

Netzgestaltung mit Duplexdrosseln

Design of Power Supply Systems with Duplex-Reactors

Dipl.-Ing. W. Schild, Bargteheide

Dr.-Ing. W. Planitz, Hamburg

Vortrag, gehalten auf dem Sprechtag "Netzqualität, Netzurückwirkungen, EMV" der Schiffbautechnischen Gesellschaft im April 1997 in Bremerhaven. Eine gekürzte Fassung dieses Vortrags ist abgedruckt in: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 91. Band 1997, S. 173 ff., Berlin etc.: Springer-Verlag

Dieser Text ist für den Ausdruck optimiert. Eine HTML-Fassung mit Navigationselementen und Links finden Sie unter <http://www.schild.net/duplexdrossel/1/>

1 Einleitung.....	1
2 Technik der Duplexdrosseln	2
3 Einsatz der Duplexdrossel zur Erhöhung der Kurzschluß-Sicherheit.....	5
4 Einsatz der Duplexdrossel zur Verminderung der Rückwirkungen von elektrischen Propulsions-Systemen	6
5 Projektbeschreibung	7
5.0 Betriebsverhalten der Cycloconverter	8
5.1 Netzkonzept 1.....	10
5.2 Netzkonzept 2.....	12
5.3 Bewertung der Netz-Konzepte.....	15
5.4 Umsetzung und Erprobung	15
6 Zusammenfassung	15
7 Schrifttum.....	15
8 Über die Autoren.....	16

Summary: The introduction of Duplex Reactors for the suppression of short circuit stresses and harmonic distortions was very successful. Duplex Reactors are cost effective and reliable. The suppression of harmonics is independent of the system frequency. Research has begun nearly 20 years ago, first commercial units were installed about 1984. Today there is a total experience of nearly 200 years of operation of Duplex Reactors without a severe fault. Duplex Reactors operate without auxiliary energy and need no control system. The operational safety of powerful electrical propulsion is determined by the design of the power supply system. Some exemplary design studies are presented.

1 Einleitung

Die Installation von Duplexdrosseln ist die sicherste Methode zur Vermeidung von extremen dynamischen Belastungen im Netz. Die Ausbreitung von Oberschwingungen wird verhindert und die Kurzschlußströme werden beträchtlich reduziert. Duplexdrosseln sind preiswert und raumsparend, verlustarm, wartungsfrei und arbeiten mit extremer Zuverlässigkeit über ihre technisch unbegrenzte Lebensdauer. Duplexdrosseln arbeiten unabhängig von der augenblicklichen Netzfrequenz .

Schon die ersten kommerziellen Anwendungen auf Taucherbasis-Schiffen in den Jahren 1984/85 waren erfolgreich. Auf dem Sprechtag der STG 1985 in Bremen wurde darüber berichtet unter dem Titel: "Das Verhalten von Bordnetzen mit Stromteiler-Drosselspulen

zur Kurzschlußstrombegrenzung", nachzulesen im Jahrbuch der STG 1985. Nachgewiesen wurde die Halbierung der prospektiven Kurzschlußströme und die Stabilisierung der Netzspannung in dem vom Kurzschluß nicht betroffenen Teilnetz. Schon damals wurde in einem Anwendungsbeispiel die Kompensation von Oberschwingungen in Wellengeneratoren durch Duplexdrosseln vorgeschlagen. Heute gehört auch diese Anwendung der Duplexdrossel zum Stand der Technik.

Die Nutzung von Duplexdrosseln zur Kompensation von Oberschwingungen begann 1987 mit Experimentaluntersuchungen auf einem Wracksuchschiff mit dieselektrischem Antrieb und später auf Mehrzweckschiffen der Bundesmarine.

Das Verfahren hat sich besonders auf Forschungsschiffen schnell als besonders leistungsfähig und zuverlässig durchgesetzt.

Die Entwicklung wurde vom Germanischen Lloyd getragen und vom Institut für Schiffshilfsmaschinen der TU Hannover, später Arbeitsbereich Hilfsmaschinen und Automation der TU Hamburg-Harburg, unterstützt. Entscheidende Beiträge leistete unser Freund Prof. Dr.-Ing. Werner Droste, der die Arbeiten von Anfang an bis zu seinem Tode mit wertvollem Rat und Tat begleitet hat.

2 Technik der Duplexdrosseln

Duplexdrosseln sind in Veröffentlichungen auch anders bezeichnet worden: Stromteiler, Stromteiler-Drosselpulen, Ausgleichsdrosseln oder Glättungsdrossel mit Mittelanzapfung. Es erscheint uns zweckmäßig, den ursprünglichen Namen Duplexdrossel beizubehalten, weil er die zweifache Wirkung andeutet: Drosselung des Kurzschlußstromes in einem Teilnetz und gleichzeitig Induktion einer stützenden Spannung im zweiten Teilnetz, Minderung der dynamischen Belastung im einen Teilnetz und Kompensation der Oberschwingungen im anderen Teilnetz.

Die ideale Duplexdrossel ist ein Spezial-Transformator mit zwei Wicklungen geringer Streuinduktivität auf einem Eisenkern mit mehreren kleinen Luftspalten (Abb. 1).

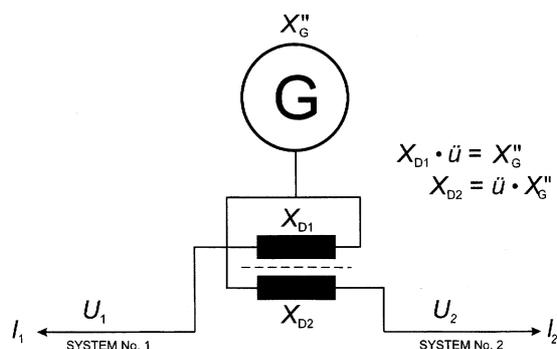


Abb. 1. Prinzipschaltbild der Duplexdrossel

Durch die räumliche Nähe und den Eisenkern sind die Spulen magnetisch fast perfekt gekoppelt. Die Wicklungen werden antiparallel von den Strömen I_1 und I_2 der angeschlossenen Teilnetze durchflossen. Das Verhältnis der Windungszahlen $\dot{u} = w_2/w_1$ wird dem Bedarf entsprechend gewählt und ist in der Regel kleiner als 2. Dieses Übersetzungsverhältnis kann zunächst frei gewählt werden und kann zur Anpassung bei unterschiedlichen Nennströmen in den beiden Teilnetzen genutzt werden.

Zum Verständnis ein Gedanken-Experiment: Die Windungszahlen der Drossel seien gleich, die Hauptinduktivität einer Wicklung sei gleich der Subtransient-Reactanz des Generators.

Ein Kurzschluß im Teilnetz 1 hat jetzt die doppelte Netzimpedanz im Vergleich zur direkten Einspeisung vom Generator, der Anfangs-Kurzschlußstrom wird also halbiert.

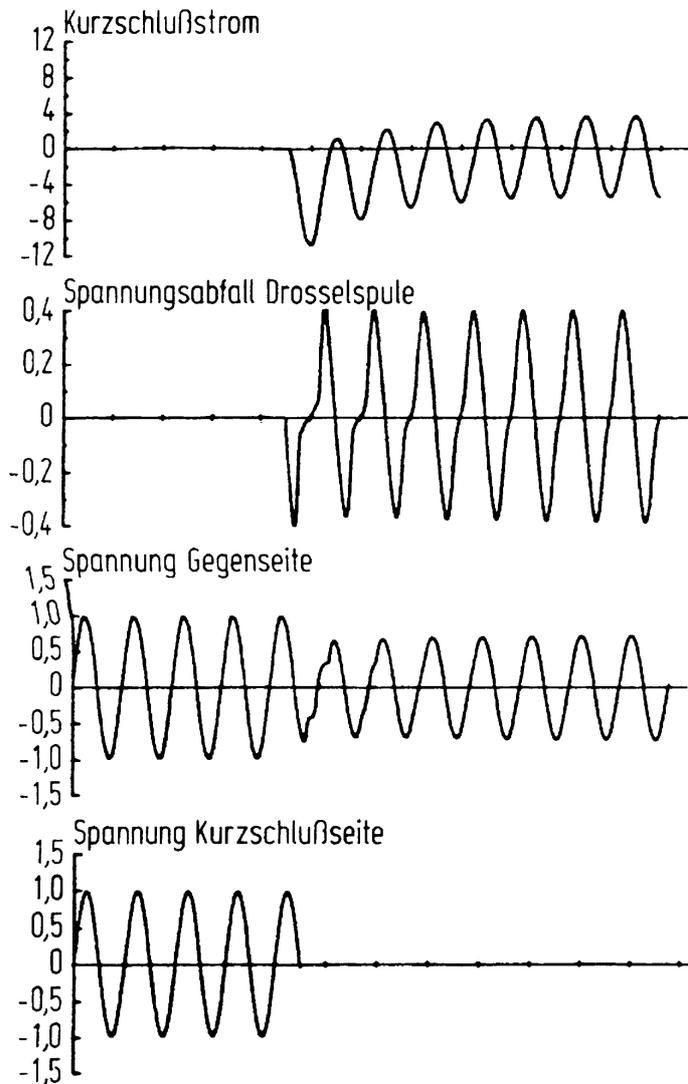


Abb. 2. Ströme und Spannungen an einer Duplexdrossel bei Kurzschluß in einem Zweig

Gleichzeitig fällt während des Kurzschlusses an der Drossel die halbe Generator-Nennspannung ab, die Klemmenspannung des Generators wird also nicht Null, sondern nur halbiert. Der Spannungsabfall am kurzschlußführenden Zweig der Drossel (=halbe Nennspannung) wird transformatorisch auf die zweite Wicklung übertragen und durch die Schaltung der Drossel zu der Generatorspannung addiert. Dadurch ist im nicht betroffenen Teilnetz die Spannung unverändert nahe der Generator-Nennspannung.

Weiterhin wird der Sättigungszustand der Subtransientreaktanz des Generators durch den Kurzschlußstrom bestimmt, bei halbem Kurzschlußstrom ist also nur eine Teilsättigung gegeben. Die wirksame Generator-Reaktanz erhöht sich dadurch, die Kurzschlußströme werden weiter reduziert.

Im ungestörten Betrieb ist das Netz so auszulegen, daß die beiden Zweige der Drossel etwa von gleichen Strömen durchflossen werden. Die magnetischen Wirkungen der Ströme heben sich wegen der antiparallelen Schaltung auf. In diesem Fall ist die resultierende Durchflutung des Drosselkerns nahezu Null, die Drossel tritt magnetisch nicht in Er-

scheinung und bewirkt nur einen minimalen Spannungsabfall infolge des ohm'schen Wicklungswiderstandes.

Da die Netzurückwirkungen netzgeführter Stromrichter letztlich auf dem kurzzeitigen Kurzschluß zweier Phasen während der Kommutierungszeit beruhen, kann die Duplexdrossel auch diese Einwirkungen nach gleichem Prinzip aus dem nicht betroffenen Teilnetz fernhalten.

Die Bemessung der idealen Duplexdrossel ist einfach. Die Induktivität wird ausgehend von der subtransienten Reaktanz der Stromquelle X_q'' und der gewählten Übersetzung \ddot{u} wie folgt berechnet:

$$L_{D1} = \frac{X_q''}{\omega \ddot{u}} \quad L_{D2} = \frac{X_q'' \ddot{u}}{\omega}$$

$$\omega = 2 \pi f ; f = \text{Netz-Nennfrequenz}$$

Die Reaktanz $X = \omega L$ ist also frequenzabhängig, ebenso wie die Reaktanz eines Generators oder Netztransformators. Das heißt: Oberschwingungen erfahren eine um die Ordnungszahl der Oberschwingung höhere Reaktanz als die Grundschwingung. Deshalb ist der Kurvenverlauf der Spannung über der Drossel besonders von Oberschwingungen geprägt (Abb. 3).

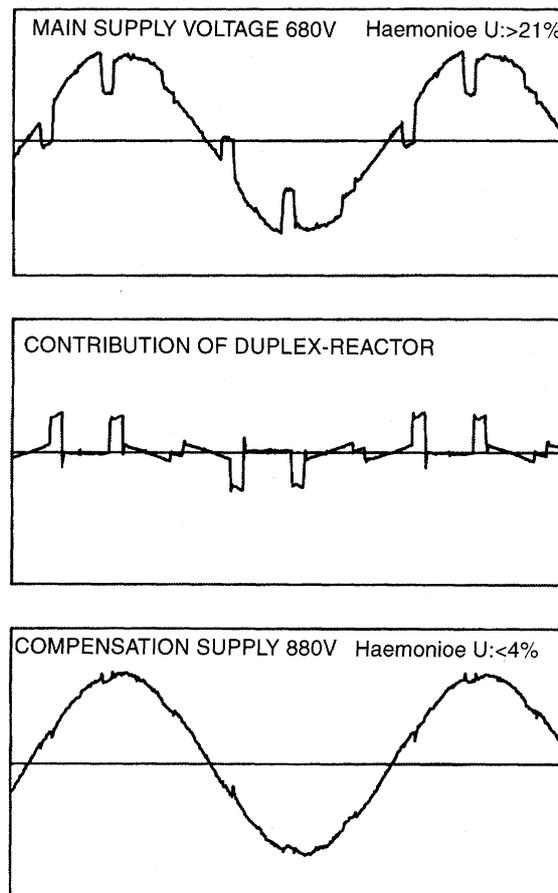


Abb. 3. Spannungen bei Anwendung der Duplexdrossel zur Kompensation von Oberschwingungen

3 Einsatz der Duplexdrossel zur Erhöhung der Kurzschluß-Sicherheit

Durch die Zuordnung der Duplexdrosseln zu den Generatoren wird das übliche Strahlen-Netz zum Doppel-Strahlen-Netz, wobei beide Teilnetze gleichberechtigt von allen laufenden Generatoren gespeist werden. Die Kurzschlußleistung je Teilnetz entspricht dabei etwa der halben Summen-Kurzschlußleistung aller laufenden Generatoren.

Die konventionelle Hauptschalttafel wird in zwei gleichwertige Hauptverteilungen mit jeweils eigenen Generatorschaltern aufgeteilt.

Dadurch ist zwar die doppelte Zahl von Generatorschaltern erforderlich, allerdings können alle Leistungsschalter der Schaltanlage für kleinere Bemessungsströme ausgelegt werden. Der Gesamtaufwand für die Schaltanlage erhöht sich nicht.

Die Vorteile von solchen Netzen mit Duplexdrosseln sind:

1. Der prospektive Kurzschlußstrom wird etwa halbiert. Das erhöht die Sicherheit und mindert die Baukosten, bzw. macht eine leistungstarke Anlage im Grenzfall erst kurzschlußsicher betreibbar.
2. Bei dynamischen Vorgängen wird die Spannung im nicht betroffenen Teilnetz ohne Reglereingriffe gestützt. Das erhöht die Stabilität und vermeidet Totalausfälle der Energieversorgung.
3. Netzurückwirkungen von Stromrichtern können nicht von einem in das andere Teilnetz gelangen. Das erhöht die Netzqualität und erspart bei dieselektrischem Antrieb rotierende Umformer oder aufwendige Filterkreise.

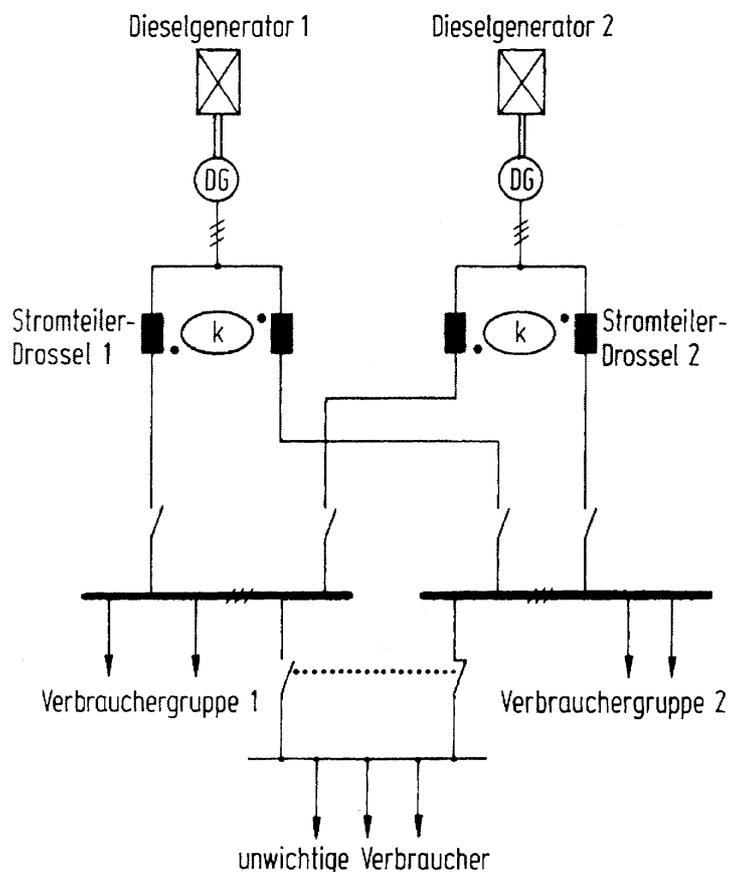


Abb. 4. Einsatz der Duplexdrossel zur Erhöhung der Kurzschluß-Sicherheit

Für die Trennung nahezu gleichberechtigter Teilnetze wird die Übersetzung der Duplexdrossel zu 1 gewählt, die Reaktanz beider Pfade wird mit der 1,2fachen Reaktanz des zugeordneten Generators bemessen nach der Gleichung

$$X_D = 1,2 \times x_d'' \times U^2/S_G .$$

Der Gleichstromwiderstand darf vernachlässigt werden. Die Wärmeverluste der Drosseln sind sehr gering, sie betragen nur etwa ein Promille der Durchgangsleistung. Unsymmetrische Belastung der beiden Teilnetze hat eine geringfügige Spannungsdifferenz zwischen den Teilnetzen zur Folge, ist aber unkritisch.

Es ist zweckmäßig, jede Spule der Duplexdrossel für den maximal denkbaren Strom im unsymmetrischen Betrieb zu bemessen, damit auch bei unsymmetrischer Stromverteilung die volle Generatorleistung genutzt werden kann.

Weiterhin erlaubt eine reichliche Dimensionierung der Wicklungen, auf einen eigenen Schutz der Drossel zu verzichten. Der Eisenkern der Duplexdrossel muß ohnehin mit Rücksicht auf den möglichen Kurzschlußstrom ausgeführt werden. Die Dimensionierung höherer Stromtragfähigkeit für den Nennbetrieb erfordert also lediglich zusätzliches Kupfer. Damit erhält man gleichzeitig noch weiter verringerte Verluste bei symmetrischer Lastaufteilung.

Der Parallelbetrieb ungleicher Generatoren ist ohne Probleme möglich, wenn die Duplexdrosseln auf die jeweiligen Anfangsreaktanzen der Generatoren ausgelegt werden.

Auch der Parallelbetrieb mit einem Generator ohne Duplexdrossel, z.B. eines Hafengenerators, ist problemlos.

4 Einsatz der Duplexdrossel zur Verminderung der Rückwirkungen von elektrischen Propulsions-Systemen

Kennzeichnend für dieselektrischen Antrieb ist die Nutzung statischer Umrichter zur optimalen Steuerung und Regelung der elektrischen Propellermotoren. Das Gesamtsystem aus Generator, Umrichter und Propellermotor bildet dann für den Antrieb praktisch ein stufenloses Getriebe zwischen Dieselmotor und Propeller. Gleichzeitig kann das elektrische Bordnetz von den selben Generatoren mitversorgt werden. Weiterhin kann ohne großen zusätzlichen Aufwand die Zahl der laufenden Dieselmotoren an den Lastbedarf angepaßt werden, damit ist eine Wirkungsgradoptimierung möglich. Für die rein mechanische Verwirklichung eines vergleichbaren Konzeptes sind Getriebe und Kupplungen erforderlich. Der Wirkungsgrad der mechanischen Lösung ist dem der elektrischen Variante etwa gleich.

Das Konzept des dieselektrischen Antriebes hat sich in den vergangenen 15 Jahren bei immer größeren Antriebsleistungen zunehmend durchgesetzt. Es erlaubt die wahlfreie Aufstellung der Dieselmotoren im Schiff und damit Raumoptimierung. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, die Diesel elastisch zu lagern, und damit den Körperschall drastisch zu vermindern.

Bei Antriebsleistungen oberhalb 10 MW pro Welle werden in der Mehrzahl direktumrichtergetriebene Synchronmotoren, aber auch Stromrichter motoren mit lastkommutierten Umrichtern eingesetzt.

Die Netzurückwirkungen der Stromrichter erzeugen im versorgenden Netz erhebliche Oberschwingungen und mindern damit die Netzqualität.

Die dem betriebsfrequenten Wechselstrom überlagerten Oberschwingungen aus dem Stromrichter bewirken in der Stromquelle eine Verzerrung der Kurvenform der Spannung, die sich damit auf alle angeschlossenen Betriebsmittel auswirkt.

Das Servicenetz für die Versorgung der Hilfsbetriebe, der Beleuchtung, der nautischen Geräte, der Kommunikationssysteme sowie der Versorgungssysteme im Wohnbereich benötigen eine überschwingungsarme Versorgungsspannung. Ein überhöhter Klirrfaktor kann zu Zusatzverlusten, Betriebsstörungen und im Grenzfall zur Zerstörung von Komponenten, z.B. Kompensationskondensatoren, führen.

Die herkömmliche Abhilfe besteht hier im Einsatz rotierender Umformer, passiver Filterkreise oder separat speisender Generatoren.

Um die Versorgung aus einer gemeinsamen Spannungsquelle zu ermöglichen bietet sich die Auskopplung eines überschwingungsarmen Teilnetzes über Duplexdrosseln an.

Am aktuellen Projektbeispiel einer Hochleistungsanlage mit Mittelspannungsgeneratoren werden in den folgenden Abschnitten zwei mögliche Konzepte der Netzgestaltung demonstriert.

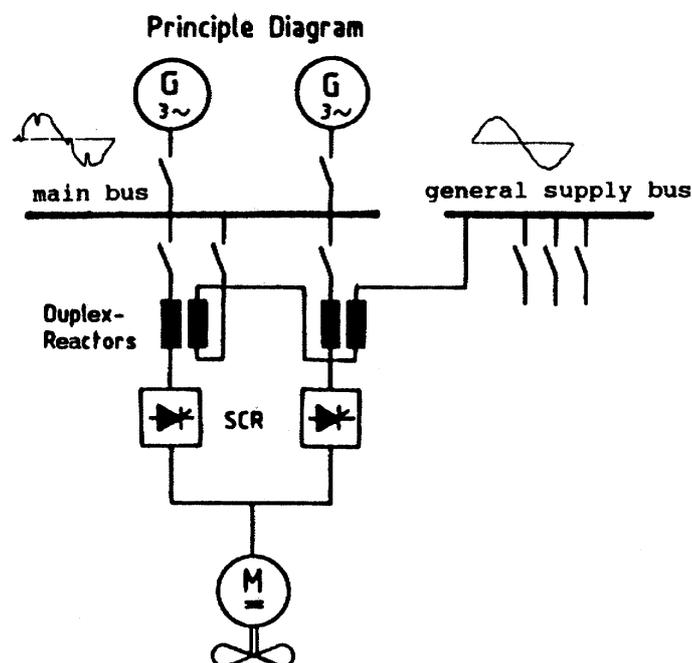


Abb. 5 Einsatz der Duplexdrossel zur Kompensation von Oberschwingungen

5 Projektbeschreibung

Als aktuelles Beispiel sollen mögliche Netzkonzepte für das Bordnetz eines mit 75 000 BRZ vermessenen Kreuzfahrtschiffes vorgestellt und verglichen werden. Für den Hauptantrieb mit einer Wellenleistung von je 20 Megawatt auf zwei Wellen sollen Synchronmotoren mit Mittelspannungs-Direktumrichtern (engl.: Cycloconverter) der ABB eingesetzt werden.

Das Fahrnetz versorgt weiterhin mit 3 Querstrahler mit je ca. 2,5 MW und ein Servicenetz mit 12 MW Leistungsbedarf. Das Servicenetz wird dominiert durch vier große Kompressoren der Klimaanlage, außerdem versorgt das Service-Netz die Hilfsaggregate des Maschinenraums und eine Vielzahl von kleineren Verbrauchern wie Lüftern, Leuchten, elektronischen Anlagen usw.

Alle Lasten sollen gemeinsam von 4 Generatoren mit je 20 MVA mit elektrischer Energie versorgt werden. Die Netzfrequenz ist 60 Hz.

Die Sammelschienenspannung des Servicenetzes beträgt 6,6 kV, mit den zulässigen Toleranzen entsprechend den Vorschriften der Klassifikationsgesellschaft. Das Servicenetz soll u.a. über eine Ringleitung für jeden Brandabschnitt jeweils eine Netzstation mit Verteiltrafo und Schaltanlage versorgen, so daß eine große Zahl von Schaltgeräten erforderlich wird. Die Verminderung der Kurzschlußleistung bedeutet eine deutliche Kostenersparnis bezüglich der Schaltgeräte und des Verkabelungsbedarfes.

Die Spannung des Propulsionsnetzes darf sich in weiteren Grenzen bewegen. Sie wird begrenzt durch die zulässigen Betriebsgrenzen der Stromrichter. Die Schaltanlagen bedeuten keine Spannungsgrenze nach oben, da die handelsüblichen Mittelspannungsschaltfelder ohnehin für eine Reihenspannung von 11 kV bemessen sind.

Zu den Betriebsbedingungen eines hier einzusetzenden Duplex-Netzes gehören folgende Randbedingungen:

1. Die Einhaltung der zulässigen Spannungstoleranzen im Servicenetz hat bei der Netzregelung Priorität. Die Spannungsregler der Generatoren erhalten ihre Spannungs-Istwerte vom Servicenetz.
Als Alternative kann der Spannungs-Istwert an einer Anzapfung der Duplexdrossel nahe der Servicenetz-seitigen Klemmen abgenommen werden, die eine Spannungsänderung im Service-Netz im Rahmen der Vorschriften zuläßt.
2. Die belastungsbedingten Spannungsänderungen im Propulsionsnetz werden im Rahmen der zulässigen Grenzen durch die automatische Änderung der Steuerwinkel der Stromrichter kompensiert.
3. Die minimale Spannung im Propulsionsnetz muß bei der Dimensionierung der Antriebsmotoren in bezug auf Strom und Spannung sowie bei der Dimensionierung der Stromrichter auf die maximalen Ströme berücksichtigt werden.
4. Die maximale Spannung im Propulsionsnetz muß bei der Dimensionierung der Isolationsspannung der Schaltanlagen und der Sperrfähigkeit der Stromrichter berücksichtigt werden.

5.0 Betriebsverhalten der Cycloconverter

Dieser Abschnitt ist in der im Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft abgedruckten Fassung des Vortrags nicht enthalten. Damit die Nummern der übrigen Abbildungen mit der gedruckten Fassung übereinstimmen, werden die Abbildungen dieses Abschnitts als Abb. 501 bis Abb. 504 numeriert.

Für das Systemverhalten des Netzes sind die Betriebseigenschaften der Direktumrichter in entscheidendem Maße mitbestimmend.

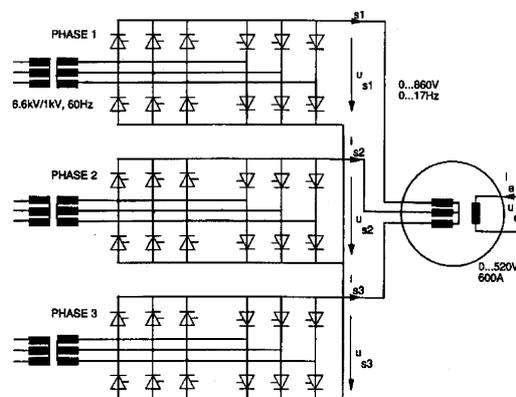


Abb. 501 Prinzipschaltung der Direktumrichter

Direktumrichter sind vom Arbeitsprinzip her gesteuerte Gleichrichter. Jede Phase der Antriebsmaschine erhält einen eigenen Vier-Quadranten-Gleichrichter. Die Ausgangsspannungen der gesteuerten Gleichrichter wird übergreifend geregelt und so schnell variiert, daß eine niederfrequenten Drehstromsystem einstellbarer Frequenz und Spannung entsteht. Als theoretische Obergrenze der Ausgangsfrequenz dieser Direktumrichter ergibt sich je nach Steuerverfahren etwa die halbe Frequenz des speisenden Netzes.

Da in der Literatur zum Verhalten dieser Direktumrichter kaum Informationen verfügbar sind, stellen die Autoren hier mit freundlicher Genehmigung der ABB Marine einige Diagramme zusammen:

Die Kurvenform der Stromaufnahme eines Teilumrichters für einen besonders ungünstigen Betriebszustand zeigt exemplarisch die untenstehende Abb.

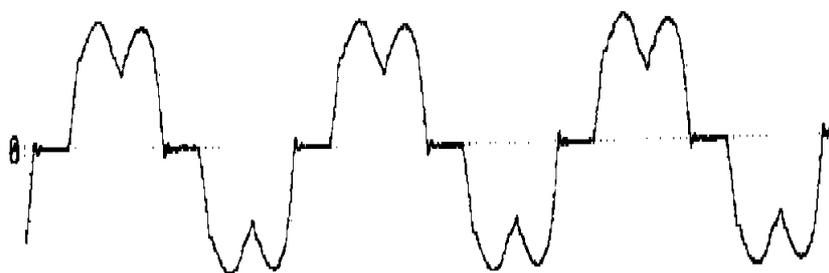


Abb. 502 Stromaufnahme Teilumrichter

Aus der Rückwirkung aller drei Teilumrichter resultiert die untenstehende Kurvenform der Versorgungsspannung. Zur Verdeutlichung wurde hier eine besonders hohe Reaktanz der Einspeisung eingestellt.

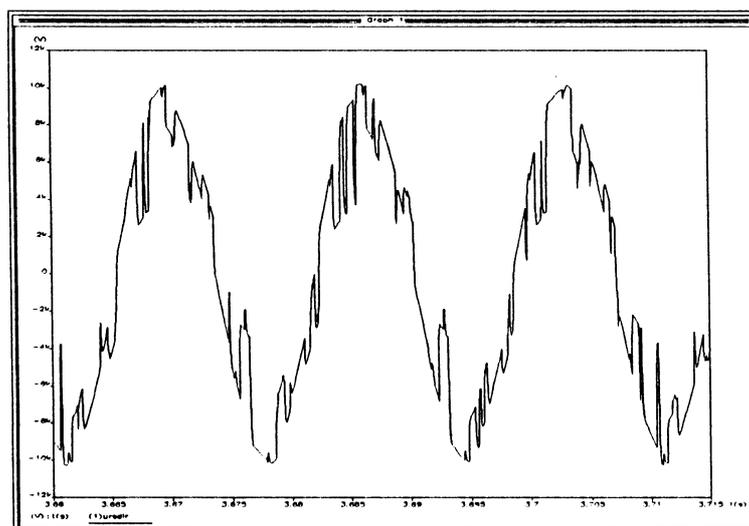


Abb. 503 Kurvenform der Versorgungsspannung

Aus dem Fahrwiderstand des Schiffes, der Erregerstrom-Regelung des Synchronmotors und den Betriebseigenschaften des Direktumrichters ergibt sich die untenstehende Abhängigkeit zwischen Propeller-Drehzahl und Leistungsfaktor.

CYCLO POWER FACTOR

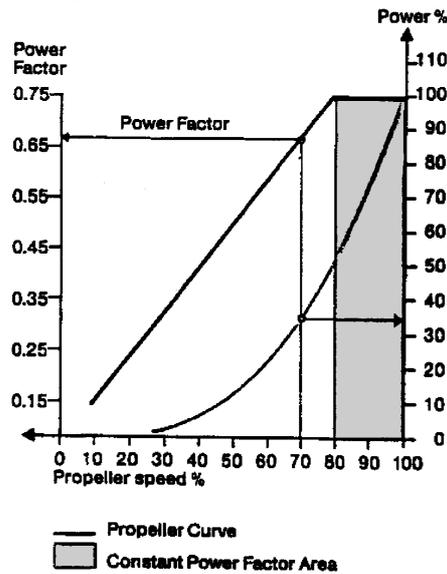


Abb. 504 Leistungsfaktor und Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Da die Last im vorliegenden Fall eine Synchronmaschine ist, braucht der Umrichter bei korrekter Ausführung der Erregerstrom-Regelung keine Blindleistung aufzubringen. Der Ausgangsstrom der Direktumrichters ist dem Maschinen-Drehmoment proportional.

Damit ist auch der Grundschwingungsstrom des aus dem Versorgungsnetz dem Maschinen-Drehmoment proportional.

5.1 Netzkonzept 1

Jedem Generator wird eine Duplexdrossel nachgeschaltet. Jede dieser Drosseln speist wie in Abschnitt 3 beschrieben jeweils zwei unabhängige Netze. Einerseits ist hier das Propulsionsnetz mit hohem Oberschwingungsgehalt angeschlossen, andererseits das ober-schwingungsarme Servicenetz.

Als Besonderheit sind hier sowohl Propulsions- als auch Servicenetz nochmals in Backbord- und Steuerbord-Netze teilbar. Damit können im Havariefall Fehler in Teilanlagen auf keinen Fall den völligen Ausfall von Antrieb oder Servicebetrieb bewirken. Das Ringnetz des Servicebetriebes erlaubt das Auftrennen an jeder Unterstation und damit im Fehlerfall das Heraustrennen einer einzelnen Station.

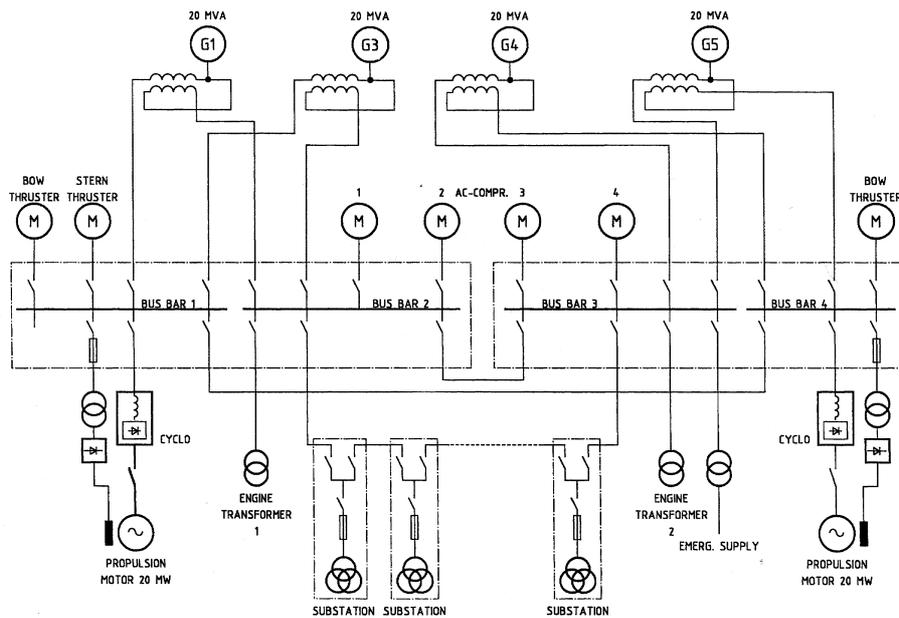


Abb. 6 Netzkonzept 1: Zuordnung der Duplexdrosseln zu den Generatoren

Anders als im Abschnitt 3 beschrieben sind hier die beiden Pfade der Duplexdrosseln nicht von Strömen gleicher Höhe durchflossen. Das Übersetzungsverhältnis der Duplexdrosseln muß daher auf mittlere Belastungsverhältnisse abgestimmt werden. Hier ist für das Servicenetz in etwa die doppelte Windungszahl im Vergleich zum Propulsionsnetz zu wählen.

Die optimale Bemessung der Duplex-Drosseln bedarf einer komplexen Berechnung der zu erwartenden Spannungsverhältnisse, weil die Ströme und ihre Phasenlagen in Abhängigkeit vom Betriebszustand des Propulsionsnetzes und der Last des Servicenetzes sehr verschieden sein können. Hierbei ist eine Vielzahl möglicher Betriebszustände zu untersuchen, jeweils unter Berücksichtigung des dann möglichen Schiffseinsatzes. So ist ein Seebetrieb mit nur einem Generator bei voller Service-Last und geringer Leistung der Antriebsanlage zwar vorstellbar, aber realitätsfremd.

Diese Berechnungen wurden im vorliegenden Fall durch aufwendige Computersimulationen der ABB erhärtet.

Bei starker Abweichung der Lasten in den beiden Teilnetzen vom optimierten Betriebszustand entstehen Spannungsdifferenzen zwischen Propulsions- und Servicenetz.

Um diese Spannungsdifferenzen möglichst gering zu halten, ist es wünschenswert, die Subtransientreaktanz der Generatoren möglichst gering zu wählen, damit die davon abgeleitete Induktivität der Duplex-Drosseln gering ausfallen kann.

Um den Aufwand für Schaltgeräte speziell im Servicenetz gering zu halten, wird ein möglichst kleiner prospektiver Kurzschlußstrom angestrebt, bei dem im Rahmen handelsüblicher Abstufungen möglichst kleine und damit raum- und kostensparende Schaltgeräte eingesetzt werden können. Um diese Forderung zu erfüllen, müßten die Reaktanzen von Generator und Duplexdrossel möglichst groß ausfallen.

In der Optimierung zwischen diesen gegensätzlichen Anforderungen liegt die eigentliche Herausforderung bei der Gestaltung dieses Grenzleistungs-Netzes.

Eine Übersichtsrechnung mit einer angenommenen Subtransientreaktanz der Generatoren von 15 % und einer Übersetzung der Duplexdrosseln von 2 ergibt:

Ohne die Duplexdrosseln ergäbe sich bei vier parallel arbeitenden Generatoren ein prospektiver Kurzschlußstrom von ca. 60 kA.

Mit Einsatz der Duplexdrosseln wird der prospektive Kurzschlußstrom im Servicenetz auf ca 30% des unbeeinflussten Stromes begrenzt und der Kurzschlußstrom im Propulsionsnetz ebenfalls erheblich vermindert.

Der Klirrfaktor der Spannung im Servicenetz wird kaum über demjenigen der leerlaufenden Generatoren liegen, also 5% nicht überschreiten, selbst wenn im Grenzfall im Propulsionsnetz ein Klirrfaktor von weit über 20% auftreten sollte.

Die Nutzung sechspulsiger Stromrichter bei Mittelspannung ohne den Einsatz von Versorgungstransformatoren und ohne weitere Saugkreise o.ä. ist damit problemlos möglich, was zur weiteren Kostenoptimierung beiträgt.

Wenn im Servicenetz eine maximale Abweichung von der Nennspannung innerhalb der Klassifikationsvorschriften geduldet wird, wird die Abweichung im Propulsionsnetz deutlich größer ausfallen, abhängig vom Belastungszustand der beiden Netze. Bei Minimallast im Servicenetz und gleichzeitiger Höchstlast im Propulsionsnetz ist die Spannung im Fahrnetz am geringsten, bei Höchstlast im Servicenetz und stehendem Hauptantrieb ist die Spannung im Fahrnetz am höchsten.

Die Vorteile dieses Konzeptes sind:

1. Schädliche Oberschwingungen werden unabhängig von der Frequenz und vom Betriebszustand der Netze sicher vom Servicenetz ferngehalten. Die Netzqualität im Servicenetz ist sehr gut.
2. Der prospektive Kurzschlußstrom im Servicenetz wird, verglichen mit einem Netz ohne Duplexdrossel auf etwa ein Drittel reduziert.
3. Der prospektive Kurzschlußstrom im Propulsionsnetz wird auf zwei Drittel des ursprünglichen Wertes reduziert. Bei vier gleichzeitig laufenden Generatoren wäre im Fahrnetz andernfalls die Grenze heute lieferbarer Schaltgeräte erreicht.
4. Dynamische Vorgänge im Propulsionsnetz, wie z.B. das direkte Zuschalten der Querstrahler, können die Qualität des Servicenetzes nicht beeinträchtigen. Kurzschlußvorgänge im Servicenetz beeinträchtigen das Fahrnetz ebenfalls nicht.

Der Hauptnachteil liegt in den lastabhängigen, deutlichen Spannungsänderungen im Fahrnetz.

5.2 Netzkonzept 2

In diesem Konzept werden die Duplexdrosseln den Stromrichtern zugeordnet. Die Generatoren werden in konventioneller Weise direkt auf eine Sammelschiene mit Längstrennung geschaltet. Von dieser Sammelschiene werden alle Verbraucher gespeist.

Als Kommutierungsdrossel für die Stromrichter der Propulsionsanlage dient die Primärwicklung jeweils einer Duplexdrossel, bzw. die Duplexdrosseln werden den Cyclo-Convertern vorgeschaltet. Die Einspeisungen für die beiden Sammelschienenhälften des Servicenetzes werden über die Sekundärwicklungen der Duplexdrosseln geführt um in bekannter Weise die Spannungsüberschwingungen infolge der Netzurückwirkungen der Stromrichter zu kompensieren.

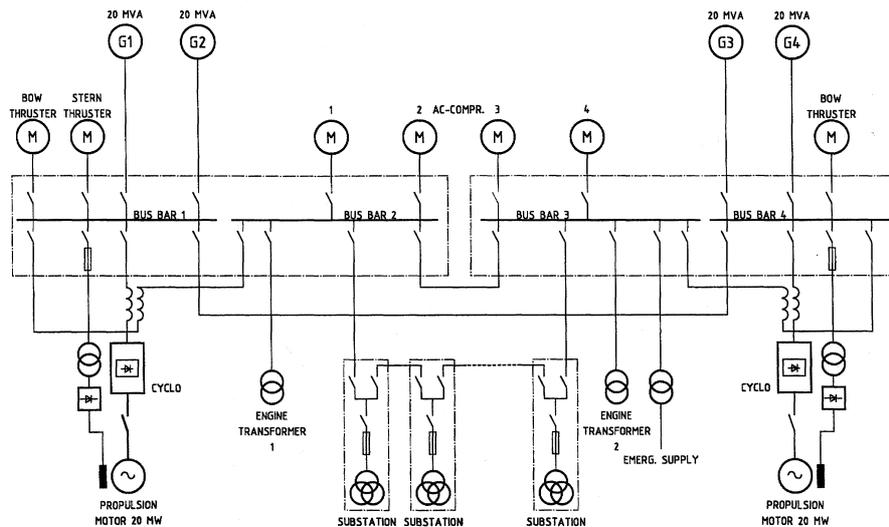


Abb. 7 Netzkonzept 2: Zuordnung der Duplexdrosseln zu den Generatoren

Damit ist das Netz hinter den Generatorschaltern gleich dem Propulsionsnetz; das ober-schwingungsarme Servicenetz wird erst hinter den Duplexdrosseln gebildet.

Die Reaktanz der Spannungsquelle wird bei diesem Konzept von der Parallelschaltung der speisenden Generatoren gebildet, ist also vom Schaltzustand des Netzes abhängig. Die Zahl der Schaltungsvarianten ist vielfältig, aber es gibt bevorzugte Kombinationen. Mit nur einem Generator ist ein Fahrbetrieb praktisch nicht möglich. Realistisch ist nur der Seebetrieb mit 2, 3 und 4 Generatoren. Mit zwei Generatoren ist nur Schleichfahrt möglich, dann ist der Oberschwingungsgehalt im Propulsionsnetz noch gering.

Der durchschnittliche Betrieb findet bei mittlerer Geschwindigkeit mit drei Generatoren statt. Für diesen Zustand sollte die optimale Kompensation ausgelegt werden.

Wird dann bei Betrieb mit vier Generatoren die höchste Stromrichter-Last abgefordert, dann beträgt die resultierende Reaktanz der Spannungsquelle nur noch drei Viertel gegenüber dem Auslegungszustand, damit ist die Induktivität der Duplexdrossel zu groß für diesen Betriebspunkt. Deshalb erfolgt eine Überkompensation.

Bei Betrieb von nur zwei Generatoren im Gesamtnetz ist die Reaktanz der Quelle gegenüber dem Auslegungszustand um 50% größer, daraus resultiert eine Unterkompensation.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn im Havariefall die Sammelschiene längs geteilt wird.

Bei Betrieb einer Hälfte mit einem Generator findet Unterkompensation statt, bei Betrieb einer Hälfte mit zwei Generatoren findet eine Überkompensation statt.

Bei der vorgegebenen Konfiguration treten sowohl bei Überkompensation wie auch bei Unterkompensation im Servicenetz Oberschwingungen von ca. einem Drittel des Wertes im Fahrnetz auf. Bei Überkompensation tritt eine Phasenverschiebung der Oberschwingungen um 180° ein.

Experimentaluntersuchungen und Veröffentlichungen des Germaischen Lloyd belegen, daß mit diesem Ansatz ein ausreichender Erfolg erreicht wird. Der Klirrfaktor im Servicenetz wird nur unter ungünstigen Bedingungen zeitweise größer als 5% sein, aber auch dann einen Wert von 10% nicht überschreiten.

Wenn die Hauptsammelschienen sowohl des Propulsionsnetzes als auch des Servicenetzes im Normalbetrieb gekuppelt sind, dann sind die beiden Duplexdrosseln ober- und

unterspannungsseitig parallel geschaltet. Dadurch ändert sich zunächst nichts an der Kompensation der Oberschwingungen.

Nur wenn die Propellermotoren mit ungleicher Leistung betrieben werden, ändert sich die Lastverteilung der Einspeisungen für das Servicenetz. Der Strom des höher belasteten Propellerantriebes erzeugt eine höhere Spannung an der sekundärseitigen Wicklung der Duplexdrossel. Diese Duplex-Drossel übernimmt infolgedessen einen höheren Anteil des Stromes für die Speisung des Service-Netzes.

Der Ausgleichsstrom über die Längskupplungen der Netze ist ein reiner Blindstrom maximal in etwa der Höhe des halben Nennstromes im Servicenetz. Dieser Strom ist ohne schädliche Wirkungen.

Der Vergleichbarkeit wegen soll auch hier von einer Subtransientreaktanz der Generatoren von 15% und einer Übersetzung der Duplexdrossel von 2 ausgegangen werden. Die Induktivität und die Übersetzung der Duplexdrosseln müssen hier mit Rücksicht darauf gewählt werden, daß die Primärinduktivität der Duplexdrossel als Teil der Kommutierungsdrossel wirkt.

In diesem Fall wird der Anteil der Generatoren am Kurzschlußstrom für die Hauptverteilung nicht durch die Duplexdrosseln beeinflusst, die Schaltanlage ist also nahezu für den gleichen Strom auszulegen, der sich ohne Duplexdrosseln ergibt.

Im Servicenetz und an den Stromrichtern ergeben sich durch den Einsatz der Duplexdrosseln verminderte Kurzschlußströme, die jedoch größer als im Konzept 1 ausfallen.

Die im Konzept 2 vorgesehene Zuordnung der Duplexdrosseln zu den Stromrichtern hat gegenüber dem Konzept 1 folgende Vorteile:

1. Es sind nur 2 Duplexdrosseln erforderlich anstelle von vier Duplexdrosseln kleinerer Leistung, die Kommutierungsdrosseln können kleiner gewählt werden oder entfallen ganz. Das bedeutet reduzierte Kosten und geringeren Raumbedarf.
2. In der Schaltanlage werden zwei Leistungsschalter-Felder eingespart. Auch das bedeutet reduzierte Kosten und verminderten Raumbedarf.
3. Die Bemessungsreaktanz der Duplexdrosseln ist um ein Drittel geringer. Deshalb wird der Spannungshub an den Stromrichtern bei Abweichung vom Bemessungspunkt geringer.
4. Der Spannungsfall und damit der Blindleistungsbedarf im Hafenbetrieb sind gering.

Als wesentliche Nachteile sind zu nennen:

1. Die Netzqualität im Servicenetz ist nicht immer optimal. Unterkompensation im Betrieb mit nur 2 Generatoren bzw. Überkompensation bei einem Betrieb mit 4 Generatoren führen jeweils zu Klirrfaktoren von 6 ... 8 % bei ungünstigen Betriebszuständen.
2. Die Verminderung der prospektiven Kurzschlußströme ist geringer als bei Konzept 1, die Schaltanlage ist entsprechend zu bemessen. Der Kurzschlußstrom in der Schaltanlage wird u.U. sehr hoch.
3. Die Zuordnung der Duplexdrosseln zu den Stromrichtern wird auf vielen Schiffen erfolgreich angewandt. Bisher sind die Ausgleichswicklungen aller Drosseln allerdings in Reihe geschaltet worden, die Parallelschaltung der beiden Duplexdrosseln bei der Einspeisung in das Service-Netz ist bisher noch nicht erprobt.
4. Der Einsatz von Duplexdrosseln als Kommutierungsdrosseln ist für Stromrichter derart großer Leistung noch nicht erprobt.

5.3 Bewertung der Netz-Konzepte

Bei der Bewertung der vorgestellten Netz-Konzepte wurde im aktuellen Fall durch ABB Marine dem Konzept 1 der Vorzug gegeben. Hierfür wurden Computersimulationen aller realistisch vorkommenden Betriebsarten und Betriebsmittelkombinationen angestellt und haben zu einer eindeutigen Auswahl geführt.

Das entscheidende Kriterium für die Auswahl ist im vorliegenden Fall die höchstmögliche Netzqualität. Der apparative Mehraufwand wird teilweise durch die geringeren Kosten der Komponenten infolge der geringeren Kurzschlußströme im Servicenetz und durch Vorteile bei der Installation kompensiert.

5.4 Umsetzung und Erprobung

Dieser Abschnitt wurde später nachgetragen.

Die Kreuzfahrtschiffe "SuperStar Virgo" und "SuperStar Leo" wurden wie im Abschnitt 5.1 beschrieben ausgerüstet. Das Konzept erwies sich als außerordentlich erfolgreich.

Zitat aus dem Meßprotokoll der Probefahrt:

Conclusions:

Duplex Reactor is working as was calculated. According to the measurements done in several operation points with different numbers of generators the voltage distortion in the service bus is not affected by the propulsion load. The small distortion (2.7 %) in the service voltage is caused by the other consumers in this bus.

6 Zusammenfassung

Nach einer kurzen Vorstellung von Wirkungsweise und Bauart von Duplexdrosseln wurden zwei unterschiedliche Konzepte für die Verbesserung der Netzqualität auf einem dieselelektrisch angetriebenen Kreuzfahrtschiff mit Hilfe von Duplexdrosseln vorgestellt.

Weitere Konzepte sind im Schrifttum erwähnt.

Bis 1997 sind bereits 80 Duplexdrosseln unterschiedlicher Leistungsdaten und Netz-Schaltungen im Einsatz. Die summierte Betriebsdauer aller Duplexdrosseln beträgt mehr als 200 Jahre. Die Drosseln sind völlig wartungsfrei, arbeiten ohne Steuerungstechnik und Hilfsenergie.

Es ist keine einzige Betriebsstörung durch Duplexdrosseln bekannt geworden.

Der Einsatz von Duplexdrosseln ermöglicht neben der Unterdrückung von Oberschwingungen auch eine beträchtliche Reduzierung der Kurzschlußströme und trägt damit wesentlich zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei, besonders in Grenzleistungsnetzen für elektrischen Fahrantrieb.

7 Schrifttum

Schild, W.: Stromteiler im Bordnetz. HANSA 1980 Nr 15/16, S. 1112 - 1116

Rüssel, K.; Schild, W.: Das Verhalten von Bordnetzen mit Stromteilerdrosselspulenzur Kurzschlußstrombegrenzung. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft Band 79 (1985), S. 215 - 224

Gaede, F.; Planitz, W.; Schild, W.; Weidel, W.; Wittburg, J.; Wulf, J.: Dämpfung von Oberschwingungen im Bordnetz mit Stromrichtern durch Einsatz von Duplexdrosseln. BMFT-Forschungsvorhaben MTK 0459-3, 1989

Schild, W.: Harmonische Oberschwingungen und Methoden der Kompensation im Bordnetz mit Stromrichtern. GL-technology Nr. 1, April 1991

Schild, W.: Bordnetze der Zukunft. HANSA 1991 Nr. 17, S. 904 - 907

Droste, W.; Härer, H.; Paduch, W.; Planitz, W.; Schild, W.: Moderne Bordnetz-Konzepte. Handbuch der Werften Band XXI. 1992, Schiffahrts-Verlag HANSA

Schild, W.: Anwendung und Bemessung von Ausgleichsdrosseln. HANSA 1994 Nr. 11, S. 26 - 28

NN: Projektunterlagen "Superstar Leo"/"Superstar Virgo". ABB Industrietechnik AG, Geschäftsfeld Marine, Öl und Gas

Hackmann, Th.: Diesel-Electric Propulsion Systems for Cruise Vessels. The Experience of the "Fantasy" Sea Trials. ABB Strömberg Drives, Helsinki 1990

8 Über die Autoren

Dipl.-Ing. Wolfgang Schild ist im Ruhestand nach vier Jahrzehnten Tätigkeit in der Schiffbauindustrie und beim Germanischen Lloyd. Er führte die Verwendung von Duplexdrosseln zur Verringerung der Kurzschlußbeanspruchungen und harmonischen Netzurückwirkungen in Hochleistungsschiffbordnetzen ein. Siehe auch GL Technology April 1991 (<http://www.germanlloyd.org/news/magazines/gltech/glt0491.html>)
Tel./Fax: (0 45 32) 83 82

Dr.-Ing Wolfgang Planitz ist Experte für Kraftwerkstechnik, Lehrbeauftragter für Leistungselektronik an der TU Hamburg-Harburg und wirkt an der Entwicklung schiffstechnischer Systeme mit.