

NIF
Norske Sivilingeniørers Forening
GASSTURBINER OG KOMPRESSORER
Bergen, 5. - 7. oktober 1993

STATUS OG UTFORDRINGER
INNEN
FLERFASE MASKINER

Lars E. Bakken, Spesialist
Statoil Forskningscenter

SAMMENDRAG

Flere konsepter er i dag tilgjengelig innen flerfase maskiner, dvs. flerfase pumper og våtgass kompressorer. Også erfaring fra design og drift av turbo ekspandere er viktig med hensyn på kunnskap om flerfase stømning i rotor- og diffusorkanaler.

Fabrikk- og felttester har avdekket svakheter og utfordringer ved utvikling av flerfase maskiner. Mekanisk og delvis ytelsesmessig er maskinenes kapabilitet analysert og fastlagt.

Viktige utfordringer gjenstår med hensyn til integrering av flerfase maskiner i et flerfase produksjonsnettverk. Aktuelt strømningsregime påvirker maskinens og systemets effektivitet og stabilitet vesentlig. Fremtidig ubemannet marinisert drift stiller krav til enkle og pålitelige enheter. For overvåking og tilstandsanalyse er det behov for diagnosesystemer med blant annet prediksjon av midlere tid til feil for å sikre en pålitelig drift.

Nomenklatur:

g : gravitasjonskonstant [m/s^2]
h : entalpi [kJ/kg]
H : løftehøyde [m]
p : trykk [bar]
s : entropi [kJ/kgK]
t : temperatur [$^{\circ}C$]
T : temperatur [K]
q : tetthet [kg/m^3]

GLR : gass væskeforhold (standard)
GVF : gass volumfraksjon (aktuell)

Inndekser:

1 : innløp
2 : utløp

INNLEDNING

Utviklingen av flerfase maskiner tok for alvor fatt på midten av 80-årene. I dag eksisterer flere konsepter for flerfase maskiner, samt trykkøkingsutstyr for flerfase/ubehandlet brønnstrøm. Selv om det for tiden er begrenset med applikasjoner gir prospektene for Nordsjøen et klart potensiale. Særlig gjelder dette innen marinisert drift av flerfase maskiner.

Redusert brønnehodetrykk, gjerne ved bruk av flerfase maskiner har vesentlige fordeler også for eksisterende plattformbrønner. Trykkstøtte til enkelte produktive brønner gir direkte fortjeneste ved akselerert produksjon i tillegg til vesentlig større fleksibilitet i brønnstyringen.

Med bakgrunn i forventet utbygging av satellitter og havbunnsbrønner forventes et stort potensiale innen marinisering av flerfase maskiner. Utbygging ved havbunnsløsninger med integrerte flerfase maskiner kan gi vesentlige reduksjon i utbyggingskostnader, -ned mot 50% i forhold til et tradisjonelt plattformkonsept.

APPLIKASJONER

De fleste større felt i Nordsjøen er bygd ut eller under utbygging. Også flere sentrale felt og satellitter er utbygd, primært ved innfasing mot eksisterende prosesseringsplattformer. Prospektene for Nordsjøen viser i overkant av 70 felt/satellitter. Av disse er cirka to tredjedeler gassfelt, hvorav 70 % av feltene ligger innenfor en avstand av 50 km fra eksisterende eller planlagt infrastruktur. Fremtidig utvinning av olje og gass i Nordsjøen vil derfor i hovedsak foregå ved satellitt-utbygging, samtidig som avstanden fra satellitt til moderplattformen øker. Økt avstand medfører sterkere behov for trykkstøtte for å produsere gitte mengder eller opprettholde produksjonen etter hvert som brønnehodetrykket reduseres.

I dag eksisterer et begrenset antall applikasjoner for flerfase maskiner. Det forventes imidlertid et økende behov både i forbindelse med redusert brønntrykk for plattformbrønner, samtidig som antall havbunnsbrønner øker vesentlig fram mot århundreskiftet (7 - 800).

For plattformbrønner viser analyser at det kan være fordelaktig å gi trykkstøtte til enkelte gode produsenter framfor generell trykkreduksjon for samtlige brønner, inklusive brønner med høy gass volumfraksjon eller høyt vannkutt (60 - 80%). Ovennevnte forhold påvirkes både av reservoaregenskaper og prosesseringskapasitet på moderanlegg.

Bruk av flerfase maskiner for trykkstøtte er imidlertid

bare et alternativ for å opprettholde høy produksjon fra 'late' brønner. Andre alternativ er gassløft i brønn, evt. redusert brønnehode/separatortrykk ved økt gass kompresjons-kapasiteten. Avhengig av reservoar egenskaper vil normalt ikke redusert brønnehodetrykk redusere behovet for trykkstøtte til reservoaret i form av gass- og/eller vanninjeksjon.

Redusert brønnehodetrykk, gjerne ved bruk av flerfase maskiner har vesentlige fordeler:

- direkte fortjeneste ved akselerert produksjon
- vesentlig større fleksibilitet i brønnstyringen og derigjennom muligheter for å opprettholde produksjonen ved innestegning eller vedlikehold av brønner
- redusert produksjonstap ved vanngjennombrudd
- redusert(utsatt) stimulering/vedlikehold av gruspakkede brønner.

Med bakgrunn i forventet utbygging av satellitter og havbunnsbrønner forventes et stort potensiale innen marinisert drift av flerfase maskiner. Utbygging ved havbunnsløsninger med integrerte flerfase maskiner vil gi vesentlige reduksjon i utbyggingskostnader, -i enkelte tilfelle ned mot 50% i forhold til et tradisjonelt plattformkonsept.

Med hensyn til utbygging er det økonomisk fordelaktig å på et tidlig tidspunkt ta hensyn til mulig bruk av flerfase trykkøkingsutstyr. Dette for å unngå vesentlige design- og systemendringer på utstyr i drift. Forholdet gjelder både ved design av nye plattform- og undervanns produksjonssystemer.

STATUS KONSEPTER

Tilgjengelige konsepter for flerfase trykkøkning dekker til sammen et bredt driftsområde med hensyn til innløpstrykk, volumstrøm og gass volumfraksjon. Oversikt over noen konsepter/prototyper maskiner er gitt i figur 1. Flerfasemaskinene er her inndelt i to hovedgrupper, rotodynamiske og fortrenningsmaskiner, hvor de rotodynamiske ofte har begrenset trykkstigningsevne, mens fortrenningsmaskinene gjerne har begrenset volumstrøm.

Typisk prototyp designforhold tilsier:

- | | | |
|----------------------|---|---------------------------|
| - innløpstrykk | : | 30 - 50 bar |
| - volumstrøm innløp | : | 300-500 m ³ /h |
| - gass volumfraksjon | : | 0-0,5 / 0,97-1,0 |

Området fra 0,90 til 0,98 GVF er i dag dårlig dekket. Flere konsepter er beskrevet i artikkel: "Preface to the

Subsea International Conference '89" [1].

Analyser av flerfase maskiner må gjøres med utgangspunkt i konkret applikasjon. De ulike konsepter bør derfor ikke vurderes opp mot hverandre før applikasjonen foreligger og designen tilpasses applikasjonens spesifikke forhold.

Det gjøres oppmerksom på at refererte konsepter er på ulike utvikling- og teststadier. I tillegg eksisterer det konsepter innen membraner og ulike osilerende prinsipper.

Også andre konsepter for flerfase trykkøkning bør refereres i denne sammenheng. Av disse er KBS (Kværner Booster Station) meget interessant. Konseptet består av separator for separasjon av væske og gass, samt pumpe og kompressor for trykkøkning av fasene. Pumpen i dette konseptet er designet og testet til å kunne håndtere gass volumfraksjon inntil 0,25.

FLERFASE MASKINER

Design av flerfase maskin må ta utgangspunkt i konkret applikasjon. Endringer i driftsforhold stiller imidlertid krav til maskiner med stor fleksibilitet til å håndtere et gitt spekter av betingelser framfor optimal design for et gitt driftspunkt. Variasjoner i driftsforhold kan skyldes både endringer i strømningsregime (transiente forhold), samt endringer i reservoaregenskaper over tid. Ovennevnte momenter vil normalt gå på bekostning av maskinens optimale virkningsgrad.

For å oppnå gode ytelser på flerfase strømningsmaskiner er det viktig å oppnå en mest mulig homogen blanding ved innløpet. Ved hydraulisk design av løpe- og diffusorkanaler i en rotodynamisk maskin må separasjon av fasene unngås. Separasjon redusere ytelsene vesentlig og kan gi sammenbrudd i maskinens løftehøyde. Særlig gjelder dette ved off-design driftsbetingelser.

I det etterfølgende er design og utfordringer for ulike maskiner angitt. Følgende er benyttet som basis innen de ulike typer maskiner:

- radial turboekspander
- halvaksial rotodynamisk pumpe
- skrue fortrenningspumpe og
- aksial våtgass kompressor

Turboekspandere.

Turboekspander benyttes normalt for en maskin med integrert ekspander- og kompressorenhet. Ulike

kombinasjoner mellom ekspander og kompressor (typer), evt. generator eksisterer.

Turboekspandere er velkjente og utprøvde enheter innen landbasert prosessindustri. Innen offshore petroleumvirksomhet er enhetene benyttet for å fjerne kondensat fra prosessgassen og oppnå salgsgassspesifikasjon blant annet med hensyn på brennverdi, Wobbe Indeks og hydrokarbon duggpunkt. Av de få turboekspandere som er installert i Nordsjøen nevnes Valhall, Piper, NW Hutton, Magnus og Sleipner.

Sammenlignet med en enkel Joule-Thompson ekspansjon tar ekspanderen ut ca. 30% mer væske. Føden bør imidlertid filtreres for å unngå at partikler større enn 10 μm (2 - 3 μm ved kontinuerlig partikkelbelastning) forårsaker skader på dyser og rotor. Ved riktig hydraulisk design av strømningskanaler (vektorformede rotorkanaler) håndterer ekspanderen inntil 45% væske i utløpet uten at væsken berører veggene.

Tradisjonell design av entrinns turboekspandere tilsier:

- trykkforhold opp til 7:1
- design turtall 15 - 30 000 r/min
- innløpstrykk opp mot 200 bar
- effekt opp mot 15 000 kW

Driftsmessig er turboekspanderen en enkel, stabil og pålitelig maskin. Maskinen krever imidlertid en nøye integrering med den øvrige prosess. Problemer er erfart med utrusning/høyt turtall på grunn av dårlig tilpasning mellom kompressordel og innløpstrykk. Tilsvarende er det erfart lager- og rotorproblemer ved dellastdrift utenfor normalt driftsområde.

Flere ekspandere leveres for tiden med magnetiske lagre og eget buffergasssystem for å unngå at våt gass trenger inn i lagrene. Utfordringen i denne sammenheng har vært å sikre et pålitelig buffergasssystem, samt unngå at "nød"-lagrene roterer med akselen og derved slites ut i normal drift.

Store energimengder går i dag tapt ved struping av brønnstrøm i produksjons-strupeventiler. I flere sammenhenger er det vurdert å benytte ekspandere for trykkreduksjon og kapasitetskontroll. Transient oppførsel til ekspandere er viktig å klarlegge med hensyn til brønn- og reservoarmessige begrensninger. Det tenkes her spesielt på trykk- og mengdefluktasjoner ved utrusning og trip av maskinen. I tillegg vil sand som følger med brønnstrømmen vanskelig la seg fjerne før den går inn på enheten og forårsaker erosjonsskader.

Flerfase pumper.

Figur 1 angir flere typer flerfase pumper som enten er utviklet eller er under utvikling. Flere av prototypene er testet på reell brønnstrøm, enkelt delvis langtidstestet. Til sammen dekker pumpene et stort driftsområde, også med hensyn på gass volumfraksjon.

For å oppnå gode ytelser for rotodynamiske pumper er det viktig å unngå separasjon av fasene. Hydraulisk design av strømningskanaler bør derfor sikre en mest mulig homogen strømming. Teoretisk vil ikke maskinens løftehøyde (entalpidifferanse) endres vesentlig ved ulike gass volumfraksjoner ($\Delta p = f(\rho)$). Avhengig av hydraulisk design og kompresjonsbane oppstår en viss fase-separasjon. Analyser og tester viser at separasjonen ofte oppstår ved løpehulets innløp og varierer avhengig av gass volumfraksjon. Separasjonen medfører forstyrrelser i strømningsbildet som igjen gir reduksjon i teoretisk løftehøyde og virkningsgrad. Typisk reduksjon i teoretisk løftehøyde som funksjon av gass væskeforhold og innløpstrykk er gitt i figur 2. Et godt mål for pumpens egenskaper til å unngå kavitasjon, og derigjennom muligheter til håndtere flerfase strømming både ved design- og offdesign forhold er dens NPSH ("net positive suction head"). Pumpens ytelse ved varierende innløpstrykk og gass væskeforhold er vist i figur 3.

Tilsvarende kompressorer vil pumpens volumstrøm begrenses av ustabil strømming/surge. Både surgelinjens form og beliggenhet påvirkes av driftsforholdene. Særlig påvirkes surgelinjen av endringer i gass volumfraksjon og innløpstrykk. Ovennevnte forhold er viktig å ta hensyn til ved tilpasning av maskinens kontroll- og reguleringssystem.

Innen fortregningmaskiner er ytelsene sterkt avhengig av interne klaringer mellom rotor og hus. Man oppnår også gode ytelser så lenge klaringene er fylt med væske. Kompresjonsbane og klaringer bør nøye tilpasses aktuelt fluid (viskositet, sand, korrosivitet) og strømningsregime.

Maskinen må i mange tilfelle også designes med tanke på drift på ren inkompressibel væske, evt. bare gass. Dette påvirker optimale ytelser for et gitt designpunkt.

Avhengig av kompresjonsbane vil det kunne oppstå høye strømningshastigheter i spalter og kanaler. Kapasiteten begrenses derfor ofte av høyt Machtall, mens trykkstigningsevnen av rent mekaniske forhold. Typiske ytelser ved varierende gass volumfraksjoner er gitt i figur 4.

Våtgass kompressorer.

Prospekter for Nordsjøen viser en markert økning av andelen gassfelt. Ved utvikling av våtgass kompressor vil applikasjonen være avgjørende for valg av type og størrelse kompressor. Det eksisterer derfor prototype maskiner innen de fleste hovedkategorier. Maskinene bør dekke et driftsområde med gass volumfraksjon fra 0,90 til 1,0, med hovedvekt på området 0,96 til 1,0..

Ved høye gass volumfraksjoner, tilnærmet lik 1 påvirker de våte andelene i liten grad maskinens strømnings- og ytelsesbilde. Dette er også bekreftet av flere ledende leverandører av turbomaskiner som har injisert vann i innløpet på tradisjonelle gasskompressorer.

Ved økende mengde væske i fluidet vil strømmingen i kanaler og rundt skovler påvirkes. Teoretiske analyser og eksperimentelle forsøk bekrefter tendensen til fase-separasjon i spesifikke deler av strømningskanalene. Ved hydraulisk design er det derfor svært viktig å oppnå homogen blanding av fasene ved innløpet og gjennom hele maskinen. Erfaringer fra tester viser behov for å integrere strømningshomogeniserer så nært første løpehjul som mulig. I figur 5 er det vist testdata for en kompressor ved ulike gass volumfraksjoner. Virkningsgraden endres vesentlig ved økende GVF. I tillegg påvirkes både surge- og chokemarginene vesentlig. Endringen i ytelse kan i utgangspunktet analyseres med basis i Machtallseffekter for enfase løpehjul.

Teoretiske og eksperimentelle analyser bekrefter kompleksitet ved strømming av våt gass i skovlkanaler. Gjenvinning av potensiell energi i diffusorkanalene forstyrres og påvirkes vesentlig av væskepartiklene i fluidet. Det er i dag ikke mulig å utføre detaljerte teoretiske analyser av flerfase strømming i rotor- og diffusorkanaler. Dette gir seg klart utslag i avvik ved prediksjon av ytelser hvor fluidet betraktes som homogent. Vesentlige utfordringer gjenstår, hvorav mye må utføres eksperimentelt i testrigg.

Tester av våtgass kompressorer viser klart at transient strømming (slugging) inn på enheten er kritisk for driften av maskineriet. Maskinen utsettes for sterke mekaniske belastninger, så vel som større endringer og degraderinger i ytelser. I enkelte tilfelle kan strømnings-transienter medføre sammenbrudd i maskinens trykkstigningsevne. For å oppnå et stabilt og effektivt flerfase produksjonsnettverk er det essensielt å sikre riktig interaksjonen mellom maskin, prosessystem og strømningsregime.

MASKIN OG SYSTEM

Utviklingen innen flerfase maskiner har i lengre tid vært fokusert på hydraulisk og mekanisk design av selve maskinen. Selv om flere konsepter er utviklet og kommersielt tilgjengelig gjenstår viktige områder.

Erfaringer fra fabrikk- og felttester tilsier imidlertid en intensivering av innsatsen for å sikre at flerfase maskiner kan integreres i et flerfase produksjonsnettverk. En trykkøkingsenhet består i hovedsak av en flerfase maskin, drivenhet, hjelpesystem, kontrollsystem, samt rør med tilhørende strømningsregime. Forståelse for totalsystemets begrensninger og respons vil være avgjørende for design av et effektivt og stabilt system. Særlig gjelder dette ved framtidig marinisert drift hvor mulighetene for regulering og overvåking er begrenset.

Strømningsregime.

Aktuelt strømningsregime påvirker vesentlig utvikling, design og drift av flerfase maskiner. Innen segregert og dispergert strømning representerer segregert slugstrømning de mest kritiske driftsforhold for maskinen. Strømningsregimet kan medføre større mekaniske belastninger på rotor, lagre og drivenhet, samt vesentlige degraderinger og evt. sammenbrudd i ytelser. Systemets dynamiske respons er avhengig av volum og utforming av tilhørende rør- og prosessystem. Store volum rundt maskinen demper effektivt trykktransienter. I tillegg vil en integrert strømningshomogeniserer like foran første løpehjul sikre et mest mulig homogent fluid, samt jevne ut overganger mellom ulike strømningsregimer og derved bidra til å begrense transiente mekaniske belastninger på maskinen.

Ubehandlet brønnstrøm vil ofte inneholde sand, i tillegg til mulig voks, hydrat og emulsjoner. Fastleggelse av reelle fluidegenskaper er nødvendig. Det er av avgjørende betydning at laboratorieanalyser foretaes riktig for blant annet å fastlegge komposisjon, termo- og fluiddynamiske egenskaper, samt korrosivitet og sand. I både hydraulisk og mekanisk design må det taes høyde for slitasje som følge av korrosjon, erosjon og abrasjon. Optimal design vil derfor inkludere riktige klaringer for å ivareta ovennevnte forhold.

Bruk av flerfase maskiner direkte i brønnstrøm medfører spesielle krav med hensyn på brønn- og reservoaregenskaper. Trykkfallet over brønnen er ofte begrenset av fare for sandmedrivning. Produksjonen styres i dette tilfelle på maksimal sandfri rate. Selv om gruspakkede brønner normalt tolererer større produksjon uten fare for sandmedrivning, stilles det også her klare krav med hensyn til trykkfall og variasjoner i trykkfall

over brønnen. Normal oppstart av en olje- og gassproduserende brønn er i underkant av en halv time, mens nedstengning ofte ligger i underkant av et minutt. Ved integrering av flerfase maskiner er det særlig viktig å hindre for rask oppstart, evt. akselerasjon av brønnstrømmen. Maskinenes "selvregulerende" effekt med hensyn til gass volumfraksjon, - i tillegg til samspillet med øvrige reguleringssystemer kan derfor bli kritisk med hensyn til trykk- og mengdefluktasjoner.

Mengde produsert sand varierer sterkt avhengig av reservoar og type brønn. Produsert sandmengde fra oljebrønner er avhengig av reservoardybde og vannproduksjon. Kornstørrelsene varierer opp mot 70 μm . Sikkerhetsmessige aspekter ved produksjonsutstyret stiller krav til maksimalt 0,5 kg tørket sand over fire timer. Målemetoder for kontinuerlig deteksjon av sand er i dag under videreutvikling og det forventes at nye og sikrere instrumenter blir tilgjengelige. Dagens sandfeller for måling, som tar opp cirka 1% av total sandmengde er primitiv. Operatører har erfart at plutselig frigivelse av injisert sand i reservoaret, evt. skader på gruspakke har medført en sandproduksjon på inntil et tonn pr. time. Konsekvensen for flerfase maskiner kan i denne sammenheng være katastrofal. For flere applikasjoner er maskinene designet for opp til 200 gram sand pr. kubikkmeter fluid i perioder.

Hydraulisk design.

Ved design av flerfase strømningsmaskiner må det taes nøye hensyn til ovennevnte strømningsregimer og effekter. Maskinenes stabilitet og fleksibilitet til å håndtere ulike driftsforhold er vel så viktig som optimal design for et spesifikt driftspunkt. Dette har operatører av gass turbomaskiner ofte erfart, særlig ved innfasing av nye brønner og satellitter hvor driftsforholdene ligger langt utenfor designspesifikasjonen til maskinene. Prosess teknisk er følgende parametre sentrale ved design av flerfase maskiner:

- aktuell innløps volumstrøm
- innløpsstrykk og -temperatur
- trykkstigningsevne/løftehøyde
- gass volumfraksjon.

Teoretisk fastleggelse av reelle ytelser er beheftet med usikkerheter. Med basis i tester på "ideelle" og reelle fluider er det utviklet prototype analyseverktøy for design og optimalisering av maskiners ytelser ved aktuelle innløpsforhold. Estimering av maskinens trykkstigningsevne kan utføres fra følgende relasjon:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H \cdot f(\text{GVF}, p_1)$$

Innvirkningen av gass volumfraksjon og innløps-trykk er i henhold til eksperimentelle verdier gitt i figur 2. Angitte relasjon er bare en første approksimasjon for å inkludere effektene av reelt flerfase fluid, mulige separasjon- og faseoverganger, samt reelle termo- og fluiddynamiske forhold. I utviklingen av verktøy for analyse og prediksjon av strømnings effekter og ytelser må blant annet følgende forhold inkluderes:

- kompresjonsbane
- Machtallseffekter
- Reynoldseffekter

Ved å inkludere ovennevnte forhold i analyser kan maskinens kapabilitet ved ulike geometriske utforminger og driftsforhold fastlegges. Det gjøres oppmerksom på at flere av ovennevnte forhold er mangelfulle, eller direkte misvisende i internasjonale standarder for turbomaskiner. Fastleggelse av reelle termo- og fluiddynamiske data for flerfase strømnings (inkludert vann) er i mange sammenhenger en utfordring. Det tenkes her på isentropisk og isotherm adiabat eksponent med tilhørende kompressibilitetsfunksjoner, kompressibilitetsfaktor, sammensetning/ molekylvekt, viskositet etc. Flere forhold vil endres vesentlig ved endring i gass volumfraksjon. Figur 6 viser lyd hastighet som funksjon av endret gass volumfraksjon for typisk "Nordsjø-olje". [2]

Vesentlige endringer i Machtall ved ulike gass volumfraksjoner medfører at flerfase maskiner må designes konservativt med hensyn på strømnings hastigheter. Periferihastigheter i området 100 m/s er derfor ikke uvanlig. I tillegg er det viktig at design av skovler inkluderer lav skovl innløpsvinkel med tilhørende lav utløpsvinkel. Forholdet begrenser løfte høyden pr. trinn, men reduserer faren for fase separasjon og sikrer derved god evne til å håndtere høye gass volumfraksjoner. Særlig gjelder dette ved offdesign drift. Ved oppstart må maskinen i enkelte tilfelle ha tilfredsstillende ytelser ved ren gass, evt. væske til å overvinne statisk innstengningsstrykk for i det hele tatt å få produksjonen i gang.

Valg av tilstandsligning for beregning av termodynamiske data bør gjøres med forsiktighet. Sammenligninger mellom tilstandsligninger viser vesentlige avvik i blant annet isentropisk løfte høyde ved samme inn- og utløpsforhold. Tabell 1 angir isentropisk løfte høyde og utløpstemperatur for en gitt turboeks pander under gitte driftsforhold. Generaliserte metoder, blant annet basert på API bør vurderes nøye. Erfaringer fra karakterisering av "Nordsjøoljer" viser klart behovet for tilpasning av termodynamiske verktøy til aktuelt applikasjonsområde. For flerfase maskiner i bønnstrøm må normalt også vann inkluderes i analysene.

Parameter	SRK (basis)	PR (%avvik)	BWRS (%avvik)
t_2 (°C)	-29,9	- 0,7	10,7
Δh (kJ/kg)	54,33	5,2	15,9
Q_1 (m ³ /s)	1,686	5,7	0,7

Tabell 1. Sammenligning av tilstandsligninger.

Det er i dag et potensiale innen optimalisering av ytelser for flerfase maskiner. Foreløpig er det ikke fokusert spesielt på effektivitet, men eksisterende og forventet økte miljøavgifter tilsier en sterkere fokusering på dette området. I tillegg vil redusert effektbehov kunne gi vesentlige besparelser ved undervanns utbyggings løsninger. Dette gjelder blant annet ved reduserte kostnader og dimensjoner for drivenhet, elektrisk kabel og tap ved kraftoverføring.

Mekanisk design.

Tilsvarende annet roterende maskineri må mekanisk design av flerfase maskiner sikre å tilfredsstillende spesifiserte krav til RAM (reliability, availability, maintainability). Kravene vil naturlig variere avhengig av applikasjon. Ved marinisert drift stilles det blant annet særlige krav med hensyn til forventet midlere tid til første gangs feil fordi kostnader ved trekking og overhaling ofte er formidable sammenlignet med selve reparasjons kostnadene for enheten. Typisk krav til MTBF (mean time between failure) for ubemannet marinisert drift av strømningsmaskiner er 2 år.

Erfaringer fra tester og drift viser at slugstrømnings inn på enheten kan gi store transiente mekaniske belastninger. Belastningene må nøye analyseres med basis i totalsystemets dynamikk og taes hensyn til i design av rotor, lagre og tetninger. For å sikre tilstrekkelig mekanisk styrke og bestandighet mot korrosjon benyttes gjerne rustfritt duplex stål (25% krom) i alle vitale deler.

Ved design av rotor, lagre og tetninger bør man i utgangspunktet holde seg til internasjonale standarder, for eksempel API 676. Lav løfte høyde pr. trinn tilsier mange trinn i maskinen for å tilfredsstillende gitte prosessbetingelser. På grunn av fare for transient strømningsregime og større transiente belastninger på rotor bør denne konstrueres "stiv", dvs. subkritisk drift i hele operasjonsområdet.

For strømningsmaskiner for tørr gass er det i dag en klar trend i bruk av tørre tetninger og magnetiske lagre. Flere konsepter integrerer både drivmotor og strømningsmaskin

i en enhet og unngår derved helt bruk av akseltetninger. Selv om enkelte turboekspandere og gasskompressorer benytter magnetiske lagre krever lagrene tørr buffergass for å fungere tilfredsstillende. I flerfase maskiner benyttes imidlertid tradisjonelle rulle og glidelagre. Hydro-dynamiske "tilting pad" lagre har imidlertid fordeler med hensyn på demping og stabilitet. Dette er særlig viktig ved vertikal design, - gjerne for marinisert drift. Avhengig av maskinens trykkdifferanse vil aksiallageret ha kapasitet til å håndtere hele aksialkraften fra rotor og løpehjul. Dette kan ha fordeler ved at man unngår balansestempelet med trange klaringer, fare for slitasje og mulig retningsskifte av aksial kraft.

Utfordringer i forbindelse med akselteininger bør ikke undervurderes. Ved større trykktransienter settes teiningssystemet på langt større belastninger enn erfaringer fra tradisjonell drift av strømningsmaskiner tilsier. Integrering av drivenhet og strømningsmaskin i en enhet krever bruk av sperrefluid mellom interne deler. Tilsvarende akseltetningene vil også dette systemet utsettes for vesentlige transiente belastninger.

Både innen en- og flerfase maskiner er det en trend i design av integreerte enheter hvor både elektrisk drivmotor og selve strømningsmaskinen inngår. Dette er i dag mulig fordi både gass- og væskefylte motorer kan opereres med akseptable tap ved turtall 2 - 7000 r/min. Prototype elektriske motorer for direkte kompressordrift er testet på turtall inntil 22000 r/min. Selv om effekten foreløpig er begrenset til cirka 2000 kW stilles det forventninger til utvidet applikasjonsområde.

Regulering/ kontrollsystem.

Med hensyn på ubemannet marinisert drift av flerfase maskiner er det sterkt ønskelig å begrense både instrumentering og reguleringssystem. Drift i det ustabile området av karakteristikken (surge) kan få katastrofale følger for maskinen og må derfor unngås.

Selv om maskinen har en viss "selvregulerende" (adaptiv) effekt med hensyn til gass volumfraksjon, og derigjennom trykk og temperatur er det viktig å sikre totalsystemets stabilitet og unngå interferens mellom delsystemer. Det må forventes at flerfase maskiner blir utsatt for langt større spenn i driftsforhold og derfor bli mye mer sensitiv med hensyn på stabilt driftsområde (surge til choke) enn enfase maskiner.

Gass volumfraksjon er avhengig av brønnstrømmens kjemiske sammensetning, trykk og temperatur. Dette medfører at gass volumfraksjonen for maskinen også er funksjon av aktuell produksjonsrate. Ved transient strømningsregime må reguleringssystemet, gjerne i

kombinasjon med strømningshomogeniserer være i stand til å dempe transienter og belastninger på maskinen. Samtidig må man sikre at ovennevnte forhold ikke medfører uakseptabel akselerasjon, evt. retardasjon av brønnstrømmen. Tester med slugstrømning på innløpet viser at det ofte oppstår et trykkfall like foran selve sluggen. En standard trykk - turtallsregulering kan medføre at maskinen ikke er i stand til å håndtere transienten. I tillegg oppstår trykk- og mengdefluktasjoner opp- og nedstrøms enheten. Typisk trykkforløp ved slugstrømning er vist i figur 7.

Erfaringer fra fabrikk- og felttester viser at det er vanskelig å oppnå en stabil og effektiv regulering av flerfase maskiner ved transient strømningsregime. Bruk av prediktive reguleringsmodeller, gjerne i kombinasjon med nevrale nettverk bør vurderes. Drivenhetens karakteristikker og reservekapasitet må inkluderes. I denne sammenheng er tester av maskiner ved kontrollerte strømningsforhold av meget stor nytteverdi for å kunne analysere og fastlegge maskinens samspill med det øvrige strømningsssystem. Erfaringer fra tester ved flerfase laboratoriet ved Tiller i Trondheim er utmerket.

Overvåking/ tilstandsanalyse.

Det meste av tyngre roterende maskineri blir i dag kontinuerlig overvåket av tilstands analysesystemer. Systemene inkluderer normalt både termodynamisk analyse og vibrasjon. Felles for mange systemer er at omfang av målinger og beregninger er formidable. Fremtidig ubemannet og eventuell marinisert drift stiller krav til et svært begrenset utvalg måleparametre. Det er derfor av avgjørende betydning å ha kunnskap om de ulike parametres sensitivitet med hensyn til å representere maskinens tilstand.

Felttester viser at det er vanskelig å oppnå gode målinger for nøyaktig verifikasjon av ytelse under reelle strømningsforhold. Dette skyldes både fluktasjoner i trykk og mengde, i tillegg til utfordringer med kontinuerlig flerfase måling. En god referanse for vurdering av degraderinger kan være å kjøre maskinen periodevis på ren væske (vann) eller gass (nitrogen). En vesentlig fordel med metoden er at maskinens kapasitet (volumstrøm ved innløp) kan fastlegges nøyaktig. Metoden gir imidlertid ingen sikre konklusjoner med hensyn på kapabilitet til å håndtere flerfase.

I enhver tilstandsanalyse av enfase maskiner inngår aktuell volumstrøm som sentral parameter. Måling av flerfase volumstrøm, gass volumfraksjon og evt. slip mellom fasene er i dag behengt med usikkerheter. Flere prinsipper (gammastråling, kapasitans, mikrobølger) er under utvikling. Fastleggelse av aktuell volumstrøm og

gass volumfraksjon er viktig både for tilstandsanalyse og regulering/kontroll av enheten. De fleste av dagens prototype flerfase målere er basert på krav om homogen strømning. Målenøyaktighet på fraksjon er cirka +/- 2%, mens mengdemåling ligger i størrelsesorden +/- 5%. I tillegg fungerer bare enkelte målere innen et gitt strømningsregime. Ved gass volumfraksjoner større enn 0,80 har de fleste målere svært begrenset nøyaktighet. Dette måleområdet bør derfor prioriteres. Integrering av flerfase måler i et flerfase maskinkonsept er meget ønskelig.

En hovedhensikt med kontinuerlig overvåking er å sikre maskinens tilgjengelighet. Det er derfor ofte ønskelig å kombinere overvåkingen med diagnostesystemer for prediksjon av blant annet midlere tid til feil. Sentrale parametre i overvåking/tilstandsanalyse vil være:

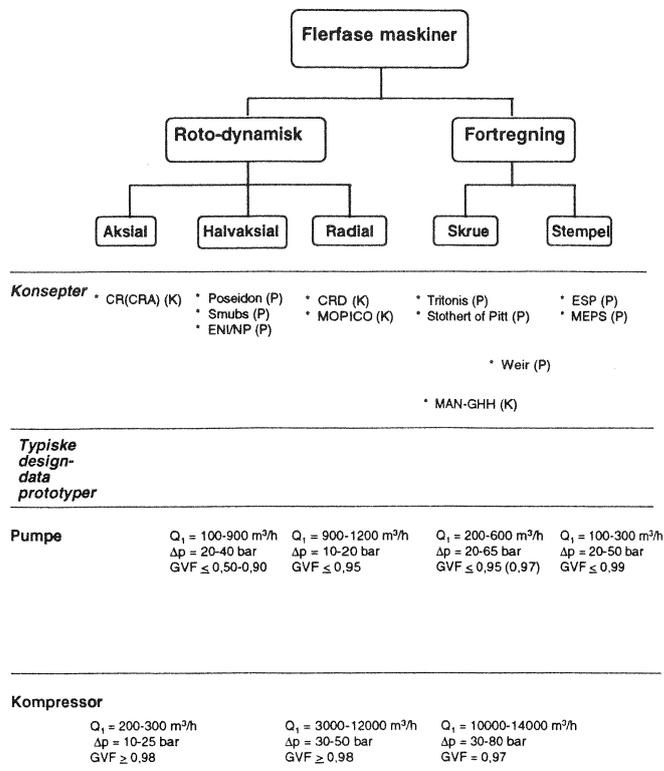
- trykk og temperatur for tetning
- inn- og utløpstrykk
- aktuell volumstrøm
- vibrasjon
- effekt

Sistnevnte er ikke minst viktig med hensyn til fastleggelse av maskinens reelle ytelser. Dette fordi gitt trykk og temperatur i flerfaseområdet ikke gir en entydig entalpi - entropiverdi ($(\frac{dh}{ds})_p \approx (\frac{dh}{ds})_T$). I enkelte tilfelle er det i tillegg behov for å overvåke maskinens utløpstemperatur for å hindre avleiring av hydrokarboner.

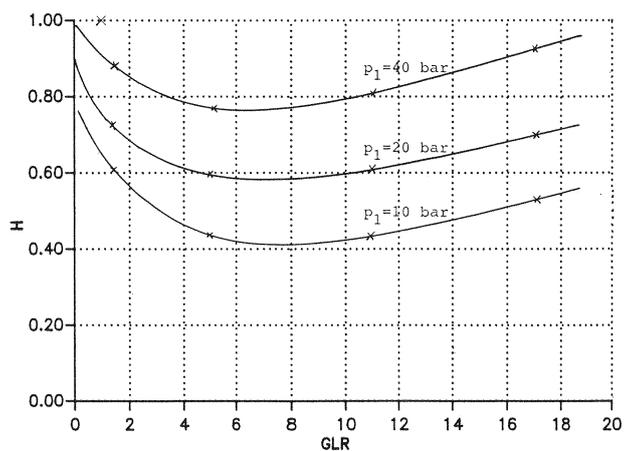
Sammenlignet med enfase maskiner representerer overvåking av flerfase maskiner en vesentlig utfordring når både fastleggelse av volumstrøm og entalpidifferanse over maskinen er behengt med usikkerheter..

REFERANSER

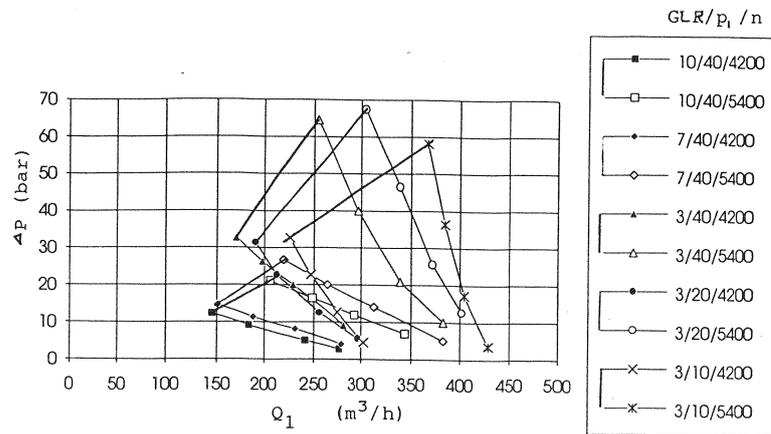
- [1] Chasserot, J. "Preface to the Subsea International Conference 1989" Offshore Engineering, Vol 20, 1989.
- [2] Rapport for: "Program for flerfase forskning, (PROFF)", NTNf 1992.



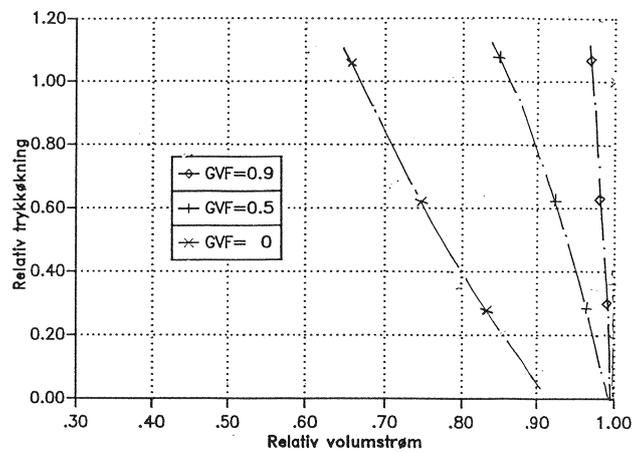
Figur 1. Flerfase maskiner



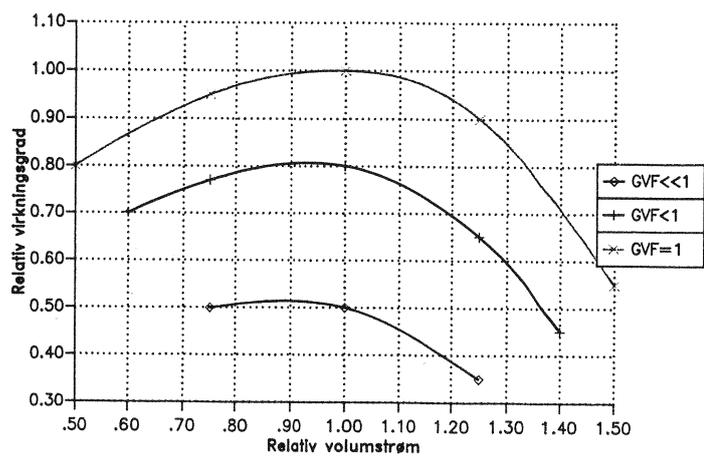
Figur 2. Endring i løftehøyde som funksjon av gass væskeforhold og innløpstrykk



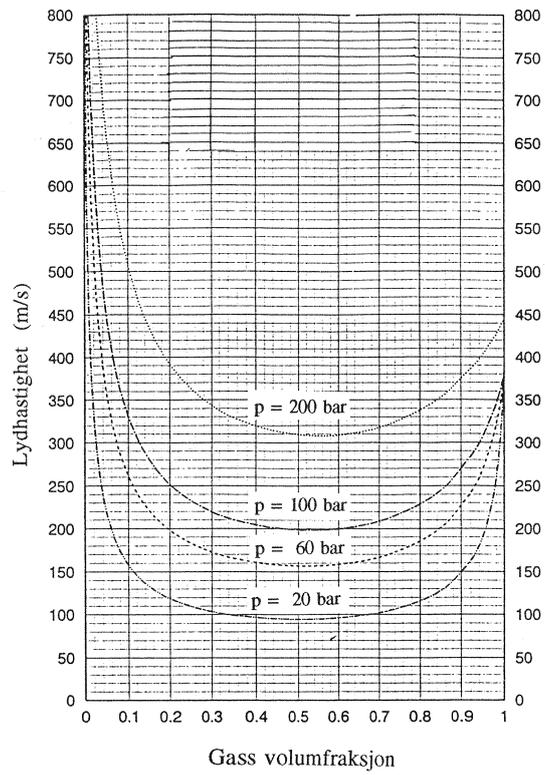
Figur 3. Ytelser ved ulike driftsforhold



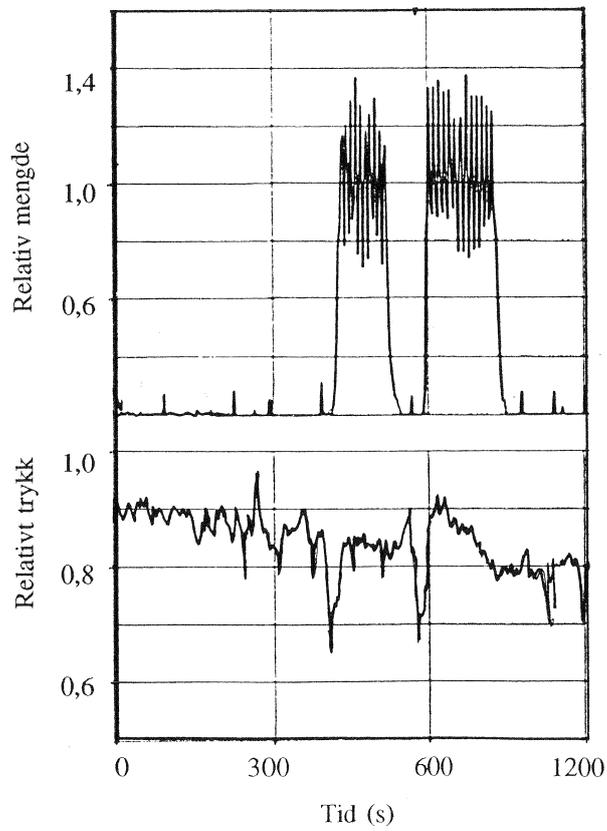
Figur 4. Ytelser ved ulike GVF



Figur 5. Virkningsgrad ved økende GVF.



Figur 6. Lydhastighet ved ulike GVF



Figur 7. Trykkvariasjoner ved slugstrømning.