

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	89 (1998)
Heft:	1
Artikel:	Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisation von Generatoren
Autor:	Muzaffer Canay, I. / Braun, Dieter / Köppl, Georg
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902038

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

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 Generatorenspannung und der Netzspannung noch eine erhebliche Winkeldifferenz (Fehlwinkel) δ_0 besteht. Einer der Hauptgründe für das Auftreten von Fehlsynchronisationen sind Verdrahtungsfehler, die bei Inbetriebsetzung- oder Wartungsarbeiten beim Anschluss der Spannungswandler an die Synchronisierenrichtung gemacht werden. Nur eine voll redundante Ausführung der gesamten Synchronisierenrichtung 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 Anlageteile 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 δ_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 Birr
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 $\delta_0 = +120^\circ$ (Generatorenspannung u_G eilt der Netzspannung u_N um 120° 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 δ angegeben.

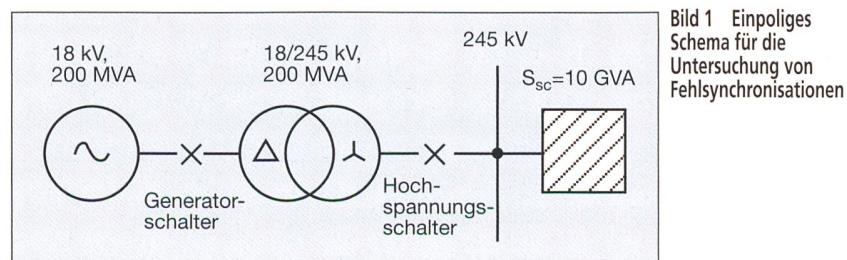
Die Wechselstromkomponente i_{ac} wird durch die Änderung des Rotorwinkels δ schnell reduziert, während das Gleichstromglied wesentlich langsamer abklingt. Folglich gibt es in der Phase A zwischen t_0 und t_3 keine Stromnulldurchgänge (Bild 2a). Wenn der Generatorschalter oder der Leistungsschalter auf 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' , ..., alle Zeitkonstanten T_d' , T_d'' ... und der Gleichstromwiderstand der Statorwicklung r_a
- *Rotorwinkel δ und Rotorbewegung:* Fehlwinkel δ_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-



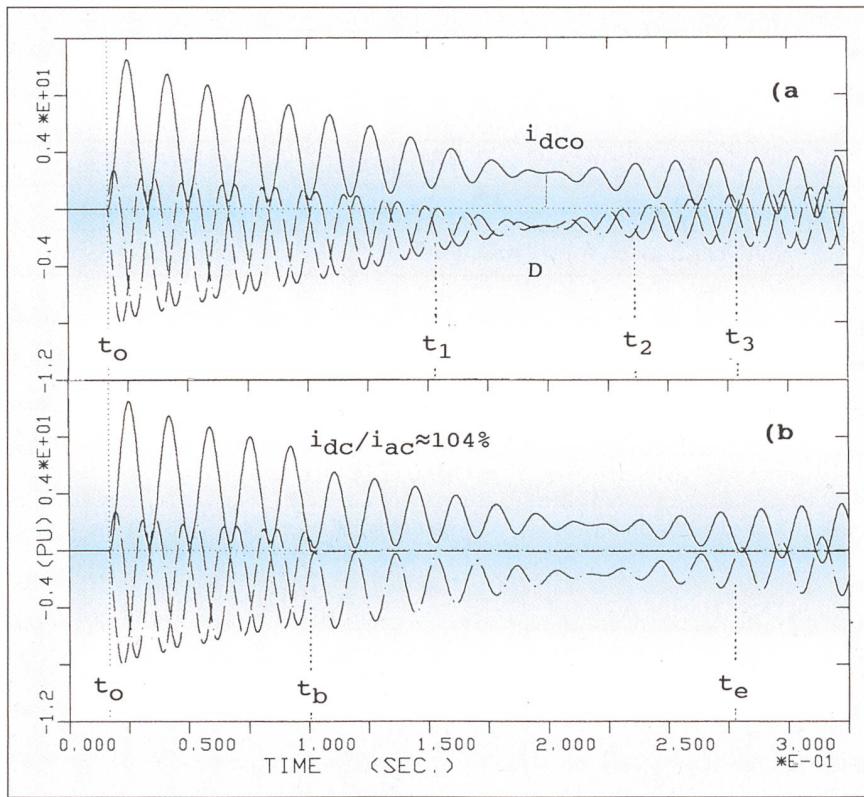


Bild 2 Generatorströme bei Fehlsynchronisation mit $\delta_0 = +120^\circ$
 Phase A voll asymmetrisch (Schlupf = 0, Erregerspannung = const.)
 a ohne Ausschaltung
 b mit Ausschaltung nur in Phase B nach rund 80 ms

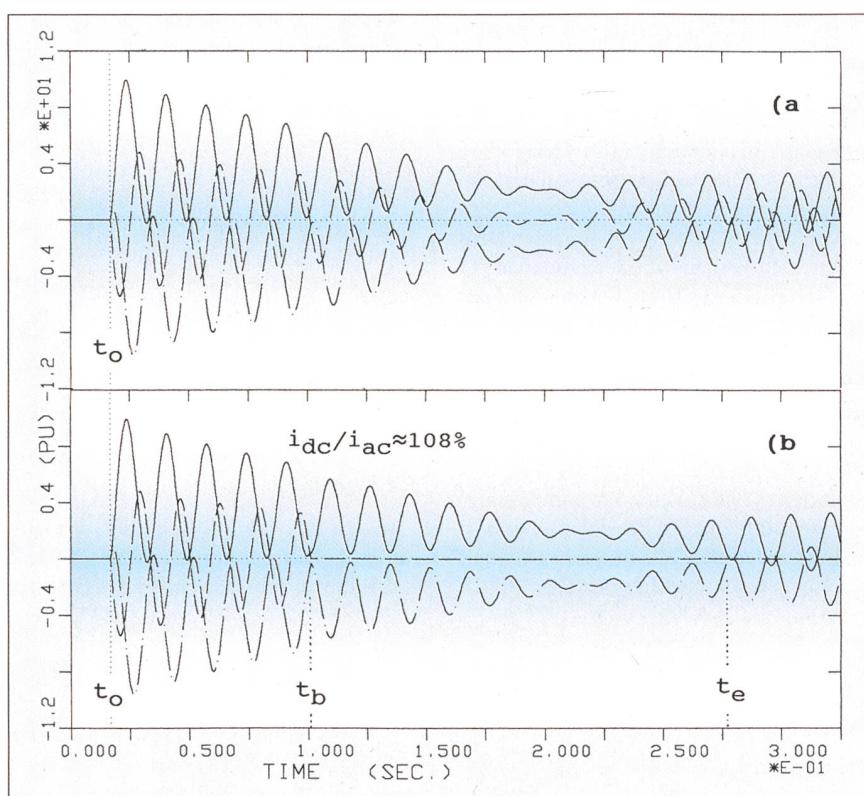


Bild 3 Generatorströme bei Fehlsynchronisation mit $\delta_0 = +120^\circ$
 Phase B voll symmetrisch (Schlupf = 0, Erregerspannung = const.)
 a ohne Ausschaltung
 b mit Ausschaltung nur in Phase B nach rund 80 ms

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

Einfluss des Einschaltmoments

Die Höhe der Gleichstromkomponente der Ströme in den Statorwicklungen hängt vom Winkel α ab, welcher im Einschaltaugenblick zwischen der Feldachse und einer Phasenachse herrscht. Dabei gibt es eine Periodizität von 60° . 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 δ_0

Eine Fehlsynchronisation geht von einem Fehlwinkel δ_0 zwischen der Generatorenspannung 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 (Generatorenspannung 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

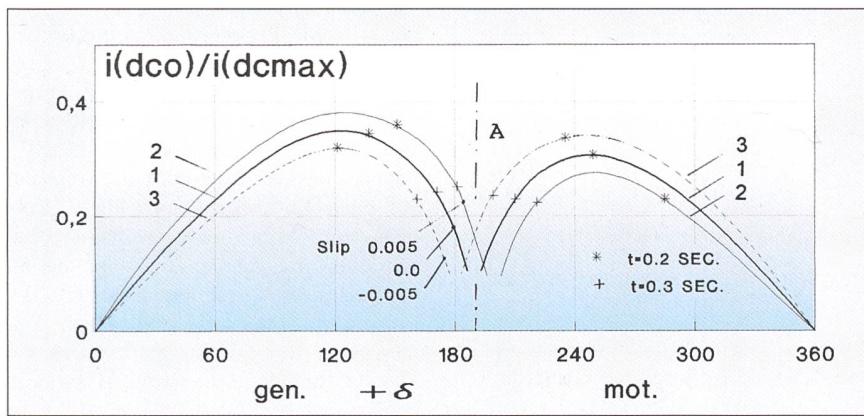


Bild 4 Relative Gleichstromkomponente i_{dc0}/i_{dcmax} bei $\delta=0$ in Funktion des Anfangsfehlwinkels δ_0

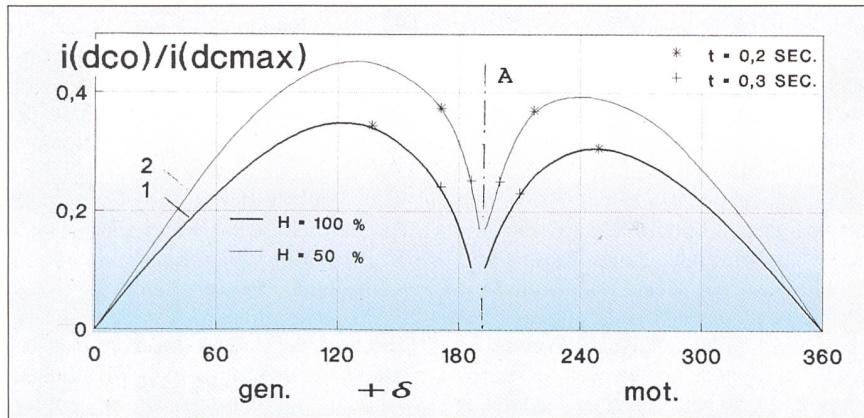


Bild 5 Einfluss der Trägheitskonstante H_{tot} auf die relative Gleichstromkomponente i_{dc0}/i_{dcmax} bei $\delta=0$

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 δ_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° (Generatorenspannung eilt der Netzspannung um 120° 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 δ_0 und verzögert die Vorwärtsbewegung des Rotors bei negativen δ_0 . Daher erreicht der Rotor den Zeitpunkt $\delta=0$ bei Fehlsynchronisationen mit positiven δ_0 früher als bei Fehlsynchronisationen mit negativen δ_0 . Dies führt zu den etwas höheren Gleichstromkomponenten i_{dc0} bei Fehlsynchronisationen mit positiven δ_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 δ_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 Synchronisiereinrichtung vor. Es kann gezeigt werden, dass gewisse Verdrahtungsfehler beim Anschluss der Spannungswandler an die Synchronisiereinrichtung 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° -Fehlsynchronisation resultiert die höchste Gleichstromkomponente bei $\delta=0$. Auf die Verhältnisse bei einer 60° -Fehlsynchronisation wird im Abschnitt «Spezielle Gesichtspunkte bei einer 60° -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 Generatordrehzahl von 0,5% unter und Kurve 3 einer solchen von 0,5% über der synchronen Drehzahl. Es ist ersichtlich, dass eine geringere Generatordrehzahl (Schlupf+) die Asymmetrie der Kurven zwischen positiven und negativen δ_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° -Fehlsynchronisation

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

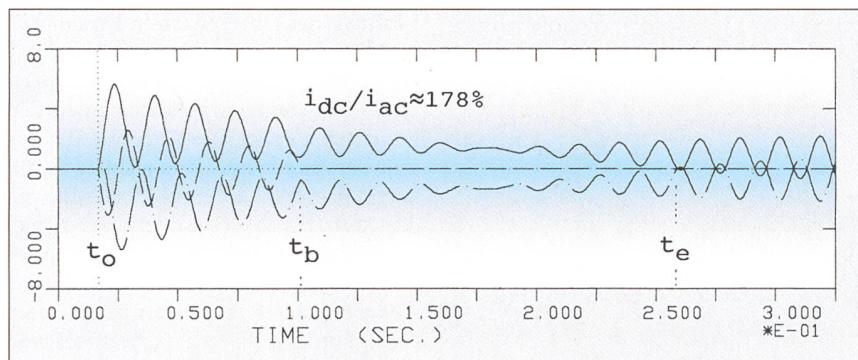


Bild 6 Fehlsynchronisation bei $\delta_0 = +60^\circ$, Phase B symmetrisch (Schlupf=0, Erregerspannung=const.) mit Ausschaltung in Phase B nach rund 80 ms

i_{dc}/i_{dcmax} 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 Schenkel-polygeneratoren 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

gefunden wurden, vorausgesetzt in beiden wird SF₆-Gas bei etwa dem gleichen Druck als Lösungsmittel eingesetzt. Eine wesentliche Einflussgröße stellt hingegen die Anzahl von Löscheinheiten pro Phase dar. Ein moderner 245-kV-SF₆-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 löscherfähig 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 Kontakt trennung (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 wurden.

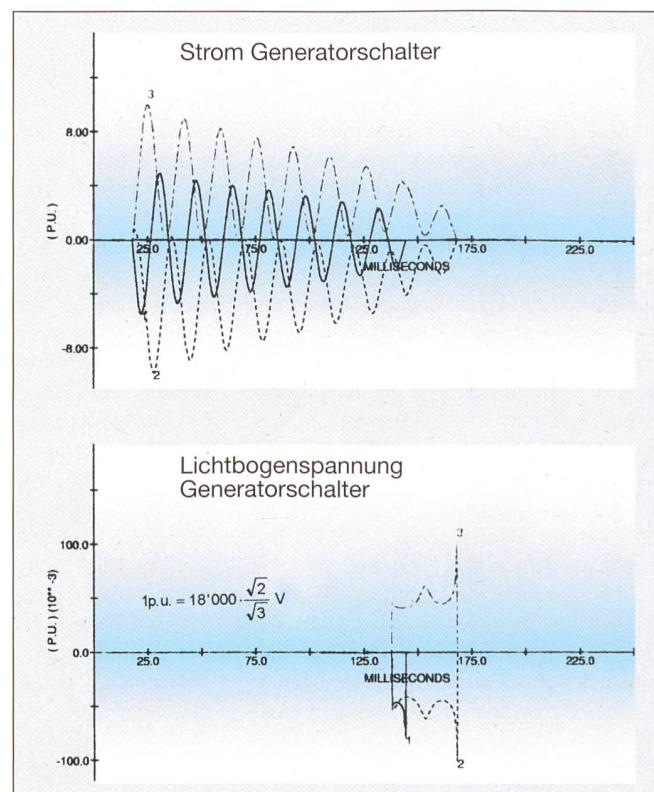


Bild 7 Fehlsynchronisation bei $\delta_0 = +120^\circ$ und Kontakt trennung des Generatorschalters 120 ms nach Fehlereintritt

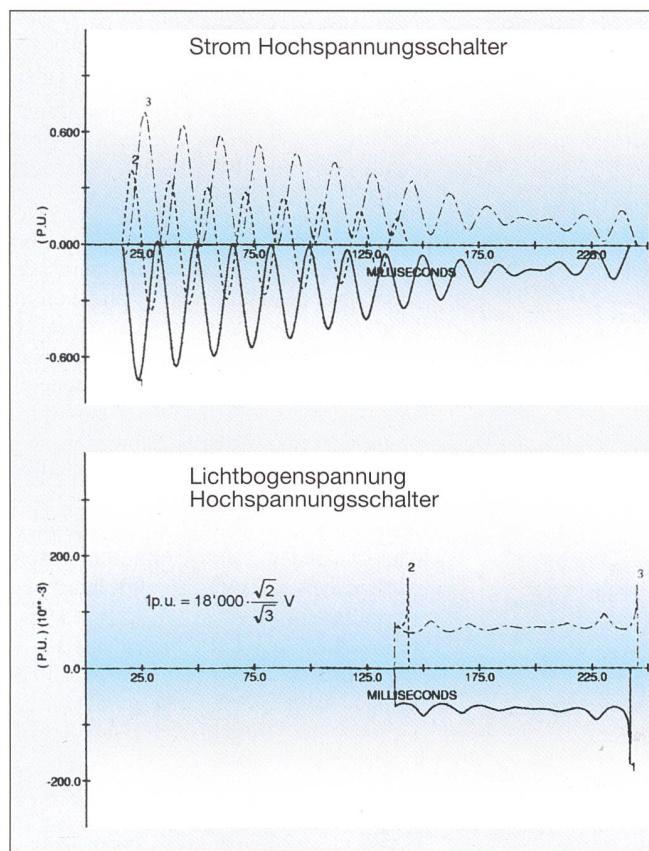


Bild 8 Fehlsynchronisation bei $\delta_0 = +120^\circ$ und Kontakttrennung des Hochspannungs-schalters 120 ms nach Fehlereintritt

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 Generatorenspannungsseite (US-Seite) oder der Hochspannungsseite (OS-Seite) des Blocktransformators zugeschaltet wird [10].

Beim Zuschalten auf der Generatorenspannungsseite 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° 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° -Fehlsynchronisation und einer Zuschaltung auf der Hochspannungsseite (Kurve 1) bzw. auf der Generatorenspannungsseite (Kurve 2) des

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 Generatorenspannungsseite 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° -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

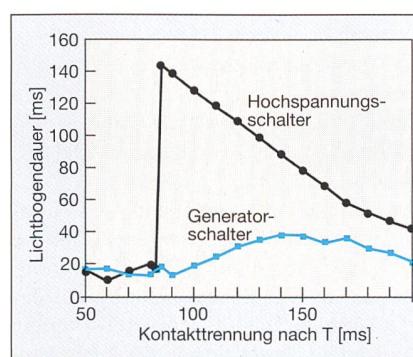


Bild 9 Ausschaltung nach Fehlsynchronisation bei $\delta_0 = +120^\circ$

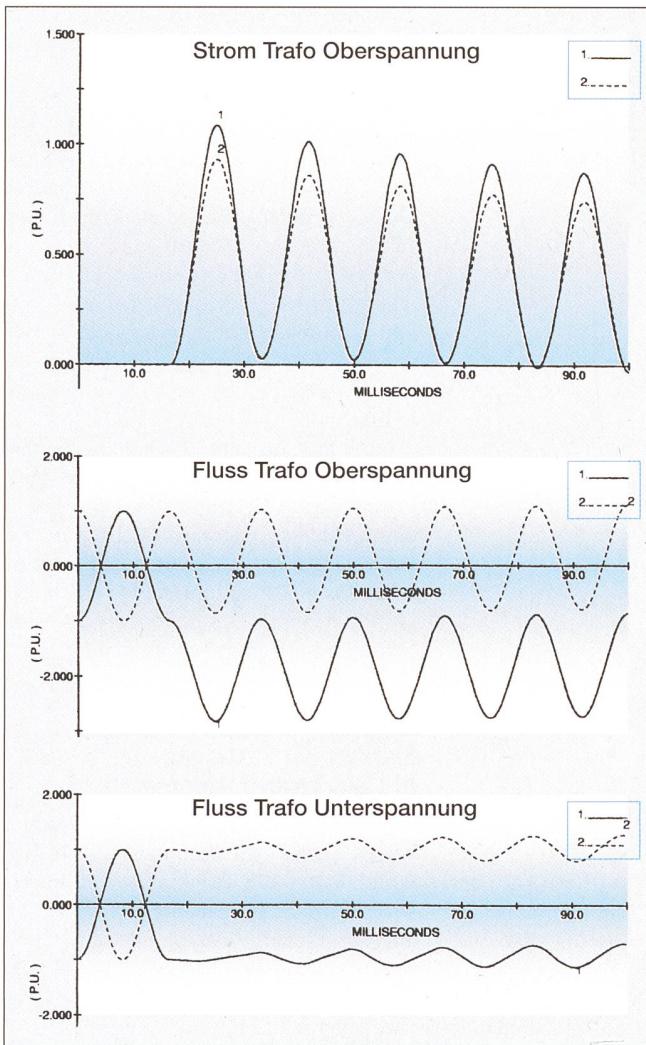


Bild 10 Maximaler Strom in OS-Wicklung des Blocktransformators und entsprechender Fluss in OS- und US-Wicklung bei Fehlsynchronisation mit $\delta_0 = 180^\circ$ entsprechend Bild 1, aber $S_k = 20$ GVA, Trafo YNy0

Kurve 1: Einschalten mit HS-Schalter
 Kurve 2: Einschalten mit Generator-schalter

Schlussfolgerungen

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

- Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisationen werden durch die schnelle Bewegung des Rotors von δ_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.
- Beziiglich 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 δ_0

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 δ_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 weitern 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.

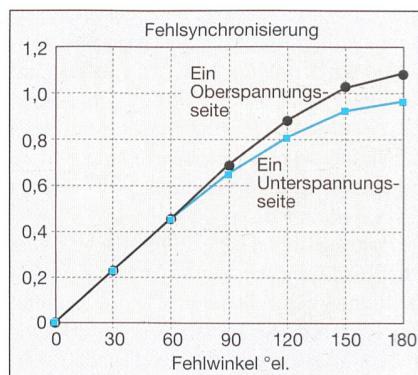


Bild 11 Maximaler Strom in OS-Wicklung des Blocktransformators bezogen auf den Kurzschlussstrom (bei KS auf der US-Seite) in Funktion des Anfangsfehlwinkels δ_0

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 SF₆-Generatorschalter aufgrund seiner Lichtbogenspannung in der Lage, Nulldurchgänge im Stromverlauf im ganzen Bereich der Kontakttrennungszeiten zu erzwingen. Mit einem Generatorschalter basierend auf dem SF₆-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 Sättigungszusatzströme fliessen, die zu einer erhöhten 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. Provanza, 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 EMTP 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 défectiveuse d'alternateurs

Après une brève description des répercussions des synchronisations défectiveuses sur l'alternateur et l'alternateur de tranche, on traite dans l'article de l'allure des courants sous l'effet de synchronisations défectiveuses. 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.