirkt eine nur unwesentliche Verringerung dieses Verhältnisses auf etwa 175%.

Eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +60^\circ$  kann deshalb zu einer sehr hohen Beanspruchung eines Leistungsschalters führen, wenn dieser zu einem ungünstigen Zeitpunkt ausgeschaltet wird. Auf der anderen Seite sind die Fehlerströme in diesem Fall nicht sehr hoch, sie entsprechen etwa dem Strom, wie er bei einem Klemmenkurzschluss bei 50% bis 60% der Generatorspannung fließen würde.

Fehlsynchronisationen von Schenkelpolgeneratoren sowie Fehlsynchronisationen kombiniert mit der Einschaltung in nur einer oder zwei Phasen sind in [7] beschrieben, ebenfalls der Einfluss von nichtadäquaten Generatormodellen auf das Ergebnis.

### Generatorschalter und Hochspannungs-Leistungsschalter

In den oben beschriebenen Untersuchungen wurde der Leistungsschalter als idealer Schalter modelliert, das heisst, der Schalter übt keinen Einfluss auf den Stromverlauf aus und der Strom wird in einem Nulldurchgang unterbrochen. Die

Lichtbogenspannung eines tatsächlichen Leistungsschalters stellt einen nichtlinearen Widerstand dar, welcher die Gleichstromzeitkonstante des Kreises um einen nennenswerten Betrag reduzieren und dadurch Nulldurchgänge im Stromverlauf früher erzwingen kann.

Die Lichtbogenspannung eines Leistungsschalters hängt insbesondere vom verwendeten Löschmittel ab. Für die heute vorwiegend eingesetzten SF<sub>6</sub>-Schalter wurden der Verlauf und die Grösse der Lichtbogenspannung aus einer Vielzahl von Versuchsergebnissen ermittelt. Es ist bemerkenswert, dass zwischen der Löscheinheit eines Generatorschalters und der Löscheinheit eines Hochspannungs-Leistungsschalters in bezug auf die Lichtbogenspannungs-Charakteristik nur geringe Unterschiede

gefunden wurden, vorausgesetzt in beiden wird SF<sub>6</sub>-Gas bei etwa dem gleichen Druck als Löschmittel eingesetzt. Eine wesentliche Einflussgrösse stellt hingegen die Anzahl von Löscheinheiten pro Phase dar. Ein moderner 245-kV-SF<sub>6</sub>-Schalter besteht heute normalerweise nur aus einer Löscheinheit pro Phase. Deshalb wurde für die im folgenden beschriebenen Untersuchungen angenommen, dass der Generatorschalter und der Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators die gleiche Lichtbogenspannungs-Charakteristik aufweisen.

Die wesentliche Frage für die Beurteilung der Fähigkeit eines Leistungsschalters zum Unterbrechen von Strömen mit fehlenden Nulldurchgängen ist, ob die Lichtbogenspannung des Schalters ausreicht, um Nulldurchgänge im Stromverlauf in allen drei Phasen innerhalb der Zeitspanne, in welcher der Schalter löschfähig ist, zu erzwingen.

Der Fall, welcher Bild 3 zugrunde liegt, das heisst eine Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$ , wurde zusammen mit einem ungünstig gewählten Zeitpunkt der Kontakttrennung (Kontakttrennung 120 ms nach der Fehlsynchronisation) benutzt, um den Einfluss der Lichtbogenspannung auf den Verlauf der Fehlerströme aufzuzeigen. Die Bilder 7 und 8 zeigen die Resultate von Simulationen, die mit Hilfe des «Alternative Transients Program» (ATP) [9] durchgeführt wur-

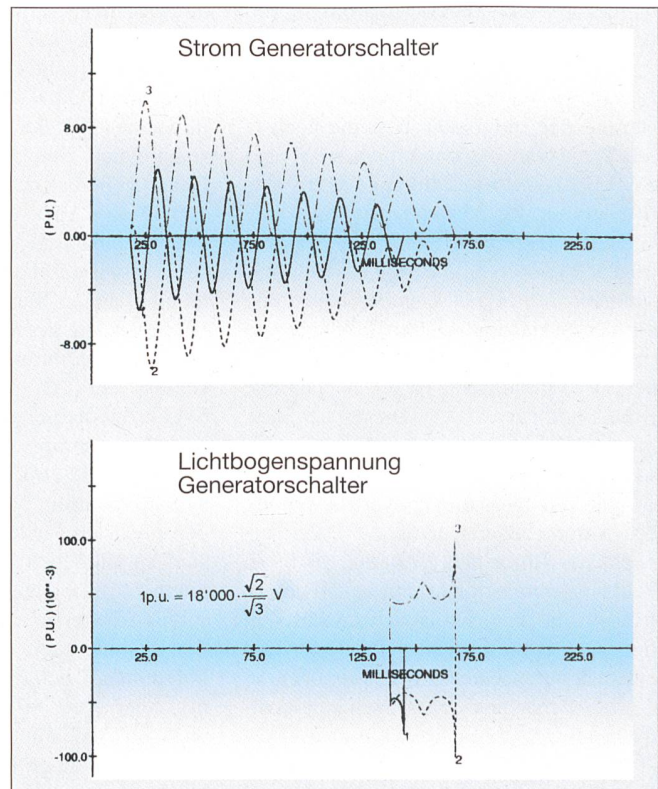


Bild 7 Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$  und Kontakttrennung des Generatorschalters 120 ms nach Fehlereintritt



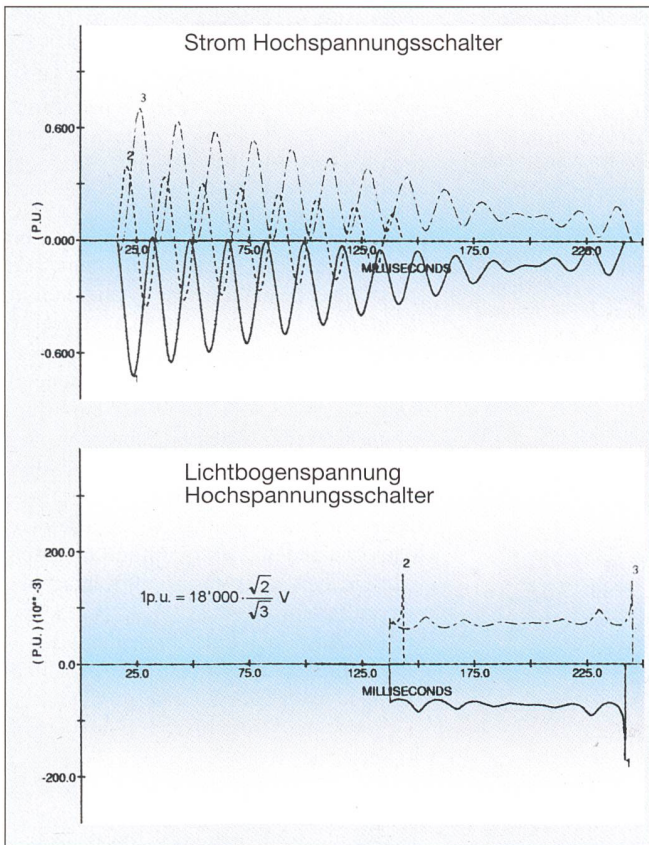


Bild 8 Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$  und Kontakttrennung des Hochspannungsschalters 120 ms nach Fehlereintritt

den. Als Folge des Einflusses der Lichtbogenspannung kommt es im Falle des Generatorschalters zu einem schnellen Abklingen der Gleichstromkomponente und zu einer erfolgreichen Stromunterbrechung, das heisst die Lichtbogendauer liegt unter der für den Schalter zulässigen maximalen Lichtbogenzeit (Bild 7). Sollte jedoch der Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators unter den gleichen Bedingungen ausschalten müssen, ergibt sich ein ganz anderes Resultat. Obwohl die Lichtbogenspannung des Hochspannungs-Leistungsschalters wegen des kleineren Stroms grösser ist als die des Generatorschalters, ist ihr auf die Generatorspannungsseite des Blocktransformators bezogener Wert um das Übersetzungsverhältnis des Transformators kleiner und übt praktisch keinen Einfluss auf den Verlauf der Gleichstromkomponente der Fehlerströme mehr aus. Die Ausschaltung würde im vorliegenden Fall zu einem Schaltversager in zwei Phasen führen (Bild 8).

Die in Bild 9 dargestellten Kurven sind das Resultat einer Variation der Zeit von der Fehlsynchronisation bis zur Trennung der Kontakte des Leistungsschalters zwischen 50 ms und 200 ms für den Fall einer  $120^\circ$ -Fehlsynchronisation. Die Kurven zeigen die maximalen Lichtbogenzeiten des Generatorschalters und des Leistungsschalters auf der Hochspan-

nungsseite des Blocktransformators als Funktion der Zeit bis zur Trennung der Kontakte. Bei Kontakttrennungszeiten bis etwa 80 ms ist der Hochspannungs-Leistungsschalter in der Lage auszuschalten, da Stromnulldurchgänge in allen drei Phasen vorhanden sind. Bei einer Kontakttrennungszeit von rund 80 ms weist die entsprechende Kurve jedoch eine Unstetigkeit auf, wobei die Lichtbogenzeit bis auf 140 ms springt, um dann mit zunehmender Kontakttrennungszeit wieder abzunehmen. Die Lichtbogendauer übersteigt aber im Zeitbereich ab 80 ms die für den Schalter zulässige maximale Lichtbogenzeit bei weitem. Im Gegensatz dazu ist der Generatorschalter in der Lage, im ganzen Zeitintervall auszuschalten, wobei für Kontakttrennungszeiten

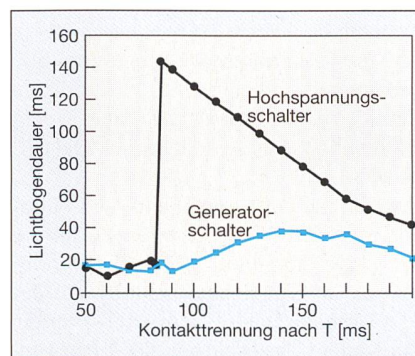


Bild 9 Ausschaltung nach Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +120^\circ$

zwischen 110 ms und 180 ms ein leichter Anstieg der maximalen Lichtbogendauer zu beobachten ist.

Es muss hier betont werden, dass die in Bild 9 dargestellten Resultate ausschliesslich für die Daten gemäss Tabelle I Gültigkeit haben und andere Daten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Die Aussage, dass die Lichtbogenspannung eines Hochspannungs-Leistungsschalters einen nur unwesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Gleichstromkomponente der Fehlerströme ausübt, ist jedoch allgemein gültig.

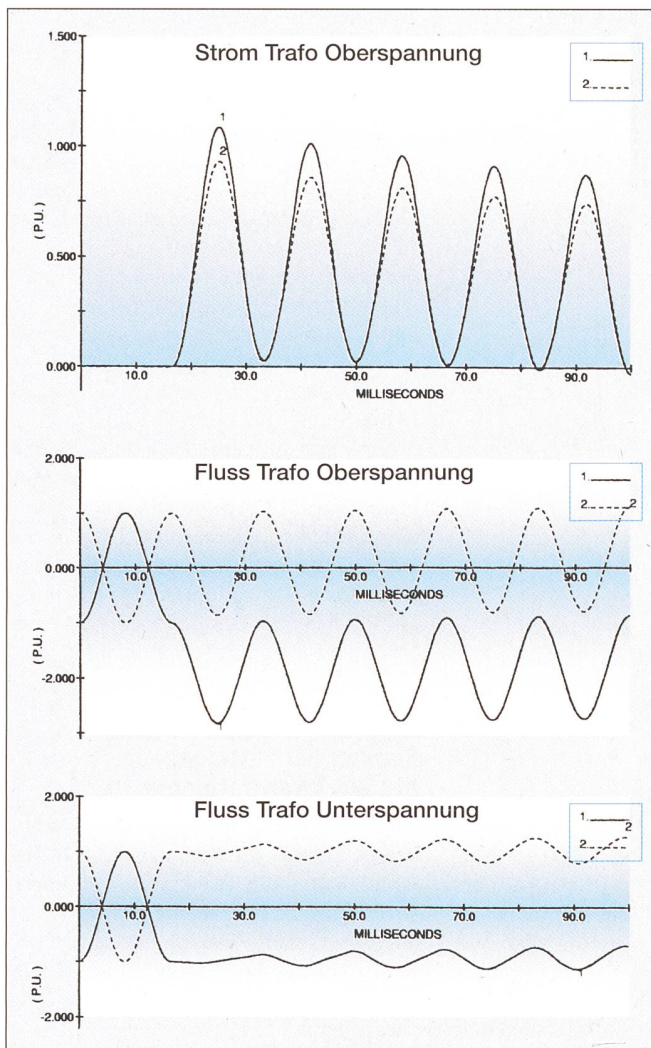
Eine Prüfung eines Leistungsschalters unter den erwähnten Bedingungen wird in der Regel aus prüftechnischen Gründen nicht möglich sein. Deshalb ist zur Bestätigung der Eignung ein rechnerischer Nachweis zu führen, wie er gemäss [1] für den Fall des generatorgespeisten Kurzschlussstromes vorgesehen ist.

### Einfluss der Sättigung des Blocktransformators

Im Falle einer Fehlsynchronisation bei  $\delta_0 = +180^\circ$  (Phasenoppositionsbedingung) hängt die Höhe der Wicklungsströme im Transformator davon ab, ob auf der Generatorspannungsseite (US-Seite) oder der Hochspannungsseite (OS-Seite) des Blocktransformators zugeschaltet wird [10].

Beim Zuschalten auf der Generatorspannungsseite nimmt die Spannung an den US-Klemmen des Blocktransformators sehr kleine Werte an, und der magnetische Fluss in der US-Wicklung verändert sich – ausgehend von seinem Anfangswert – nur wenig, das heisst, es gibt praktisch keinen Sättigungseinfluss. Ganz anders stellt sich die Situation beim Zuschalten unter Phasenoppositionsbedingungen auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators dar. Die Spannung an den OS-Klemmen des Blocktransformators ist wegen der üblicherweise hohen Kurzschlussleistung des Netzes in fast voller Höhe vorhanden, aber um  $180^\circ$  gegenüber dem Ausgangswert vor der Zuschaltung verschoben und baut damit einen hohen Fluss auf, der im ungünstigsten Fall fast das Dreifache des Nennwertes betragen kann. Dieser Fluss erzeugt einen zusätzlichen Strom in der OS-Wicklung. Bild 10 zeigt einen Vergleich der Ströme und der Flüsse in der ungünstigsten Phase bei einer  $180^\circ$ -Fehlsynchronisation und einer Zuschaltung auf der Hochspannungsseite (Kurve 1) bzw. auf der Generatorspannungsseite (Kurve 2) des





**Bild 10** Maximaler Strom in OS-Wicklung des Blocktransformators und entsprechender Fluss in OS- und US-Wicklung bei Fehlsynchronisation mit  $\delta_0 = 180^\circ$  entsprechend Bild 1, aber  $S_{kr} = 20$  GVA, Trafo YNy0

Kurve 1: Einschalten mit HS-Schalter  
 Kurve 2: Einschalten mit Generatorschalter

Blocktransformators. Dabei wurde von einer typischen Sättigungscharakteristik ausgegangen. Die den Berechnungen zugrunde gelegte Systemkonfiguration entspricht Bild 1, allerdings mit einer Netzkurzschlussleistung von 20 GVA. Es ist erkennbar, dass Fluss- und Strommaxima korrelieren und dass die für die Wicklungsbeanspruchung entscheidenden asymmetrischen Stromscheitelwerte deutlich höher sind, wenn auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators zugeschaltet wird.

Bei kleineren Fehlwinkeln  $\delta_0$  ist dieses Phänomen weniger ausgeprägt. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Bild 11 aufgezeigt. Als Basis wurde der Kurzschlussstrom in der OS-Wicklung bei einem Kurzschluss an den US-Klemmen des Transformators gewählt. Es zeigt sich, dass bei Fehlwinkeln  $\delta_0 > 145^\circ$  beim Zuschalten auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators der Strom in der OS-Wicklung höher sein kann als im entsprechenden Kurzschlussfall. Obwohl dieser Fall eine geringe Auftretenswahrscheinlichkeit hat, bietet folglich das Synchronisieren auf der Generatorspan-

nungsseite einen generellen Vorteil im Hinblick auf eine kleinere dynamische Beanspruchung des Blocktransformators. Selbstverständlich bedingt dies die vorherige Zuschaltung des leerlaufenden Transformators auf der OS-Seite; die entsprechenden Inrush-Ströme sind im Normalfall unkritisch.

Für den Generator dagegen ist es nicht relevant, ob auf der Generatorspannungsseite oder der Hochspannungsseite synchronisiert wird, da die Sättigungszusatzströme nur in der OS-Wicklung des Blocktransformators fließen. Vergleichsrechnungen haben im weiteren gezeigt, dass die beschriebenen Sättigungszusatzströme praktisch ohne Einfluss auf die im Kapitel «Generatorschalter und Hochspannungs-Leistungsschalter» vorgestellten Resultate sind.

In [4] wird über eine Fehlsynchronisation eines 955-MVA-Turbogenerators bei  $\delta_0 = +120^\circ$  berichtet, wobei der Stromverlauf auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators registriert wurde. Der Verlauf dieser Ströme lässt den Einfluss der Transformatorsättigung deutlich erkennen.

### Schlussfolgerungen

Aufgrund von theoretischen Überlegungen und einer Vielzahl von durchgeführten Simulationen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisationen werden durch die schnelle Bewegung des Rotors von  $\delta_0$  (Anfangsfehlwinkel) nach  $\delta = 0$  verursacht. Die Ströme sind durch eine schnell abklingende Wechselstromkomponente charakterisiert, die bei  $\delta = 0$  ein Minimum aufweist. Während einer gewissen Zeitspanne fließen in den Statorwicklungen praktisch reine Gleichströme. Dieses Phänomen ist wesentlich verschieden von den fehlenden Stromnulldurchgängen, wie sie bei generatornahen Kurzschlüssen auftreten.

- Bezüglich der Verteilung der Gleichstromkomponente in den einzelnen Phasen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

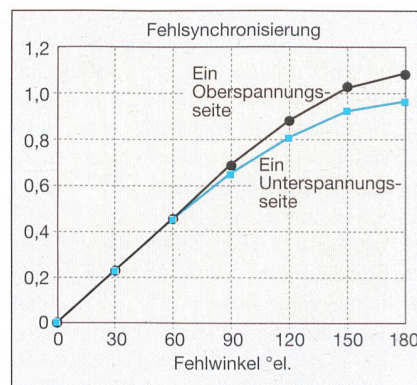
- Fall 1: der Strom in einer Phase ist voll verlagert
- Fall 2: der Strom in einer Phase ist symmetrisch

Der zweite Fall führt in der Regel zu schwierigeren Bedingungen für einen Leistungsschalter.

- Die Gleichstromkomponente bei  $\delta = 0$  (d.h. im Zeitpunkt der minimalen Wechselstromkomponente) kann als Mass für die Schwierigkeit der Stromunterbrechung durch einen Leistungsschalter herangezogen werden. Sie zeigt Maxima für  $\delta_0 = \pm 120^\circ$ . Der Höchstwert tritt bei  $\delta_0 = +120^\circ$  auf. Der Grund für diese Asymmetrie ist das asynchrone Bremsmoment.

- Eine kleinere Trägheitskonstante reduziert die Zeit, bis  $\delta = 0$  erreicht wird, und verursacht somit eine höhere Gleichstromkomponente bei  $\delta = 0$ .

- Eine Anfangsdrehzahl unter der synchronen Drehzahl ergibt bei positiven  $\delta_0$



**Bild 11** Maximaler Strom in OS-Wicklung des Blocktransformators bezogen auf den Kurzschlussstrom (bei KS auf der US-Seite) in Funktion des Anfangsfehlwinkels  $\delta_0$



eine kürzere Zeit, bis  $\delta=0$  erreicht wird. Das heisst, es resultiert eine höhere Gleichstromkomponente bei  $\delta=0$ .

- Spannungsdifferenzen vor der Zuschaltung sowie die Wirkung des Spannungsreglers haben einen geringen Einfluss auf die Gleichstromkomponente bei  $\delta=0$ .
- Das Phänomen ist stark von den elektrischen und mechanischen Daten abhängig. Toleranzen von 10% und mehr in den charakteristischen Generatordaten können die Resultate stark beeinflussen. Die einer Untersuchung zugrunde gelegten Daten sollten daher unter Berücksichtigung dieser Tatsache entsprechend dem Toleranzbereich etwas modifiziert werden. Im weiteren ist eine korrekte Modellierung des Generators wesentlich [7].
- Wenn der Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators Ströme unter Asynchronbedingungen ausschalten muss, kann es einen Zeitbereich geben, in dem es für den

Schalter schwierig oder gar unmöglich ist, Nulldurchgänge im Stromverlauf zu erzwingen, da die für die Beeinflussung der Gleichstromkomponente massgebende Lichtbogenspannung durch das Übersetzungsverhältnis des Blocktransformators auf einen kleinen Wert reduziert wird und wirkungslos bleibt.

- Im Gegensatz dazu ist ein SF<sub>6</sub>-Generatorschalter aufgrund seiner Lichtbogenspannung in der Lage, Nulldurchgänge im Stromverlauf im ganzen Bereich der Kontakttrennungszeiten zu erzwingen. Mit einem Generatorschalter basierend auf dem SF<sub>6</sub>-Selbstblasprinzip ist daher eine erfolgreiche Ausschaltung auch unter ungünstigen Bedingungen möglich.
- Wenn mit dem Leistungsschalter auf der Hochspannungsseite des Blocktransformators synchronisiert wird, können – abhängig vom Fehlwinkel – in der OS-Wicklung des Transformators Sättigungsstromströme fliessen, die zu einer erhöh-

ten dynamischen Beanspruchung des Blocktransformators führen.

Aus Obigem geht hervor, dass – obwohl Leistungsschalter auf beiden Seiten des Blocktransformators aus schutztechnischen Gründen erforderlich sind – zum Synchronisieren bevorzugt der Generatorschalter benutzt werden soll.

### Literatur

[1] *IEEE Std C37.013-1993*: IEEE Standard for AC High-Voltage Generator Circuit-Breakers Rated on a Symmetrical Current.

[2] *IEC Publication 56-1987*: High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers.

[3] *M. Canay*: Beanspruchung von Turbosätzen bei elektrischen Störungen. Brown-Boveri-Mitteilungen 62(1975)9, S. 435-443.

[4] *J. V. Mitsche, P. A. Rusche*: Shaft Torsional Stresses Due to Asynchronous Faulty Synchronization. IEEE Paper F 80 203-0, IEEE PES Winter Meeting, New York, 1980.

[5] *C. M. Arturi*: Transient Simulation and Analysis of a Three-Phase Five-Limb Step-Up Transformer following an Out-of-Phase Synchronization. IEEE Transactions on Power Delivery 6(1991)1, p. 196-207.

[6] *B. M. Pasternack, J. H. Provanzana, L. B. Wagenaar*: Analysis of a Generator Step-Up Transformer Failure Following Faulty Synchronization. IEEE Transaction on Power Delivery, 3(1988)3, p. 1051 to 1058.

[7] *I. M. Canay, D. Braun, G. S. Köppl*: Delayed Current Zeros Due to Out-of-Phase Synchronizing. IEEE Paper PE-596-EC-0-05-1997, IEEE PES Summer Meeting, Berlin, 1997.

[8] *I. M. Canay*: Physical Significance of Sub-Subtransient Quantities in Dynamic Behavior of Synchronous Machines. IEE Proceedings, Pt. B, 135(1988)6, p. 334-340.

[9] Alternative Transients Program (ATP) Rule Book. Canadian/American EMTD User Group, 1987-92.

[10] *A. Babare, A. Bossi, S. Calabro, G. Caprio, S. Crepaz*: Electromagnetic Transients in Large Power Step-Up Transformers: Some Design and Testing Problems. CIGRÉ-Report 12-207, 1990.

## Passages de courant par zéro manquants en cas de synchronisation défectueuse d'alternateurs

Après une brève description des répercussions des synchronisations défectueuses sur l'alternateur et l'alternateur de tranche, on traite dans l'article de l'allure des courants sous l'effet de synchronisations défectueuses. Ces courants présentent pendant plusieurs périodes de très petites composantes alternatives liées à des composantes de courant continu importantes et peuvent de ce fait entraver la coupure dans cette plage de temporisation; cela vaut en particulier pour le disjoncteur côté haute tension.