



**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

**12 PATENTSCHRIFT A5**

11

**627 882**

21 Gesuchsnummer: 525/76

73 Inhaber:  
Northern Engineering Industries Limited,  
Newcastle upon Tyne (GB)

22 Anmeldungsdatum: 16.01.1976

72 Erfinder:  
Kenneth Charles Parton, Newcastle upon Tyne  
(GB)  
Anthony Derek Appleton, Newcastle upon Tyne  
(GB)  
Trevor Carlisle Bartram, Newcastle upon Tyne  
(GB)

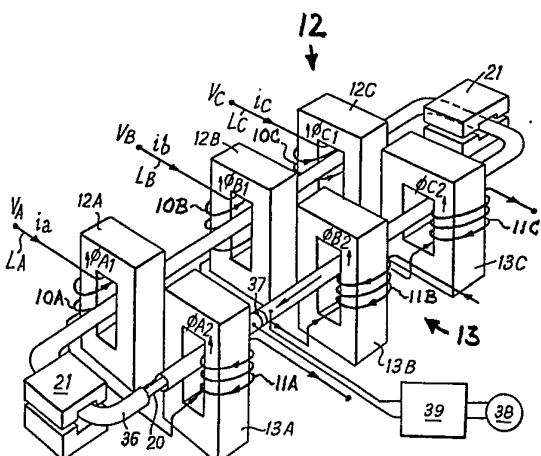
24 Patent erteilt: 29.01.1982

74 Vertreter:  
Brühwiler & Co., Zürich

45 Patentschrift  
veröffentlicht: 29.01.1982

**54 Strombegrenzungsaggregat für eine Wechselstromeinrichtung und Verwendung des Aggregates bei einer Leistungsübertragungsanlage.**

57 Zur Verringerung der Energieverluste sind bei dem Strombegrenzungsaggregat für jede Phase der Wechselstromeinrichtung mindestens zwei sättigungsfähige Drosselvorrichtungen (12,13) vorhanden. Jede weist eine Wechselstromwicklung (10A,10B,10C;11A,11B,11C) und eine supraleitende Gleichstrom-Vormagnetisierungswicklung (20,36) auf, die den Drosselkern (12A;12B;12C;13A;13B;13C) derart sättigt, dass letzterer auch bei Vollast der Wechselstromeinrichtung gesättigt bleibt. Die Wechselstromwicklungen (10A,10B,10C;11A,11B,11C) pro Phase bewirken, dass bei Vollast eine Änderung des Sättigungsgrades in einem der Drosselkerne (12A;12B;12C;13A;13B;13C) inbezug auf den allein durch die Vormagnetisierungswicklung (20,36) bedingten Sättigungsgrad mit einer entgegengesetzten Änderung des Sättigungsgrades in dem anderen Drosselkern (12A;12B;12C;13A;13B;13C) der gleichen Phase verbunden ist. Die Strombegrenzung erfolgt, wenn bei jeder Halbwelle der eine oder andere der Drosselkerne (12A;12B;12C;13A;13B;13C) aus seinem Sättigungszustand herausgedrängt wird. Das Aggregat eignet sich besonders für die Leistungsübertragung zwischen zwei Leistungs-Wechselstromeinrichtungen.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Strombegrenzungsaggregat für eine Wechselstromeinrichtung, dadurch gekennzeichnet, dass für jede Phase der Wechselstromeinrichtung mindestens zwei sättigungsfähige Drosselvorrichtungen (10, 12, 14; 11, 13, 15) vorhanden sind, von denen jede eine Wechselstromwicklung (10A; 11A; 10B; 11B; 10C; 11C) und eine supraleitende Gleichstrom-Vormagnetisierungswicklung (14A; 15A; 14B; 15B; 14C; 15C; 20) hat, die den Drosselkern (12A; 13A; 12B; 13B; 12C; 13C) der Drosselvorrichtung (10, 12, 14; 11, 13, 15) derart sättigt, dass letzterer auch bei einem durch die Wechselstromeinrichtung fließenden Vollast-Wechselstrom gesättigt bleibt, wobei pro Phase die Wechselstromwicklungen (10A; 11A; 10B; 11B; 10C; 11C) so ausgebildet und geschaltet sind, dass bei einem solchen Vollastwechselstrom eine Änderung des Sättigungsgrades in einem der Drosselkerne (12A; 13A; 12B; 13B; 12C; 13C) in bezug auf den allein durch die Vormagnetisierungswicklung (14A; 15A; 14B; 15B; 14C; 15C) bedingten Sättigungsgrad mit einer entgegengesetzten Änderung des Sättigungsgrades in dem anderen Drosselkern (13A; 12A; 13B; 12B; 13C; 12C) der gleichen Phase in bezug auf den allein durch die Vormagnetisierungswicklung (15A; 14A; 15B; 14B; 15C; 14C) bedingten Sättigungsgrad verbunden ist, wobei die Strombegrenzung erfolgt, wenn bei jeder Halbwelle der eine oder andere der Drosselkerne aus seinem Sättigungszustand herausgedrängt wird.

2. Aggregat nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein mit einem Luftspalt versehener magnetischer Kern an die Vormagnetisierungswicklung angekoppelt ist.

3. Aggregat nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass in jeder Phase die Wechselstromwicklungen miteinander in Reihe geschaltet sind.

4. Aggregat nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Vormagnetisierungswicklungen aller Drosselvorrichtungen eine einzige supraleitende Schleife bilden (Fig. 14).

5. Aggregat nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung, um den Vormagnetisierungsgrad jeder Drosselvorrichtung zu verändern.

6. Aggregat nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung Mittel hat, um die Stromzufuhr zur Vormagnetisierungswicklung zu verändern.

7. Aggregat nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung einen Kern mit Luftspalt aufweist, welcher Kern mit einer Steuerwicklung versehen ist, die an die Vormagnetisierungswicklung angekoppelt ist.

8. Aggregat nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung eine Hilfs-Vormagnetisierungswicklung aus einem Material mit normaler Leitfähigkeit aufweist, ferner Mittel, um den Strom der Hilfs-Vormagnetisierungswicklung zu verändern, die auf einer mindestens angenähert parallelen Bahn zu der supraleitenden Wicklung verläuft.

9. Aggregat nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine vermaschte Wechselstromwicklung aus einem Material mit normaler Leitfähigkeit, welche Wicklung an alle Drosselvorrichtungen angekoppelt ist.

10. Aggregat nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass rund um die supraleitende Vormagnetisierungswicklung eine magnetische Abschirmung angeordnet ist, um den Einfluss des Wechselstromflusses auf die supraleitende Vormagnetisierungswicklung zu unterdrücken.

11. Aggregat nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Hilfs-Vormagnetisierungswicklung als eine die supraleitende Vormagnetisierungswicklung umgebende magnetische Abschirmung ausgebildet ist, um den Einfluss des Wechselstromflusses auf die supraleitende Vormagnetisierungswicklung zu unterdrücken.

12. Aggregat nach Anspruch 10, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung zur Kühlung der magnetischen Abschirmung, um deren Leitfähigkeit zu vergrößern.

13. Aggregat nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetische Abschirmung mindestens teilweise aus supraleitendem Material besteht.

14. Aggregat nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein elektrische Energie absorbierendes Element, das parallel zum Ein- und Ausgang des Aggregats geschaltet ist, um die Stabilität der Wechselstromeinrichtung zu verbessern.

15. Aggregat nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Element ein elektrischer Widerstand ist.

16. Aggregat nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass in Reihe mit dem Element ein induktives Element geschaltet ist, um den Energieverlust bei Vollast zu verringern.

17. Verwendung des Strombegrenzungsaggregates nach Anspruch 1 für eine Leistungsübertragungsanlage mit zwei

15 elektrischen Leistungs-Wechselstromeinrichtungen, wobei diese beiden Einrichtungen über mindestens ein solches Strombegrenzungsaggregat miteinander verbunden sind, dadurch gekennzeichnet, dass der Vormagnetisierungsgrad des Aggregats (30 bis 33) in Abhängigkeit vom Phasenwinkel ( $\theta$ ) zwischen beiden Wechselstromeinrichtungen ( $E_1, E_2$ ) zyklisch verändert wird, um zwischen beiden Wechselstromeinrichtungen ( $E_1, E_2$ ) Leistung zu übertragen.

25

Die Erfindung betrifft ein Strombegrenzungsaggregat gemäss Oberbegriff des Anspruches 1 sowie eine Verwendung 30 des Aggregates für eine Leistungsübertragungsanlage gemäss Oberbegriff des Anspruches 17.

Derartige Aggregate werden dazu benötigt, um zu verhindern, dass der Strom in irgendeiner Zweigleitung einer Wechselstromeinrichtung einen bestimmten Grenzwert überschreitet, und zwar selbst im Falle eines Kurzschlusses oder im Falle 35 von Spannungsspitzen, die beim Schalten entstehen. Unter Wechselstromeinrichtung wird hier durchgehend jede Leitung, jedes Verteilernetz und jede elektrische Schaltung verstanden, in der bzw. in dem ein Wechselstrom mit freiwählbarer Phasenanzahl und Charakteristik fließt. Solche Aggregate müssen unter anfänglichen Umgebungsbedingungen und/oder im stationären Zustand, unter ausgewogenen oder unausgewogenen Bedingungen arbeiten und die Stabilität der Anlage bzw. des Verteilernetzes gewährleisten. Derartige Anlagen sollen ferner 40 die Anforderungen verringern, die an die Schaltwerke der Anlage bzw. des Verteilernetzes gestellt werden sowie an andere Bauteile, welche die Störanfälligkeit der Anlage bzw. des Verteilernetzes bestimmen. Bekannte Aggregate haben sich bisher nicht in jeder Beziehung geeignet.

50 Es sind bereits Strombegrenzungsaggregate bekannt (siehe z. B. die DE-PSen 12 57 259 und 20 28 924), von denen jede einen sättigungsfähigen Kern und für jede Phase der Wechselstromeinrichtung zwei Wicklungen aufweist. Keine dieser Strombegrenzungsaggregate weist jedoch eine supraleitende 55 Wicklung auf.

Aufgabe der Erfindung ist die Schaffung eines Strombegrenzungsaggregates der eingangs genannten Art für eine Wechselstromeinrichtung sowie die Verwendung des Aggregates bei einer Leistungsübertragungsanlage, welches Aggregat 60 die Nachteile bekannter Ausführungen nicht aufweist und insbesondere eine bessere Leistungsfähigkeit bei vergleichbarem Aufwand wie bei bekannten Ausführungen liefert. Diese Aufgabe wird beim Strombegrenzungsaggregat durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruches 1 gelöst.

65 Besonders vorteilhafte Ausgestaltungen des Strombegrenzungsaggregats sind in den Ansprüchen 2 bis 16 umschrieben.

Bei fehlender Abschirmung kann eine Erhitzung der supraleitenden Vormagnetisierungswicklung zu einer Rückkehr in

den normalen leitenden Zustand führen. In einigen Fällen ist jedoch die Rückkehr in den normalen leitenden Zustand in Verbindung mit einem grossen Anstieg der Impedanz des Aggregats als Sicherheitsvorkehrung nützlich, falls eine sehr starke Stromüberlastung erfolgt.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele des Erfindungsgegenstandes sind nachfolgend anhand der Zeichnungen näher beschrieben, dabei zeigen schematisch:

Fig. 1 ein Diagramm, in dem für ein mit einer sättigungsfähigen Drosselvorrichtung der Kraftfluss  $\Phi$  über der Amperewindungszahl  $\Sigma N I$  aufgetragen ist, wobei auch die Wellenformen für den Kraftfluss und den Strom bei der Strombegrenzung zu erkennen sind;

Fig. 2 ein Schaltschema für ein Strombegrenzungsaggregat;

Fig. 3 ein Schaltschema für ein zweites Strombegrenzungsaggregat;

Fig. 4 ein drittes Strombegrenzungsaggregat in schaubildlicher Darstellung;

Fig. 5 ein Schaltschema für den Anschluss an eine Wechselstromeinrichtung;

Fig. 6 eine Leistungsübertragungsanlage mit zwei Wechselstromeinrichtungen mit verschiedenen Eigenschaften sowie Diagramme, in denen der Strom  $I$  bzw. die Leistung  $P$  über dem Phasenwinkel  $\theta$  aufgetragen sind (nicht erfundungsgemäß);

Fig. 7 eine ähnliche Darstellung wie in Fig. 6 mit einem Strombegrenzungsaggregat (erfindungsgemäß);

Fig. 8 eine ähnliche Darstellung wie in Fig. 7, jedoch mit drei Strombegrenzungsaggregaten;

Fig. 9 eine ähnliche Darstellung wie in Fig. 8, jedoch mit drei sättigungsfähigen Drosselvorrichtungen in jeder Phase eines dreiphasigen Wechselstromverteilernetzes;

Fig. 10 eine Leistungsübertragungsanlage sowie ein Diagramm, in dem die übertragene Leistung  $P$  über dem Phasenwinkel  $\theta$  aufgetragen ist (nicht erfundungsgemäß);

Fig. 11 eine ähnliche Darstellung wie in Fig. 10 (erfindungsgemäß);

Fig. 12 eine ähnliche Darstellung wie in Fig. 11, jedoch mit verbesserter Stabilität;

Fig. 13 ausschnittsweise eine abgewandelte Ausführungsform der Fig. 12;

Fig. 14 eine abgewandelte Ausführungsform der Fig. 4 in schaubildlicher Darstellung; und

Fig. 15 ein ähnliches Schaltschema wie in Fig. 2, jedoch mit einer zusätzlichen Vieleckwicklung, welche die Kerne der Drosselvorrichtungen ankoppelt.

Das Diagramm der Fig. 1 zeigt ein «Knie» am Sättigungspunkt. Normalerweise erhält der Steuer-Gleichstrom einer Vormagnetisierungswicklung den Kern im gesättigten Zustand an der Stelle 0 der Kurve, wobei der normale Vollast-Strom  $I_L$  in der Wechselstromwicklung eine sinusförmige Veränderung des Kraftflusses  $\Phi$  an der Stelle 0 zwischen den Punkten A, B bewirkt. Wichtig ist, dass der Kern gesättigt bleibt. Als Folge davon tritt ein restlicher Reihenspannungsabfall

$$V_L = K \cdot \Delta \Phi$$

an der sättigungsfähigen Drosselvorrichtung auf, wobei  $\Delta \Phi$  die Kraftflussänderung zwischen den Stellen O, A und K eine Konstante ist.

Beim Auftreten einer Störung bewirkt jedoch das Ansteigen des Laststromes in der negativen Halbwelle, dass der Kraftfluss  $\Phi_T$  unter den genannten Wert bis auf den Wert C fällt. Das bewirkt eine starke Kraftflussänderung und somit eine induzierte elektromotorische Kraft, die der Leistungsspannung entgegengesetzt gerichtet ist. Der Störungsstrom wird dadurch begrenzt und verläuft längs der Kurve  $I_F$ , es ist jedoch eine zusätzliche Komponente erforderlich, um die erhöhten Amperewindungszahlen zu liefern, die durch die Selbstinduk-

tion der Vormagnetisierungswicklung benötigt werden. Auf diese Weise ergibt sich der Gesamtstrom  $I_T$ . Die Selbstinduktion der Vormagnetisierungswicklung ist so bemessen, dass sie im Steuerbereich linear bleibt oder dass sie der besonderen Strombegrenzung entspricht, die erforderlich ist.

Es ist zu bemerken, dass, wenn die Wechselstromwicklung in zwei gleiche Hälften auf getrennten Eisenkernen angeordnet ist und wenn diese mit entgegengesetzten Polaritäten in bezug auf eine gemeinsame Gleichstromvormagnetisierungswicklung miteinander elektrisch verbunden werden, der zweite Kern in ähnlicher Weise arbeitet, wie es oben beschrieben worden ist, jedoch während der entgegengesetzten Halbwelle des Wechselstroms. Das Strombegrenzungsaggregat wirkt auf diese Weise symmetrisch in seiner Wirkung auf den Wechselstrom, wobei keine fundamentalen Komponenten des Stroms oder des Kraftflusses in die Gleichstromwicklung eingeführt werden. Der Wechselstrom ist im Störungsfalle nicht sinusförmig bei dem einfachen, dargestellten Beispiel, jedoch kann in der Praxis die Wellenform  $I_F$  leicht modifiziert werden.

Die Schaltung der Fig. 2 zeigt dreiphasige Wechselstromeinrichtung mit den Spannungen  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  und den entsprechenden Strömen  $i_a$ ,  $i_b$  bzw.  $i_c$  in den einzelnen Phasen.

Jede Phase weist zwei Wicklungen 10, 11 auf, denen in der Fig. 2 die Indices A, B bzw. C gegeben worden sind, um ihre Zugehörigkeit zu den zugeordneten Phasen auszudrücken. Diese Wicklungen 10, 11 liegen in Reihe und sind an voneinander getrennten, sättigungsfähigen Kernen 12, 13 einer Drosselvorrichtung angeordnet, und zwar in entgegengesetztem Sinne. Die Kerne 12, 13 haben ferner in Reihe liegende Gleichstromsteuerwicklungen 14 bzw. 15, welche in einem gemeinsamen Schaltkreis liegen, dessen Spannung  $V_{DC}$  und dessen Stromstärke  $i_{dc}$  sind. Obwohl die Steuerwicklungen getrennt dargestellt sind, werden sie vorzugsweise als einzige Wicklung ausgebildet, die allen Kernen der Drosselvorrichtungen gemeinsam ist, wie es weiter unten näher erläutert wird.

Die Steuerschaltung weist Kerne für den Kraftfluss auf, um ihr unter Störbedingungen die nötige Selbstinduktion zu geben, wie es beispielsweise durch eine Wicklung 16 dargestellt ist, die einem Kern 17 zugeordnet ist. Die Kraftflüsse in den Kernen 12, 13 sind durch die Bezugszeichen  $\Phi_1$  bzw.  $\Phi_2$  gekennzeichnet, wobei wieder die Indices A, B bzw. C die drei verschiedenen Phasen angeben. Der Kraftfluss im Kern 17 ist durch das Bezugszeichen  $\Phi_{DC}$  angedeutet.

In Fig. 3 ist die Steuerschaltung eine einzige Schleife 20, welche allen Kernen der Drosselvorrichtungen gemeinsam ist. Die Schleife 20 ist eine supraleitende Spule, in der ein festgelegter Vormagnetisierungsgleichstrom kontinuierlich zirkuliert, und zwar ohne äussere Anschlüsse.

Die Fig. 4 entspricht der Fig. 3 und zeigt, dass die Kerne 12, 13 für die drei Phasen paarweise so angeordnet sind, dass sie die eine supraleitende Spule 20 umgeben, die außerdem mit nicht sättigungsfähigen magnetischen Kernen 21 mit Luftspalt versehen ist, um die Selbstinduktion der Gleichstromwicklung zu vergrössern. Die Kerne 21 mit Luftspalt sind mit Steuerwicklungen 22 versehen, mit deren Hilfe der Vormagnetisierungskraftfluss in den Kernen 12, 13 mittels der Vormagnetisierungswicklung 20 geändert werden kann, um den Grenzwert des Stroms zu verändern, wie es weiter unten näher beschrieben wird.

Rund um die supraleitende Spule 20 ist eine Anzahl von Kernen 21 angeordnet, welche zusätzlich zu der erforderlichen Selbstinduktion als mechanische Stützen für die Spule 20 wirken. Während die Kerne 12, 13 in Fig. 4 rechteckig eingezeichnet sind, können sie auch toroidförmig ausgebildet sein, und auf diese Weise könnte man die Leistungsfähigkeit des Strombegrenzungsaggregats dadurch verbessern, dass man die äquivalente Reihenreaktanz verringert, und zwar unter normaler Last, dass man die Energieverluste verringert und eine

genauere Steuerung erzielt.

Nach diesen Prinzipien kann eine sehr grosse Anzahl von sättigungsfähigen Drosselvorrichtungen gebaut werden, die dieselben Eigenschaften aufweist oder ähnliche Eigenschaften. Gleichzeitig können die Oberwellengehalte der Kraftflüsse und der Ströme so verändert werden, dass der erforderliche Gesamt-Oberwellengehalt und der zeitliche Verlauf erzielt wird. Die möglichen Modifikationen betreffen umgekehrte Parallelverbindungen der Wechselstromspulen anstatt der umgekehrten Reihenverbindung, vielfach Kerne mit Phasenverschiebungsverbindungen, zusätzlich Gleichstromkreise und den Einbau verschiedener induktiver und kapazitiver Bauteile und Filtervorrichtungen.

Wenn ein Transformator und ein Strombegrenzungsaggregat am selben Ort erforderlich sind, ist es zweckmäßig, beide dicht benachbart anzutragen, vorzugsweise im selben Behälter mit Innenverbindungen. Fig. 5 zeigt, wie ein Strombegrenzungsaggregat mit einem dreiphasigen Autotransformer verbunden werden kann, welcher die Leistung zwischen einer Quelle und einer Last überträgt, um die Last gegen Leistungsstörungen in der Zuleitung zu schützen. Das Strombegrenzungsaggregat 26 ist zwischen den Transformatorwindungen 23, 24, 25 einerseits und dem neutralen Punkt 27 andererseits der Quelle angeschlossen.

Die Benutzung von Strombegrenzungsaggregaten in Reihe mit oder in Kombination mit einem Transformator zwischen einer Zuführungs-Wechselstromeinrichtung und einer örtlichen Verteilungs-Wechselstromeinrichtung leistet Gewähr, dass die Fehlergrenze auf einen bestimmten Bruchteil der vollen Last beschränkt werden kann und dass die nachfolgende Vergrößerung der Last an der Verteilungs-Wechselstromeinrichtung nicht den Fehlerpegel vergrößert oder den Kurzschlussstrom, und zwar auf einen Wert, wo die Auslegung des Schaltwerkes unzureichend ist und ein kostspieliges neues Schaltwerk eingesetzt werden muss. Eine ähnliche Anwendung besteht beim Strombegrenzungsaggregat, um das Einströmen von Fehlerströmen in die Zuleitung von der synchronen Anlage eines lokalen Benutzers zu begrenzen. Auf diese Weise wäre es möglich, dass die Strombegrenzungen beim Benutzer in grossem Umfange verringert werden könnten.

Eine weitere Anwendung des Strombegrenzungsaggregats besteht darin, zwei Leistungs-Wechselstromeinrichtungen miteinander zu einer Anlage zu verbinden. Das begrenzt in beiden Wechselstromeinrichtungen jedes Anwachsen des Fehlerpegels auf einen Wert, der durch den Grenzstrom des Strombegrenzungsaggregats bestimmt ist und vermeidet wiederum die Notwendigkeit, kostspielige, stärker ausgelegte Schaltwerke zu verwenden, um den sehr stark angestiegenen Fehlerpegeln Rechnung zu tragen, welche in Abwesenheit der Strombegrenzungsaggregate auftreten würden. Durch zyklische Veränderung des Grenzstromes der Strombegrenzungsaggregate ist es ferner möglich, eine gesteuerte Leistungsübertragung zwischen zwei Zuführungs-Wechselstromeinrichtungen zu erzielen, und zwar ohne die Notwendigkeit, dass letztere in einem kontinuierlichen Zustand des Synchronismus in bezug aufeinander bleiben.

Fig. 6 dient zur Erläuterung des Standes der Technik. Im oberen Teil der Fig. 6 sind zwei Leistungs-Wechselstromeinrichtungen mit äquivalenten elektromotorischen Kräften  $E_1$ ,  $E_2$  dargestellt, die über eine scheinbare Reaktanz  $X$  miteinander verbunden sind. Wie das Vektordiagramm zeigt, ist die elektrische Phasenverschiebung zwischen beiden Wechselstromeinrichtungen durch den Winkel  $\theta$  ausgedrückt. Die Veränderung der Leistung  $P$  und des Stroms  $I$ , welcher zwischen den beiden Wechselstromeinrichtungen  $E_1$ ,  $E_2$  in Abhängigkeit vom Winkel  $\theta$  fließt, ist in den Diagrammen am unteren Teil der Fig. 6 dargestellt. Die schraffierten Bereiche 0 bis  $\pi/2$  oder zwischen  $3\pi/2$  und  $2\pi$  stellen Bereiche dar, in denen die Leistungsüber-

tragung ohne Instabilität möglich ist. Ausserhalb dieser Bereiche kann jedoch ein Verlust an Stabilität erfolgen, was zu einer unkontrollierten Beschleunigung und Verzögerung der Generatoren führt und in unannehmbarer Weise die Ströme und Spannungen in beiden Wechselstromeinrichtungen vergrößert.

Die ein Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellende Fig. 7 zeigt die Verbesserung, die zu verzeichnen ist, wenn die beiden Wechselstromeinrichtungen mittels eines Strombegrenzungsaggregats miteinander verbunden werden. In den Diagrammen ist mit ausgezogenen Linien der Fall dargestellt, so der Grenzwert des Stromes konstant gehalten wird. Es ist leicht zu erkennen, dass das vom Stabilitätsstandpunkt eine zufriedenstellende Bedingung darstellt, dass aber der Leistungsfluss ganz einfach zwischen den beiden Wechselstromeinrichtungen oszilliert. Wenn jedoch der Grenzwert des Stromes zyklisch verändert wird, um den Stromfluss auf einen Mindestwert in den miteinander abwechselnden Halbwellen zu begrenzen, ist der Stromverlauf und der Leistungsfluss so, wie es mit unterbrochenen Linien dargestellt ist. Es besteht also ein einsinnig pulsierender Leistungsfluss von einer Wechselstromeinrichtung zur anderen, und zwar ohne Verlust an Stabilität und ohne synchrone Betätigung beider Wechselstromeinrichtungen. Die notwendige Steuerung des Grenzwerts des Stroms kann dadurch erreicht werden, dass man die effektiven Amperewindungszahlen der Gleichstromwicklungen der Strombegrenzungsaggregate verändert. Es ist dazu eine verhältnismäßig kleine Energieveränderung notwendig, um den Zustand der Kerne der Drosselvorrichtungen zu verändern, welche rechteckförmige Hystereseschleifen haben, und die supraleitende Spule gewährleistet, dass die gesamte eingeschlossene Kraftflussverbindung zu allen Zeiten konstant bleibt. Beispielsweise kann die Steuerung dadurch erfolgen, dass man die Gleichstromzufuhr zu der Vormagnetisierungswicklung verändert oder aber deren Selbstinduktion mittels einer Steuerwicklung an den zugeordneten Kernen mit Luftspalt. Das letztergenannte Verfahren bezeichnet man als «flux pumping» und ist bei supraleitenden Wicklungen bekannt.

Fig. 8 zeigt die Verbindung zweier Wechselstromeinrichtungen mit äquivalenten elektromotorischen Kräften  $E_1$ ,  $E_2$  und Sequenzen  $f + \Delta f$  bzw.  $f$ , wodurch ein sich kontinuierlich verändernder Phasenwinkel  $\theta$  erzielt wird. Die Wechselstromeinrichtungen sind alle dreiphasig und sind mittels eines dreiphasigen Strombegrenzungsaggregats 30 miteinander verbunden, welches eine gemeinsame Steuerwicklung hat. Letzterer wird ein Steuerstrom  $I_{DC}$  von einer Steuervorrichtung K zugeführt, die  $I_{DC}$  zyklisch in Abhängigkeit von  $\theta$  verändert, wie es die Diagramme zeigen. Das führt zu einer entsprechenden Veränderung der gesamten übertragenen Energie  $P_{TOT}$  in Abhängigkeit von  $\theta$ .

In Fig. 9 sind drei Strombegrenzungsaggregate 31, 32, 33 parallel geschaltet und weisen Steuerströme  $I_{DC1}$ ,  $I_{DC2}$  bzw.  $I_{DC3}$  auf. Letztere folgen ähnlichen Kurven 1, 2, 3, aber sie sind in bezug auf den Verschiebungswinkel  $\theta$  verschoben. Auf diese Weise wird ein im wesentlichen konstanter Energiefluss von einer Wechselstromeinrichtung zur anderen erzielt, und zwar unabhängig von der Änderung von  $\theta$ , wie es die Gerade für  $P_{TOT}$  in Abhängigkeit von  $\theta$  zeigt.

Wenn bei einer der beiden Wechselstromeinrichtungen eine vorübergehende Störung auftritt, wie z. B. ein kurzdauernder Kurzschluss, besteht die unmittelbare Wirkung darin, dass Oszillationen der relativen elektrischen Maschinenwinkel erzeugt werden, und zwar bei den verschiedenen Generatoren und aufgrund eines plötzlichen auftretenden Ungleichgewichts zwischen dem mechanischen Drehimpulseingang für jeden Generator, welcher gewöhnlich im wesentlichen konstant bleibt. Ausserdem ändert sich das elektrische Drehmoment, das für die Wechselstromeinrichtung vorgeschrieben ist, welches

virtuell augenblicklich sich ändern kann, wenn sich die Wechselstromeinrichtung ändert. Diese Oszillationen bewirken Strom- und Leistungsfluktuationen, die durch die Wechselstromeinrichtung gedämpft werden können oder auch nicht. Bekannte Merkmale bestehen bereits, um das Verhalten der Wechselstromeinrichtung gegenüber einer solchen Störung vorherzusagen und insbesondere zu ermitteln, ob die Wechselstromeinrichtung sich selbst erholt, was zu einer stabilen Funktionsweise führt, oder ob die Wechselstromeinrichtung die Oszillation vergrößert, bis ein Asynchronverlauf von einem oder mehreren der Generatoren auftritt, was zu einem Verlust an Stabilität führt. Die Anwendung dieser Merkmale auf eine bestimmte Wechselstromeinrichtung ist sehr wichtig für die gesamte Auslegung der Wechselstromeinrichtung und bestimmt die erforderliche Belastungsfähigkeit von vielen Bau- 15 teilen der Wechselstromeinrichtung, beispielsweise die Geschwindigkeit der Störungsbehebung bei Schaltern, die mit sehr hoher Geschwindigkeit unterbrechen.

Der Einbau von Strombegrenzungssystemen in die Wechselstromeinrichtung reduziert die Größen der Fehlerströme, kann aber in einigen Fällen auch die elektrischen Wiederherstellungsdrehmomente an den Generatorrotoren verringern und dadurch die Wechselstromeinrichtung weniger stabil machen. Dieses Problem wird anhand der Fig. 10 und 11 erläutert. Fig. 10a zeigt einen Generator G1 mit einer Leistung  $P_1$ , die er an eine grosse elektrische Wechselstromeinrichtung S2 abgibt, wo die Spannungsvektoren des Generators und der Wechselstromeinrichtung  $E_1$  bzw.  $E_2$  sind. Der Winkel  $\theta_1$  ist der Leistungswinkel. Fig. 10b zeigt für diese Wechselstromeinrichtung die Leistung  $P$  in Abhängigkeit vom Leistungswinkel  $\theta$ . Die Kurve  $T_e$  zeigt das elektrische Drehmoment als Funktion von  $\theta$ , wogegen das mechanische Drehmoment konstant ist, wie es die Linie  $T_M$  zeigt.

Wenn eine Störung von kurzer Dauer erfolgt, wie es bei F angedeutet ist, wird die Maschine G1 in Vorwärtsrichtung beschleunigt, da das elektrische Ausgleichsdrehmoment auf Null verringert wird. Wenn jedoch nach einer kurzen Zeitspanne die Störung beseitigt wird und wenn der Generator den Winkel  $\theta_2$  erreicht hat, so wird ein stark der Wiederherstellung dienendes elektrisches Drehmoment  $T'$  automatisch zugeführt, 40 um eine Verzögerung auszulösen, und zwar der relativen Vorwärtsbewegung des Rotors der Maschine G1. Es ist jedoch zu bemerken, dass, wenn der Rotorwinkel sich fortgesetzt nach vorn bewegt, das elektrische Drehmoment verringert wird, und dass, wenn der Punkt S erreicht wird, bevor die Vorwärtsbewe- 45 gung in vollem Umfange beendet worden ist, das Wiederherstellungsdrehmoment verschwinden wird. Der Grund dafür besteht darin, dass  $T_e$  kleiner wird als  $T_M$  und dass der Rotor fortgesetzt sich beschleunigt, bis die Stabilität verloren geht. Diese Vorwärtsbewegung hört auf, wenn der Bereich A<sub>1</sub> gleich 50 dem Bereich A<sub>2</sub> wird («equal area criterion»). In der Praxis wird also die Stabilitätsgrenze erreicht, wenn der Anfangsbereich A<sub>1</sub> gleich dem gesamten erzielbaren Wiederherstellungsbe- reich FT'S wird.

Die Fig. 11a zeigt die Verbesserung, die durch die Hinzufü- 55 gung eines strombegrenzenden Strombegrenzungssystems 35 erzielt wird, welche den Generator G1 mit der Wechselstromeinrichtung S2 verbindet. Die Fig. 11b zeigt die Wirkung in Form eines Diagramms, welches zeigt, dass der Erholungsbereich FT'S soweit verringert wird, dass eine viel kürzere Störungsdauer d. h. ein kleinerer Bereich A<sub>1</sub> einen Verlust an Stabilität bewirken könnte. Die Sachlage ist dieselbe, gleichgültig ob die Störung auf der Generatorseite oder der Wechselstromeinrichtungsseite des Strombegrenzungssystems 35 stattfindet.

Das Stabilitätsproblem kann dadurch gelöst werden, dass man ein elektrische Energie absorbierendes Element in einer Schaltung parallel zum Strombegrenzungssystem setzt. Beim

Normalbetrieb ist der Spannungsabfall an Strombegrenzungssystemen klein und folglich ist auch der Energieverlust bei der Energieübertragung auf die Wechselstromeinrichtung im energieabsorbierenden Element klein. Im Falle einer Störung 5 wächst jedoch die Spannung an und die absorbierte Energie kann genügend gross gemacht werden, um Oszillationen der Wechselstromeinrichtung zu dämpfen. Als Beispiel zeigt die Fig. 12 auf der linken Seite das Ergebnis der Hinzufügung eines energieabsorbierenden Widerstandes R, und zwar parallel zum Strombegrenzungssystem 35. Fig. 12b zeigt die resultierende Drehmomentkurve  $T_e$  für eine Störung, die auf der Generatorseite des Strombegrenzungssystems 35 auftritt. Der Rotor wird wie oben erläutert, bis zum Winkel  $\theta_2$  beschleunigt, wenn aber einmal die Störung behoben ist, besteht eine zusätzliche sehr grosse Energie und somit auch ein zusätzliches Drehmoment, welches auf der Generatorseite erforderlich ist, um Energie dem Widerstand zuzuführen, der eine beträchtliche Spannungsdifferenz an seinen Enden aufweist. Daher wird die Stabilität der Wechselstromeinrichtung sehr schnell wiederhergestellt. Wenn jedoch eine Störung auf der Wechselstromeinrichtungsseite des Strombegrenzungssystems 35 auftritt, überträgt der Generator im Endeffekt seine Last auf den Widerstand R, so dass also keine Beschleunigung erfolgt. Zur Zeit der Beseitigung der Störung erfolgt also keine beträchtliche Änderung des Winkels  $\theta_1$ , und das System erholt sich unmittelbar darauf.

Wie die Fig. 13 zeigt, können die normalerweise im stationären Zustand auftretenden Verluste, die durch den Widerstand R dadurch hervorgerufen werden, dadurch beseitigt werden und auf einen sehr kleinen Wert gedrückt werden, dass man eine vorzugsweise nicht-lineare Abstimmvorrichtung oder eine Vormagnetisierungsvorrichtung dem Parallelkreis zufügt. In diesem Falle wird eine kleine Induktionsspule L mit einem Eisenkern in Reihe mit dem Widerstand R geschaltet und so 35 ausgelegt, dass sie unter normalen Arbeitsbedingungen eine hohe Impedanz für den Durchgang des Stroms in den Widerstand R darstellt. Wenn jedoch eine Störung auftritt, so ergibt sich, dass die Spannung an der Transduktorenvorrichtung beträchtlich ansteigt, die Induktion der Spule L gesättigt wird und eine kleine Impedanz für die Absorption der erforderlichen Energie des Widerstands R bietet. Es ist zu bemerken, dass es für den Parallelkreis an der Transduktorenvorrichtung viele andere Modifikationen gibt, die dazu benutzt werden können, um die stationären Zustandsverluste des Widerstands R auf ein Mindestmass zu verringern.

Bei den oben beschriebenen Strombegrenzungssystemen hat der Kern jeder Drosselvorrichtung eine einzige Gleichstromwicklung, und diese Wicklungen sind alle so verbunden, dass sie einen gemeinsamen direkten Stromkreis bilden. Es ist jedoch auch möglich, zur Verbesserung der Steuerung zusätzliche Gleichstromwicklungen parallel zur supraleitenden Haupt-Gleichstromwicklung anzubringen. Das bedeutet, dass sie einen ähnlichen Weg einschlagen wie die supraleitende Vormagnetisierungsvorrichtung, jedoch gewöhnlich elektrisch unabhängig von derselben sind. Während die supraleitende Hauptwicklung immer denselben Strom führt, kann der Strom in der Hilfswicklung leichter und schneller verändert werden, um den Gesamtkraftfluss in den Kernen der Drosselvorrichtungen zu vergrößern oder zu verkleinern. Fig. 14 zeigt einen speziellen Fall, wo die Haupt-Gleichstromwicklung auch als Kraftfluss- 55 schirm für die supraleitende Wicklung dient.

Es besteht das Bestreben, die Stärke des wechselnden magnetischen Kraftflusses, der die supraleitende Steuerwicklung beeinflusst, auf ein Mindestmass zu verringern, weil das zu einer Erhöhung der inneren Temperatur führt und die Möglichkeit der Umkehr zur normalen Leitfähigkeit bietet. Das wird ohne Störung durch den stetigen Kraftfluss ermöglicht, der durch die supraleitende Wicklung selbst erzeugt wird, und zwar

durch die Anbringung eines normalleitenden Kraftflussschirms rund um die supraleitende Wicklung. In Fig. 14 entsprechen die Teile denen der Fig. 4 und haben auch dieselben Bezugsziffern. Die supraleitende Wicklung 20 und deren Kryostat sind in einem metallischen, normalleitenden, hohlen, rohrförmigen, magnetischen Kraftflussschirm 36 eingeschlossen, der einen kreisförmigen Querschnitt hat, welcher das äussere Gehäuse des Kryostaten bildet. Die Wand des Schirms 36 ist so ausgelegt, dass sie grösser ist als die Skindicke für Wechselströme der niedrigsten Frequenz, die mittels der magnetischen Ankopplung mit dem Kern der Drosselvorrichtung induziert werden können. Unter normalen Bedingungen ist die Änderung des Kraftflusses in den Kernen der Drosselvorrichtungen klein, und der Wechselstrom im Schirm 36 ist sehr niedrig. Beim Auftreten eines Fehlers sind jedoch die Änderungen des Kraftflusses beträchtlich und Skin-Wechselströme werden im Schirm induziert, der dann die supraleitende Wicklung 20 schützt.

Der normalleitende, magnetische Kraftflussschirm 36 oder eine besondere normalleitende Wicklung kann parallel zur supraleitenden Wicklung geschaltet werden, um als Hilfs-Steuerwicklung zu wirken. Im Falle einer besonderen Wicklung kann diese ihren eigenen Selbstinduktionselementen zugeordnet werden, und zwar in Form von magnetischen Kernen mit Luftspalt, und es können auch weitere Widerstands-, Induktions- und Kapazitätsbauteile zusätzlich verwendet werden. Bei-

spielsweise zeigt die Fig. 14, dass der Schirm 36 einen Luftspalt oder einen elektrisch isolierenden Abschnitt 37 hat, von dessen beiden Seiten Verbindungen zu einer Stromquelle 38 mittels einer Steuervorrichtung 39 ausgehen. Letztere erlaubt es, den Strom im Kraftflussschirm von einer Richtung (in der er den Kraftfluss der Vormagnetisierungswicklung 20 unterstützt) in die andere Richtung umzuschalten (in der das Gegenteil erfolgt).

In der Schaltung der Fig. 15 haben die Bauteile dieselben Bezugszahlen wie in der Fig. 2. Um die harmonischen Ströme in der Wechselstromeinrichtung auf ein Mindestmass zu verringern, ist jeder Kern der Drosselvorrichtung mit einer zusätzlichen Wechselstrom-Vieleckwicklung 37A, 38A; 37B, 38B; 37C, 38C versehen, wobei die Wicklungen auf den Kernen jedes Paars entgegengesetzt in Reihe miteinander verbunden sind und wobei alle sechs Wicklungen in einem geschlossenen Stromkreis miteinander verbunden sind.

Ein weiterer Vorteil des Strombegrenzungsaggregats besteht darin, dass die durch Stromüberschüsse verursachten Störungen in der Wechselstromeinrichtung, welche einen unerwünscht hohen Wert erreichen können, die supraleitende Steuerwicklung in den normalleitenden Zustand versetzen. Auf diese Weise wird in hohem Masse die Impedanz vergrössert und der Stromfluss in der Wechselstromeinrichtung auf ein Mindestmass verringert.

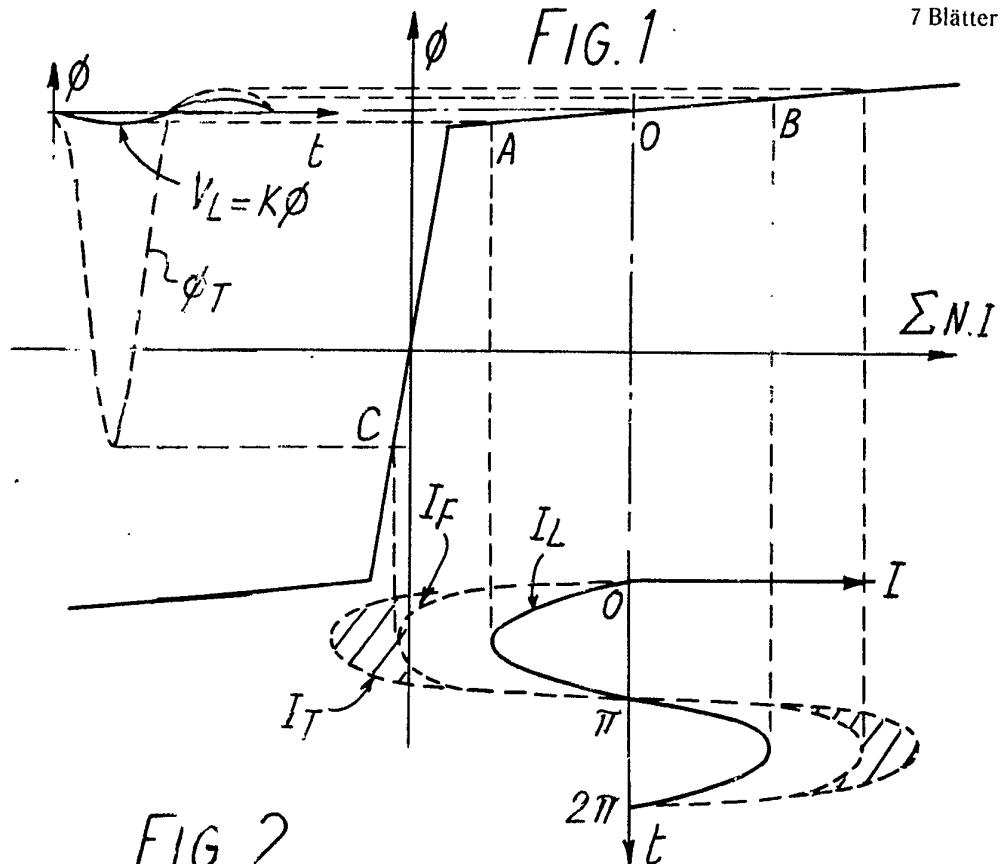


FIG. 2

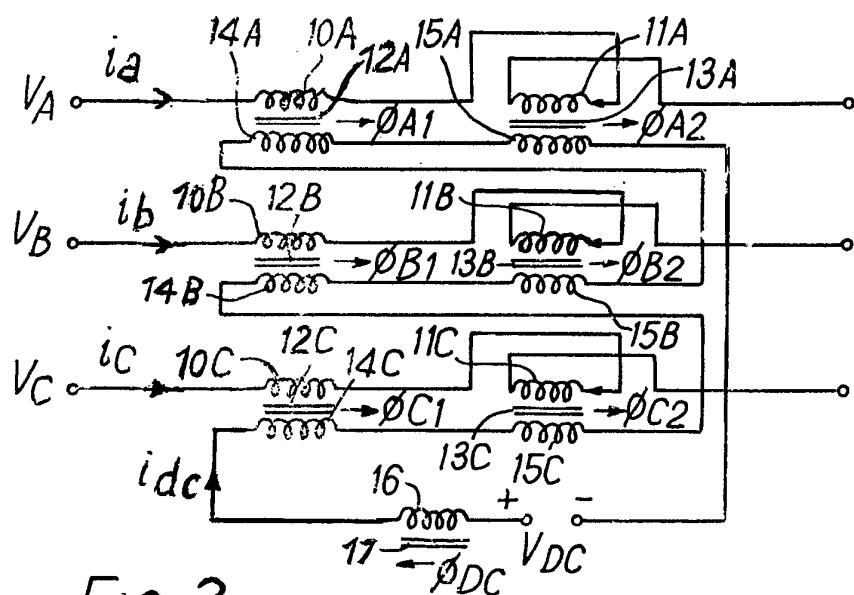


FIG. 3

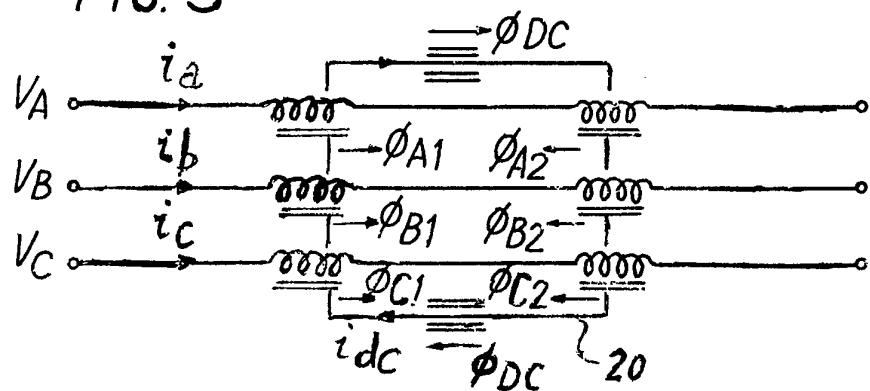


FIG. 4

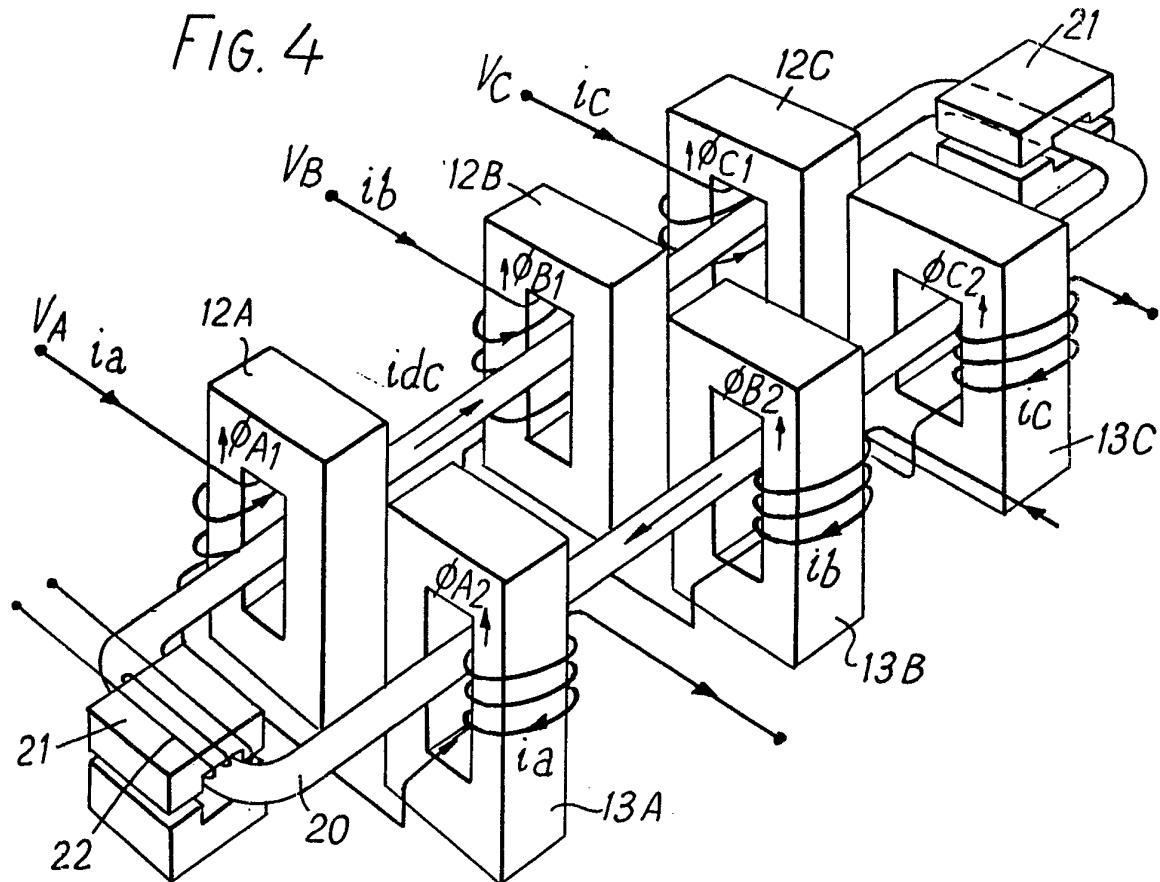
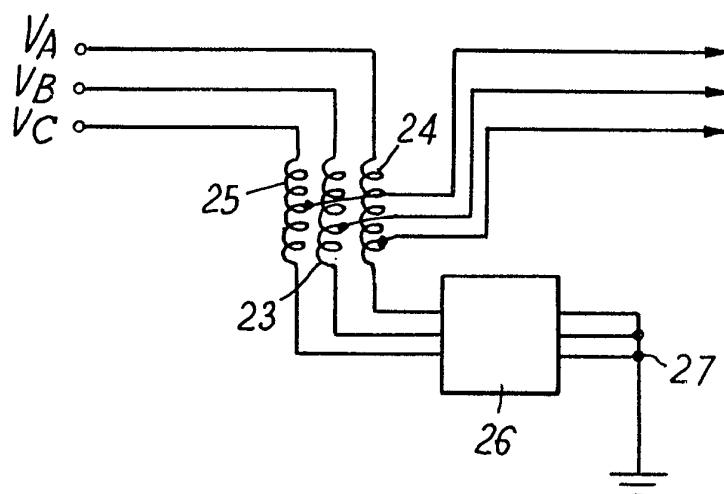
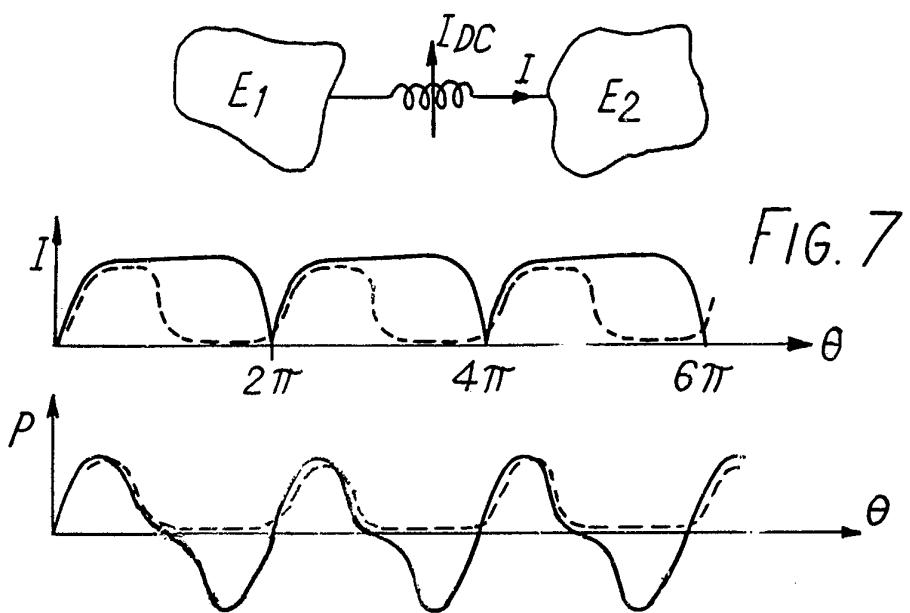
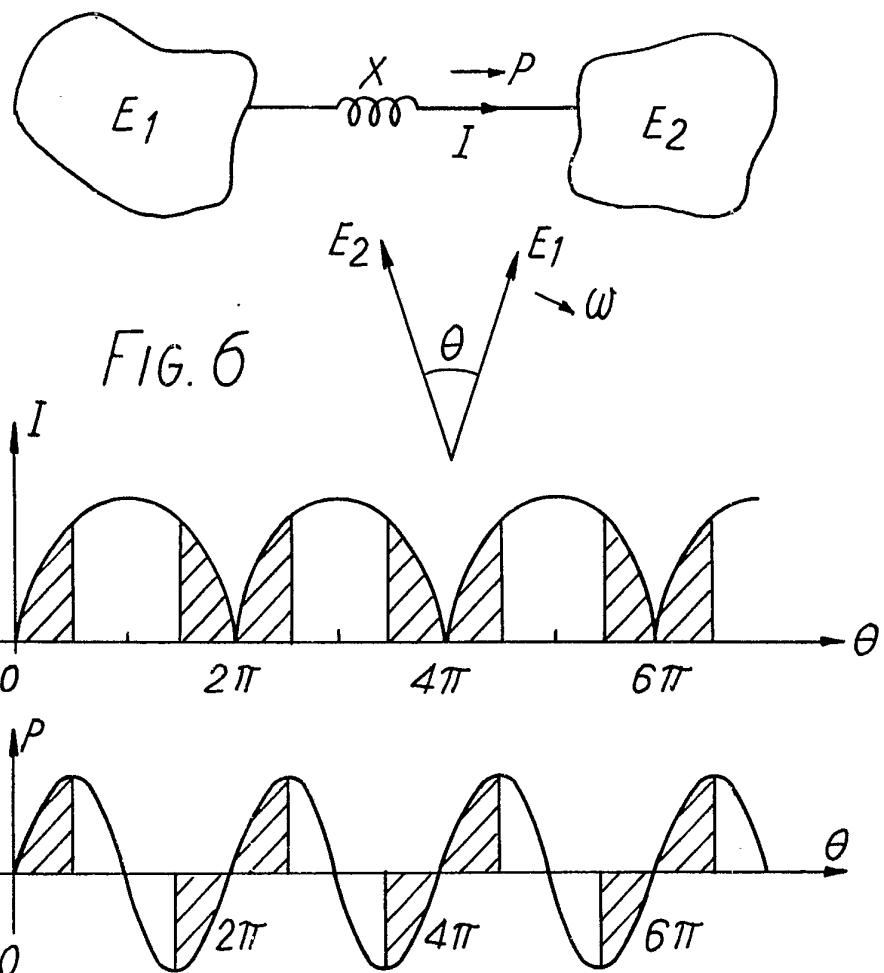


FIG. 5





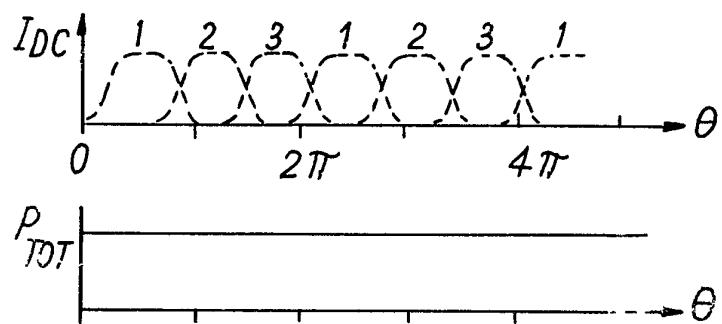
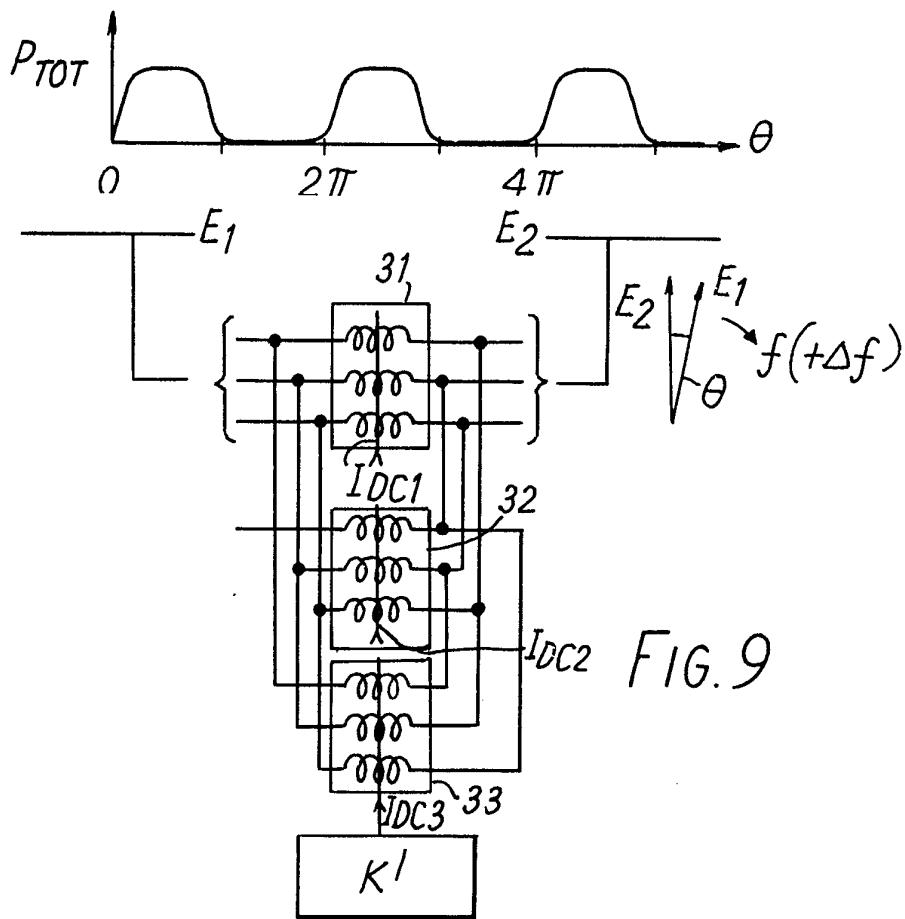
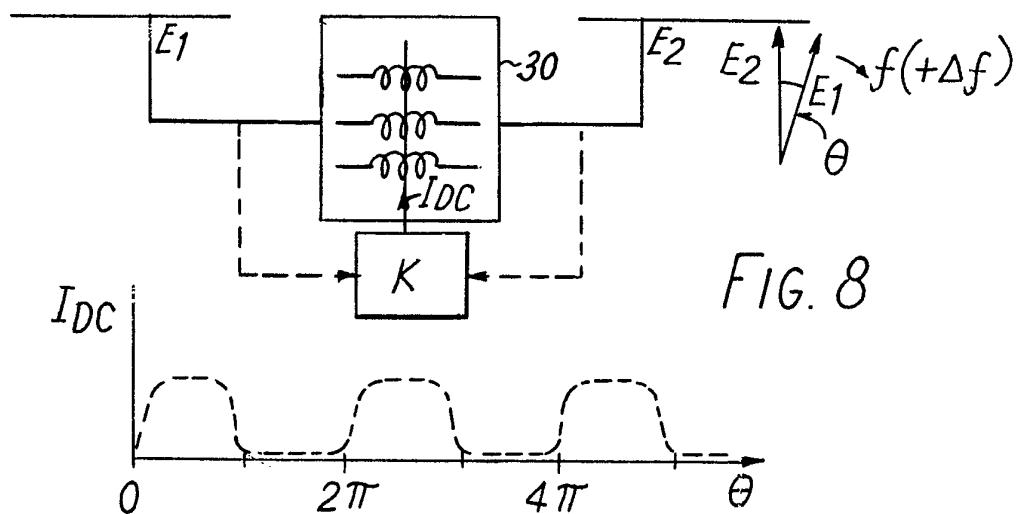


FIG. 10

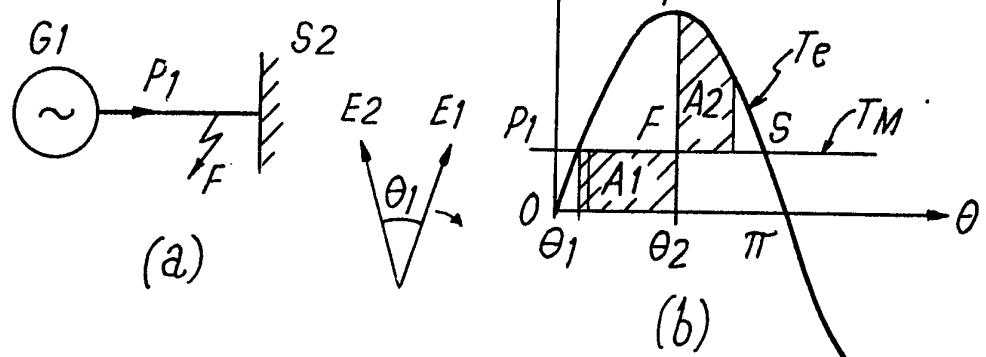


FIG. 11

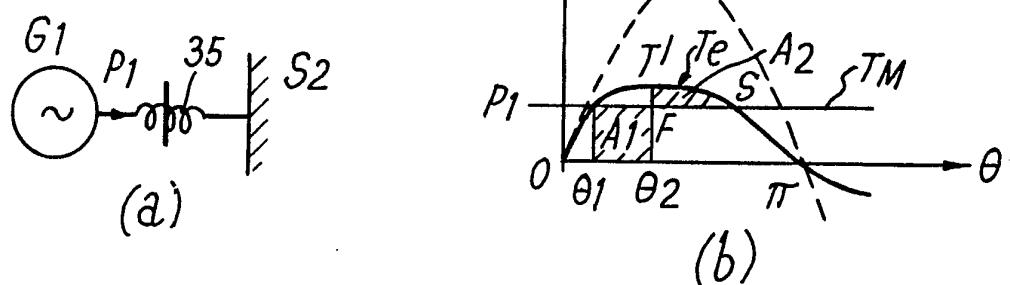


FIG. 12

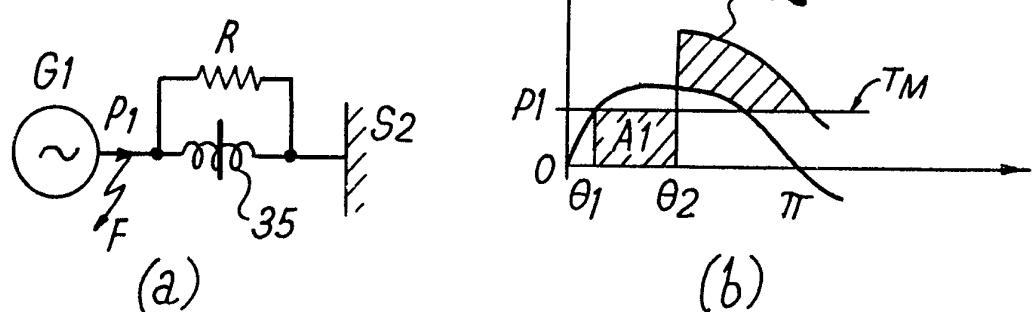


FIG. 13

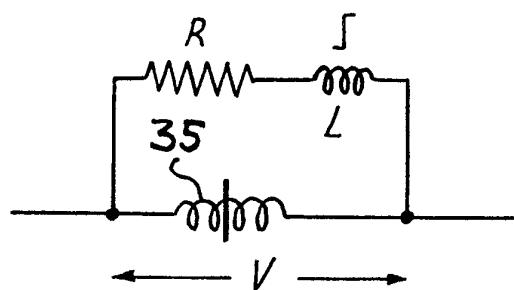


FIG. 14

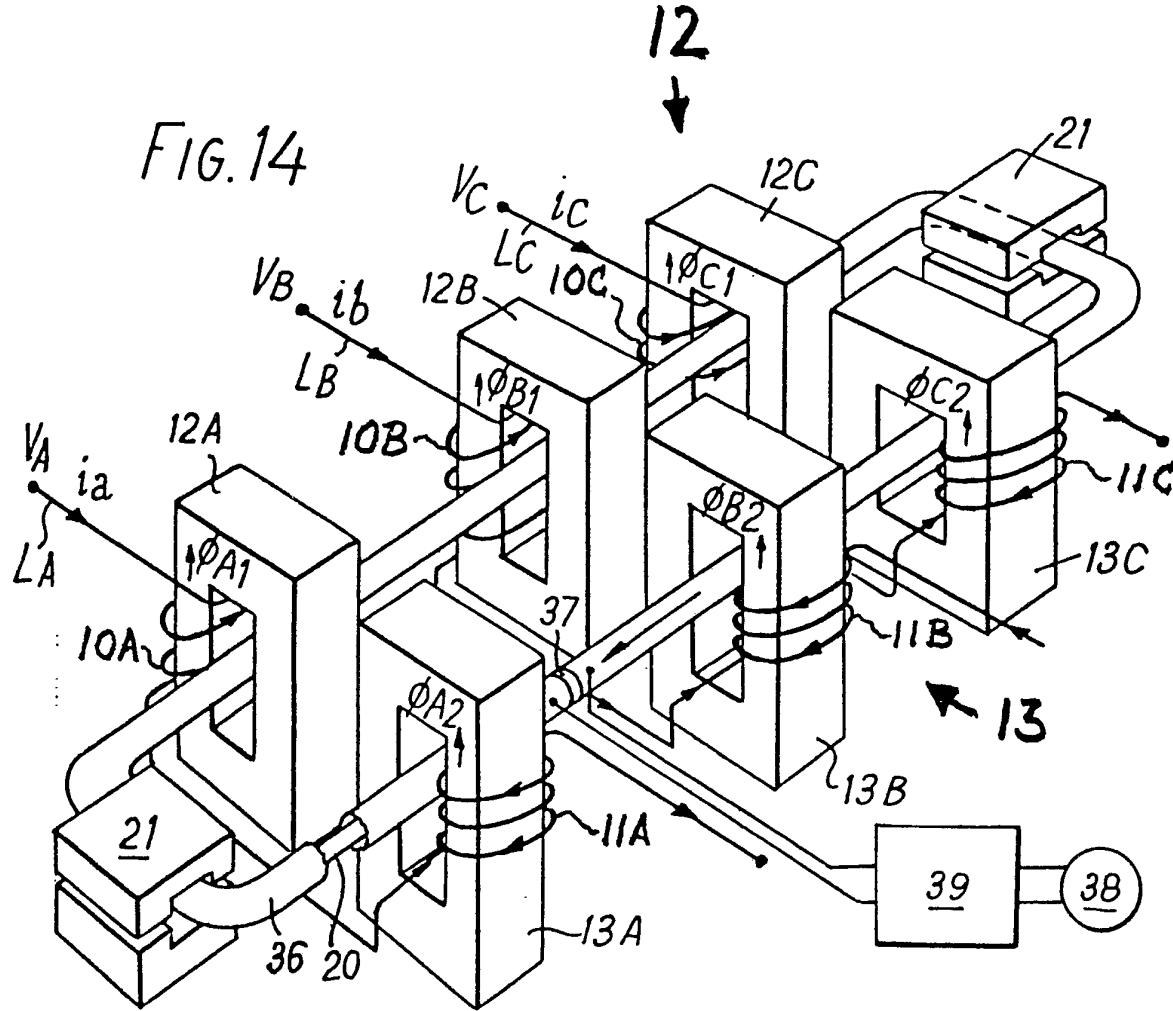


FIG. 15

