



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**14.01.2009 Patentblatt 2009/03**

(51) Int Cl.:  
**F25J 1/02<sup>(2006.01)</sup> F01D 15/00<sup>(2006.01)</sup>**

(21) Anmeldenummer: **07013711.2**

(22) Anmeldetag: **12.07.2007**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL BA HR MK RS**

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**  
**80333 München (DE)**

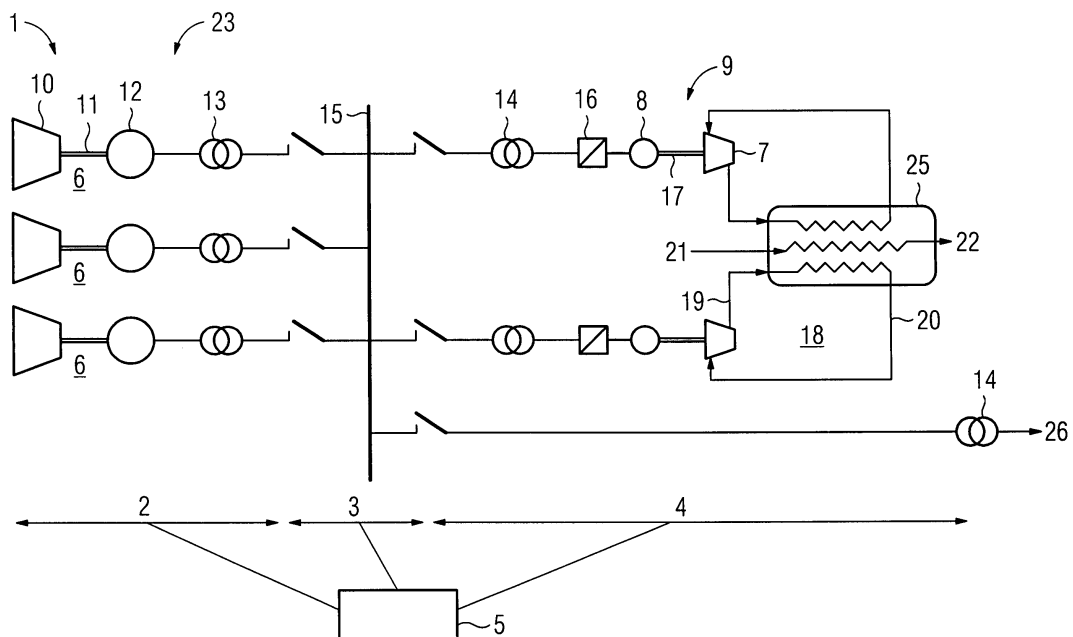
(72) Erfinder:  
• **Balling, Reiner**  
**91056 Erlangen (DE)**  
• **Heinemann, Andreas**  
**96114 Hirschaid (DE)**  
• **Kleiner, Fritz**  
**81827 München (DE)**  
• **Tomschi, Ulrich, Dr.**  
**91077 Neunkirchen am Brand (DE)**

(54) **Gasverflüssigungsanlage sowie ein Verfahren zum unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage**

(57) Die Erfindung betrifft eine Gasverflüssigungsanlage (1) und ein Verfahren zum unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage (1), umfassend einen Energieerzeugungsteil (2), einen Übertragungsteil (3), einen Kältemittelverdichterteil (4) und eine Regeleinrichtung (5), wobei der Energieerzeugungsteil (2) eine Anzahl von Turbosätzen (6) und der Kältemittelverdichterteil (4) mindestens einen Kältemittelverdichter (7) und einen an den Kältemittelverdichter (7) angekoppelten Antriebsmotor (8) zum elektrischen Antrieb des Kältemittelverdichters (7) mit einem elektrischen Nennbedarf auf-

weisen, der Übertragungsteil (3) die im Energieerzeugungsteil (2) erzeugte Leistung dem Kältemittelverdichterteil (4) zur Verfügung stellt und die Regeleinrichtung (5) mit dem Energieerzeugungsteil (2) und dem Kältemittelverdichterteil (4) verbunden ist, wobei über die Regeleinrichtung (5) im Normalbetrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teil- oder Volllastbetrieb aller Turbosätze (6) bereitstellbar ist, wobei die Anzahl der Turbosätze (6) die Mindestanzahl übersteigt, die notwendig ist, die Kontinuität des Betriebs des Kältemittelverdichterteils (4) sicherzustellen.

FIG 1



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Gasverflüssigungsanlage, insbesondere eine Erdgasverflüssigungsanlage, und bezieht sich auf die Bereitstellung elektrischer Energie für den unterbrechungsfreien Betrieb einer solchen Gasverflüssigungsanlage. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage.

**[0002]** Als verflüssigtes Erdgas (Abkürzung LNG für engl. liquefied natural gas) bezeichnet man durch Abkühlung verflüssigtes Erdgas. LNG hat weniger als 1/600stel des Volumens von Erdgas bei atmosphärischem Druck und eignet sich daher besonders zu Transport- und Lagerungszwecken; als Brennstoff kann es in diesem Aggregatzustand nicht verwendet werden.

**[0003]** In Kraftwerken, die einer Anlage zur Verflüssigung leichter Kohlenwasserstoffe, wie z.B. Erdgas, vorgeschaltet sind, kommen üblicherweise mit Erdgas befeuerte Gasturbinen sowie gegebenenfalls Dampfturbinen zum Einsatz, um über die angekuppelten Generatoren die elektrische Energie bereitzustellen, die motorgetrieben benötigt wird.

**[0004]** In konventionellen Erdgasverflüssigungsanlagen werden die Turboverdichter für den Kältemittelkreislauf durch direkt gekoppelte Gasturbinen angetrieben.

**[0005]** Gattungsmäßige Nachteile dieser Anlagen sind Produktionsausfall bei den erforderlichen regelmäßigen Wartungsarbeiten an den Gasturbinen, schwieriges An- oder Wiederanfahren der Verdichter mit Einwellengasturbinen, sowie die direkte Abhängigkeit der Größe und der Leistungsabgabe der Kältemittelverdichter von den typgeprüften Gasturbinen selbst, deren Wellenleistung wiederum von täglich schwankenden oder saisonal sich ändernden Umgebungsbedingungen abhängt.

**[0006]** Zur Vermeidung dieser Nachteile werden in neueren Anlagen die Kältemittelverdichter durch wartungsfreie drehzahlgeregelte Elektromotoren angetrieben. Ein von einer Gas- oder Dampfturbine angetriebener elektrischer Generator liefert die elektrische Leistung für diese Motoren; vorgeschaltete statische Frequenzumrichter erlauben einen sanften Anlauf und drehzahlgeregelten Betrieb. Man spricht dann auch von einer eLNG-Anlage (e für *electric*).

**[0007]** Die US 7 114 351 B2 beschreibt eine solche Anlage zur Bereitstellung der elektrischen Leistung für die Antriebe der Kältemittelverdichter eines LNG-Prozesses. Hierbei wird in einem ersten Schritt die elektrische Leistung für den Prozess der Verflüssigung gasförmiger leichter Kohlenwasserstoffe aus einer Quelle bereitgestellt und in einem zweiten Schritt ein Kältemittel in einem Kältemittelverdichter verdichtet, der durch einen Elektromotor angetrieben wird, unter Verwendung der im ersten Schritt erzeugten elektrischen Leistung.

**[0008]** Elektromotoren liefern ihre Nennleistung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, was einen Dauerbetrieb der Kältemittelverdichter ermöglicht, selbst bei wechselnden Umgebungsbedingungen, unterschiedli-

chem Gas, oder unterschiedlichen Lufteingangstemperaturen an den Gasturbinen. Die US 7 114 351 B2 führt weiter aus, dass eine plötzlich ausfallende Gasturbine durch eine oder auch mehrere zusätzliche Gasturbinen im Standby, bzw. einen oder auch mehrere zusätzliche Turbosätze im Standby, ersetzt werden könne. Der Nachteil dieser Methode ist aber, dass der LNG Produktionsprozess dann aber bereits zusammengebrochen ist und es einige Stunden dauert, bis der betroffene Kältemittelverdichter wieder angefahren und thermisch stabilisiert ist. Man hat also insbesondere Unterbrechungen bzw. Stillstandszeiten in Kauf zu nehmen.

**[0009]** Aufgabe der Erfindung ist daher die Angabe einer hochverfügbaren Gasverflüssigungsanlage sowie ein Verfahren für den unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage.

**[0010]** Erfindungsgemäß wird die auf den unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage gerichtete Aufgabe gelöst durch eine Gasverflüssigungsanlage, umfassend einen Energieerzeugungsteil, einen Übertragungsteil, einen Kältemittelverdichterteil und eine Regeleinrichtung, wobei der Energieerzeugungsteil eine Anzahl von Turbosätzen und der Kältemittelverdichterteil mindestens einen Kältemittelverdichter und einen an den Kältemittelverdichter angekuppelten Antriebsmotor zum elektrischen Antrieb des Kältemittelverdichters aufweisen, der Übertragungsteil die im Energieerzeugungsteil erzeugte Leistung dem Kältemittelverdichterteil zur Verfügung stellt und die Regeleinrichtung mit dem Energieerzeugungsteil und dem Kältemittelverdichterteil verbunden ist, wobei über die Regeleinrichtung im Normalbetrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teil- oder Vollastbetrieb aller Turbosätze bereitstellbar ist, und die Anzahl der Turbosätze die Mindestanzahl übersteigt, die notwendig ist, die Kontinuität des Betriebs des Kältemittelverdichterteils sicherzustellen.

**[0011]** Die Erfindung beruht demnach auf dem Gedanken, einen zusätzlichen Turbosatz, gemessen am GesamtLeistungsbedarf der eLNG-Anlage, dem n+1 Prinzip folgend, zu installieren. Dieser Turbosatz ist kein Standby-Turbosatz. Alle zum Betrieb der eLNG-Anlage notwendigen Turbosätze, einschließlich dem n+1ten Turbosatz, arbeiten im ungestörten bzw. Normalzustand der Anlage im Teillastbetrieb, d.h. es wird jeweils so viel rotierende Reserve vorgehalten, dass der Ausfall eines Turbosatzes regelungstechnisch ausgeglichen werden kann. Dabei können einer oder mehrere designierte Turbosätze die Frequenzregelung übernehmen und alle operativen Turbosätze werden im Normalfall gleichmäßig belastet. Bei Schutzabschaltungen (trip) einer Turbine oder eines Generators entscheidet eine Regeleinrichtung (dynamischer Lastrechner), ob Maßnahmen zur Stabilisierung des Inselnetzes eingeleitet werden müssen oder nicht.

**[0012]** Der für den Betrieb der eLNG-Anlage schwerwiegendste zu erwartende Fehler ist der ungeplante Ausfall eines Turbosatzes im Energieerzeugungsteil, also im

Inselkraftwerk - Schutzabschaltungen von Verdichterantrieben sind in ihren Auswirkungen untergeordnet und bei Notabschaltungen in der Prozessanlage kann der Betrieb unter Umständen nicht aufrechterhalten werden. Prinzipiell kann aber auch eine partielle Notabschaltung (ESD, *emergency shut down*) in der Prozessanlage in den Algorithmus des dynamischen Lastrechners mit einbezogen werden.

**[0013]** Die damit prinzipiell mögliche unterbrechungsfreie Betriebsdauer der Gasverflüssigungsanlage wird durch Wegfall notwendiger Wartungsarbeiten an den Gasturbinen im Energieerzeugungsteil von bisher ein bis zwei auf mehr als fünf Jahre erhöht. Einer Erhöhung der voraussehbaren produktiven Tage von circa 340 (bisheriger Erfahrungswert mit direkt getriebenen Gasverflüssigungsanlagen) auf 365 pro Jahr stehen dann nur noch ungeplante (Stör-)Abschaltungen entgegen.

**[0014]** Bei Einsatz von drehzahlgeregelten (stromrichtergespeisten) Elektromotoren und Speisung derselben aus einem modernen GuD-Kraftwerk erhöht sich der thermische Wirkungsgrad der Anlage und der Ausstoß von Treibhausgasen wird reduziert.

**[0015]** Durch geeignete Auslegung der Antriebsanlagen können die Kältemittelverdichter nach einer prozessbedingten Abschaltung innerhalb von 10 bis 30 Minuten anstatt in 8 bis 12 Stunden im Fall von Standby-Turbinen oder Festdrehzahl-Elektromotoren mit Anfahrumschaltern wieder angefahren werden, ohne die Verdichter zu entlasten und ohne Kältemittel abzufackeln.

**[0016]** Bei entsprechender Auslegung des speisenden Inselkraftwerks und Integration der beteiligten Automatisierungssysteme (z. B. Kraftwerk, Stromrichterantriebe, Verdichter) kann die Produktion der eLNG-Anlage auch während der Störabschaltung eines Generators im Kraftwerk unterbrechungsfrei aufrechterhalten werden.

**[0017]** Das Personengefährdungspotenzial wird durch Verlagerung von Wartungsarbeiten aus dem explosionsgefährdeten Prozessbereich in den Kraftwerksbereich reduziert.

**[0018]** Die Einengung der Verdichterauswahlkriterien auf die Drehzahl und Leistung der Gasturbinen weicht bei Einsatz von anwendungsspezifisch ausgelegten drehzahlgeregelten Elektromotoren einer Optimierung nach Prozessgegebenheiten.

**[0019]** Im erfinderischen Verfahren zum unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage, umfassend einen Energieerzeugungsteil, einen Übertragungsteil, einen Kältemittelverdichterteil und eine Regeleinrichtung, wobei der Energieerzeugungsteil eine Anzahl von Turbosätzen und der Kältemittelverdichterteil mindestens einen Kältemittelverdichter und einen an den Kältemittelverdichter angekoppelten Antriebsmotor zum elektrischen Antrieb des Kältemittelverdichters mit einem elektrischen Nennbedarf aufweisen, der Übertragungsteil die im Energieerzeugungsteil erzeugte Leistung dem Kältemittelverdichterteil zur Verfügung stellt, und die Regeleinrichtung mit dem Energieerzeugungsteil und dem Kältemittelverdichterteil verbunden ist, wird im Normal-

betrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teil- oder Vollastbetrieb aller Turbosätze bereitgestellt, wobei die Anzahl der Turbosätze die Mindestanzahl übersteigt, die notwendig ist, die Stabilität des Betriebs des Kältemittelverdichterteils sicherzustellen.

**[0020]** Vorteilhafterweise werden alle zum Betrieb der Gasverflüssigungsanlage notwendigen Turbosätze im Normalbetrieb der Verflüssigungsanlage und der Turbosätze bei Teillast betrieben.

**[0021]** Vorzugsweise werden alle operativen Generatoren im Normalfall gleichmäßig belastet werden.

**[0022]** Damit die Regeleinrichtung schnell und exakt arbeitet, ist es zweckmäßig, dass die Regeleinrichtung kontinuierlich Informationen aus der Kraftwerksleittechnik und aus der Verdichterleittechnik erhält.

**[0023]** Ein unterbrechungsfreier Betrieb der Gasverflüssigungsanlage lässt sich am ehesten dadurch erreichen, dass die Turbosätze so betrieben werden, dass eine vorgehaltene positive oder negative Leistungsreserve den Ausfall der größten Turbomaschine deckt, wobei die positive Leistungsreserve den Ausfall eines Generators deckt und die negative Leistungsreserve den Ausfall eines Motor-Verdichterstrangs des Kältemittelverdichterteils.

**[0024]** Bei Ausfall eines Turbosatzes wird vorzugsweise die Verdichterantriebsdrehzahl abgesenkt, wenn eine zuvor bestimmte gesamte positive Lastreserve kleiner ist, als die erbrachte Leistung des Turbosatzes vor dem Ausfall. (Der quadratischen Lastkennlinie der Turboverdichter folgend, reduziert sich die von den Elektromotoren aufgenommene Leistung mit der dritten Potenz der Drehzahl).

**[0025]** Wird auch durch die Reduzierung der Verdichterantriebsdrehzahl der aktuelle Energiebedarf des Kältemittelverdichterteils nicht gedeckt, ist es zweckmäßig, vorbestimmte elektrische Verbraucher der Gasverflüssigungsanlage abzuschalten (englisch load shedding).

**[0026]** Der weitestgehend unterbrechungsfreie Betrieb der Gasverflüssigungsanlage bei ungewollter Abschaltung von Teilanlagen im Verflüssigungsprozess oder beim Überschreiten der vorgegebenen Grenzwerte für die Netzfrequenz und deren zeitlicher Änderung, Spannung und Phasenwinkel im Energieversorgungsnetz der Gasverflüssigungsanlage kann dadurch sichergestellt werden, dass vorbestimmte Turbinen abgeschaltet werden.

**[0027]** Ist die negative Lastreserve kleiner als der Energiebedarf des größten Kältemittelverdichters und fällt entweder ein Kältemittelverdichter aus oder überschreiten die vorgegebenen Grenzwerte für die Netzfrequenz und deren zeitlicher Änderung, Spannung und Phasenwinkel im Energieversorgungsnetz der Gasverflüssigungsanlage eine vorgegebene Grenze, ist es zweckmäßig, vorbestimmte Turbinen abzuschalten.

**[0028]** Die Erfindung wird beispielhaft anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen schematisch und nicht maßstäblich:

- Figur 1 eLNG-Anlagenkonzept  
 Figur 2 Lastrechner-Algorithmus der Regeleinrichtung für die positive Lastreserve  
 Figur 3 Lastrechner-Algorithmus der Regeleinrichtung für die Reduzierung der Drehzahl der Verdichtereinheiten  
 Figur 4 Lastrechner-Algorithmus der Regeleinrichtung für die Abschaltung vorgewählter Turbinen  
 Figur 5 Turbinenauslastung in konventionellem Energieerzeugungsteil einer Gasverflüssigungsanlage  
 Figur 6 Turbinenauslastung im Energieerzeugungsteil einer Gasverflüssigungsanlage mit Stand-by-Turbine  
 Figur 7 Turbinenauslastung im Energieerzeugungsteil einer Gasverflüssigungsanlage mit n+1 Turbinen im Teillastbetrieb  
 Figur 8 alternative Turbinenauslastung im Energieerzeugungsteil einer Gasverflüssigungsanlage mit n+1 Turbinen

**[0029]** Die Figur 1 zeigt eine integrierte Lösung für eine Gasverflüssigungsanlage 1 mit einem Inselkraftwerk 23 als Energieerzeugungsteil 2, einem Übertragungsteil 3 für die Verteilung der Energie und einem Kältemittelverdichterteil 4. Eine Regeleinrichtung 5 ist mit dem Energieerzeugungsteil 2, dem Übertragungsteil 3 und dem Kältemittelverdichterteil 4 verbunden.

**[0030]** Der Energieerzeugungsteil 2 umfasst drei Turbosätze 6, mit jeweils einer Turbine 10 und einem Generator 12, die über eine Welle 11 verbunden sind. Der Energieerzeugungsteil 2 kann aber auch weniger als drei oder mehr als drei Turbosätze 6 umfassen.

**[0031]** Die Turbosätze 6 sind über jeweils einen elektrischen Transformator 13 mit der Kraftwerksstromschiene 15 des Übertragungsteils 3 verbunden, welcher die elektrische Energie den Motoren im Kältemittelverdichterteil 4 und/oder anderen Verbrauchern 26 zur Verfügung stellt.

**[0032]** Im Kältemittelverdichterteil 4 werden über Stromrichtertransformatoren 14 und Stromrichter 16 die drehzahlveränderbaren Elektromotoren 8 der Kältemittelverdichter 7 angetrieben. Antriebsmotoren 8 und Kältemittelverdichter 7 sind über Wellen 17 verbunden und bilden Motor-Verdichterstränge 9, die letztlich die Kältemittelzirkulation und Kühlung des Erdgases 21 im Kältemittelkreislauf 18 bewirken.

**[0033]** Die Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung des geschlossenen Kältemittelkreislaufs 18. Komprimiertes Kältemittel wird von den Kältemittelverdichtern 7 über Leitungen 19 zur Verflüssigungseinheit 25 transportiert. Verbrauchtes gasförmiges Kältemittel wird über Leitungen 20 zu den Kältemittelverdichtern 7 zurückgeführt.

**[0034]** Weiterhin zeigt die Figur 1 an der Verflüssigungseinheit 25 einen Einlass für leichte, gasförmige Kohlenwasserstoffe, wie z.B. Erdgas 21. In der Verflüs-

sigungseinheit 25 (und weiteren ähnlichen, hier nicht dargestellten Stufen) geht das Erdgas 21 durch Kühlen in Wärmetauschern von der gasförmigen in die flüssige Phase (LNG) 22 über.

**[0035]** Figur 2 zeigt den Algorithmus eines Lastrechners der Regeleinrichtung 5 zur Steuerung des unterbrechungsfreien Betriebs einer Gasverflüssigungsanlage 1. Zur Beurteilung der Lastverhältnisse erhält der dynamische Lastrechner laufend Informationen 101 aus der Kraftwerksleittechnik. Die Informationen umfassen die momentan abgegebene Leistung jeder Gas- bzw. Dampfturbine, die momentan mögliche maximale Leistung jedes Gas- bzw. Dampfturbinensatzes und die momentan mögliche Mindestlast jeder Gas- bzw. Dampfturbine, ausgedrückt jeweils in elektrischer Generatorleistung. Anhand der abgegebenen Leistung und der momentan möglichen maximalen Leistung beziehungsweise anhand der abgegebenen Leistung und der momentan möglichen Mindestlast, lassen sich die positive bzw. negative Lastreserve bestimmen.

**[0036]** In einem ersten Schritt 102 berechnet der dynamische Lastrechner die insgesamt momentan verfügbare positive Lastreserve unter Einbeziehung verschiedener Parameter, wie z.B. der momentanen Umgebungstemperatur, der Luftfeuchte und des Brennwertes des Brenngases, die bereits in den Werten 101 aus der Kraftwerksleittechnik berücksichtigt sind.

**[0037]** In einem zweiten Schritt 103 vergleicht der dynamische Lastrechner die positive Lastreserve mit der Leistung des größten Turbosatzes 6. Reicht die gesamte positive Lastreserve auch bei Abschaltung eines Turbosatzes 6 aus, den Betrieb der eLNG-Anlage aufrecht zu erhalten, meldet der dynamische Lastrechner an die Warten des Kraftwerks und der eLNG-Anlage den Zustand "n+1 verfügbar" 104. Erfolgt in diesem Zustand wirklich eine Schutzabschaltung im Kraftwerk, bleibt der dynamische Lastrechner passiv, und die Kraftwerksleittechnik stellt durch Umlastung der verbliebenen Generatoren 12 das Gleichgewicht zwischen verfügbarer und angeforderter Last wieder her.

**[0038]** Stellt der dynamische Lastrechner fest, dass die momentan verfügbare positive Leistungsreserve nicht ausreicht, um den möglichen Ausfall eines Turbosatzes 6 zu kompensieren, meldet er den Alarmzustand "n+1 nicht verfügbar" 105 prophylaktisch an die Warten.

**[0039]** Dies ermöglicht es dem Bedienpersonal eventuell stillgesetzte Leistungsreserven (z.B. durch Wartungsarbeiten) zu mobilisieren, oder die Belastung des Netzes zu reduzieren, z.B. durch Abschaltung anderer Verbraucher 26, und damit ggf. einer Produktionsunterbrechung bei Ausfall eines Turbosatzes 6 vorzubeugen. Auch manuelle Umlastungen zwischen den operativen Turbosätzen 6 und Änderungen im Prozessdampfverbrauch sind dazu geeignet.

**[0040]** Wird die prophylaktische Lastreduzierung nicht vom Bedienpersonal der eLNG-Anlage initiiert, z.B. durch Abschaltung unwichtiger Verbraucher 26 oder temporärer Reduktion der Produktion, kann der dynami-

sche Lastrechner eingreifen, indem er die Drehzahl aller operativen Verdichterantriebe temporär auf einen Wert absenkt, der die Stabilität des Verdichters noch sicherstellt und damit die Unterbrechungsfreiheit der Produktion gewährleistet. Hierzu wird die aus der Verdichterleittechnik erhaltene Information 106 zu den momentan möglichen Lastreduzierungen durch Senkung der Verdichter-Drehzahl, ohne die Stabilität des Verdichtersbetriebs zu gefährden, kontinuierlich verarbeitet und die Summe der möglichen Lastreduzierung der einzelnen Verdichtereinheiten zur positiven Lastreserve addiert 107. Die dadurch erzielte gesamte Leistungsreserve deckt dann möglicherweise den Ausfall eines Turbosatzes 6.

**[0041]** Im Alarmzustand "n+1 nicht verfügbar" kann also das Gleichgewicht zwischen positiver und negativer Lastreserve durch eine Absenkung der Verdichterantriebsdrehzahl wieder hergestellt werden. Da dieser Vorgang sehr schnell erfolgen kann, wird er vom dynamischen Lastrechner nur ausgelöst, wenn im Alarmzustand wirklich eine Schutzabschaltung im Kraftwerk erfolgt.

**[0042]** Der zugehörige Algorithmus ist in Figur 3 gezeigt. Wie bereits erläutert, bezeichnet 107 die Summe aus der positiven Lastreserve der Turbosätze 6 und der möglichen Lastreduzierung infolge einer Reduzierung der Drehzahl der Verdichtereinheiten. In einem nächsten Schritt 108 werden die positive Lastreserve und die mögliche Lastreduzierung mit der momentan verfügbaren Leistung des größten Turbosatzes 6 verglichen. Unabhängig vom Ergebnis des Vergleichs ist bei Ausfall 109 einer Turbine 10 die Konjunktion 110 wahr und die Drehzahl der Verdichtereinheiten wird verringert 111. Ist die Summe aus positiver Lastreserve und möglicher Lastreduzierung kleiner als die Leistung des größten oder zumindest betroffenen Turbosatzes 6, erfolgt zusätzlich ein Lastabwurf 112.

**[0043]** Neben der rechnerischen Ermittlung der Differenz zwischen positiver und negativer Lastreserve kann eine unabhängige Bestimmung der Netzfrequenz-Änderungsgeschwindigkeit ( $df/dt$ ) dazu benutzt werden, eine plötzliche Veränderung der Lastverhältnisse zu erkennen - ohne Rücksicht auf deren Ursache. Die Frequenz-Änderungsgeschwindigkeit ist proportional zum jeweiligen Lastsprung und kann somit zur Bestimmung der notwendigen Schutzabschaltungen verwendet werden.

**[0044]** Da eine Frequenzänderung eine direkte Konsequenz des auslösenden Ereignisses ist, und die Bestimmung der Änderungsgeschwindigkeit mehr Zeit benötigt als eine Schutzauslösung über die direkten Abschaltensignale, würde eine Aktion aus der errechneten Frequenzänderung ggf. zu spät kommen. Deshalb kann diese Funktion als Backup zur beschriebenen direkten Abschaltung angesehen werden. Außerdem muss sichergestellt sein, dass Aktionen, die aus der rechnerischen Ermittlung der Unterfrequenz resultieren, keine Fehlauflösungen verursachen.

**[0045]** Reichen die beschriebenen Maßnahmen zum Ausgleich des Unterschieds zwischen positiver und ne-

gativer Lastreserve nicht aus, initiiert der dynamische Lastrechner eine Kette von vorprogrammierten Lastabwürfen bei Erreichen von vordefinierten Unterfrequenzschwellen, um ein weiteres Absenken der Netzfrequenz - und damit einer Schutzabschaltung des gesamten Kraftwerks - vorzubeugen. Die im Lastrechner hinterlegten Verbraucher, die ggf. zeitweise abgeschaltet werden können, ohne die Produktion zu unterbrechen, werden so schnell und im notwendigen Umfang vom Netz getrennt, wie es die Aufrechterhaltung der Netzfrequenz erfordert.

**[0046]** Prinzipiell ist der auf die ungeplante Abschaltung von Turbosätzen 6 angewandete Algorithmus auch anwendbar auf die ungeplante Abschaltung großer Verbraucher, vor allem der großen Verdichterantriebe. Die Kraftwerks- und Maschinenleittechnik ist so ausgelegt, dass sie Lastabwürfe dieser Größenordnung ohne Mitwirkung des dynamischen Lastrechners ausregeln kann. Figur 4 zeigt das Prinzip.

**[0047]** Ist die Summe der durch Frequenzregelung erreichbaren negativen Lastreserve größer als der größte anzunehmende Lastabwurf durch Abschaltung von Verdichterantrieben, greift der dynamische Lastrechner nicht ein. Andernfalls wird ein vorgewählter Turbosatz 6 abgeschaltet und die resultierende positive Lastreserve gleicht die verbleibende Lücke aus.

**[0048]** 113 bezeichnet hierbei die Berechnung der negativen Lastreserve und die Bestimmung der Verdichtereinheiten mit der größten Last. Im Schritt 114 werden diese beiden Werte verglichen. Ist die negative Lastreserve größer als die größere Last der Verdichtereinheiten, meldet der Rechner "n+1 verfügbar" 115. Im anderen Fall meldet er "n+1 nicht verfügbar" 116.

**[0049]** Anhand der Daten aus der Kraftwerksleittechnik 101 sowie der Verdichterleittechnik 106 erfolgt eine Zuordnung 117 von Turbosätzen 6 und Verdichtereinheiten. Mithilfe dieser Zuordnung werden vorgewählte Turbinen 10 abgeschaltet, wenn die negative Lastreserve kleiner ist 116 als der Energiebedarf der größten Verdichtereinheiten und 124 entweder eine Verdichtereinheit ausfällt 122 oder 123 die Frequenzänderungsgeschwindigkeit 120 im Energieversorgungsnetz der Gasverflüssigungsanlage 1 eine vorgegebene Grenze überschreitet 121.

**[0050]** Bei noch größeren Lastabwürfen 126, z.B. im Falle von partiellen Notabschaltungen aus dem Prozess, müssen ggf. mehrere Turbosätze 6 vom Netz genommen werden 128. Sind der Ablauf und die Größe 118 einer solchen Notabschaltung bekannt, kann auch ein solcher Vorgang vom Lastrechner prinzipiell gesteuert werden, z.B. indem eine Vorauswahl 119 abzuschaltender Turbinen 10 getroffen wird, um ggf. einen Teilprozess weiter betreiben zu können. Große Lastabwürfe 126 und das Überschreiten 121 einer Grenze der Frequenzänderungsgeschwindigkeit 120 sind im Sinne einer nicht-ausschließenden Disjunktion 127 miteinander verknüpft.

**[0051]** Figur 5 zeigt schematisch die Turbinenauslastung in einem konventionellen Energieerzeugungsteil

einer Gasverflüssigungsanlage 1 im Nennbetrieb. Alle Turbinen 10 des Energieerzeugungsteils laufen unter nominaler Volllast 27. Der so betriebene Energieerzeugungsteil verfügt über keine positive Lastreserve, um bei Ausfall eines Turbosatzes 6 den unterbrechungsfreien Betrieb der kompletten Gasverflüssigungsanlage sicherstellen zu können.

**[0052]** Figur 6 zeigt schematisch die Turbinenauslastung, im in der US 7 114 351 B2 beschriebenen Energieerzeugungsteil einer Gasverflüssigungsanlage im Nennbetrieb. Die zusätzliche, im Standby bereitgehaltene Turbine 24, wird bei Ausfall einer anderen im Nennbetrieb der Gasverflüssigungsanlage unter Volllast laufenden Turbine 10 gestartet. Unterbrechungen und Stillstandszeiten im LNG-Produktionsprozess können bei Ausfall einer Turbine 10 die Folge sein und es kann einige Stunden dauern, bis der betroffene Kältemittelverdichter 7 wieder angefahren und der Verflüssigungsprozess thermisch stabilisiert ist.

**[0053]** Figur 7 zeigt schematisch und beispielhaft die Turbinenauslastung im Energieerzeugungsteil 2 einer erfindungsgemäßen Gasverflüssigungsanlage 1 im Nennbetrieb für den Kältemittelverdichterteil 4. Alle Turbinen 10 laufen unter Teillast 28. Es gibt keine Standby-Turbine 24. Die positive Lastreserve ist ausreichend, bei Ausfall einer Turbine 10 durch Erhöhen der Last der verbleibenden Turbinen 10 den unterbrechungsfreien Betrieb der Gasverflüssigungsanlage 1 sicherzustellen.

**[0054]** Figur 8 zeigt schematisch und beispielhaft eine alternative Turbinenauslastung im Energieerzeugungsteil 2 einer erfindungsgemäßen Gasverflüssigungsanlage 1 im Nennbetrieb für den Kältemittelverdichterteil 4. Alle Turbinen 10 laufen unter Teil- oder Volllast 28,27. Auch hier gibt es keine Standby-Turbine 24. Die Auslastung der Turbinen 10 ist jedoch nicht notwendigerweise gleich. Beispielsweise kann, neben anderen Parametern, die Maschinenstandzeit der Turbinen 10 bei der Bestimmung der Auslastung maschinenspezifisch berücksichtigt werden.

## Patentansprüche

1. Eine Gasverflüssigungsanlage (1) umfassend einen Energieerzeugungsteil (2), einen Übertragungsteil (3), einen Kältemittelverdichterteil (4) und eine Regeleinrichtung (5), wobei der Energieerzeugungsteil (2) eine Anzahl von Turbosätzen (6) und der Kältemittelverdichterteil (4) mindestens einen Kältemittelverdichter (7) und einen an den Kältemittelverdichter (7) angekoppelten Antriebsmotor (8) zum elektrischen Antrieb des Kältemittelverdichters (7) mit einem elektrischen Nennbedarf aufweisen, der Übertragungsteil (3) die im Energieerzeugungsteil (2) erzeugte Leistung dem Kältemittelverdichterteil (4) zur Verfügung stellt und die Regeleinrichtung (5) mit dem Energieerzeugungsteil (2) und dem Kältemittelverdichterteil (4) verbunden ist, **dadurch gekennzeichnet**

**zeichnet, dass** über die Regeleinrichtung (5) im Normalbetrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teil- oder Volllastbetrieb aller Turbosätze (6) bereitstellbar ist, wobei die Anzahl der Turbosätze (6) die Mindestanzahl übersteigt, die notwendig ist, die Kontinuität des Betriebs des Kältemittelverdichterteils (4) sicherzustellen.

2. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach Anspruch 1, wobei über die Regeleinrichtung (5) im Normalbetrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teillastbetrieb aller Turbosätze (6) bereitstellbar ist.
3. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach Anspruch 1 oder 2, wobei eine maximale Abgabeleistung aller Turbosätze (6) den Nennbedarf um mindestens die maximale Abgabeleistung des Turbosatzes (6) mit der größtmöglichen Abgabeleistung übersteigt.
4. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Gas ein Erdgas (21) ist.
5. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mindestens zwei Kältemittelverdichter (7) vorgesehen sind, mit jeweils einem Antriebsmotor (8).
6. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Drehzahl der Antriebsmotoren (8) variabel ist.
7. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Energieerzeugungsteil (2) eine Gasturbinenanlage mit einer Anzahl von Gas-Turbosätzen (6) ist.
8. Die Gasverflüssigungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Energieerzeugungsteil (2) eine Gas- und Dampfturbinenanlage ist, mit einer Anzahl von Gasturbinen (10) und Dampfturbinen (10).
9. Ein Verfahren zum unterbrechungsfreien Betrieb einer Gasverflüssigungsanlage (1) umfassend einen Energieerzeugungsteil (2), einen Übertragungsteil (3), einen Kältemittelverdichterteil (4) und eine Regeleinrichtung (5), wobei der Energieerzeugungsteil (2) eine Anzahl von Turbosätzen (6) und der Kältemittelverdichterteil (4) mindestens einen Kältemittelverdichter (7) und einen an den Kältemittelverdichter (7) angekoppelten Antriebsmotor (8) zum elektrischen Antrieb des Kältemittelverdichters (7) mit einem elektrischen Nennbedarf aufweisen, der Übertragungsteil (3) die im Energieerzeugungsteil (2) erzeugte Leistung dem Kältemittelverdichterteil (4) zur Verfügung stellt und die Regeleinrichtung (5) mit

- dem Energieerzeugungsteil (2) und dem Kältemittelverdichterteil (4) verbunden ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Normalbetrieb die für den Nennbedarf erforderliche Leistung durch den Teil- oder Volllastbetrieb aller Turbosätze (6) bereitgestellt wird, wobei die Anzahl der Turbosätze (6) die Mindestanzahl übersteigt, die notwendig ist, die Kontinuität des Betriebs des Kältemittelverdichterteils (4) sicherzustellen.
10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei im Normalbetrieb der Gasverflüssigungsanlage (1) alle Turbosätze (6) bei Teillast betrieben werden.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei alle operativen Generatoren (12) im Normalbetrieb gleichmäßig belastet werden.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, wobei eine Regeleinrichtung (5) kontinuierlich Informationen aus einer Kraftwerksleittechnik (101) und aus einer Verdichterleittechnik (106) erhält.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12, wobei die Turbosätze (6) so betrieben werden, dass eine vorgehaltene positive oder negative Leistungsreserve den Ausfall der größten Turbomaschine deckt.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, wobei als Turbomaschine ein Turbosatz (6) verwendet wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 14, wobei als Turbomaschine ein Motor-Verdichterstrang (9) des Kältemittelverdichterteils (4) verwendet wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 15, wobei eine Verdichterantriebsdrehzahl bei Ausfall eines Turbosatzes (6) abgesenkt wird, wenn eine zuvor bestimmte gesamte positive Lastreserve kleiner ist, als die erbrachte Leistung des Turbosatzes (6) vor dem Ausfall.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 16, wobei vorbestimmte elektrische Verbraucher der Gasverflüssigungsanlage (1) abgeschaltet werden, wenn nach Ausfall eines Turbosatzes (6) auch durch die Reduzierung der Verdichterantriebsdrehzahl die aktuelle Leistung der Turbosätze (6) den aktuellen Energiebedarf des Kältemittelverdichterteils (4) nicht deckt.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 15, bei dem vorbestimmte Turbinen (10) abgeschaltet werden, wenn Teilanlagen aus dem Verflüssigungsprozess abgeschaltet werden oder die Frequenzänderungsgeschwindigkeit im Energieversorgungsnetz der Gasverflüssigungsanlage (1) einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 15, bei dem vorbestimmte Turbinen (10) abgeschaltet werden, wenn die negative Lastreserve kleiner ist als der Energiebedarf des größten Kältemittelverdichters (7) und entweder ein Kältemittelverdichter (7) ausfällt oder die Frequenzänderungsgeschwindigkeit im Energieversorgungsnetz der Gasverflüssigungsanlage (1) eine vorgegebene Grenze überschreitet.

FIG 1

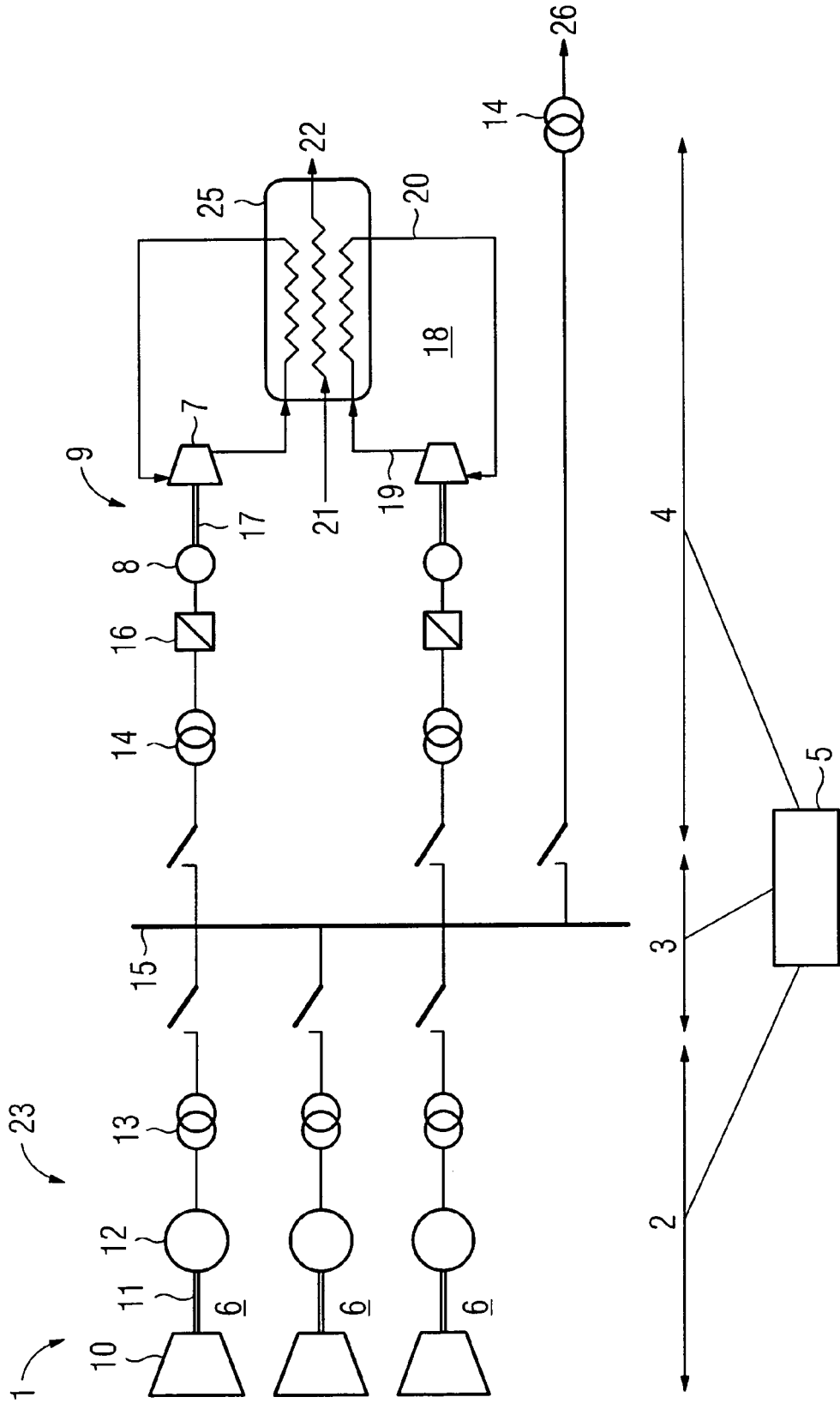


FIG 2

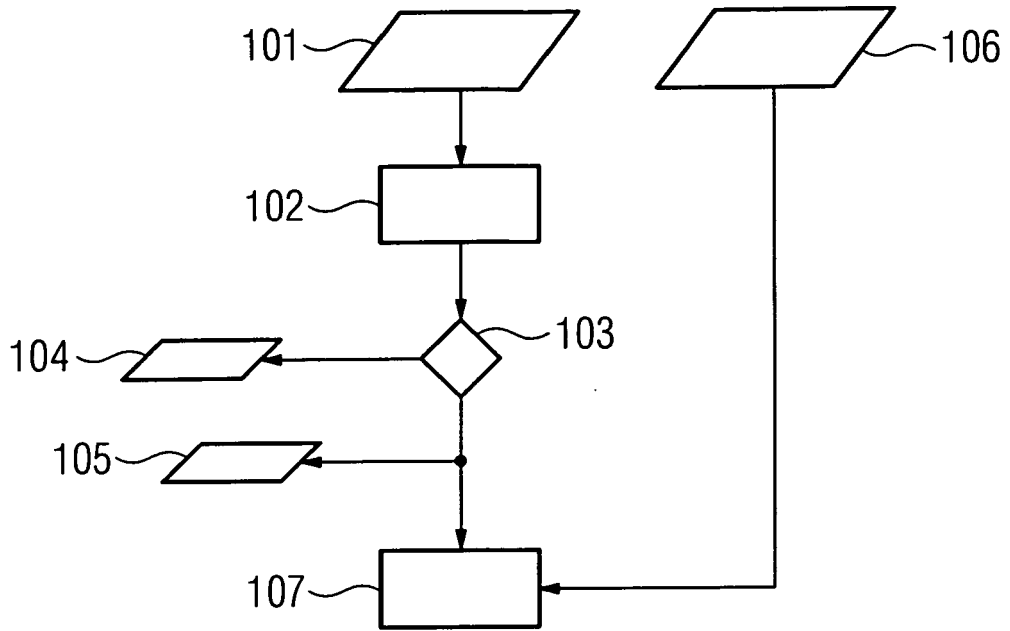


FIG 3

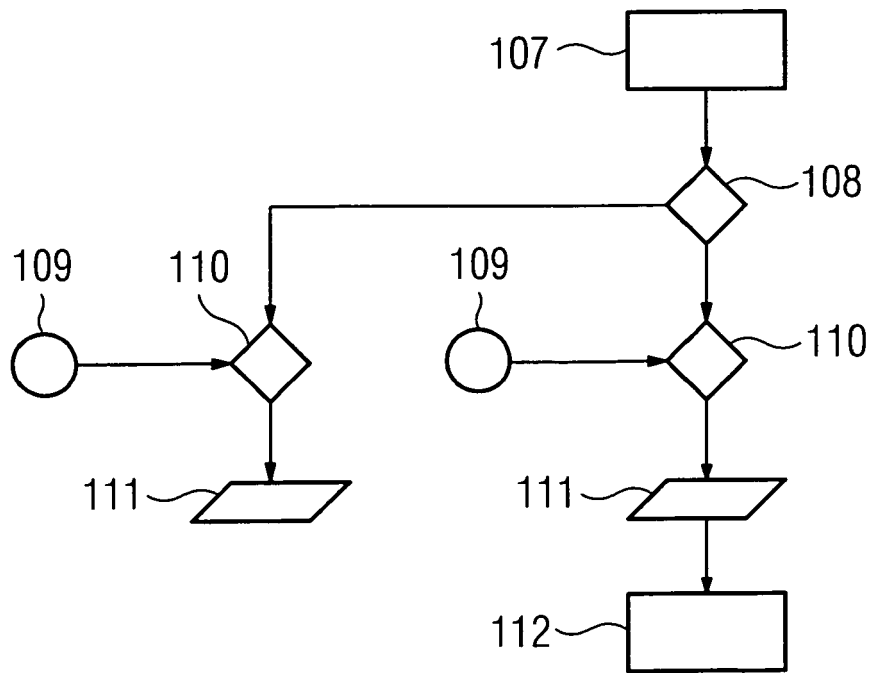


FIG 4

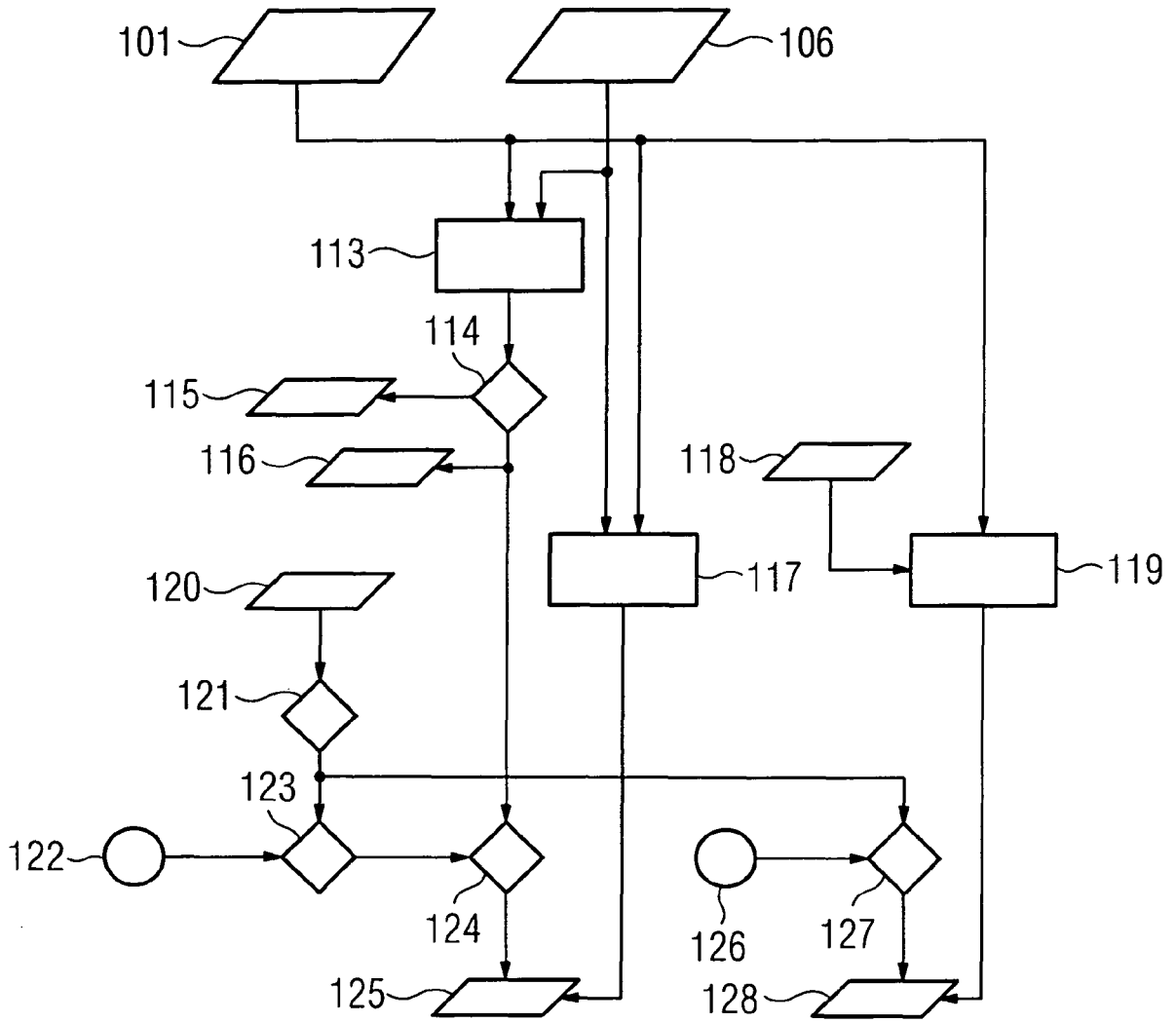


Fig. 5

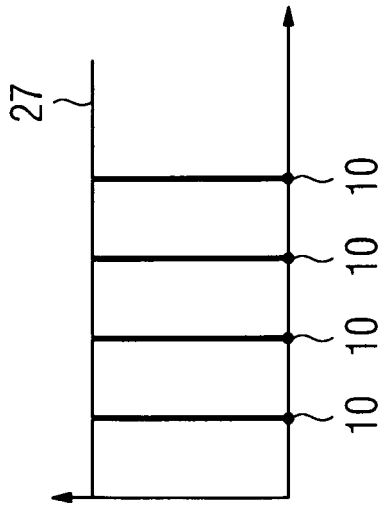


Fig. 7

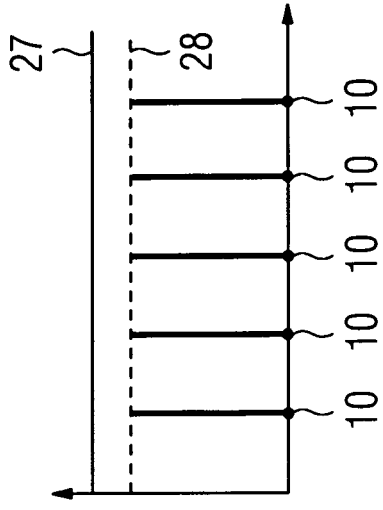


Fig. 6

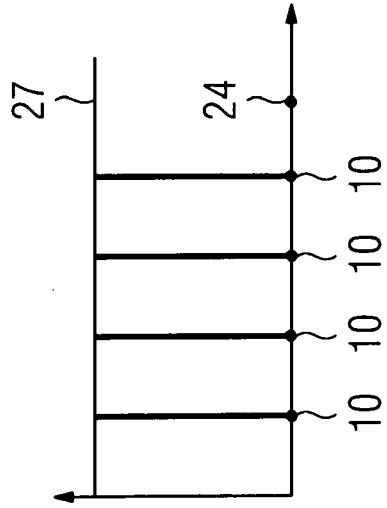
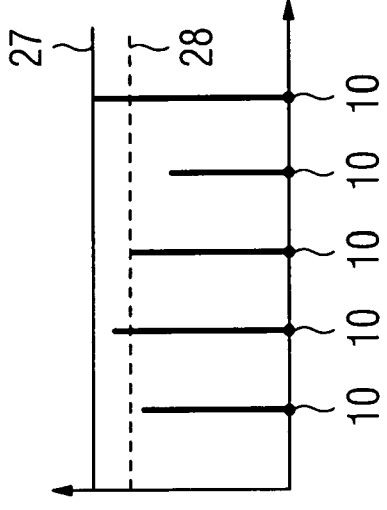


Fig. 8





Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 07 01 3711

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	KLEINER F ET AL: "ALL ELECTRIC DRIVEN REFRIGERATION COMPRESSORS IN LNG PLANTS OFFER ADVANTAGES" GASTECH, XX, XX, 14. März 2005 (2005-03-14), Seiten 1-8, XP001544023 * das ganze Dokument *	1-19	INV. F25J1/02 F01D15/00
X	----- WILSON R C ET AL: "Electrical Network Design Studies for Natural Gas Liquefaction Plants" THE 2006 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE FORTY-FIRST IAS ANNUAL MEETING, CONFERENCE RECORD OF, IEEE, PI, Oktober 2006 (2006-10), Seiten 287-292, XP031026048 ISBN: 1-4244-0364-2 * das ganze Dokument *	1-19	
A	----- CORCORAN J C W ET AL: "Studies of machine dynamic behaviour and system recovery in a natural gas liquefaction plant" ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, 1991. APSCOM-91., 1991 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HONG KONG, HONG KONG, IEE, 1991, Seiten 921-926, XP006512444 ISBN: 0-86341-246-7 * das ganze Dokument *	16-19	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) F25J F01D
A	----- FALLAIZE R A ET AL: "NEXT GENERATION LNG - EDRIIVE" AICHE NATIONAL MEETING, XX, XX, 12. März 2002 (2002-03-12), Seiten 203-223, XP009050746 * Seite 210 - Seite 216 * ----- -/--	16,17	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
1	Recherchenort München	Abschlußdatum der Recherche 3. März 2008	Prüfer Göritz, Dirk
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ----- & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03/02 (P/AC03)



EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	"THE ALL ELECTRIC DRIVEN LNG PLANT" BP UPSTREAM ENERGY CONFERENCE, XX, XX, 9. Mai 2001 (2001-05-09), Seiten 3-38, XP001544024 * das ganze Dokument *	1-19	
A	SHU ET AL: "Analysis points to electric-motor drivers for Angola LNG" OIL & GAS JOURNAL, 7. Oktober 2002 (2002-10-07), XP009096700 * Seite 63, Spalte 3, letzter Absatz - Seite 64, Spalte 2, Absatz 2 *	1-19	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 3. März 2008	Prüfer Göritz, Dirk
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1  
EPO FORM 1503 03.02 (P04C03)

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- US 7114351 B2 [0007] [0008] [0052]