

STATISK UNDERVANNSINNRETNING

Område for oppfinnelsen

Den foreliggende oppfinnelsen gjelder utstyr for produksjon av petroleum under vann, spesielt utstyr som blir plassert langt vekk fra en tørr toppside eller steder som er på land. Mer spesifikt gjelder oppfinnelsen utstyr for elektrisk kraftoverføring til undervannslaster som kan være plassert langt vekk fra overflateplattformer, eller land, og som krever høy kraftoverføring. Nevnte laster vil typisk være motorer for pumper og kompressorer, som krever regulering av rotasjonshastighet ved å regulere den elektriske frekvensen.

Oppfinnelsen får bukt med de problemene som er forårsaket av Ferranti-effekten og skinneffekten, som derved åpner for lengre utleggs lengder undervanns enn det som tidligere har vært oppnåelig.

15

Bakgrunn for oppfinnelsen og tidligere teknikk

I løpet av de siste titalls år har det globale energiforbruket øket eksponentielt, og man kan ikke se for seg noen ende på den økende etterspørselen. Hvormed utnyttelse av fossile brensler tidligere var fokusert på felt som var på land, har den begrensede mengden med olje satt i gang seriøse anstrengelser for å kunne finne og utvinne offshore gass- og oljefelt. Dagens teknikk for produksjon fra offshorefelt, er anvendelse av faste eller flytende bemannede plattformer, og ved tilknytning til undervanns produksjonsrammer med undervannsbrønner til disse plattformene. I noen tilfeller blir produksjonen ledet direkte til en mottaksfasilitet uten en plattform, som er på land. For å kunne opprettholde en tilstrekkelig høy produksjon fra undervannssatellitter til en sentral plattform eller direkte til land, kan det tilveiebringes en trykk-forsterkning ved bruk av en multifasepumpe eller –separasjon, etterfulgt av pumping og kompresjon. Det har også blitt installert pumper på havbunnen for direkte injeksjon av sjøvann inn i reservoaret for trykkstøtte til økt oljeproduksjon.

30

Det finnes flere fordeler som gir motivasjon for undervannsplassering av pumper og kompressorstasjoner sammenlignet med plassering på plattformer:

- Sikkerhet for mennesker, ved at man ikke arbeider eller bor på en plattform, og ved at man ikke blir fraktet frem og tilbake med helikopter
- Ingen brann- og eksplosjonsrisiko
- Ingen utblåsningsrisiko fra produksjonsstigerør opp fra havbunnen til plattformen og ned fra plattformen til havbunnen
- Sikkerhet mot sabotasje
- Kostnadsbesparelser for både kapital og drift, det vil si reduserte produksjonskostnader for olje og gass
- Øket produksjon fordi sugeeffekten fra kompressorer og pumper er nærmere brønnhodene
- Utstyret har statiske omgivelsesforhold, det vil si nesten konstant, kald temperatur og nesten konstant lav hastighet på havstrømmer rundt utstyret og ingen bølger, mens temperaturen på plattformene vil kunne variere fra for eksempel -20°C til $+30^{\circ}\text{C}$, og vindhastigheten kan være ved orkans styrke kombinert med ekstremt høye bølger
- Det kalde sjøvannet vil kunne bli benyttet til avkjøling av motorer og annet elektrisk eller elektronisk utstyr og prosessfluider
- Ingen visuelle forurensinger
- Betydelig lavere vekt, og dermed lavere material- og energimengder ved fabrikasjon av et undervannsanlegg
- Mindre karbondioksid, det vil si klimagass utslipp for fabrikasjon på grunn av mindre materialmengder
- Mindre utslipp av karbondioksid ved drift på grunn av at helikoptertransport elimineres og drift av plattform
- Mindre utslipp av karbondioksid sammenlignet med plattformer på grunn av at det er elektriske motorer som driver kompressorer og pumper, og forsyning av elektrisk strøm fra land eller plattform
- Mindre energiforbruk og utslipp av klimagasser per vektenhet av olje og gass

30

Ulempen for undervanns kompressorer per 2010 er at ingen har blitt installert og blitt driftet under vann, det betyr at dette er en teknikk som ikke er bevist.

Imidlertid er dette kun et spørsmål om tid, og den første kompressorstasjonen under vann vil trolig være i drift i 2015 eller tidligere på grunn av sterke motivasjoner for denne anvendelsen.

- 5 Undervanns trykkforsterkning er en nyere teknologi. Trykkforsterkning under vann hvor det kreves en betydelig undervanns utleggs lengde er en svært ny teknologi som bruker moderne teknologi, og som blir stilt opp mot problemer som ikke blir møtt eller som er irrelevante andre steder.
- 10 Teknikkens tilstand i dag er definert i patentpublikasjon WO 2009/015670, som foreskriver anvendelse av et første arrangement av en omformer på den nærliggende enden, toppsidene eller den enden som er på land, av en undervanns utleggskabel og til slutt et andre arrangement av en omformer på den andre enden, den enden som er fjerntliggende under vann, av undervanns
- 15 utleggskabelen. En variabel hastighets drivmotor, VSD (engelsk: «variable speed drive») foreskrives på hver ende av utleggskabelen. Undervanns variabel hastighets drivmotor kalles også variabel frekvens drivmotor (engelsk: «variable frequency drive», VFD), eller justerbar frekvens drivmotor (engelsk: «adjustable frequency drive», AFD) eller frekvensomformere eller bare omformere, og disse
- 20 representerer teknikkens tilstand. Verken i WO 2009/015670 eller andre publikasjoner er Ferranti-effekten nevnt, og heller ikke har noen av de problemene som er knyttet til undervanns VSD'er blitt omtalt eller antydnet.

- Europeisk patentsøknad EP1316672 angir en anordning for energiforsyning til
- 25 undersjøiske systemer for hydrokarbonproduksjon. Anordningen har en strømforsyningskabel som forsyner likestrøm til elektriske laster på havbunnen.

- Artikkelen *Technical Status and Development Needs for Subsea Gas Compression* (Baggerud, E. et al. OTC 18952, 30 april – 3 mai 2007), angir at
- 30 med en variabel frekvensomformer (VSD) plassert oversjøisk og høyspent vekselstrømsoverføring til en undersjøisk last, er slik overføring kun mulig over korte avstander på grunn av spenningsfall og tap i kabelen. Det er angitt noen typer løsninger på dette problemet.

Så langt finnes det bare noen få undervanns kompressorer som er i drift. Imidlertid er undervanns kompressorstasjoner under utvikling, og de første forventes å bli installert og komme i drift innen få år. For tiden blir alle

5 undervannspumper og -kompressorer drevet med asynkrone motorer. Utleggssavstanden for installerte pumper er ikke på mer enn omtrent 30 km fra plattformen eller fra land, og så langt har ikke dybdene vært på mer enn 1800 m. Det er kjent at det utføres seriøse studier og prosjekter innen oljeindustrien, som har mål av seg å få til installasjon av kompressorer med en utleggsavstand

10 i en størrelsesorden av 40 til 150 km og ved vanndybder ned til 3000 m eller mer.

En realistisk motorkraft vil være fra omtrent 200 kW for små pumper, og opp til 15 MW for kompressorer, og i fremtiden vil man kunne se for seg enda større

15 motorer. De undervannsmotorene som for tiden installeres blir forsynt med strøm via vekselstrømskabler fra det stedet hvor det finnes en strømforsyning, det vil si på en plattform eller på land og, dersom det finnes flere motorer vil hver av motorene ha sin egen kabel og frekvensomformer («variable speed drive», VSD) på den *nærliggende enden* av kabelen for å kunne regulere

20 hastigheten på hver individuelle motor ved den *fjernestliggende enden* av kabelen, ref. figur 1 og tabell 2.

Innenfor konteksten av denne patentbeskrivelsen betyr den *nærliggende enden* den enden av kraftoverføringen som er i nærheten av kraftforsyningen. For

25 undervanns anvendelser vil dette være et sted som er toppsiden av en plattform eller på land. Tilsvarende vil den *fjernestliggende enden* vise til den andre enden av overføringslinjen i nærheten av kraftlastene, typisk motorlaster. Den fjernestliggende enden er ikke nødvendigvis begrenset til den høyspenne enden av overføringslinjen. Uttrykket vil kunne utvides til busser eller terminaler med

30 lavere spenning, som er en del av den fjernestliggende stasjonen, så som en alminnelig undervannsbuss på den lavspenne siden av en undervanns transformator.

Kompressorer og pumper blir ofte driftet ved maksimums hastigheter, som ligger på henholdsvis mellom 4000 til 14000 rpm og mellom 2000 til 5000 rpm. Dermed må den elektriske drivmotoren ha en nominell hastighet i størrelsesorden fra 2000 til 14000 rpm når det blir brukt moderne høyhastighets motorer uten en girkasse mellom motoren og pumpen eller kompressoren. Denne mekaniske hastigheten tilsvarer et elektrisk frekvensområde for det innmatende drevet på omtrent 30 til 230 Hz for det eksempelet som har en to-polet motor. Motorer med flere pol-par vil kunne tillate en lavere maksimumshastighet for de samme elektriske frekvensene.

10

Figur 1 illustrerer den eneste løsningen som så langt har blitt brukt til overføring av elektrisk strøm til installerte pumper, i noen tilfeller uten omformere mellom VSD og undervannsmotorer, og dette blir referert til som Første løsning. Denne løsningen, med én overføringskabel per motor, har den ulempen at den blir dyr for lange oppskrittinger, for eksempel når de er mer enn 50 km, på grunn av den høye kostnaden for kablene.

15

En alvorlig teknisk hindring for denne løsningen er at, ved en bestemt undervanns utleggslengde vil det ikke la seg gjøre med å kunne overføre elektrisk strøm, på grunn av at overføringssystemet vil bli elektrisk ustabil og ubrukelig på grunn av Ferranti-effekten, som vil bli beskrevet senere. Oppfinnelsen vil løse dette problemet av ustabilitet.

20

Figur 2 illustrerer en løsning som har blitt foreslått for overføring av elektrisk strøm til flere laster ved lange oppskrittinger, Løsning To. Denne løsningen med en felles overføringskabel og et undervanns strømfordelingssystem, som innbefatter en undervanns VSD («Variable Speed Drive») per motor, vil gi en betydelig reduksjon av kabelkostnadene for overføringen, og vil dessuten forebygge problemet med elektrisk ustabilitet ved å begrense strømfrekvensen i overføringskabelen til for eksempel 50 – 10 Hz, og dessuten vil skinneffekten være akseptabel for slike frekvenser. Frekvensen økes deretter av en VSD for å passe til hastigheten på den motoren som har blitt koplet til VSD'en. Andre Løsning vil imidlertid også ha ulemper. Blant annet vil disse være dyre VSD'er

25

30

som ikke har blitt dokumentert for bruk under vann, og fordi slike VSD'er vil være satt sammen av mange elektriske og elektroniske komponenter, inkludert et reguleringsystem, som vil være tilbøyelig til å gi en større hyppighet med feil på elektriske overføringer og fordelingssystemer under vann.

5

I det som følger nå vil de iboende elektriske problemene med den eksisterende Første løsningen (figur 1) bli beskrevet, med en motor på den fjernestliggende enden av en lang kabel, og en Tredje løsning, illustrert i figur 3, med flere motorer på den fjernestliggende enden av en felles lang overføring og en felles VSD ved den nærliggende enden.

10

For en lang utleggsavstand fra strømforsyning til last, i en størrelsesorden av 50 km eller mer, vil påvirkningen fra undervannskabelen være så sterk at et slikt system enda ikke har blitt laget for en begrenset last, så som en enkelt motor.

15

Linjens induktans og motstand innebærer et stort spenningstap fra strømforsyningen til lasten. Det er kjent at et slikt spenningstap vil være selvforsterkende, og vil kunne føre til null spenning ved den fjernestliggende enden. Jo lengre utleggsavstanden er, jo høyere må overføringsspenningen være for å kunne redusere det spenningstapet som er langs overføringslinjen.

20

Imidlertid har en kabel en høy kapasitans, og en lang vekselstrømskabel vil utvise en betydelig såkalt Ferranti-effekt. Ferranti-effekten er et kjent fenomen, hvor den kapasitive ladningsstrømmen på linjen eller kabelen øker med linjens lengde og nivået for spenningen. Ved en utleggslengde på 100 km, vil ladningsstrømmen i en kabel kunne være høyere enn laststrømmen, hvilket gjør

25

det vanskelig å rettferdiggjøre et slikt ineffektivt overføringssystem. Et mer kritisk resultat vil være at ikke-last spenningen vil være omtrent 50 % høyere enn tilførselsspenningen ved den nærliggende enden som ville ha ødelagt kabelen og transformatoren og forbindelsene på den fjernestliggende enden.

30

Ved et plutselig fall ville spenningen på den fjernestliggende enden hoppe til dette høye nivået. I tillegg vil det være en transient topp på for eksempel 50 %, som gir noe slikt som 100 % totalt, se Tabell 1 nedenfor hvor verdier som er markert med **fet kursiv skrift** er over spenningsklassemarginen for isolasjonen.

Dagens system med utleggsavstander i størrelsesorden av 30 km har ikke dette problemet, fordi det fortsatt er mulig å få til en utleggs lengde og elektrisk last i kombinasjon under vann.

- 5 Tabell 1: Spenningsøkning ved lasttripper på grunn av Ferranti-effekten i forskjellige systemer

Effekt på lengst-liggende aksling	Maks overføringseffekt, $f_{\max}$ og motorhastighet $\omega_{\max}$	Utleggslengde	Standard kabel	Kildespenning ved nærliggende ende, U	Spennning, U, for fulllast og ingen-last	Transier spenning u_p , på fjernestl etter full trip
Pumpe 2,5 MW <u>Første løsning</u>	60 Hz (3600 rpm)	40 km	95 mm ² 30 (36) kV	20 kV	18,3 kV 20,2 kV	20,9 kV
Kompressor 7,5 MW <u>Første løsning</u>	180 Hz (10800 rpm)	40 km	150 mm ² 30 (36) kV	32 kV	29,2 kV 34,8 kV	41,0 kV
Pumpe 2,5 MW <u>Første løsning</u>	60 Hz (3600 rpm)	100 km	150 mm ² 30 (36) kV	26 kV	23,6 kV 27,5 kV	28,9 kV
Kompressor 7,5 MW <u>Første løsning</u>	180 Hz (10800 rpm)	100 km	150 mm ² 30 (36) kV	28,5kV	28,8 kV 52,7 kV	68,4 kV
Tre kompressorer og tre pumper. Totalt 30 MW <u>Tredje løsning</u>	180 Hz Kompressor: 10800 rpm Pumpe: 5400 rpm	100 km	400 mm ² 45 (54) kV	45,6 kV	45,6 kV ustabil	155 kV

- 10 Ferranti-effekten og skinneffekten – noen vurderinger:

Ferranti-effekten er en økning av en spenning, som oppstår på den fjernestliggende enden av en lang overføringslinje, i forhold til den spenningen som er ved den nærliggende enden, og som forekommer når linjen er ladet men

når det er en svært liten last eller når lasten er frakoplet. Denne effekten oppstår på grunn av spenningsstapet over linjeinduktansen (på grunn av ladningsstrømmen) som er i fase med de spenningene som er på den enden som sender. Av denne grunn vil både kapasitans og induktans være ansvarlig
 5 for at dette fenomenet oppstår. Ferranti-effekten vil være mer fremhevet jo lengere linjen er og jo høyere spenning som blir anvendt. Den relative spenningsøkningen vil være proporsjonal med kvadratet av linjens lengde.

På grunn av høy kapasitans vil Ferranti-effekten være mye mer fremhevet for
 10 undergrunns- og undervannskabler, selv over korte lengder, sammenlignet med luftspente overføringslinjer.

En foreslått ligning for å kunne bestemme Ferranti-effekten for et gitt system er:

$$v_f = v_n(1 + \omega \times C \times L \times l^2)$$

15 hvor:

v_f = den fjernestliggende spenningen

v_n = den nærliggende spenningen

$\omega = 2 \times 3,14 \times f$

f = frekvens

20 C = linjens kapasitans

L = linjens induktans

l = linjens lengde

l^2 = linjens lengde i kvadrat

25 I litteraturen vil det også kunne bli funnet andre uttrykk for Ferranti-effekten, men i alle fall er det enighet om at effekten øker med overføringsfrekvensen, kabelkapasitans, kabellengde og spenning.

Ut fra ovenstående ligning kan det sluttet at Ferranti-effekten for en lang linje
 30 kan bli kompensert for med en passende reduksjon i elektriske frekvensen. Dette er årsaken til Andre løsning med en undervanns VSD. Overføringsfrekvensen kan for eksempel være den vanlige europeiske frekvensen på 50 Hz.

En annen fordel med lav overføringsfrekvens vil være en sterk reduksjon av den elektriske skinneffekten for overføringskabelen, det vil si bedre utnyttelse av tverrsnittsarealet på kabelen. I praksis vil overføring av en høyfrekvent

5 elektrisitet, for eksempel 100 Hz eller mer over lengre avstander, for eksempel 100 km eller mer, være prohibitivt på grunn av skinneffekten og den tilsvarende høye motstanden i kabelen.

Påvirkningen fra Ferranti-effekten og skinneffekten må naturligvis beregnes fra tilfelle til tilfelle, for å kunne vurdere om de er akseptable eller ikke for overføring

10 ved en gitt frekvens. Det er en etterspørsel etter å få frem elektriske kraftoverføringssystemer under vann, som vil være gunstige med hensyn til de ovenfor nevnte problemene, og uten å introdusere VSD'er under vann.

15 Figurer

Oppfinnelsen er illustrert med figurer, hvor

Figurer 1 – 3 illustrerer utførelsesformer av tidligere teknikk, og

Figurer 4, 5 og 6 illustrerer utførelsesformer av den foreliggende oppfinnelsen.

20 Oppsummering av oppfinnelsen

I samsvar med et første aspekt av oppfinnelsen er det tilveiebrakt en anordning for operativ forbindelse mellom en fjerntliggende ende av en undervanns utleggsskabel og undervannslaster så som pumper, kompressorer og reguleringsystemer. Anordningen er en statisk frekvensøkningsanordning, og

25 omfatter:

en statisk frekvensøkningsenhet,

minst én gass- og / eller væskefylt tank, hvor nevnte enhet eller deler av denne er anordnet.

Videre er anordningen en undervanns statisk frekvensøkningsanordning

30 (SSFSD) omfattende passive faststoff komponenter, for undervannsplassering ved den fjerntliggende enden av undervanns utleggskabelen som er koplet til minst en kraftkilde ved den nærliggende enden av utleggskabelen. Utleggs-lengden er lang, som betyr lang nok til å kunne forårsake problemer ved de

frekvens- og effektnivåene som er egnede for undervannsmotorer for pumper og kompressorer. Anordningen via utleggskabelen tar i mot elektrisk kraft ved en tilstrekkelig lav frekvens til å kunne ha en stabil overføring, og anordningen, som er operativt koplet til en undervannsmotor, leverer en utgang av elektrisk frekvens, ampere og spenning egnet for drift av den tilkoplete undervannsmotoren.

Innretningen er fortrinnsvis en passiv frekvensoppsteppingsanordning, som ikke har midler for aktiv undervannsregulering eller -justering på stedet.

10

Mer foretrukket, innretningen vil være en undervanns statisk frekvensoppsteppingsanordning (engelsk: «Subsea Static Frequency Step-up Device», SSFSD) som omfatter passive komponenter i fast tilstand, for undervannsplassering ved den fjernestliggende enden av en undervanns utleggskabel koplet til minst en kraftkilde ved utleggskabelens nærliggende ende ved et tørt sted på land eller en toppside, og utlegglengden er lang, som betyr at den er lang nok til å kunne forårsake problemer på grunn av Ferranti-effekten ved de frekvens- og kraftnivåene som er mulig for undervanns pumpe- og kompressormotorer, og hvor innretningen via utleggskabelen tar i mot en inngang av elektrisk kraft ved en tilstrekkelig lav frekvens til å kunne ha en stabil overføring, og hvor innretningen, som er operativt koplet til undervannsmotoren, leverer en utgang av elektrisk frekvens, ampère og spenning som vil kunne la seg gjøre for drift av de tilkoblede motorene, og innretningen blir satt inn i en trykktank eller et –hus som vil være fylt med væske eller gass eller begge deler.

Ingen tidligere undervanns trykkforsterkningssystemer har tatt hensyn til Ferranti-effekten. Tidligere systems versjon med en undervanns VSD vil derfor kunne være ubrukelig i mange applikasjoner, siden isolasjonen på utleggskabelen kan bli ødelagt av en ukontrollert høy spenning på den fjernestliggende enden på grunn av Ferranti-effekten. Særtrekket om en «passiv elektrisk frekvensoppsteppings eller –nedsteppings- (eller steppings-) anordning», betyr at anordningen ikke skal og ikke kan bli justert på stedet,

30

under drift eller ved et hvilken som helst tidspunkt ved systemets levetid, anordningen er en passiv slaveenhet, nemlig en passiv frekvensoppsteppingsanordning eller en passiv frekvensnedsteppingsanordning, i motsetning til en undervanns VSD. En

5 undervanns VSD er svært kompleks, stor og kostbar, - den er typisk omtrent 12 m høy, 3 m i diameter og veier rundt 200 tonn. I motsetning til dette, vil den passive anordningen være mye mindre og enklere, og vil typisk være omtrent 6 m lang og 2 – 3 m i diameter, med en vekt på rundt 50 tonn. Anordningens pålitelighet har blitt anslått å være flere ganger bedre enn den for en

10 undervanns VSD. Dette er på grunn av at en undervanns VSD er svært kompleks, og selv om alle komponenter i en undervanns VSD vil være av topp kvalitet, vil i praksis det store antallet av komponenter og kompleksitet føre til en dårligere pålitelighet. Kostnaden for anordningen eller et system av oppfinnelsen vil bli betydelig redusert sammenlignet med de systemene som

15 har dagens teknikk av en undervanns VSD. Uttrykket andre laster omfatter strøm til reguleringssystemer og andre laster som ikke nødvendigvis er knyttet til trykkforsterkning.

Driftsfrekvensen for utleggskabelen må tas i betraktning, hvor det blir tatt

20 hensyn til Ferranti-effekten og de elektriske tapene. Isolasjon er et nøkkelement. Mest foretrukket vil dimensjoner på ledere og isolasjon, og valg av driftsfrekvens, være slik at ved den fjernestliggende enden av kabelen vil Ferranti-effekten, ved det maksimale under drift, øke spenningen like mye som det elektriske tapet, og kabelutformingen blir forenklet. Den veiledningen som

25 har blitt tilveiebragt i dette dokumentet, kombinert med god teknisk praksis, antas å være tilstrekkelig for å få en ordentlig utforming av utleggskabelen, inkludert valg av driftsfrekvens: Løsningen bør kunne finnes for hvert enkelt tilfelle. Anordningen i henhold til oppfinnelsen blir da bli utformet for å kunne omforme driftsfrekvensen for utleggskabelen til driftsfrekvensen for

30 undervannslastene, det vil si undervannskompressorer eller -pumper eller, mer spesifikt, motorene som er for undervannskompressorer eller -pumper.

I samsvar med et andre aspekt ved oppfinnelsen er det tilveiebrakt et system for undervanns trykkøkning av hydrokarbonfluid eller et annet fluid, omfattende: en undervanns utleggskabel, koplet til en elektrisk vekselstrømskilde ved en nærliggende ende, der lengden på undervanns utleggskabelen er for lang for en

5 stabil drift ved de frekvens- og effektnivåene som er egnet for undervannsmotorer for pumper og kompressorer, undervannspumper eller -kompressorer som er operativt koplet til en fjerntliggende ende av undervanns utleggskabelen. I samsvar med det andre aspektet ved oppfinnelsen omfatter systemet videre en undervanns statisk

10 frekvensøkningssanordning (SSFSD), omfattende: en statisk frekvensøkningsssenhet og minst en gass og / eller væskefylt tank hvor nevnte enhet eller deler derav er anordnet.

Ytterligere utførelsesformer og særtrekk har blitt definert i de avhengige

15 kravene.

Den elektriske frekvensen for anordningens inn- og utgang vil være forskjellige. Forskjellen vil være ved et fast tallforhold for passive anordninger. Inngangsfrekvensen, driftsfrekvensen for utleggskabelen, vil være i området 0,1 – 150

20 Hz, så som 2 – 60 eller 4 – 50 Hz eller 5 – 40 Hz, mens utgangsfrekvensen vil være i området 0,1 – 350 Hz, så som 30 – 300 eller 50 – 250 Hz eller 50 – 200 Hz, Undervannsinnetningen vil kunne bli anordnet i ett eller flere hus, som ett eller flere elementer, imidlertid må alle deler kunne stå i mot det barske undervannsmiljøet uten at det må feile. Med den foreliggende oppfinnelsen vil

25 langtidskostnaden og påliteligheten for nevnte anordning, og tilhørende systemer, bli betydelig forbedret i forhold til det som for tiden vil kunne oppnås med for eksempel undervanns turtallsregulerte drivmotorer i fast tilstand.

I tillegg tilveiebringer oppfinnelsen anvendelse av en undervanns statisk

30 steppingsanordning for å kunne omforme de karakteristiske strømkarakteristikkene for en undervanns utleggskabel til en elektrisk kraftskarakteristikk som er mulig for drift av tilkoplet undervannsutstyr, et system med minst én undervanns steppingsanordning i henhold til oppfinnelsen

anordnet på den fjernestliggende enden av en undervanns utleggskabel, og en fremgangsmåte for å drifte nevnte system, ved reguleringsjusteringer bare for systemgjenstander ved slike steder som en tørr toppside eller på land.

5 Oppfinnelsens utførelsesform med frekvensoppstepping for å kjøre vekselstrømsmotorer

En utførelsesform av oppfinnelsen, den Fjerde løsningen, har blitt vist i figur 4 og 5. det viktigste særtrekket ved denne utførelsesformen vil være en introduksjon av en undervanns frekvensoppsteppingsanordning (FSD), plassert under vann ved den fjernestliggende enden av overføringskabelen og med en kort avstand til de motorene som kjører kompressorene og pumpene. Kort avstand i denne sammenheng betyr nære nok til å kunne holde et akseptabelt ohmsk motstandstap, og dermed krafttap, mellom FSD'en og motorene, og det betyr også kort nok til å unngå de problemene som oppstår på grunn av Ferranti-effekt og ustabilitet. Det er viktig å merke seg at undervanns FSD'er ikke direkte vil regulere frekvensen til å passe driftshastigheten for motorer, ved å ha et lokalt reguleringsystem som justerer hastigheten i henhold til behov. Variasjon av hastighet i henhold til produksjonsbehovet ved stasjonær tilstand, oppstart og stopp, og ramping av hastighet ned og opp, blir gjort med VSD'en ved den nærliggende endeoverflaten (toppside på plattform eller på land), langt unna undervanns FSD'ene. FSD'ene er ganske enkelt slaver av VSD'en, og deres formål vil bare være en oppstepping av den overføringsfrekvensen, som er gitt av VSD'en med en eller annen multipl.

25 **Undervanns statisk frekvensoppsteppingsanordning**

En utførelsesform av en undervanns FSD er en undervanns fast-trinns statisk VSD (SVSD) blitt tilveiebragt slik at, når den har blitt modifisert til passe til det enkle formålet av å være en oppsteppingsanordning for overføringsfrekvensen, kan den bli laget i en forenklet versjon med en akseptabel høy robusthet, pålitelighet og tilgjengelighet. En opplagt forenkling synes å være at reguleringsystemets datamaskin, for å stille inn oppsteppingsforholdet, vil kunne bli plassert på overflaten og bli koplet til eller integrert inn i reguleringsystemet for overflate-VSD'en, som egentlig regulerer hastigheten

på motorene. Den eneste funksjonen for undervanns statisk frekvensoppsteppingsanordning (SSFSD) er oppstepping av overføringsfrekvensen med et oppsteppingsforhold, $n : 1$. Det vil ikke være noe behov for en veldig rask respons lokalt til SSFSD'en, og som derfor vil tillate at

5 den blir plassert ved en nærliggende ende.

Et reguleringssystem som blir plassert på overflaten er opplagt mye lettere å vedlikeholde og reparere enn en som blir plassert under vann, og vil derfor betydelig øke påliteligheten for SFSD'en.

10

En opplagt fordel med en SSFSD vil være at oppsteppingsforholdet kan bli nullstilt ved visse tidspunkter dersom dette er fordelaktig, for eksempel ved å øke tallforholdet fra $2 : 1$ til $3 : 1$. Inngangssignalet til reguleringssystemet for SSFSD'en vil være overføringsfrekvensen, og utgangen er et signal som

15 stepper opp frekvensen for den elektriske kraften ut fra SFSD'en med et innstilt tallforhold som passer til den virkelige hastigheten for motoren(e).

Også i dette tilfelle vil det generelle uttrykket være:

$$f_{s-u} = n \times f_t, \text{ hvor}$$

20 n : en multiplum som ikke nødvendigvis trenger å være et heltall, men kan settes til en hvilken som helst ønskelig verdi, for eksempel 2,3.

En SSFSD kan, alternativt til å sette et frekvensforhold, bli programmert til å steppe opp frekvensen med en bestemt tillagt økning, for eksempel legge til 100

25 Hz i en overføringsfrekvens på 50 Hz, eller i et mer generisk uttrykk: $f_{s-u} = f_t + \Delta f_a$, hvor:

f_t : overføringsfrekvensen, Hz

f_{s-u} : oppsteppet frekvens = input frekvens til motorer, Hz

f_a : tillagt frekvens, Hz

30

Noen elementer av en praktisk løsning vil kunne innbefatte:

De komponentene som er i SSFSD kan bli satt sammen i en trykktank fylt opp med en egnet væske, for eksempel isolerende olje som også avkjøler de elektroniske og elektriske komponentene.

- 5 Den interne oljen vil kunne være trykktolerant med det omgivende sjøvannet, eller trykket vil kunne bli holdt på et nivå som på mellom én bar og omgivelsestrykket, bestemt av trykktoleransen for komponentene.

- 10 Reguleringsystemet vil kunne bli plassert inne i trykkhuset, men det vil være mer gunstig å ha det i en separat ekstern kapsel. Reguleringsystemet vil kunne bli plassert på overflaten (toppsides eller på land).

- Alternativt til en væskefylt tank, vil det kunne bli brukt en tank fylt opp med inert, tørr gass, for eksempel tørr nitrogen. Trykket innenfor huset vil kunne bli valgt
15 fra i området av én bar og opp til det som er likt med det omgivende vanntrykket eller høyere. Fordelen med høyt trykk er at varmekapasiteten på gassen vil øke med trykket og vil derfor gi en bedre avkjøling. En annen fordel med høyt trykk er også at man vil få et redusert krav til veggtykkelsen og en lavere belastning på flenser og tetninger. Dsomm trykket velges tett opp til det som er likt med det
20 omgivende sjøvannstrykket, vil de kravene som følger i forhold til trykktank, flenser og tetninger være tilsvarende en væskefylt trykktolerant tank. Det vil være den trykktoleransen for de komponentene som skal være inne i tanken (det vil si elektroniske, elektriske, og andre) som vil være avgjørende for trykktoleransen.

25

Dersom det er gunstig, vil komponentene i en SSFSD kunne bli segregert på en optimal måte i samsvar med deres toleranser for: væske, trykksatt væske og trykksatt gass. De komponentene vil kunne bli anordnet i tanker på den følgende måten:

- 30 De mest robuste komponentene kan bli installert i en tank fylt opp med trykksatt væske.

Komponenter som er tolerante for væsker, som har lav toleranse for trykk, kan bli installert i en annen lavtrykks væskefylt tank.

Komponenter som ikke tolererer væske, men tolererer høytrykks gass kan bli installert i en høytrykks tank.

Passende avkjøling må anvendes for de forskjellige tankene.

- Komponenter i de forskjellige tankene vil bli koplet som nødvendig, med
- 5 ledninger som går gjennom penetratorer i tankveggene. Undervanns
koplingsenheter, som er i stand til å gå i pardannelse, vil også kunne bli
anordnet mellom tankene for å få de installerbare og opphentbare hver for seg.

- Det skal nevnes at den ovenfor beskrevne segregeringen, for å få til et optimalt
- 10 arrangement av komponentene i en SSFSD i forskjellige tanker, hvor det blir tatt
hensyn til nødvendig antall penetratorer og koplingsenheter, også vil kunne bli
anvendt for undervanns variabel hastighets drivmotorer (VSD).

- Hver trykktank eller hvert trykklus omfatter minst en penetrator, så som en
- 15 penetrator for hver fase av inn og ut, eller en felles penetrator for henholdsvis
fasene inn og ut, eller en felles penetrator for alle faser inn og ut.

Noen vurderinger

- Et viktig punkt ved oppfinnelsen vil være at, selv om det typisk blir brukt en VSD
- 20 på den nærliggende enden, det ikke er viktig å kunne være i stand til å foreta en
rask justering av frekvensen på motorlastene. Motorens hastighet vil langsam
bli justert i løpet av årene, mens reservoaret produserer og feltrykket gradvis
blir redusert, som dermed vil kreve økende kraft, det vil si motorhastighet. Dette
faktum vil gi anledning til, for eksempel, en midlertidig ramping ned av motorer
- 25 som går, for å kunne kople til en motor til. Alternativt vil den ubrukte motoren
kunne bli koplet direkte på lasten dersom beregningene har vist at dette vil
kunne være mulig å gjøre med hensyn til strømtopper eller andre forstyrrelser i
strømoverføringssystemet. Avhengig av antall motorer som allerede er i gang,
vil det kunne være fordelaktig å midlertidig redusere frekvensen før DOL-starten
- 30 (DOL: «direct online»). Om nødvendig, vil strømmen kunne bli slått av når man
starter en ekstra motor, og oppstart og oppramping av hastigheten for alle
motorer samtidig. I en kompressorstasjon vil et annet alternativ kunne være å
sette alle pumper og kompressorer i sirkulasjon før man starter opp en

kompressor eller en pumpe som har blitt stanset, og deretter starte opp den enheten som har stanset, og når denne har nådd den ønskede hastigheten, sette alle kompressorer og pumper online i en produksjonsmodus.

- 5 De ovenfor nevnte anordningene og fremgangsmåtene gjør det mulig å håndtere Ferranti-effekten og skinneffekten, og dermed gi en betydelig forlengelse av avstanden for statisk undervanns høyspent strømovertføring.

Dermed vil maksimalt praktisk utleggsavstand kunne bli øket svært mye uten å
10 introdusere undervanns VSD'er med lokal undervannsregulering av frekvensen. I både figur 4 og 5 har oppsteppingsanordningene ikke et lokalt reguleringssystem som varierer frekvensen og dermed hastigheten på motorene i henhold til produksjonen, de har verken regulering av nedrampingen for frekvens for å legge til en drift av motorer som har stanset eller har direkte
15 regulering av oppramping for frekvensen for å få den virkelige hastigheten på motoren til å passe med produksjonen.

Som nevnt i seksjonen om «Bakgrunn for oppfinnelsen og tidligere teknikk», vil hastigheten på kompressorene typisk kunne spenne fra for eksempel 4000 til
20 14000 rpm og fra for eksempel 2000 til 5000 rpm for pumpene. Når kompressor- og pumpemotorer i en kompresjonsstasjon i henhold til oppfinnelsen (Fjerde og Femte løsning) blir tilført med den samme frekvensen med en felles overføringskabel, vil hastigheten for pumpene lett kunne bli justert til den ønskede hastigheten av halvparten av kompressorhastigheten ved å
25 bruke fire-polete, eller flere-polete, motorer for pumpene, og to-polete motorer for kompressorene. Dersom pumpene brukes til regulering av væsknivået i en separator i en kompressorstasjon, vil en passende variabel netto fremadgående strømning for pumpen kunne bli anordnet med resirkulering og bli utstyrt med ventiler for strømningsregulering.

30

Hastigheten for pumpene vil derfor kunne bli regulert på følgende eventuelle måter:

Dedikert SSFSD for hver pumpemotor.

En felles SSFSD for flere pumpemotorer.

Kjøre pumpemotorene på samme frekvens som kompressorene, men med det dobbelte antallet av poler, og som fører til en halvering av rotasjonshastigheten. Kjøre pumpene på den samme overføringsfrekvensen.

5

Generelt kan antall SSFSD'er være fra én per motor til en stor felles enhet for alle motorer, eller et eller annet i mellom, for eksempel én SSFSD per store kompressormotor og én felles enhet for nokså små motorer eller, som nevnt ovenfor, ingen SSFSD for pumpemotorene.

10

Noen foreslåtte kombinasjoner av overflateplasserte VSD'er, antall undervanns drivmotorer og antall 3-fase overføringslinjer

En 3-fase overføringslinje består av tre individuelle kabler som er isolerte og buntet sammen. For en lang undervannsoverføring med mer enn én motor, for eksempel to kompressorer, er det med den foreliggende teknologien mulig å bunte sammen overføringslinjer for flere SSFSD'er, for eksempel seks kabler i bunten, i tilfelle av to SSFSD'er. Dette vil redusere utleggingskostnadene for linjene, og har den fordelen av å kunne tillate individuell frekvensregulering av to eller flere motorer M1, M2 og så videre, ved den fjernestliggende endene av de linjene som har blitt buntet sammen.

20

I tabell 2 er det forklart betydningen av de gjenstandene som er i figurene.

25 Tabell 2: Figurmerkinger

Gjenstand nr.	Forklaring
1	Elektrisk kraftforsyningsnett
2, 2', 2'', 2'''	Nedsteppings transformator
3, 3', 3'', 3'''	VSD, Variabel hastighet drivmotor
4, 4', 4'', 4'''	Oppsteppings transformator
5, 5', 5'', 5'''	Overføringskabel
6, 6', 6'', 6'''	Nedsteppings transformator

7, 7', 7'', 7'''	Kretsbyter
8, 8', 8'', 8'''	Nærliggende ende av overføringskabel
9, 9', 9'', 9'''	Fjernestliggende ende av overføringskabel
10	Felles bunt med to eller flere kraftoverføringslinjer
16	SSFSD
13, 13', 13'', 13'''	Nedsteppings transformator
14, 14', 14'', 14'''	VSD
15, 15', 15'', 15'''	Kretsbyter
19	Trykkbalanseringsenhet
M1, M2, M3, M4	Motor

Detaljert beskrivelse

Det vises til Figur 4, som illustrerer en spesifikk utførelsesform av den foreliggende oppfinnelsen. Node 1 blir koplet til en kilde for elektrisk kraft; kilden er et lokalt strømnett eller, for eksempel, et lokalt kraftgenereringssystem. En VSD 3 er tilkopling til en strømkilde. En VSD-inngang transformator 2 blir ofte koplet mellom, for å kunne justere tilførselsspenningen, for eksempel 13,8 kV for en plattform til den klassifiserte VSD-spenningen, for eksempel 6 kV. Transformatoren vil kunne være en integrert del av VSD'en, slik som tilbys av noen leverandører. Normalt vil det være nødvendig med en oppsteppingstransformator 4 for å kople VSD3 til den høyspente overføringslinjen 5, som i det eksempelet med en undervannsapplikasjon består av en kabel. En typisk spenning som anvendes på kabelen kunne for eksempel være omtrent 120 kV. Kabelen blir lagt ned i havet for å kunne strekke seg fra den nærliggende enden 8 til undervanns fjernestliggende ende 9; kabelen har en operativ lengde hvor Ferranti-effekten begynner å bli observert inntil der hvor den sterkt dominerer laststrømmen. Dette kan bli oversatt til lengde i størrelsesorden av 20 km, til 100 km og trolig mer enn dette, diktert av stedet og egenskapene for undervannslastene. På den fjernestliggende enden 9 av kabelen anordnes en undervanns transformator 6, som stepper ned spenningen til for eksempel 20 kV som passer for kretsbryterne 7, 7', 7'', 7''', etterfulgt av transformator 13, 13', 13'', 13''', som stepper ned til for eksempel 6 kV som

passer som driftsspenningen for SSFSD'er, som også er en passende spenning for motorene M1, M2, M3, M4. Det er illustrert fire undervannsmotorer, som for eksempel vil kunne være to kompressormotorer M1, M2 og to pumpemotorer M3, M4. Nedsteppingstransformatorene er i prinsippet valgfrie, fordi

- 5 nedsteppingstransformatore 6 (ref. figurer 4 og 5) direkte kan steppe ned den spenningen som vil være egnet for undervanns SSFSD'ene, slik som illustrert i figur 5. Å inkludere 13, 13', 13'' og 13''' er et spørsmål om optimalisering av kraftfordelingssystemet på den fjernestliggende enden.

- 10 De undervanns SSFSD'ene i figurer 4 – 6 stepper opp overføringsfrekvensen med et ønskelig trinn opp.

Det skal understrekes at nøkkelkomponentene i kraftoverføringssystemene av figurer 4 – 6 er kraftkilden 1, variabel hastighet drivmotor (VSD) 3,

- 15 overføringskabelen 5 og 16. De andre komponentene, det vil si oppsteppings- og nedsteppingstransformatorene, 2, 4, 6 og 14, 13', 13'' og 13''' og kretsbyrterne 15, 7, 7', 7'', 7''', er inkludert i samsvar med behovet fra tilfelle til tilfelle.

- 20 Kostnaden for lange undervannskabler og undervanns VSD'er vil være svært stor, og undervanns VSD'er i figur 2 har en negativ innvirkning på systempålitelighet så vel som at de er dyre. En felles overføringskabel sammenlignet med den løsningen som er i figur 1 vil derfor representere en betydelig besparelse på investeringene.

25

Det skal nevnes at selv om én felles overføringskabel vil være gunstig ut fra kostnadshensyn, vil det ikke være noen tekniske problemer med å ha én overføringskabel for hver SSFSD. Dette vi kunne være den optimale løsningen for mellomliggende utleggslengder, for eksempel 35 til 75 km, det vil si opp til

30 de avstandene hvor kabelkostnaden ikke blir prohibitiv. Med én VSD per overføringskabel, det vil si én VSD per undervannsmotor, fører dette til individuell hastighetsregulering for hver motor.

Kondensert beskrivelse av oppfinnelsen undervanns

oppsteppingsanordning

- 5 Det er problematisk, eller til og med ikke mulig, å overføre høyspent høy-effekts elektrisitet ved høy frekvens, for eksempel mer enn 100 Hz, over lange undervanns oppsteppingsavstander, for eksempel mer enn 10 km, for å forsyne motorer som opererer ved høy hastighet for undervannspumper og – kompressorer. Dette er på grunn av Ferranti-effekten som kan bure over
10 spenning og ustabilitet i overføringssystemet, så vel som den skinneffekten som skaper stor ohmsk motstand, og følgelig stort tap av spenning og effekt.

- Undervanns variabel hastighet drivmotorer, hvor overføringsfrekvensen kan være lav, for eksempel 50 Hz, tilveiebringer en løsning på dette. Imidlertid vil de
15 være de store, og være utstyrt med en stor mengde med sensitive, skjøre elektriske og elektroniske komponenter og reguleringssystem, som i tillegg til å gjøre dem dyre også antas å kunne ha en høy hyppighet med feil.

- Oppfinnelsen tilbyr en løsning på dette ved å ha VSD'en med sitt
20 reguleringssystem på overflaten (på en plattform eller på land), og som da har enkle undervanns frekvensoppsteppingsanordninger i nærheten av undervannsmotorene. Disse anordningene regulerer ikke direkte frekvensen i den elektriske strømmen på motorene, men deres eneste funksjon er å steppe opp overføringsfrekvensen, som vil være variabel og være innstilt til en frekvens
25 i samsvar med behovet for motorene, med et egnet forholdstall.

- Dersom statiske oppsteppingsanordninger brukes, kan de bli forenklet sammenlignet med undervanns variable hastighets drivmotorer. Blant andre ting, vil reguleringssystemet for oppsteppingen kunne bli plassert på overflaten,
30 og vil enten kunne bli koplet til den overflate-plasserte VSD'en eller bli integrert inn i den.