



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Informasjonsteknologi - Kybernetikk	Vår semesteret, 2011 Konfidensiell
Forfatter: Yngve Sundt (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Morten Tengesdal Veileder(e): Gunnar Sunde v/Oilfield Technology Group AS	
Tittel på masteroppgaven: Engelsk tittel: Subsea Maintenance and Monitoring System	
Studiepoeng: 30	
Emneord: - Induktiv kraftoverføring i sjøvann - Overføringsfrekvens - Tap	Sidetall: 53 + vedlegg: 11 Stavanger, 15.06.2011 dato/år

Forord

I denne oppgaven har jeg fått anledning til å utvikle mine kunnskaper innenfor elektromagnetisme og herunder læring og bruk av simuleringsverktøyet Comsol Multiphysics. En spesielt interessant utfordring i arbeidet har vært å anvende elektromagnetisk teori i praksis, mot et teknologisk konsept.

I forbindelse med gjennomføringen av dette arbeidet vil jeg rette en stor takk til Gunnar Sunde ved Oilfield Technology Group AS (OTG AS) og Ivar Austvoll og Morten Tengedal ved Universitetet i Stavanger.

Gunnar Sunde har vært oppgaveveileder for bedriften OTG AS som oppgaven er skrevet for. Selskapet har også bidratt med faglig utvikling på fagområdet undervannsteknologi i form av finansiering av deltagelse på Norsk Undervannssymposium 2011, samt bidratt og tilrettelagt med kontorfasiliteter og kontormateriell.

Førsteamanuensis Ivar Austvoll har elektromagnetisme som et av fagområdene sine på Universitet i Stavanger og har gjennom sin store interesse for faget også tilbudt en ekstra faglig dybde til dette arbeidet.

Morten Tengedal har vært veileder fra Universitet i Stavanger og bidratt med både faglig og generell veiledning.

Sammendrag

Firmaet Oilfield Technology Group AS har oppfunnet og søkt patent på et konsept som går ut på å plassere en manipulatorarm permanent nede på havbunnsutstyr for å kunne gjøre inspeksjons-, vedlikeholds- og reparasjonsarbeid. Manipulatorarmen skal kunne ta seg frem langs et skinnesystem påmontert undervannsinstallasjonen eksempelvis en brønnramme. Denne rapporten presenterer forslag til hvordan kraftoverføringen kan gjøres mellom skinnesystemet og manipulatorarmen.

Foreslått løsning for kraftoverføring går ut på å overføre elektrisk kraft ved bruk av induktiv overføring. Fordelen er at overføringen blir gjort kontaktløst. Systemet kan derfor kapsles inn og dermed beskyttes bedre mot vanninntrengning, korrosjon, slitasje av bevegelige deler/ledninger, og evt. kontaktskader med annet bevegelig utstyr. Tilsvarende kraftoverføringssystem blir brukt på land i blant annet sterile rom og AGV ("Automated Guided Vehicles").

Dette arbeidet har gjort elektromagnetiske simuleringer for et enkelt induktivt kraftoverføringssystem med bruk av et FEM-analyse program ("Finite Element Method") hvor en av målene var å se på konsekvensen av å ta et system som fungerer på land ned i sjøvann. Systemet ble først simulert med luft som omgivelsesmedium og deretter med sjøvann som omgivelsesmedium hvor resultatene ble sammenliknet.

Et induktivt overføringssystem operer normalt rundt 20kHz. En økning i operasjonsfrekvensen for systemet vil kunne øke overført effekt, men ved høyere frekvenser, omtrent over 100kHz, viser simuleringene at tap relatert til nærhetseffekten, overflateeffekten, virvelstrømstap og kapasitive lekkstrømmer kan fremtre.

Resultatene fra simuleringen viser at differansene for gjensidig induktans mellom luft som omgivelsesmedium og sjøvann som omgivelsesmedium opp til 3 kHz ikke er observerbare. Fra og med 3 kHz og opp til rundt 100 kHz er differansene marginale. Over 100 kHz viser trenden en lineær økning, men selv ved høyeste simulerte frekvens som var 1MHz kunne differansen betraktes som marginal. Differansene som ble observert skyldes sannsynligvis virvelstrømstap som følge av konduktiviteten i sjøvann.

Simuleringene viste også en marginal kraftoverføring som kunne skyldes kapasitive overføringer som følge av den relative permittiviteten i sjøvannet. For et mer reelt system kan det forventes at de kapasitive effektene vil bidra til et tap på grunn av at primærsystemet i simuleringmodellen ikke var fullskala. Dette forklares med at det vil oppstå kapasitive lekkstrømmer internt i primærsystemet som ikke er omsluttet av sekundærsystemet. Lengden og avstanden mellom lederne til primærsystemet vil være faktorer som kan forventes å påvirke det kapasitive tapet.

Et typisk induktivt kraftoverføringssystem for landindustrien opererer rundt 20kHz. Ved å holde overføringsfrekvensen på dette nivået for et system i sjøvann kan det forventes å oppnå opp mot samme virkningsgrad som for et system på land, det vil si en virkningsgrad på rundt 85 %.

Videre arbeid bør blant annet se nærmere på omfanget av de kapasitive lekkstrømmene internt i primærsystemet med hensyn til lengde og avstand mellom lederne. Overslagsberegninger i rapporten viser at disse strømmene kan vise og være relativ små, omtrent i mA-området. I tillegg bør et videre arbeid se på om et kapasitivt overføringsprinsipp vil kunne være aktuelt

og sammenlignes opp mot et induktivt. Et kapasitivt system vil sannsynligvis være et enklere system samtidig som det vil dra nytte av sjøvannet.

Ved utvikling av et system bør det legges særdeles vekt på utformingen av jernkjernen da dette har betydelig innflytelse på virkningsgraden. Materialvalg i forhold til vanninntrengning, korrosjon og biologisk vekst vil også være av stor betydning.

Innhold

1	Innledning.....	7
2	Litt om undervannssystem.....	8
3	Tekniske utfordringer ved havbunnsmiljøet.....	9
3.1	Trykk	9
3.2	Korrosjon.....	9
3.3	Marin vekst.....	10
3.4	Beskyttelsesmetoder	11
4	Permanent undervanns manipulatorarm	12
5	Kraftoverføringssystemet	14
5.1	Generelt	14
5.2	Kabel og kabelvogn.....	14
5.3	Induktivt overføringssystem.....	15
5.4	Eksempel på system for bruk på land.....	18
6	Analyse og optimalisering av det induktive overføringssystemet.....	20
6.1	Generelt	20
6.2	Optimalisering av jernkjernen	21
6.3	Elektriske betraktninger av systemet.....	23
6.4	Koblingskoeffisient for sammenligning av ulike mottakere	27
7	Elektromagnetiske egenskaper til sjøvann	28
8	Simulering	29
8.1	Generelt	29
8.2	Programvare og maskinvare	29
8.3	Antagelser, forenklinger og begrensninger	29
8.4	Valg av geometri	30
8.5	Valg av strømforsyning og frekvens	32
8.6	Materialvalg for jernkjerne.....	32
8.7	Materialeegenskaper	32
8.8	Simulert tap i viklinger og jernkjerne.....	32
9	Simuleringsresultat	34
9.1	Simulering med ”ikke-optimal” jernkjerne	34
9.2	Simulering med ”optimal” jernkjerne	40
9.3	Sjøvann uten konduktivitet.....	44
9.4	Oppsummering	46
10	Beregnet effektuttak	47

11	Designkriterier.....	49
11.1	Ytre miljø	49
11.2	Effektforbruk.....	49
12	Diskusjon.....	50
12.1	Metodiske utfordringer.....	50
12.2	Usikkerhet	50
12.3	Videre arbeid	51
13	Konklusjon	52
14	Referanser.....	53
	Vedlegg A: Modelloppsett i Comsol Multiphysics	54
	Vedlegg A.1: Generelt.....	54
	Vedlegg A.2: Globale definisjoner.....	54
	Vedlegg A.3: Modell 1	54
	Vedlegg A.4: Modell 2.....	62
	Vedlegg A.5: Modell 3	62
	Vedlegg A.6: Modell 4.....	63
	Vedlegg A.7: Studie	64

1 Innledning

Firmaet Oilfield Technology Group AS har oppfunnet og søkt patent på et konsept som går ut på å plassere en manipulatorarm permanent nede på havbunntstyr for å kunne gjøre inspeksjons-, vedlikeholds- og reparasjonsarbeid. Manipulatorarmen skal kunne ta seg frem langs et skinneresystem påmontert undervannsinstallasjonen eksempelvis en brønnramme.

Denne oppgaven foreslår å bruke et induktivt kraftoverføringssystem for overføring av elektrisk kraft mellom skinneresystemet og manipulatorarmen. I arbeidet skal det gjennomføres simuleringer på et enkelt induktivt overføringssystem for å se på konsekvensen av å ta systemet ned i sjøvann samt se på effekten av jernkjernen i sekundærsystemet. Det skal også gjøres undersøkelser på hvordan et standard induktivt overføringssystem for bruk på land er bygget opp. I tillegg skal det undersøkes hva som er gjort av vitenskapelig arbeid på området.

Rapporten presenterer følgende:

- Undervannssystem på et overordnet nivå
- Undervannsmiljøet og utfordringene der
- Konseptet til manipulatorarmen
- Forslag til kraftoverføringssystem og alternativt konsept
- Oppbygning av et induktivt kraftoverføringssystem
- Hvordan simuleringen er gjennomført
- Resultatene fra selve simuleringen
- Designkriterier
- Konklusjon
- Videre arbeid

Et av hovedmålene med rapporten har vært at det enkelt skal være mulig å kunne reprodusere simuleringmodellen. Rapporten inneholder derfor detaljer om type og versjon av simuleringverktøyet samt detaljer om oppsettet av modellen.

2 Litt om undervannssystem

Et undervannsfelt består vanligvis av brønnramme(r), juletre, manifold, fordelingsnett, kontrollkabel og kontrollsystem. I senere tid har man også utviklet utstyr som undervannsseparator og undervannskompressor.

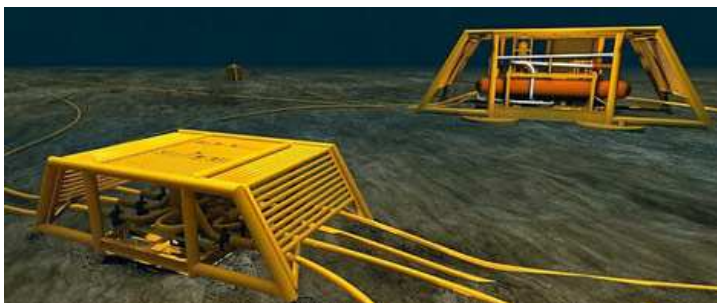
I de tilfellene hvor det ikke lønner seg å bygge ut feltet med full infrastruktur, eksempelvis plattform eller FPSO ("Floating Production Storage and Offloading"), kan det lønne seg å bygge ut brønnene som undervannsløsning hvor disse knyttes tilbake til eksisterende infrastruktur. Snorre A-feltet er et eksempel på dette, hvor olje og gass fra Vigdis-feltet blir ført tilbake til Snorre A-plattformen for prosessering og videre til Statfjord-plattformen for videre prosessering og frakt.

I senere tid har man også bygget ut løsninger hvor undervannsfelt har blitt ført tilbake til land som for eksempel Snøhvit-feltet og Ormen Lange-feltet.

Kort beskrevet har en brønnramme som hovedfunksjon å fungere som et fundament for juletre, manifold, tilkoblinger, beskyttelsesstruktur og annet utstyr. I tillegg til dette skal rammen også være beregnet for å kunne tåle krefter av BOP ("Blow Out Preventer"), fallende gjenstander og tråling.

Et felt kan også bestå av enkeltstående satellitter som knyttes inn til en brønnramme med manifoldsystem.

Brønnrammen plasseres på sjøbunnen. Utforming av fundament mot sjøbunn avhenger av sedimentet. Eksempelvis på Norne feltet har man gjort positive erfaringer med bruk av sugeanker i leirete sediment. Figur 1 under viser illustrasjon av havbunnsrammer med overtrålbar beskyttelsesstruktur.



Figur 1 viser en illustrasjon av en havbunnsramme med overtrålbar beskyttelsesstruktur. Bildet er hentet fra [8].

3 Tekniske utfordringer ved havbunnsmiljøet

3.1 Trykk

På havbunnen har man utfordringer med høyt trykk, spesielt på ultradypt vann, det vil si dybde på mer enn 1830 meter [2, s3]. Med en antakelse om at sjøvann er en ukomprimerbar væske vil en dybde på 1830 meter omtrent tilsvare 184 bar. Utstyr som er følsomt overfor sjøvann er avhengig av å være beskyttet med robuste tekniske løsninger. Dette gjør seg gjeldende selv ved lavere dyp.

3.2 Korrosjon

Korrosjon og korrosjonsvern i Nordsjøen utgjør alene kostnader i milliardklassen og samtidig en sikkerhetsrisiko. Undervannsinstallasjoner er vanskelige å komme til for reparasjon og vedlikehold. Det er derfor viktig å ta hensyn til materialvalg og korrosjonsvern.

Korrosjon i sjøvann kommer opplagt nok i kategorien "våt korrosjon" det vil si at korrosjonsmediet er vann med oppløst stoff [3, s1]. Korrosjon og korrosjonshastigheten blir blant annet påvirket av faktorer som materialvalg, belegg, temperatur og strømningshastighet.

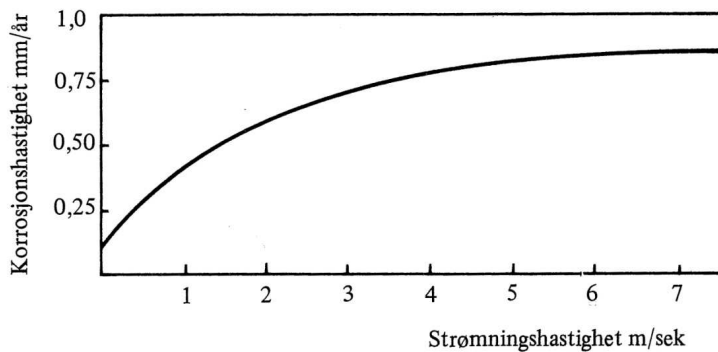
På grunn av at sjøvann har stort klorinnhold ville man tro at metaller vil korrodere mer i sjøvann enn i ferskvann, men på grunn av en økning i pH-verdien under katodisk produksjon vil man få utfelt CaCO_3 , Mg(OH)_2 og jernhydroksid. Det vil bli dannet et beskyttende sjikt som igjen vil redusere korrosjonshastigheten. Denne effekten gjør at korrosjonshastigheten blir lavere i sjøvann enn i ferskvann.

Tabell 1 under viser korrosjonshastigheten for utvalgte metaller og legeringer ved stillestående sjøvann. Tabellen illustrerer betydningen av materialvalg i forhold til korrosjon.

Tabell 1 viser korrosjonshastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$ for utvalgte metaller. Tabellen er hentet fra [3, s216].

Hastelloy C	≈ 0
Titan	≈ 0
AISI 316 rustfritt stål	Ubetydelig, unntatt for dype groper
AISI 304 rustfritt stål	Ubetydelig, unntatt for dype groper
Nikkel-kromlegering	Ubetydelig, unntatt for dype groper
Aluminium	1-5, unntatt for groper
Nikkel-kopperlegering	Normalt < 25, unntatt for groper
Nikkel	Normalt < 25, unntatt for dype groper
70-30 kopper-nikkel 0,5 Fe	3-12
90-10 kopper-nikkel 0.5 Fe	3-12
Kopper	13-90
Admiralitätsbronse	13-50
Aluminiummessing	13-30
Bronse	25-50
Nikkel-aluminiumbronse	25-50
Nikkel-aluminium-manganbronse	25-50
Manganbronse	25-75
Sink	20-85
Austenittisk nikkelleg. Støpejern	50-70
Karbonstål	100-160

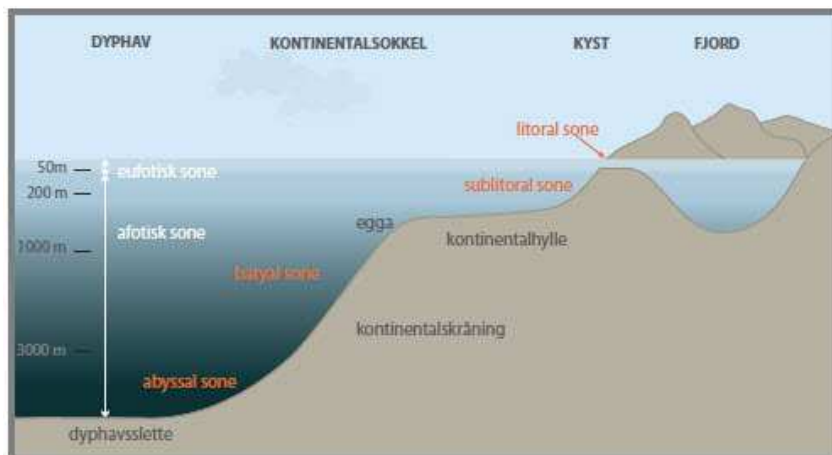
En økning i temperaturen opp til et bestemt nivå vil gi en økning i korrosjonshastigheten. Grafen under viser økningen i korrosjonshastighet for stål i forhold til strømningshastigheten til sjøvann ved 23°C.



Figur 2 viser korrosjonshastighet for stål i forhold til strømningshastighet i sjøvann ved 23°C. Grafen er hentet fra [3, s73].

3.3 Marin vekst

Marin vekst er vekster av typen mikroorganismer, planter, alger og dyr som vokser på struktur. Omtrent 90 % av den biologiske produksjonen på kontinentalsokkelen foregår i den eufotiske sonen, det vil si ned til omtrent 100-200 meters dyp [6, s195]. Figur 3 under viser hvordan havdybden er delt inn i forskjellige soner. Etter hvert som man kommer lenger ned altså i den afotiske sonen vil lysemengden avta som igjen vil føre til at fotosyntesen avtar.



Figur 3 viser topografisk og fysisk inndeling av havet. Figuren er hentet fra [7, s15].

Materialvalget vil også ha noe å si i forhold til forekomsten av marin vekst. Tabell 2 under viser forekomsten av marin vekst for forskjellige materialer i forhold til hverandre, materialene er listet opp i kronologisk rekkefølge hvor det øverste er det som det forkommer mest vekst på og det nederste minst.

Tabell 2 viser groingstendensene listet opp i økt rekkefølge. Tabellen er hentet fra [3, s217].

	Metall
1	Kopper og 90/10 kopper-nikkel
2	Messing og bronse
3	70/30 koppernikkel, aluminiumsbronse og sink
4	Nikkelkopper
5	Karbonstål, lavlegerte stål, rustfrie stål, nikkellegeringer og titan

3.4 Beskyttelsesmetoder

Stål og struktur beskyttes ofte med overflatebehandling i form av korrosjonshindrende maling og offeranoder [3]. Ulempen med dette er at overflatebehandlingen slites over tid. Det samme gjelder for offeranoder hvor disse reduseres over tid og bør skiftes ut etter hvert.

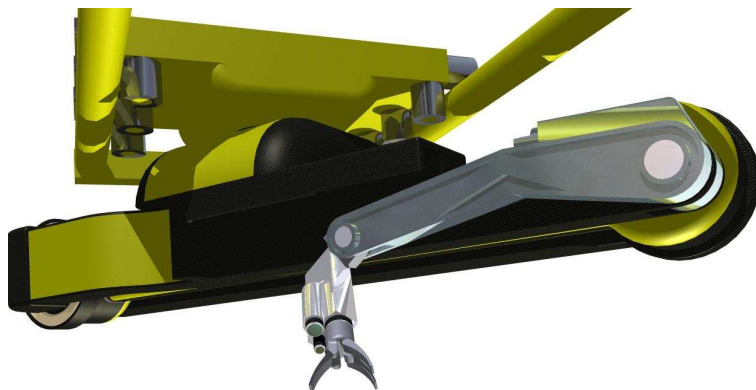
Elektronikk plassert på havbunnen blir ofte beskyttet med en kraftig beholder som er fylt med hydraulikkolje. På grunn av at oljen kan betegnes som tilnærmet inkompressibel vil denne skape et mottrykk på innsiden av beholderen og forhindre at den imploderer. Ofte blir den også utstyrt med en trykkompensator. Kompensatoren vil sørge for at det holdes et lite overtrykk, typisk rundt 0,5 bar, på innsiden som vil sørge for at dersom det oppstår en lekkasje vil olje presse seg ut og forhindre at sjøvann kommer inn. Kompensatoren kan utstyres med en sensor som gir alarm i tilfelle trykkfall, dette vil varsle om lekkasje i beholderen.

En annen og kanskje mer utradisjonell metode er å bruke plast som innkapslingsmateriale eventuelt i kombinasjon med oljefylling. Plastmateriale vil ikke korrodere og vil sannsynligvis gjøre løsningen lettere i vekt. Materialet må tåle høyt trykk, lave temperaturer og bør være utviklet for å forhindre begroing.

For et induktivt system i sjøvann kan det muligens være en løsning å blande nikkel og sink inn i plastmaterialet for å forbedre de elektromagnetiske egenskapene. Eksempel på et slikt system vil bli beskrevet senere i rapporten. Nikkel og sink blir ofte benyttet som materiale i blant annet ferritt [5] som for eksempel brukes som jernkjerne i transformatorer for å redusere den magnetiske resistiviteten.

4 Permanent undervanns manipulatorarm

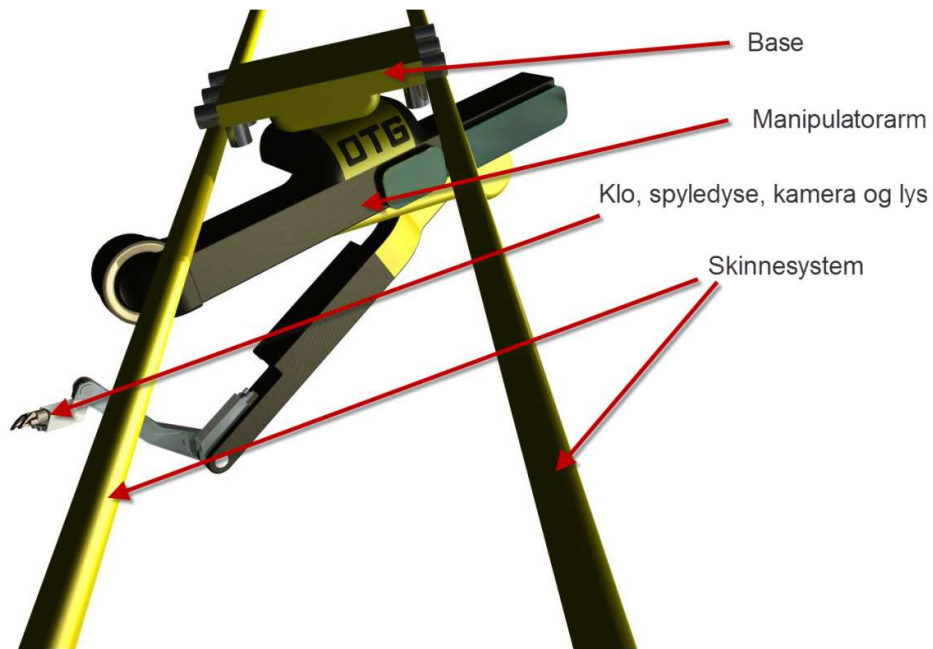
En del av konseptet til manipulatorarmen er at den skal være permanent installert nede på havbunnen. Systemet vil bestå av en manipulatorarm og et skinnesystem som monteres eksempelvis på en havbunnsramme. Figur 4 nedenfor viser en konseptmodell av manipulatorarmen som er utviklet av Oilfield Technology Group AS, heretter referert til som OTG AS. Konseptmodellen viser en manipulatorarm med spylesystem for rengjøring, kamera og lys for inspeksjon og en klo for å gjøre ulike mekaniske inngrep.



Figur 4 viser en konseptmodell av manipulatorarmen.

Manipulatorarmen skal kunne bevege seg rundt på undervannsutstyret langs et skinnesystem for å kunne gjøre forskjellige operasjoner innen inspeksjon, vedlikehold og reparasjon. Manipulatorarmen skal også kunne fungere som en undervannsstøtte i forbindelse med enkelte brønnoperasjoner, bl.a. kan armen foreta selvstendige – og væruavhengige – forberedelser og avslutninger av operasjoner direkte på havbunnsinstallasjonen, slik at overflatefartøy trenger mindre værvindu for å kunne operere på installasjonen.

Figur 5 under viser en første konseptmodell (2010) med tilhørende skinnesystem. Konseptet i figuren består av 2 rør som basen til manipulatorarmen ruller på. I figuren kan man også se at systemet ruller på hjul plassert vertikalt for å sikre mot krefter på tvers av skinnesystemet. Det bemerkes at dette første konseptet ikke ivaretar sikring mot oppløftskrefter, og heller ikke alle vridningskrefter som kan oppstå i forbindelse med visse operasjoner. Det kan derfor nevnes at den første konseptmodellen har i 2011 gjennomgått en kontinuerlig oppgradering mht. innfestingsmåte og tilhørende kraftoverføringsmåte, som avviker noe fra det som er beskrevet her i arbeidet. Informasjon rundt konseptet er hentet fra OTG's konseptrapport for systemet [4].



Figur 5 viser en konseptmodell av manipulatorarmen fra en vinkel hvor også konseptet med skinnesystemet viser tydelig.

Systemet er i et konseptstadium hvor alle tekniske detaljer ikke er løst som blant annet kraftoverføringen mellom skinnesystemet og manipulatorarm. Påfølgende hovedkapittel vil introdusere to mulige løsninger på dette.

5 Kraftoverføringssystemet

5.1 Generelt

Hovedutfordringer knyttet til havbunnsløsninger er korrosjon, marin vekst, og trykk, samt at tilgjengelighetsbegrensinger også øker med dybdeforholdene, jfr. at mange undervannsinstallasjoner allerede er installert på flere tusen meter havdyp og at utbyggingstendensen går mot økende havdyp mange steder i verden. Videre er det slik at den vanskelige tilgjengeligheten til havbunnssystemer med dagens teknologi gjør at det må mobiliseres en relativt stor organisasjon og båt for å gjøre reparasjon og vedlikehold, noe som er veldig kostbart. For alle slike overflatebaserte undervannsoperasjoner er også værforholdene en latent og uforutsigbar problemstilling. Dette fordrer at systemet er ekstremt robust for å redusere dette behovet mest mulig, eller at man i langt større grad enn i dag kan bruke permanent undervannsmontert teknologi.

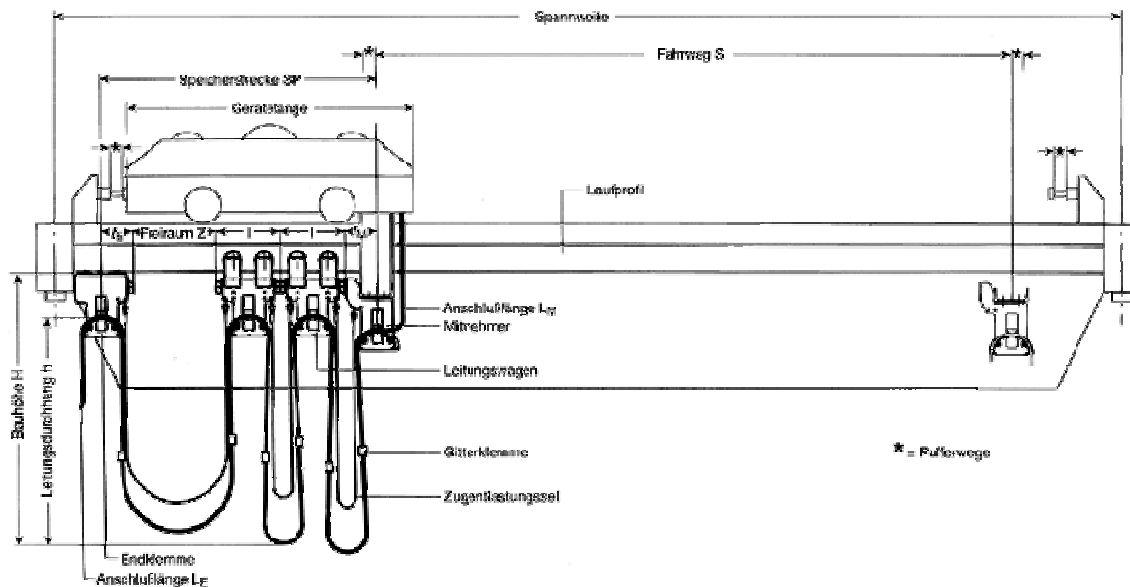
En manipulatorarm som beskrevet vil uansett ha behov for elektrisk kraft. På land brukes typisk sleperinger, men dette anses ikke som et alternativ for bruk under vann på grunn av at dette vil korrodere relativt raskt og den elektriske forbindelsen vil frafalle. Sjøvann er dessuten konduktivt, noe som også sannsynligvis vil føre til at systemet kortsluttes.

En første løsning for å overføre elektrisk kraft til manipulatorarmen kan derfor være å benytte en kabelvogn. Prinsippet går ut på å henge en kabel opp i sløyfer på kabelvogner. Kabelvognene er igjen hengt på skinnesystemet hvor disse kan bevegges langs etter manipulatorarmen. System som dette brukes blant annet på kransystem, Figur 6 under viser eksempel på dette, men har betydelige svakheter for dette formålet, mer om dette vil bli beskrevet i kapittel 5.2.

En annen metode for maksimalt robust kraftoverføring, som er foreslått og anbefalt i oppgaven, er derfor å benytte et induktivt overføringssystem som vil bli beskrevet nærmere i kapittel 5.3.

5.2 Kabel og kabelvogn

En alternativ løsning for å overføre elektrisk kraft til manipulatorarmen kan være å benytte en kabelvogn. Prinsippet går ut på å henge en kabel opp i sløyfer på kabelvogner. Kabelvognene er igjen hengt på skinnesystemet hvor disse kan bevegges langs etter manipulatorarmen. System som dette brukes blant annet på kransystem, Figur 6 under viser eksempel på dette.



Figur 6 viser eksempel på kabelvogn for kransystem. Bildet er hentet fra [17].

Ulempen med kabelvogn er at man har flere feilkilder som kabelen i seg selv, koblingene til kabelen, og skinnesystemet for kabelen. En kabel som er i bevegelse er mer eksponert for brudd enn en som ligger statisk. Med undervannsstrømninger vil kabelen også kunne bevege seg, med fare for å kunne henge seg fast i annet utstyr.

En annen ulempe med kabelvognsystemet er at manipulatorarmen vil være nødt til å gå samme skinnesbane tilbake ettersom kabelen henger etter. Dette er en større problemstilling dersom manipulatorarmen skal kunne gå i en sirkulær bane fremfor en rett bane.

Dette systemet vil ikke bli beskrevet i mer detalj, videre derimot vil man se nærmere på det induktive systemet.

5.3 Induktivt overføringssystem

Et induktivt overføringssystem utviklet for bruk under vann kan være en løsning. Prinsippet med dette systemet er at den elektriske kraften overføres kontaktløst ved bruk av induksjon. Fordelen med dette er at man ikke har fysisk forbindelse mellom den statiske delen og den bevegelige delen noe som gjør at man kan kapsle inn hele systemet bedre for å unngå vanninntrengning. I tillegg har slike system i praksis vist seg å være svært robuste [12], riktignok så langt mest på basis av erfaringer med system for bruk på land.

Et induktivt overføringssystem består i prinsippet av en primærspole, sekundærspole og en jernkjerne. Primærspole i dette tilfelle er ikke en faktisk spole, men 2 ledere som går parallelt med skinnesystemet, men vil allikevel bli referert til som primærspole videre i rapporten.

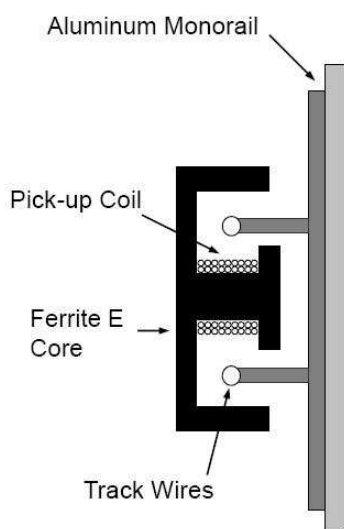
En tidsvarierende strøm med en bestemt frekvens og amplitude går gjennom lederne til primærspolen i hver sin retning. Strømmen vil sørge for at det settes opp et tidsvarierende magnetfelt rundt lederne. På grunn av at strømmen går i hver sin retning vil magnetfeltene mellom lederne gå i samme retning og forsterke hverandre. En sekundærspole med jernkjerne plasseres i senter av det tidsvarierende magnetfeltet, dette vil gi en tidsvarierende magnetisk fluks gjennom spolen. I følge Faraday's lov, referanse gjøres til likning (1) under hvor Φ_B representere magnetisk fluks og N antall viklinger i en spole, vil det bli induisert en

elektromotorisk kraft i spolen. Med ord forklares dette at den induerte elektromotoriske kraften er lik det negative at tidsrateendringen av magnetisk fluks gjennom en sløyfe [1].

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

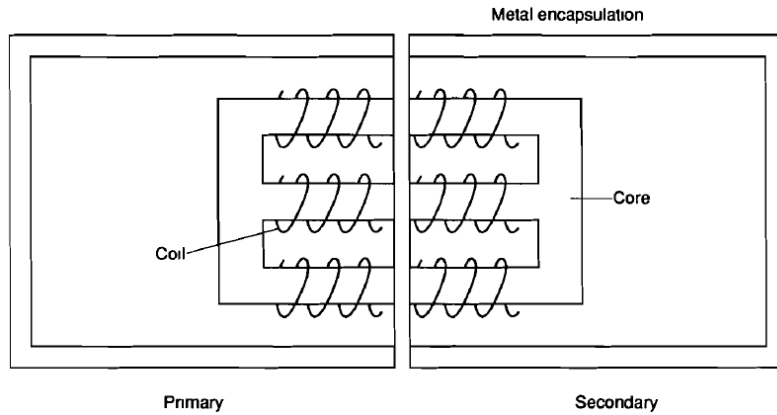
Ettersom Faraday's lov nå er introdusert bør også Lenz' lov introduseres. Lenz' lov sier at retningen til den induerte spenning er sånn at den vil motsette seg årsaken. Det vil si at den induerte spenningen vil induere en strøm som igjen vil opprette et magnetfelt med en retning som vil motsette seg magnetfeltet som var opphavet til den induerte elektromotoriske kraften. Dette forklarer minustegnet i formelen til Faraday.

Figur 7 under viser en illustrasjon av et 2D-snitt av et induktivt overføringssystem, illustrasjonen er hentet fra [11]. Denne består av en E-format jernkjerne av ferrittmateriale som omslutter en primærspole. Primærspolen igjen er montert fast på et skinnesystem. Sekundærspolen er illustrert i senter av jernkjernen. Jernkjerne og sekundærspole vil kunne bevege seg langs z-aksen hvor denne går inn i figuren i forhold til leseren.



Figur 7 viser prinsippet for et induktivt overføringssystem med E-format jernkjerne. Figuren er hentet fra [11].

Det induktive overføringsprinsipper vil man se igjen i en transformator, forskjellen her er at den magnetiske fluksen vil gå gjennom en jernkjerne og et luftgap, men for en transformator vil vanligvis flukslinjene kun bli ført via en jernkjerne og vel å merke ikke gjennom et luftgap. Figur 8 under viser konseptet til en induktiv undervannsplugg hvor en trefasettransformator er splittet. Primær- og sekundærside av transformatoren består av 2 E-format jernkjerne plassert ansikt mot ansikt hvor hver side er kapslet inn i hver sin metallkapsling.



Figur 8 viser en prinsippskisse av en trefasettransformator som er splittet. Skissen er hentet fra [9].

Jernkjernen vil minimere den totale reluktansen til systemet noe som vil øke den magnetiske fluksen gjennom spolen. Reluktans er et mål på magnetisk resistans som kan sammenlignes med elektrisk resistans R . Reluktans kan uttrykkes som:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi_B} = \frac{NI}{\Phi_B} \quad (2)$$

Hvor μ er permeabiliteten til materialet, l er lengden i meter og A er arealet i kvadratmeter. Permeabiliteten er et mål på et materials sensitivitet til å reagere på magnetisering. For et material uttrykkes denne ofte som μ_r , som er den relative permeabiliteten i forhold til permeabiliteten for vakuum. Symbolet μ_0 blir brukt for permeabiliteten i vakuum og har en verdi på $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Permeabiliteten uttrykkes derfor som:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (3)$$

I formel (2) er symbolet \mathcal{F} den magnetomotoriske kraften som er strømmen pr. viking multiplisert med viklingstallet. Denne uttrykkes som $\mathcal{F} = NI$ hvor N er viklingstallet og I er strømmen gjennom kretsen.

Utrykket $\mathcal{R} = \mathcal{F}/\Phi_B$ i formel (2) kan sammenlignes med ohms lov hvor \mathcal{F} tilsvarer elektrisk spenning v [volt] og Φ_B elektrisk strøm i [ampere].

Transformator og det induktive overføringssystemet kan uttrykkes med magnetisk kretsskjema som vist i Figur 9 under hvor krets a) viser kretsen for en transformator og b) for et induktivt overføringssystem. For en transformator vil man få:

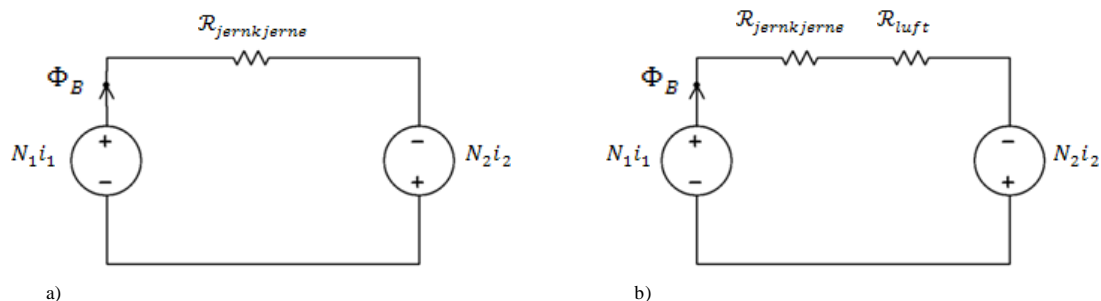
$$\Phi_B = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_{\text{jernkjerne}}} \quad (4)$$

Og for et induktivt overføringssystem vil man få.

$$\Phi_B = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_{\text{jernkjerne}} + \mathcal{R}_{\text{luft}}} \quad (5)$$

For luft er $\mu_r = 1$, men for materialet til en jernkjerne kan dette variere. Eksempelvis et ferrittmateriale av typen Epcos N27 [23] som brukes i transformatorer med høy effekt og

frekvenser mindre enn 100kHz har en $\mu_r = 2000$. Ut fra formel (2) kan man se at en jernkjerne med høy permeabilitet vil redusere reluktansen betraktelig.



Figur 9 viser et forenklet magnetisk krettskjema for henholdsvis en transformator og et induktivt overføringssystem.

For et induktivt system vil det være viktig å minimere reluktansen, for luft kan dette oppnås ved å omslutte så mye som mulig av primærspolen med jernkjerne. Ut fra formel (2) kan man uttrykke reluktansen for luft som:

$$\mathcal{R}_{luft} = \frac{l_{luft}}{\mu_0 \mu_r A_{luft}} \quad (6)$$

Man kan se at en reduksjon i luftlengden vil redusere reluktansen for luft.

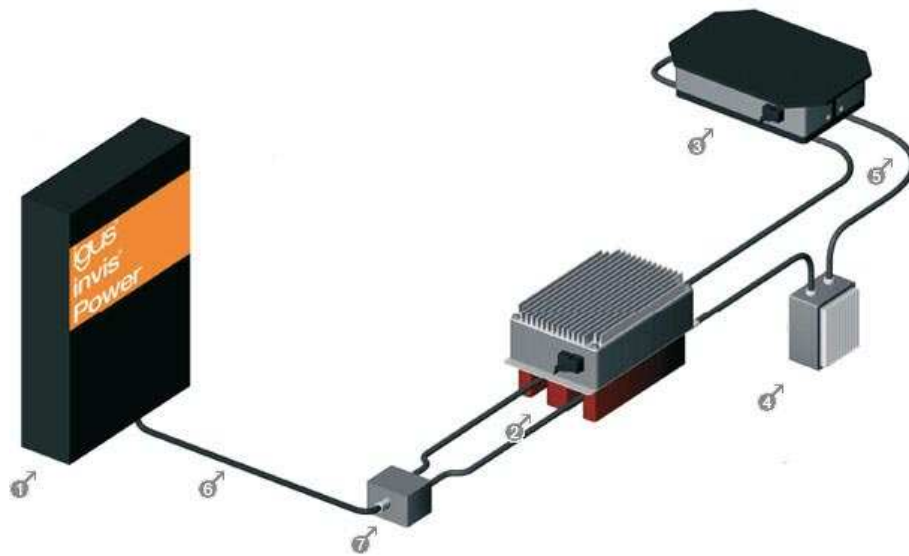
En annen måte å redusere reluktansen på er å øke arealet, men dette vil også føre til økt volum på jernkjernen som igjen muligens vil føre til en økning i virvelstrømstap og hysterese tap. Det vil bli skrevet mer om disse tapene senere i rapporten.

Ulempen med et induktivt overføringssystem er at luftgapsavstanden utgjør en stor del av tapet. Som eksempel har "The University of Auckland" bygget en prototype av tilsvarende system, men som er beregnet for bruk på land, med en total virkningsgrad på 85 % og et luftgap på 4mm [11].

5.4 Eksempel på system for bruk på land

Tilsvarende system finner man for bruk på landindustrien. Systemet brukes blant annet for AGV ("Automated Guided Vehicles") hvor man slipper kontaktflater og skinner i gulvet. Systemet brukes også i sterile rom hvor man unngår forurensning fra kraftlinjer og kontaktflater.

"Iigus", "Conductix Wampfler" og "Vahle Electrification Systems" er eksempel på produsenter av induktive overføringssystem. Figur 10 under viser en systemskisse av "Iigus Invis Power". Systemet består av en strømforsyning, primærspole, sekundærspole (mottaker) og kompensator. Strømforsyningen leverer strøm med en frekvens på 20kHz for å skape et varierende kraftfelt rundt primærspolen. Skissen viser to varianter av mottakere, en flat og en E-formet. Fordelen med den flate mottakeren er at man for eksempel slipper spor i gulvet, men ulempen igjen er at man vil få en mindre virkningsgrad på grunn av at flukslinjene ikke vil ledes like bra gjennom mottakerspolen som en E-formet og man vil få ett større flukstap.



Figur 10 viser en systemskisse av Iguis Invis Power. Figuren er hentet fra [16].

6 Analyse og optimalisering av det induktive overføringssystemet

6.1 Generelt

Som nevnt tidligere i rapporten kan systemet i stor grad sammenlignes med en transformator med luftgap i tillegg til jernkjernen. I likhet med transformatoren består det induktive overføringssystemet av primærviklinger, sekundærviklinger og jernkjerne.

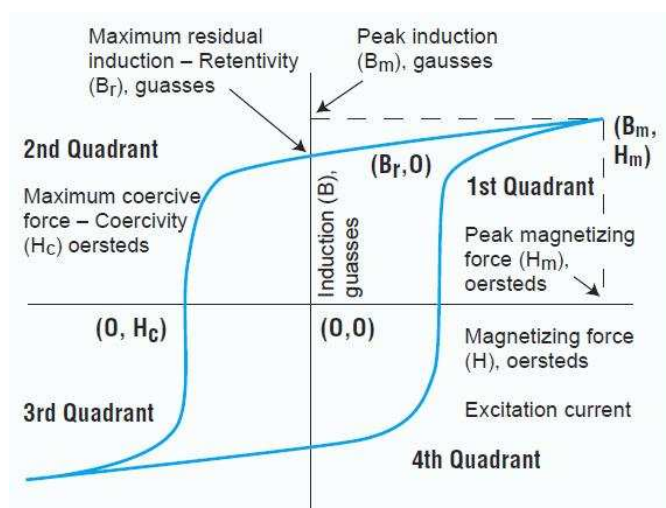
Tapet i en transformator skyldes i hovedsak [10, s14-s20]:

- Tap i primær- og sekundærviklingene (den ohmske motstanden)
- Tap i jernkerne som følge av virvelstrømmer og hysteres
- Lekkfluks i både primær- og sekundærvikling

Virvelstrømmer kan forklares ut fra Faraday's lov og Lenz's lov som det ble skrevet om tidligere rapporten referanse gjøres til kapittel 5.3 "Induktivt overføringssystem". I følge Faraday's lov vil et tidsvarierende magnetisk felt gjennom indusere en spenning. På grunn av konduktiviteten til materialet vil den induserte spenningen resultere i strømmer. Disse strømmene vil så igjen i følge Lenz's lov generere magnetfelt som vil motsette seg det opprinnelige magnetfeltet. Virvelstrømstapet vil øke ved økt variasjon i den magnetiske fluksen.

I en jernkerne for eksempel ønsker man minst mulig virvelstrømmer og mest mulig magnetisk fluks. En ideell jernkerne vil derfor ha uendelig stor elektrisk resistans ($R \rightarrow \infty$) og ingen magnetisk resistans ($\mathcal{R} \rightarrow 0$).

Hysteresetapet representerer arbeidet som må gjøres av kretsen for å magnetisere og avmagnetisere jernkjernen. Hysteresen kan man ofte lese ut fra en BH-kurve i databladet til materialet hvor flukstettheten B er vist som funksjon av feltstyrken H. Figur 11 under viser eksempel på en BH-kurve. Ut fra figuren kan man også se at B_m -kurven på et tidspunkt går i metning. Når feltstyrken snur kan man ut fra B_r -kurven se at en del av den magnetiske energien blir lagret i jernkjernen selv når feltstyrken avtar. Området avgrenset av kurvene i figuren utgjør selve hysteresetapet.



Figur 11 viser en skisse for en BH-kurve. Figuren er hentet fra [14, s6].

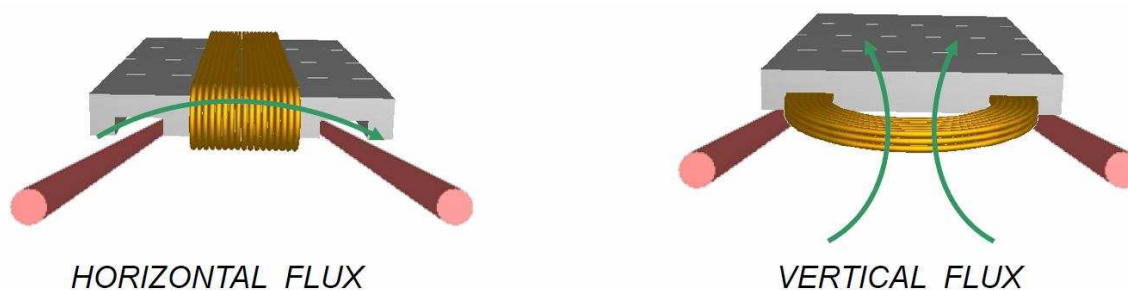
Lekkfluks vil bli beskrevet i mer detalj i neste underkapittel.

6.2 Optimalisering av jernkjernen

Som skrevet tidligere i rapporten ønsker man å omslutte mest mulig av primærspolen med jernkjerne for å redusere den magnetiske resistansen, dette bidrar til å øke den totale virkningsgraden til systemet betraktelig.

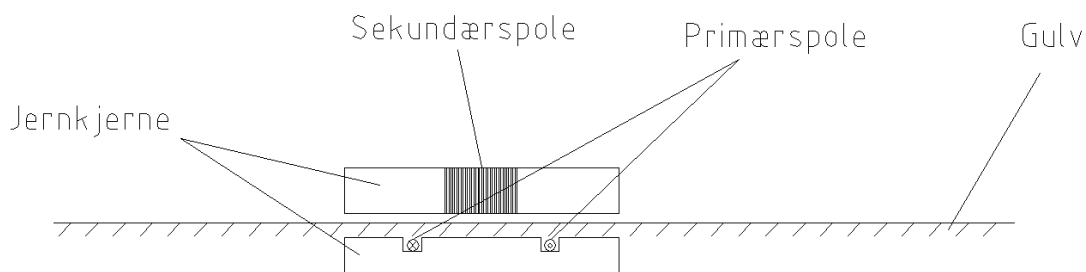
E-utforming og flat utforming er de mest brukte for mottakeren på et induktivt overføringssystem. Mottaker med E-form som vist i Figur 7 vil kunne omslutte primærspolen med mer jernkjerne og dermed kunne redusere reluktansen.

I noen tilfeller vil man ikke kunne ha mulig til å omslutte primærspolen med jernkjerne som for eksempel dersom man ønsker å grave primærspolen ned i bakken eller å legge den under gulvet. I disse tilfellene brukes det ofte en flat mottaker. Figur 12 under viser 2 eksempler på flat mottaker hvor den ene har spolen viklet vertikalt som gjør at den horisontale fluksen passere gjennom det lukkede arealet til spolen. Den andre mottakeren har spolen plassert horisontalt noe som gjør at den vertikale fluksen passerer gjennom arealet til spolen.



Figur 12 viser 2 forskjellige modeller av flat mottaker. Bildet er hentet fra [11].

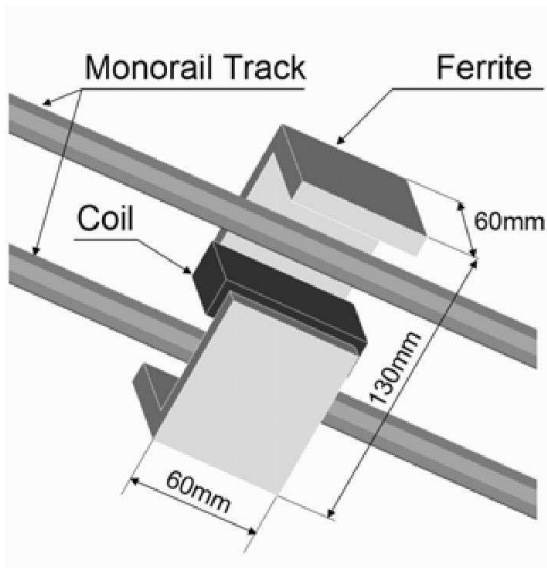
Ulempen med en flat mottaker er at man vil få en høyere reluktans som følge av et økt effektivt luftgap. For å redusere reluktansen kan man omslutte primærspolen med jernkjerne som vist i Figur 13 under. En primærspole vil i realiteten ha en lengde på flere meter avhengig av bruksområdet. Å legge jernkjerne i metervis som vist i figuren vil helt klart øke kostnadene betraktelig.



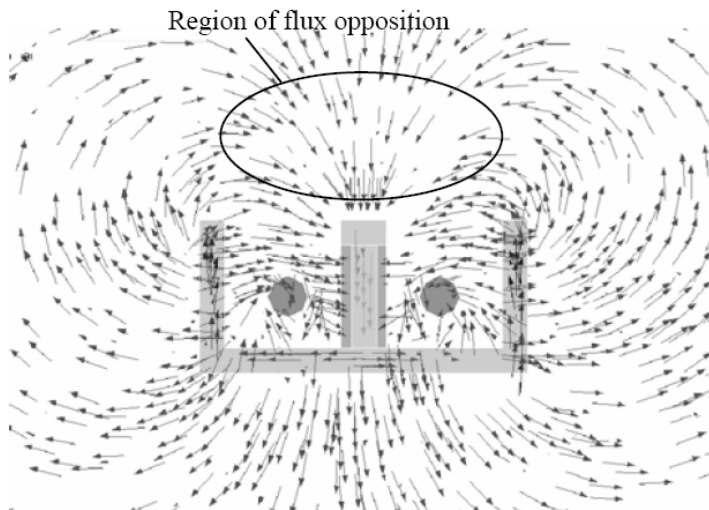
Figur 13 viser eksempel på hvordan det er mulig å omslutte mest mulig av primærspolen med jern for en konfigurasjon med flat mottaker for å redusere reluktansen.

En annen og mer optimalisert utforming av jernkjernen i forhold til E-mottakeren og den flate er den S-formede mottakeren som vist i Figur 14 under. Artikkel [15] presenterer simulering

av magnetfelt gjennom en S-kjerne sammenliknet med en E-kjerne. Resultatene i artikkelen viser at denne utformingen kan nesten doble effekten med like mye jernkjerne. Grunnen til det er at utformingen fører til at man unngår flukskanselleringer i luften i området vist i Figur 15 under i større grad sammenlignet med en E-kjerne.



Figur 14 viser en S-formet jernkjerne. Bildet er hentet fra [15].



Figur 15 viser området som er utsatt for flukskanselleringer i luft for en E-formet jernkjerne. Bildet er hentet fra artikkel [15].

6.3 Elektriske betraktninger av systemet

Det induktive overføringssystemet kan vises som et elektrisk ekvivalentskjema som vist i Figur 16 under hvor V_1 og V_2 henholdsvis er primær- og sekundærspenning. Resistansene R_a og R_b representerer det resistive tapet i henholdsvis primær- og sekundærspolen. Dette tapet kan uttrykkes som:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

Ut fra formelen kan man se at en økning i strømmen, spenningen eller i resistansen vil gi en økning i det resistive tapet. Dersom man øker lasten på utgangen V_2 i kretsskjemaet vil strømmen I_2 øke og dermed også det resistive tapet for sekundærspolen. Lasten vil bli reflektert over på primærsiden noe som også vil gi en økning i det resistive tapet i primærspolen. For å redusere tapet kan man blant annet øke tverrsnittet på viklingen dersom dette er praktisk mulig i forhold til plass.

For AC-strøm kan faktorer som overflateeffekten og nærhetseffekten bidra til økt resistans. Overflateeffekten skyldes virvelstrømmer i kobberlederen til spolen. Dette kan forklares med at virvelstrømmene vil være mest fremtredende i senter av ledere noe som igjen vil føre til at fordelingen av strømmen legger seg langs overflaten. Dette vil videre føre til at det effektive tverrsnittet vil bli redusert noe som vil gi en økt resistans. Overflatedybde er et sentralt begrep i denne sammenheng, denne er definert som [13]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (8)$$

Hvor ρ er resistiviteten, ω er frekvensen og μ er permeabiliteten til ledere. Ut fra formelen kan man se at en økning i frekvensen vil redusere overflatedybden. En reduksjon i overflatedybden vil gi en økning i resistansen. Man kan også se at materialeegenskapene naturlig nok har noe å si for overflatedybden. En økning i resistiviteten vil redusere virvelstrømmene og igjen gi en økt dybde, men dette vil også føre til en økning i DC-resistansen. En reduksjon i permeabiliteten vil redusere magnetfeltet i ledere som generer virvelstrømmene noe som vil gi en økt dybde.

For å redusere effekten av virvelstrømmer i ledere ved AC-strømmer kan det brukes såkalt "litz wire" dette er en kabel som består av mange små isolerte ledere. Dette vil bidra til en økt effektiv overflate som igjen vil redusere resistansen.

Nærhetseffekten skyldes virvelstrømmer generert i en leder som følge av magnetfeltet fra nærliggende leder. Nærhetseffekten kan bidra til økt resistans. Denne vil også øke ved økt frekvens.

Resistansen R_m i ekvivalentskjemaet i Figur 16 dekker det som er virvelstrømstap og hysterisetap.

Induktansen M er gjensidig induktans, denne er definert som [1, s972]:

$$M = N_2 \frac{\Phi_{B2}}{I_1} = N_1 \frac{\Phi_{B1}}{I_2} \quad (9)$$

Formelen viser at fluksen gjennom sekundærspolen i forhold til strømmen gjennom primærspolen er lik fluksen gjennom primærspolen i forhold til strømmen i sekundærspolen. Det vil si at induktansen er gjensidig.

Spenningen V_m i ekvivalentskjemaet er den induserte spenningen som følge av den gjensidige induktansen. Denne er rent reaktiv og kan uttrykkes som:

$$V_m = j\omega M I_m \quad (10)$$

En del av primærinduktansen generert av strømmen I_1 vil ta veien utenom sekundærspolen denne representerer induktansen L_a i ekvivalentskjemaet. I sekundærspolen vil det bli indusert en spenning som vil drive strømmen I_2 . Fluksen generert av denne strømmen vil ikke ta veien gjennom primærspolen og representerer lekkinduktansen L_b .

For et induktivt overføringssystem vil store deler av primærspolen ikke være dekket av sekundærenheten. Dette er magnetisk fluks som ikke vil gå gjennom sekundærspolen og vil bidra til lekkinduktans for primærspolen. Denne kan forventes å være betraktelig større enn for sekundærspolen. Med en økning i lengden av primærspolen kan det forventes å få en økt lekkinduktans. Primær og sekundær lekkinduktans kan uttrykkes som:

$$L_a = L_1 - M \quad (11)$$

$$L_b = L_2 - M \quad (12)$$

Hvor induktans L_1 og L_2 er total induktans for henholdsvis primær- og sekundærspole.

For å gjøre en analyse av de induktive egenskapene til systemet forenkles det med å se bort fra de resistive tapene R_m , R_a og R_b . Med utgangspunkt i ekvivalentskjemaet kan primær- og sekundærspenningen utledes:

$$I_m = I_1 - I_2 \quad (13)$$

$$V_1 = j\omega L_a I_1 + j\omega M I_m \quad (14)$$

Ved å sette inn uttrykket for I_m i formel (13) inn i formel (14) får man:

$$V_1 = j\omega L_a I_1 + j\omega M (I_1 - I_2) \quad (15)$$

For sekundærspenningen får man at:

$$V_2 = j\omega M (I_1 - I_2) - j\omega L_b I_2 \quad (16)$$

For blant annet å finne maksimal ukompensert effekt på utgangen til systemet gjøres det analyse av kretsen ved åpen krets på utgangen og deretter med kretsen kortsluttet på utgangen. Ukompensert effekt uttrykkes som:

$$S_u = V_{OC} I_{SC} \quad (17)$$

Hvor V_{OC} er åpen kretsspenning og I_{SC} kortslutningsstrømmen. Dette vil bli beskrevet nærmere senere i rapporten etter at det er gjort videre analyse av kretsen.

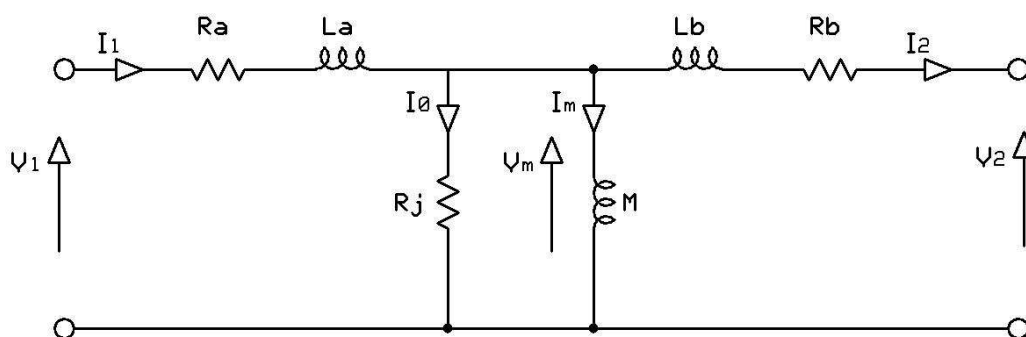
Ekvivalentskjemaet i Figur 16 viser utgangen uten last det vil si at spenningen $V_2 = V_{OC}$. Uten last på utgangen vil man ha at $I_2 = 0$. Ved å sette dette inn i formel (16) kan man uttrykke åpenkretsspenning som:

$$V_{OC} = j\omega M I_1 \quad (18)$$

Ved å snu videre på formelen får man et uttrykk for den gjensidige induktansen:

$$M = \frac{V_{OC}}{j\omega I_1} \quad (19)$$

Formelen over for gjensidig induktans ble implementert manuelt i simuleringsprogrammet da den induerte åpen kretsspenningen var en del av de integrerte simuleringsresultatene til modellen. Strømmen i primærviklingen og frekvensen var gitt.



Figur 16 viser ekvivalentskjema for et induktivt overføringsystemet uten last.

Ved kortsluttet utgang som vist i ekvivalentskjemaet i Figur 17 under vil man få at $I_2 = I_{SC}$ og $V_2 = 0$. Ved å sette dette inn i formel (16) får man:

$$\begin{aligned} 0 &= j\omega M(I_1 - I_{SC}) - j\omega L_b I_{SC} \\ &= j\omega M I_1 - j\omega M I_{SC} - j\omega L_b I_{SC} \\ &= j\omega M I_1 - j\omega I_{SC}(M + L_b) \end{aligned}$$

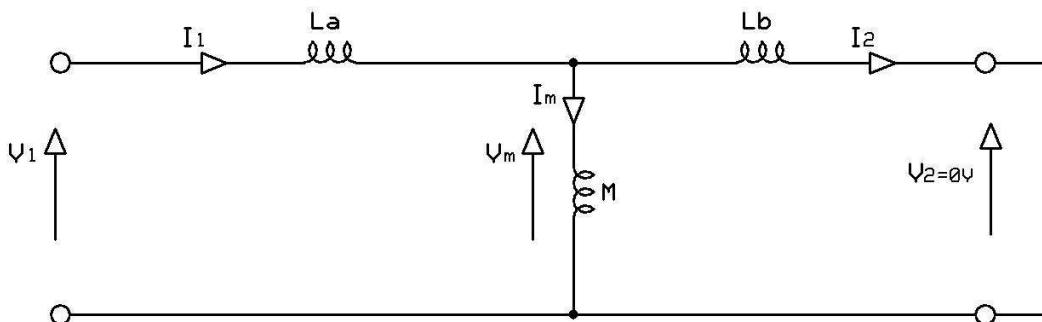
Ved å snu på formel (12) kan man erstatte uttrykket $M + L_b$, Utrykket $j\omega$ ser man også er overflødig da det forekommer i alle ledd i likningen. Ved å sette inn og snu på formelen vil man få:

$$M I_1 = L_2 I_{SC} \quad (20)$$

Ved å snu på formelen over kan man finne et uttrykk for den sekundærinduktansen:

$$L_2 = \frac{M I_1}{I_{SC}} \quad (21)$$

På samme måte som med åpen kretsspennning var kortslutningsstrømmen en del av de integrerte simuleringresultatene. For å finne den totale induktansen for primærspolen ble uttrykket i formel (21) implementert manuelt i simuleringmodellen.



Figur 17 viser et forenklet ekvivalentskjema for et induktivt overføringssystem med kortsluttet utgang.

Som nevnt tidligere har man et uttrykk for ukompensert effekt, referanse gjøres til formel (17). I følge blant annet artikkel [22] har man videre at den kompenserte effekten, altså maks effekt som kan hentes ut fra systemet uttrykt som:

$$P_2 = Q_2 S_u = Q_2 V_{OC} I_{sc} \quad (22)$$

Hvor Q_2 er kvalitetsfaktoren til det kompenserte systemet. Uttrykket for kvalitetsfaktoren vil være avhengig av hvilken kompenseringmetode som blir valgt eksempelvis kan man kompensere med en kapasitans i serie med sekundærinduktansen eller i parallell. For et eksempel vist i presentasjon [11, s33] hvor sekundærspolen ble parallellkompensert med en kapasitans fikk kvalitetsfaktoren følgende uttrykk:

$$Q = \frac{1}{\omega_0 C R_L} \quad (23)$$

Hvor resistansen R_L er lasten på utgangen. Et mer generelt uttrykk for kvalitetsfaktoren er [11, s33]:

$$Q = \frac{\omega_0}{\text{Båndbredde}} \quad (24)$$

Med andre ord er kvalitetsfaktoren et forholdstall mellom operasjonsfrekvensen og båndbredden. Ut fra formel (22) kan man se at en økt kvalitetsfaktor vil øke utgangseffekten til systemet. Men man ser også at dersom kvalitetsfaktoren skal økes må båndbredden reduseres dette vil føre til systemet blir ømfintlig overfor variasjoner i frekvensen. Små variasjoner kan føre til store reduksjoner i effekten.

I følge presentasjon [11, s35] vil en $Q > 5$ være vanskelig å opprettholde. I simuleringen vil denne erfaringen bli benyttet hvor kvalitetsfaktoren Q blir satt til 5 i kalkulasjonen av utgangseffekten. Denne rapporten vil ikke gå noe mer inn på temaet rundt kompensering av systemet.

6.4 Koblingskoeffisient for sammenligning av ulike mottakere

For en transformator er koblingsfaktoren vanligvis definert som:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (25)$$

Hvor M er gjensidig induktans og induktansene L_1 og L_2 er total induktans for henholdsvis primær- og sekundærspole. Denne koblingsfaktoren er et kvalitetsmål på hvor mye av den magnetiske fluksen generert av primærspolen som blir gjensidig koblet sammen med sekundærspolen. For en ideell transformator vil man ha $L_1 = L_2$ og man vil da få $k = 1$.

For et induktivt overføringssystem vil det ikke bli helt riktig å bruke denne faktoren i forhold til det å sammenligne ulike mottakere opp mot hverandre. For eksempel vil koblingsfaktoren for en E-formet jernkjerne variere dersom lengden på primærspolen varieres. Man vil da for eksempel ikke kunne si noe om kvaliteten på utformingen av jernkjernen til mottakeren som det ble skrevet om i kapittel 5.3.

Artikkel [22] viser utledning av følgende kvalitetsfaktor:

$$\kappa_\phi = \frac{M}{L_b} \quad (26)$$

Dersom man tar denne videre og kombinerer med formel (11) vil man da få:

$$\kappa_\phi = \frac{M}{M+L_b} \quad (27)$$

Ut fra dette kan man se at kvalitetsfaktoren er et uttrykk på kvaliteten til sekundærenheten til og nyttegjør seg av den gjensidige induktansen. En økning i lekkinduktansen vil gi redusert koblingsfaktor. For et ideelt system vil man ha $L_b = 0$ og vil da få $\kappa_\phi = 1$.

I følge artikkel [22] vil κ_ϕ for et system med en E-formet jernkjerne ligge rundt 0,65, for en flat formet jernkjerne rundt 0,35 og for en koaksialformet rundt 0,95. Referanse gjøres til kapittel 5.3 hvor E-formet og flat formet jernkjerne ble beskrevet. En koaksialformet jernkjerne har en smultringform som vil omslutte hver sin leder til primærspolen 360 grader. Denne vil nok bli vanskelig å bruke i dette tilfellet da man ikke får hengt opp primærspolen.

I et eventuelt videre arbeid vil det sannsynligvis være nyttig å benytte denne kvalitetsfaktoren ved utforming og optimalisering av blant annet jernkjernen.

7 Elektromagnetiske egenskaper til sjøvann

Både luft og sjøvann har $\mu_r = 1$ det vil si at mediumene har samme magnetiske egenskaper. Forskjellen er at sjøvann har en relativ permittivitet $\epsilon_r = 85$ og for luft $\epsilon_r = 1$.

Relativ permittivitet er et mål på hvor godt et material leder elektrisk felt. Denne uttrykkes relativt i forhold til permittiviteten for vakuum som er:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} [F/m] \quad (28)$$

På grunn av permittiviteten i sjøvannet kan for eksempel 2 parallelle ledere i sjøvann sammenlignes med en kondensator hvor lederne tilsvarer platene og sjøvannet tilsvare dielektrikumet mellom platene.

For å beregne kapasitansen mellom 2 parallelle ledere har man følgende standardformel som er hentet fra [26]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left[\frac{D}{2R} + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - 1}\right]} \quad (29)$$

Hvor D er distansen fra senter til senter mellom lederne, R er radiusen til lederne og l er lengden. Ut fra formelen kan man se at lengden på lederne vil øke kapasitansen. Lengden på primærspolen til et induktivt overføringssystem kan variere avhengig av applikasjonen.

Dersom man har kapasitansen og potensialdifferansen mellom lederne kan man anvende ohms lov og uttrykke formelen med hensyn til strømmen og få:

$$I = j\omega CV \quad (30)$$

Ut fra formelen over kan man se at en økning i kapasitansen vil gi en økning i strømmen, det vil si at kapasitive strømmoverføringer mellom lederne kan øke ved økt lengde på primærspolen. Ved økt frekvens vil også de kapasitive strømmoverføringene øke.

En annen vesentlig forskjell mellom luft og sjøvann er at sjøvann er konduktivt hvor $\sigma = 5 [S/m]$ for sjøvann.

8 Simulering

8.1 Generelt

Målene med simuleringene:

- Se på hvilken effekt sjøvannet kan forventes å ha på et induktivt overføringssystem
- Se på virkning det kan forventes av å omslutte primærspolen med mer jernkjerne
- Se på virkingen som kan forventes av å øke operasjonsfrekvensen i forhold til sjøvannet med tanke på induktans og kapasitans
- Se på virkingen det kan forventes for resistansen i primær- og sekundærspolen i forhold til frekvensen
- Se på virkning konduktiviteten i sjøvannet kan forventes å ha isolert sett

Selve simuleringen ble delt inn i 3 hovedscenarier:

- Modell med en "ikke-optimalisert" E-formet jernkjerne
- Modell med en "optimalisert" E-formet jernkjerne hvor denne ble optimalisert med å omslutte mer av primærspolen med jernkjerne
- Sjøvann uten konduktivitet. Denne ble simulert med en ikke-optimalisert jernkjerne for å få litt mer sjøvann mellom primærspolen og jernkjernen.

I denne oppgaven er det ikke gjort utregninger og simuleringer i forhold til dimensjonering og optimalisering av jernkjernen med tanke på blant annet magnetisk metning og utforming. På grunn av at dette mangler en utfyllende forutsetning eller bevis for å si om jernkjernen er optimal, men det er grunn til å anta at den ene vil være mer optimal i forhold til den andre. De er derfor definert som henholdsvis "optimal" og "ikke-optimal".

Modellen ble simulert med et frekvensintervall mellom 10Hz og 1Mhz

Oppsett av simuleringen presenteres i en detaljgrad som gjør at simulering er reproducerbar ut fra denne rapporten.

8.2 Programvare og maskinvare

Operativsystem:

Microsoft Windows XP Professional versjon 2002 SP3.

Maskinvare:

Intel Pentium 3.4GHz, 1.99GB RAM.

Simuleringsverktøy:

Cmsol Multiphysics versjon 4.1 med AC/DC modul.

8.3 Antagelser, forenklinger og begrensninger

Saltinnholdet i sjøvann varierer blant annet i forhold til havdybde noe som vil påvirke konduktiviteten til sjøvannet. I simuleringen er det derfor antatt at de elektromagnetiske egenskapene for sjøvann er konstante.

Modellen ble forenklet ved å simulere med 1 vikling på sekundærspolen.

På grunn av det ikke var mulig å sette ulike dybde for de ulike geometriske elementene i modellen fikk primærspolen samme dybde som jernkjernen og sekundærspolen. Denne vil i realiteten ha en lengde på flere meter avhengig av bruksområdet. En løsning kan være å simulere denne isolert sett i egen modell.

8.4 Valg av geometri

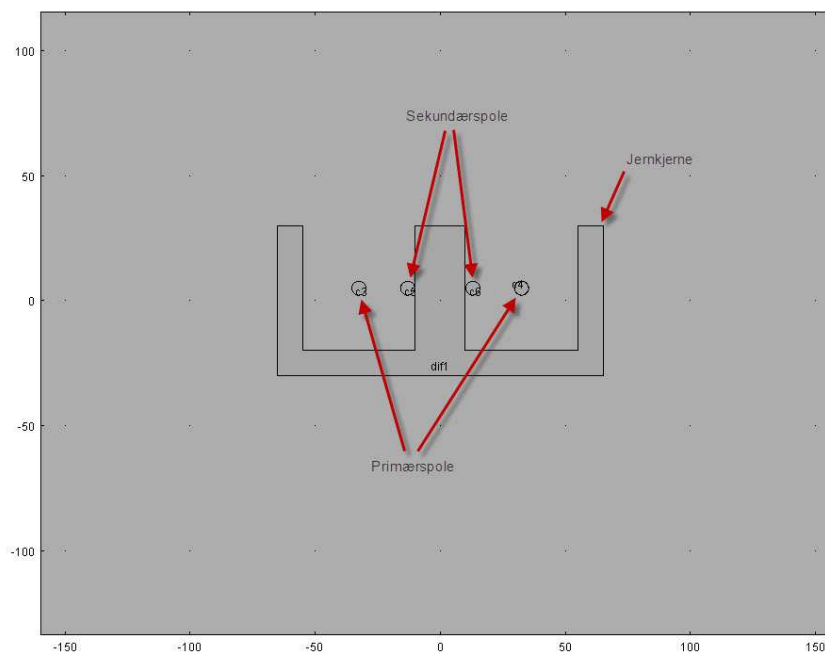
For å forenkle simuleringen ble geometrien satt opp som en 2D-modell. En simulering i 2D krever vesentlig mindre datakapasitet noe som blant annet gir den fordelen at oppløsningen på simuleringen kan økes.

En 3D-modell av systemet ville gitt en mer realistisk simulering og flottere visualisering av modellen. Med en 3D-modell kunne man simulert en mer realistisk lengde på primærspolen samt en fullstendig sekundærspole. I tillegg ville man fått med de elektromagnetiske feltene inn og ut av planet (z-retning).

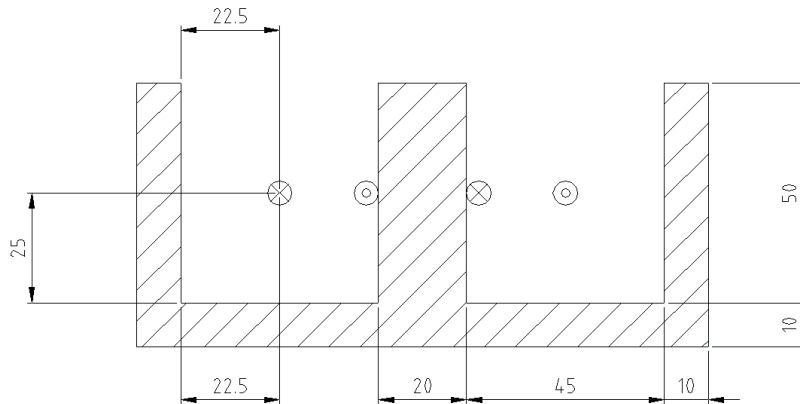
Figur 18 viser geometrien til en E-formet jernkjerne som er definert som den "ikke-optimale" jernkjernen. Grunnen til det er at det fortsatt er et gap mellom primærspole og jernkjerne som kan dekkes. Sirklene i senter av jernkjernen utgjør primærspolene og sirklene som ligger tett inntil jernkjernen utgjør sekundærspolen.

Størrelse på E-kjernen er en forenklet utgave av geometrien som ble brukt i artikkel [15] hvor artikkelen tar for seg optimalisering av jernkjerne i forhold til flukskanselleringer i luften. I følge artikkelen på side 1 utgjør denne utformingen en typisk "E-pickup". Figur 19 under viser detaljmålene av jernkjernen samt plassering av primær- og sekundærspole.

I Comsol Multiphysics i 2D-modus vil man naturlig nok ikke kunne se dybden på systemet. Dybden i simuleringen kan settes manuelt hvor den i dette tilfellet ble satt til 60mm. Dybden i dette tilfellet vil i praksis si lengden på jernkjernen og spolene.

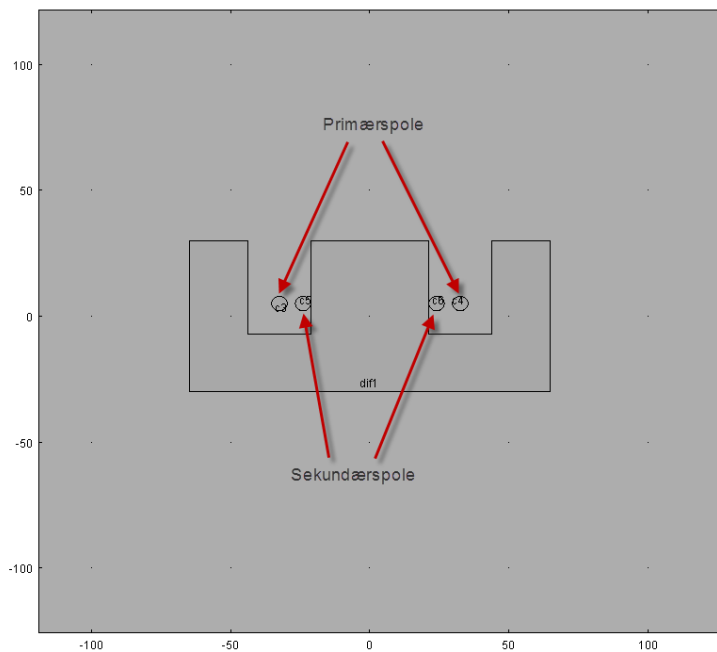


Figur 18 viser geometrien til jernkjerne og spoler for den "ikke-optimale" jernkjernen.

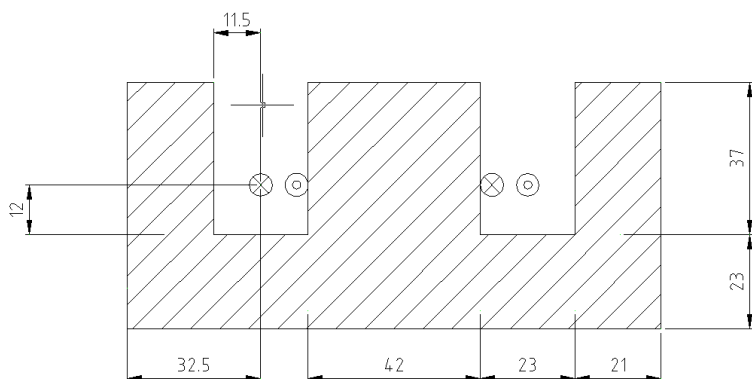


Figur 19 viser dimensjonene til den "ikke-optimale" jernkjernen.

Figur 20 under viser geometrien i simuleringsmodellen for den "optimale" jernkjernen. I dette tilfellet er det lagt på mer jernkerne rundt spolene noe som har gjort at primærspolen har kommet nærmere jernkjernen. Man kan bemerke seg i Figur 21 som viser detaljmålene for jernkjernen at avstanden mellom primærspolen og jernkjernen er 10mm. Radiusen på kabelen er 2,8mm det vil si at avstanden mellom jernkjernen og primærspolen for den "ikke-optimale" utformingen var ca. 22mm.



Figur 20 viser geometrien til jernkjerne og spoler for den "optimale" jernkjernen.



Figur 21 viser dimensjonene til den "optimale" jernkjernen.

Et mer detaljert oppsett i Comsol Multiphysics er vist i vedlegg A.

8.5 Valg av strømforsyning og frekvens

Et induktivt overføringsystem opererer i følge [20, s16] normalt mellom 10 kHz-40kHz. Eksempelvis opererer "Igus Invis Power" [16] som er et kommersielt system på en frekvens på 20 kHz. I dette tilfellet ble modellen simulert med frekvenser fra 10 Hz og helt opp til 1Mhz. Dette er langt utover normal operasjonsfrekvens, men ble gjort for å få effekten av å gå under og over normalen tydelig frem.

8.6 Materialvalg for jernkjerne

Ferrit av typen Epcos N27 [24] ble brukt i simuleringen. Denne typen materiale blir typisk brukt i transformatorer med høy effekt og frekvenser mindre enn 100 kHz.

8.7 Materialeegenskaper

Simuleringene bruker materialeegenskapene relativ permittivitet, relativ permeabilitet og konduktivitet som parametre i likningene. Tabell 3 under lister opp data for materialeegenskapene som ble benyttet i simuleringen.

Tabell 3 viser data for de forskjellige materialene som ble brukt i simuleringmodellen.

	Luft	Sjøvann	Kobber	Jernkjerne, Epcos N27 Ferritt
Relativ permittivitet (ϵ_r)	1	85	1	1
Relativ permeabilitet (μ_r)	1	1	1	2000
Konduktivitet (σ)	0 [S/m]	5 [S/m]	5,998e7 [S/m]	0,333 [S/m]

Materialeegenskapene for luft er hentet fra materialbiblioteket til Comsol Multiphysics og materialeegenskapene for sjøvann er hentet fra et bibliotekseksempel i Comsol Multiphysics. Dette stemmer godt overens med [25, s14].

8.8 Simulert tap i viklinger og jernkjerne

Comsol Multiphysics simulerte tapene i viklingene og jernkjernen ut fra materialeegenskapene oppgitt i kapittelet over. Tapene for viklingene vil sannsynligvis avvike en del i forhold til et system i virkeligheten på grunn av primærspolen har en simulert dybde på 60mm da denne i virkeligheten vil være nærmere 30000mm. Sekundærspolen for den simulerte modellen har kun 1 vikling, i virkeligheten vil denne ha flere noe som vil medføre et større resistiv tap samt

at den simulerte modellen var et snitt av en fullstendig modell noe som gjorde at spolen ikke var fullstendig.

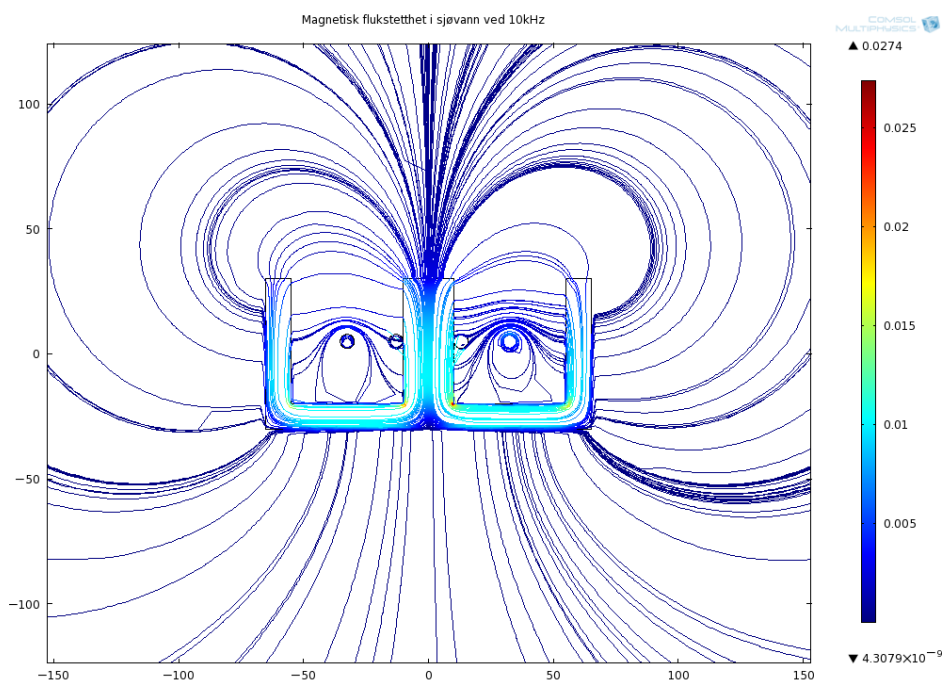
9 Simuleringsresultat

9.1 Simulering med ”ikke-optimal” jernkjerne

Figur 22 under visualiserer de magnetiske feltlinjene hvor fargene representerer selve flukstettheten, referanse gjøres til fargesøylen til høyre i figuren. I figuren kan man også tydelig se effekten av den høypermeable ($\mu_r = 2000$) jernkjernen hvor feltlinjene har en lys blå-grønn farge noe som indikerer en høyere flukstetthet enn de blåfargede linjene ellers.

I Tabell 3 kan man se at sjøvann har samme relative permeabilitet som luft, det vil si at sjøvann og luft har samme magnetiske egenskaper. Det var derfor ikke uventet at jernkjernen, som i luft, ville ha en positiv effekt i sjøvann i forhold til å lede flest mulig av feltlinjene gjennom sekundærspolen. En jernkjerne vil helt klart påvirke den totale virkningsgraden betraktelig i sjøvann, som i luft.

Egenskapene til jernkjernen vil åpenbart nok være den samme uavhengig av omgivelsesmediet, det vil si at en S-formet jernkjerne som beskrevet i artikkel [15] sannsynligvis vil være den mest optimale utformingen.



Figur 22 viser flukstetthet i sjøvann ved 10kHz.

Figur 23 under viser induktans for sekundærspolen som funksjon av frekvensen. Man kan observere ut fra grafen at induktansen for begge mediene følges frem til omtrent 10 kHz. Fra 10 kHz klarer man å skille de forskjellige kurvene. Fra omtrent 10 kHz og opp til omtrent 100 kHz er differansen marginal, men ved omtrent 200kHz øker differansen mellom mediene tilnærmet lik lineært. Legg merke til at grafen i figuren går eksponentielt dette er på grunn av at frekvensskalaen er logaritmisk. Det er verd å legge merke til at dersom man ser på tallverdien ved 1MHz kan differanse selv da betegnes som tilnærmet marginal. Ved 1MHz er induktansen omtrent $2,12 \cdot 10^{-7}H$ for luft og omtrent $2,05 \cdot 10^{-7}H$ for sjøvann, dette utgjør omtrent 3,3 % reduksjon i induktansen for sjøvann i forhold til luft.

Differansen som kommer frem på grafen kan skyldes en reduksjon i den magnetiske fluksen. Reduksjon i den magnetiske fluksen kan forklares med at det dannes virvelstrømmer i sjøvannet som følge av konduktiviteten. Som beskrevet tidligere i rapporten kan det bli generert strømmer av magnetfelt, disse strømmene vil igjen generere egne magnetfelt som motsetter seg det opprinnelige magnetfeltet.

På grunn av at det blir induisert en spenning i sekundærspolen vil det oppstå potensialdifferanser mellom primær- og sekundærspolen. Med referansen til formel (29) og (30) vedrørende kapasitanser mellom ledere kan det forventes at det overføres kapasitive strømmer mellom primær- og sekundærspole. Det vil bli beskrevet mer om dette senere i rapporten hvor det har blitt utført simuleringer uten konduktivitet i sjøvannet for å se på virkning av permittiviteten isolert sett.

Felles reduksjonen i induktansen for begge mediene som viser i Figur 23 under gjenspeiler en del av reduksjonen i induktansen til primærspolen som kan skyldes overflateeffekten i kopperviklingene og nærhetseffekten. Dette kan forklares med at både overflateeffekten og nærhetseffekten blir betraktelig mer fremtredende ved økt frekvens og vil gi et betydelig bidrag til AC-resistans.

Felles reduksjonen i induktansen kan forklares teoretisk med at primærspolen i simuleringsmodellen blir forsynt fra en konstant strømkilde med en gitt frekvens og amplitudeverdi. En endring i strømmen vil indusere en spenning i primærspolen som uttrykkes som følgende hvor R_m er tap i jernkjernen som er neglisjert i dette tilfellet:

$$V_1 = RI_1 + j\omega L_1 I_1 \quad (31)$$

Og ved å snu på formelen med hensyn på primærinduktans får man følgende:

$$L_1 = \frac{V_1 - RI_1}{j\omega I_1} \quad (32)$$

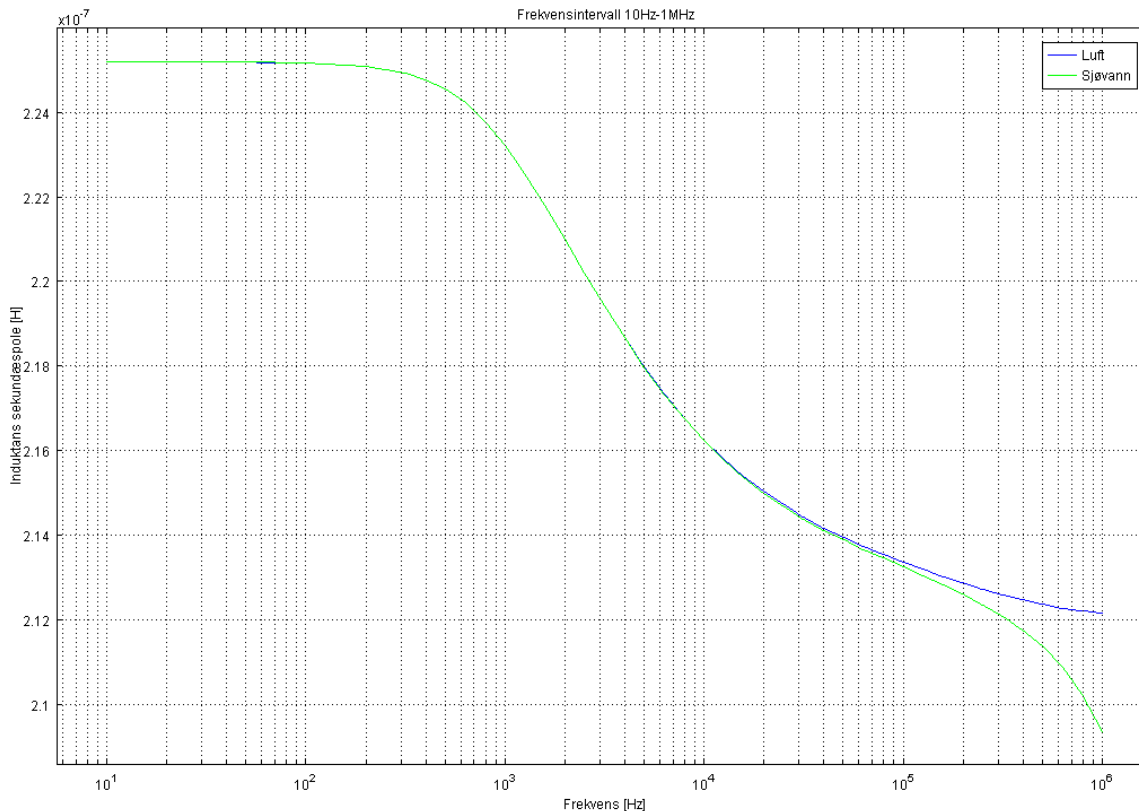
Ut fra formelen over kan man se at en økning i resistansen R vil gi et bidrag til reduksjon i primærinduktansen L_1 . Ved å snu på formel (11) med hensyn på gjensidig induktans får man:

$$M = L_1 - L_a \quad (33)$$

Ut fra formelen over kan man se at en reduksjon i primærinduktansen L_1 vil gi en reduksjon i den gjensidige induktansen. Videre ved å sette inn uttrykket for M i formel (33) inn i formel (12) og uttrykke formelen med hensyn på sekundærinduktansen får man:

$$L_2 = L_b + L_1 - L_a \quad (34)$$

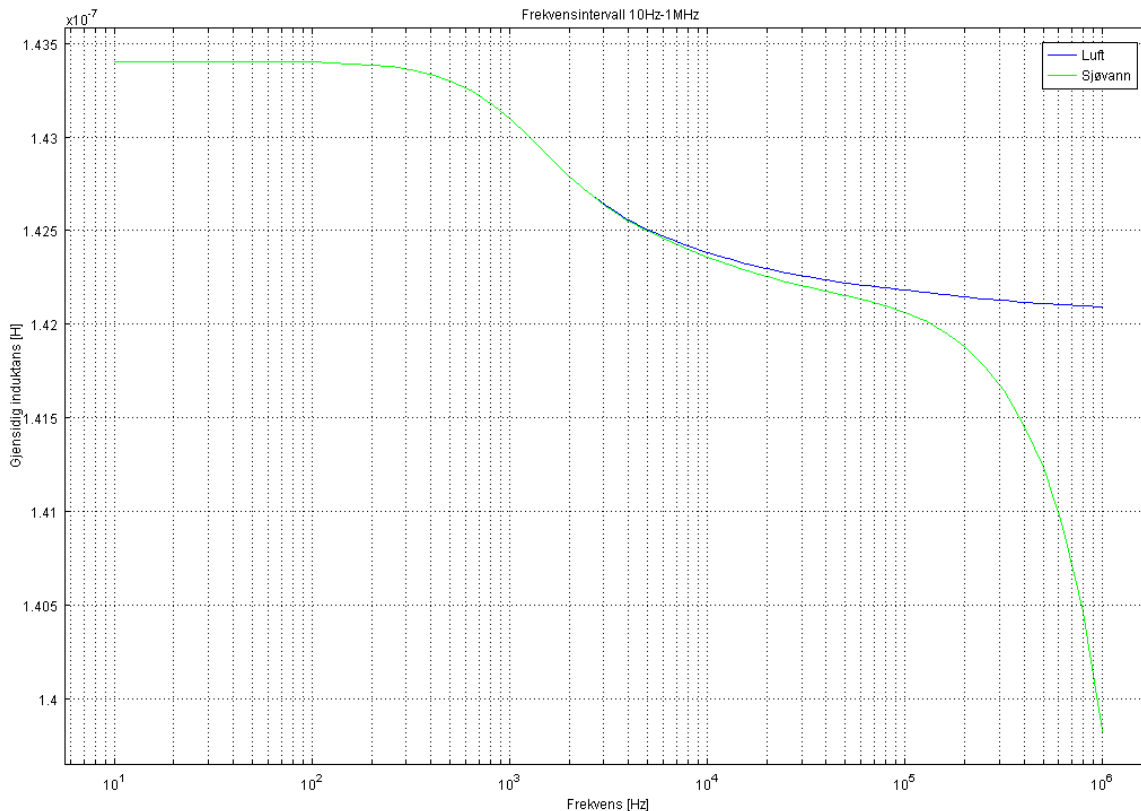
Formelen over kobler sekundærinduktansen sammen med primærinduktansen og viser at en reduksjon i primærinduktansen kan gi en reduksjon i sekundærinduktansen.



Figur 23 viser den totale induktansen for sekundærspolen som funksjon av frekvens for både luft og sjøvann.

Figur 24 under viser den gjensidige induktansen for både luft og sjøvann som funksjon av frekvens. Frem til omtrent 3kHz er det i dette tilfellet også vanskelig å se kurven for luft på grunn av at begge kurvene omfavner hverandre, men fra og med forannevnte frekvens begynner det å bli mulig å skille kurvene. Fra omtrent 3kHz og omtrent til 100kHz er differansen marginal. Fra og med omtrent 100kHz og oppover faller den gjensidige induktansen lineært i dette tilfellet også i forhold til luft. Det er verd å legge merke til også her at differansen selv ved 1MHz kan betegnes som marginal. Ved 1MHz har man at den gjensidige induktansen er omtrent $1,42 \cdot 10^{-7} H$ for luft og omtrent $1,39 \cdot 10^{-7} H$ for sjøvann. Dette utgjør en reduksjon i den gjensidige induktansen på omtrent 2,2 %.

I dette tilfellet også kan differansen mellom sjøvann og luft skyldes virvelstrømmer som følge av konduktiviteten i sjøvannet.



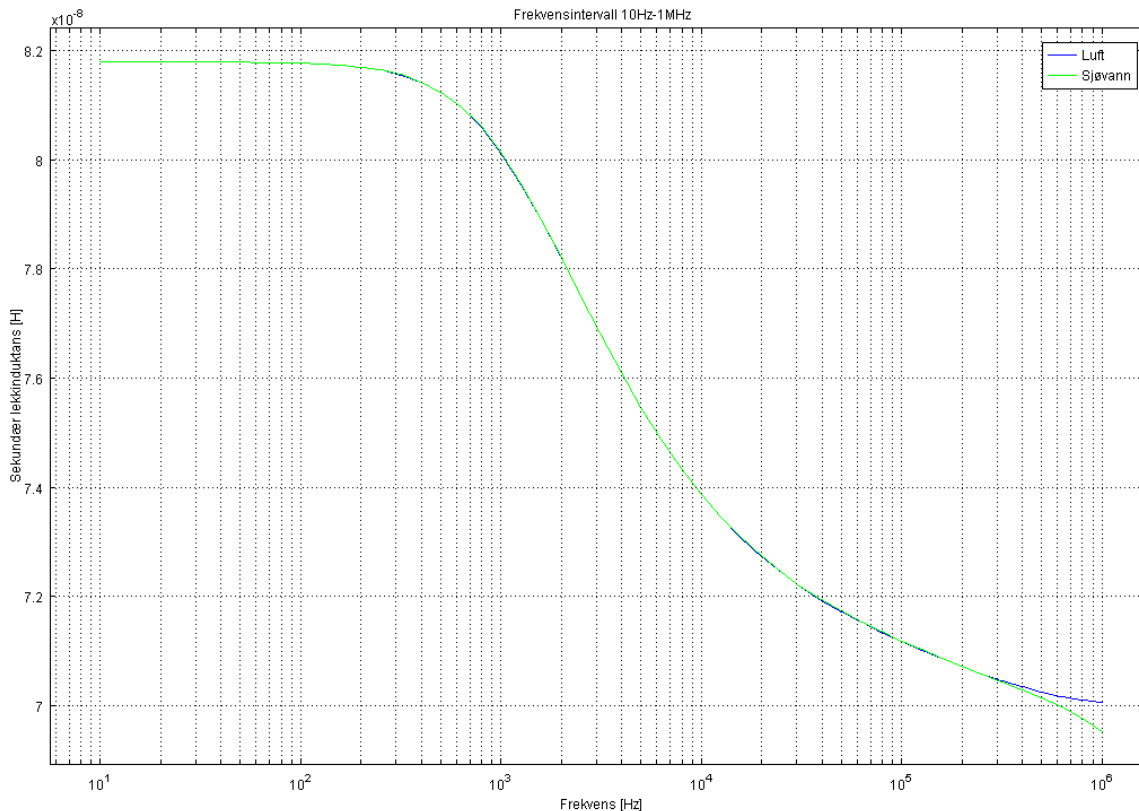
Figur 24 viser den gjensidige induktansen som funksjon av frekvensen for både luft og sjøvann

Ut fra Figur 25 under kan man observere at lekkinduktansen for luft og sjøvann følges frem til omtrent 300kHz deretter økes differansen mellom luft og sjøvann lineært.

Ved å sammenlikne kurven som viser den totale sekundærinduktansen med kurven for gjensidig induktans ved rundt 1kHz kan man observere at sekundærinduktansen avtar mer enn den gjensidige induktansen. Man ville umiddelbart tro at lekkinduktansen økte ved økt frekvens, men reduksjonen kan forklares med at tapet som skyldes overflateeffekten og nærhetseffekten kun bidrar til reduksjon i den totale primærinduktansen L_1 og sekundærinduktansen L_2 . Ut fra formlene for lekkinduktansene L_a (10) og L_b (11) kan man se at en større reduksjon i primær- og sekundærinduktans i forhold til den gjensidige induktansen vil resultere i redusert lekkinduktans.

I kapittel 6.4 ble det skrevet om koblingsfaktoren κ_ϕ som er et kvalitetsmål på hvor godt mottakeren klarer og nyttegjør seg av den gjensidige induktansen. Ut fra formel (27) kan man se at en reduksjon i lekkinduktansen som er vist vil øke denne kvalitetsfaktoren.

Differansen mellom induktansen for sjøvann og induktansen for luft kan muligens skyldes virvelstrømstapet i sjøvannet i dette tilfellet også.



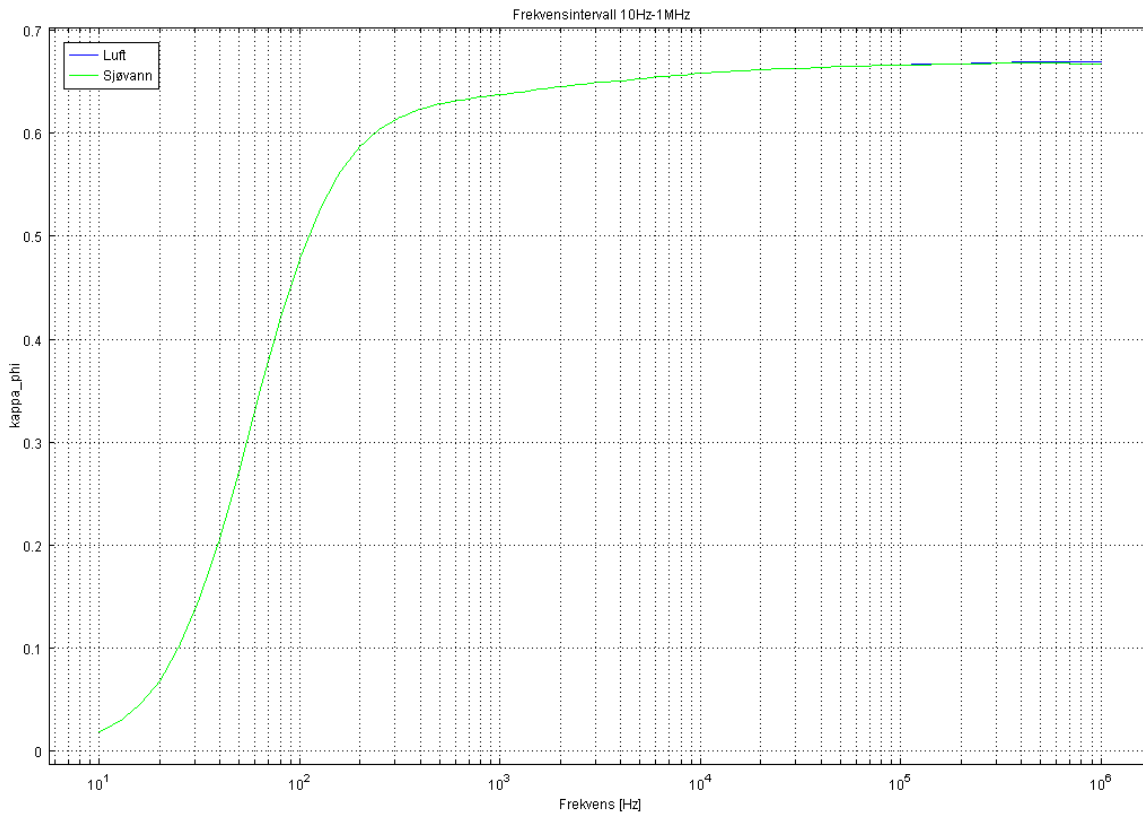
Figur 25 viser lekkinduktans for sekundærspolen for både luft og sjøvann.

Et system som benytter en E-formet jernkjerne har i følge [22, s3] normalt en koblingsfaktor κ_{ϕ} på rundt 0,65. Et induktivt overføringssystem kjøres normalt på en frekvens rundt 20kHz. Det vil si at man kan se ut fra kurven i Figur 26 under at en koblingsfaktor på rundt 0,65 stemmer godt overens med det simulerte systemet. Ved å ekstrahere koblingsfaktoren fra resultatene ved rundt 20kHz fikk man en koblingsfaktor på 0,662.

Ved omtrent 100kHz kan man i Figur 26 så vidt se at koblingsfaktoren for sjøvann avtar marginalt med økt frekvens i forhold til luft. Den marginale differansen som resultatene viser er som forventet. Dette forklares med at koblingsfaktoren er definert som forholdet mellom den gjensidige induktansen og primærinduktansen, det vil si at faktoren tar ikke hensyn til differansen for verken primærinduktans eller gjensidig induktans. Den marginale differansen man kan se skyldes sannsynligvis differansen mellom luft og sjøvann for lekkinduktansen.

I Figur 26 ser man også effekten av å øke frekvensen. Denne er veldig stor i det nedre frekvensområdet hvor økningen avtar betraktelig rundt 300Hz. En økning i frekvensen fra ca. 300Hz opp til 1MHz gir en økning i koblingsfaktoren på omtrent 0,05 for begge mediene.

Som nevnt i kapittel 8.5 opererer vanligvis et induktivt overføringssystem på frekvenser mellom 10kHz og 40kHz. Man kan se i kurven for koblingsfaktoren at et induktivt overføringssystem vil vanligvis ligge i det øvre området av koblingsfaktoren.

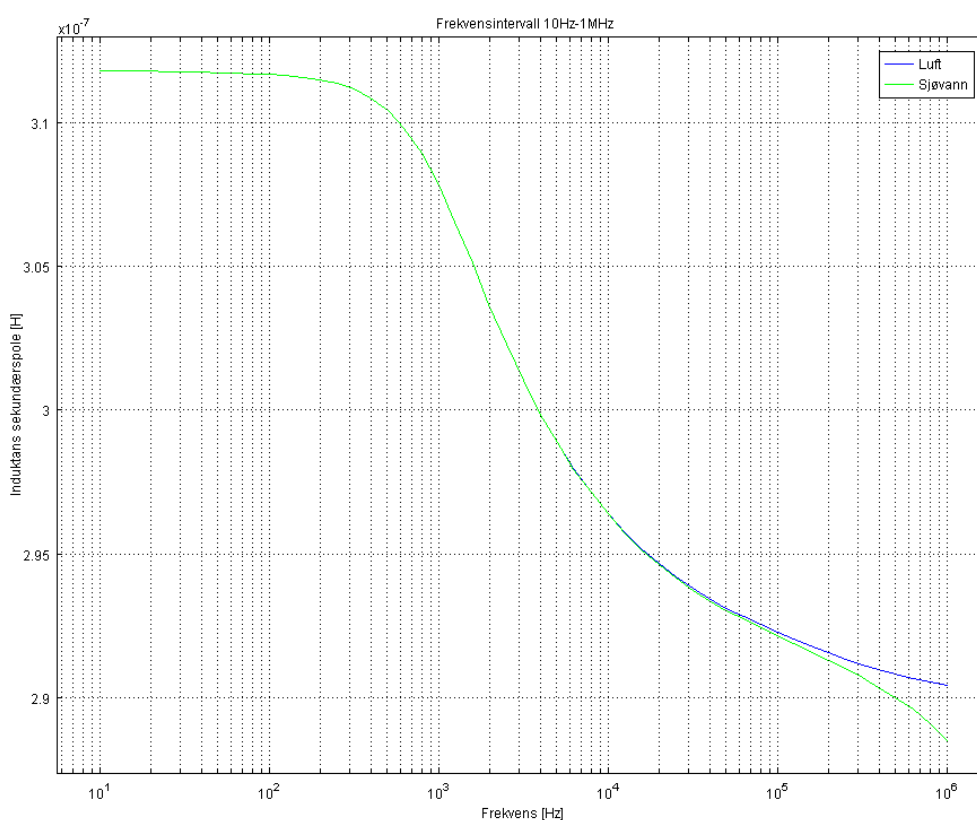


Figur 26 viser koblingsfaktoren κ_ϕ som funksjon av frekvens for systemet simulert i både luft og sjøvann.

9.2 Simulering med "optimal" jernkjerne

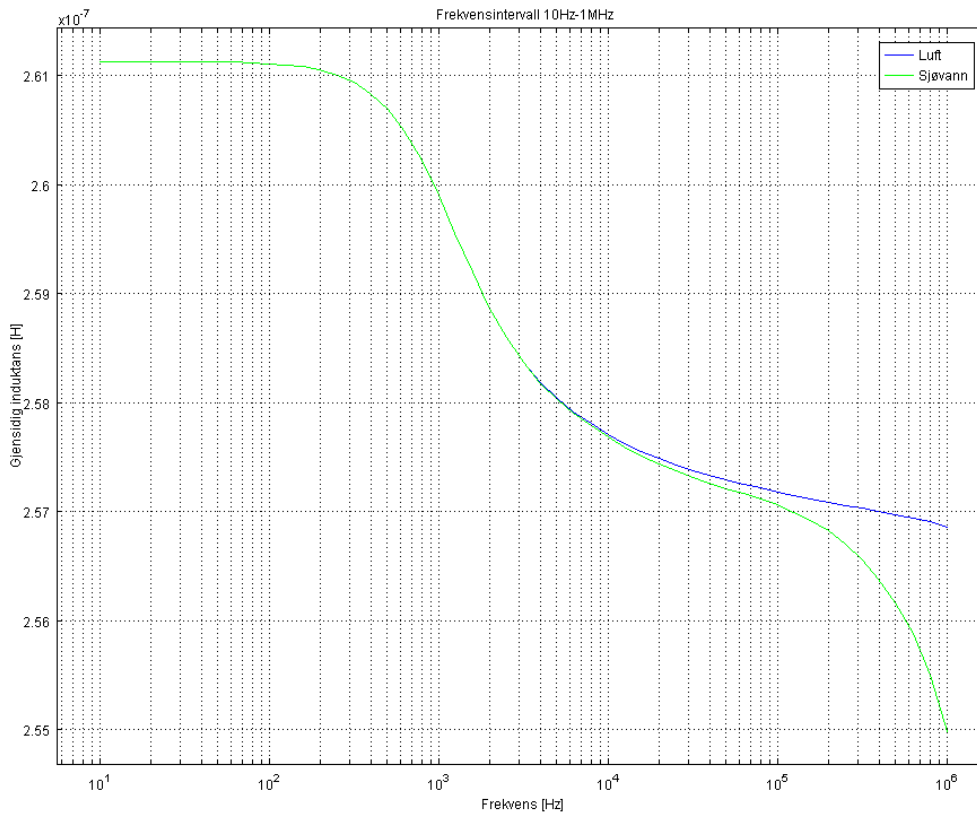
Videre ble det simulert med en mer "optimal" jernkjerne hvor det ble lagt på mer jern noe som gav større volum av jernkjernen og redusert avstand mellom jernkjerne og primærspole.

Ved å sammenligne sekundærinduktansen for en "ikke-optimal" jernkjerne i Figur 23 med sekundærinduktansen for en "optimal" jernkjerne i Figur 27 kan man se samme trenden. I begge tilfellene kan man betegne differansen mellom luft og sjøvann som tilnærmet marginale selv ved 1MHz. I Figur 27 skal man legge merke til induktansen har økt betraktelig. Ved 20kHz som er normalt arbeidsområde var sekundærinduktansen på $2,15 \cdot 10^{-7}H$ for den "ikke-optimale" jernkjernen og $2,95 \cdot 10^{-7}H$ for den "optimale", dette er en økning på omtrent 37 %. Dette kan skyldes at den magnetiske motstanden er blitt redusert på grunn av at jernkjernen har erstattet en del av luften rundt primærspolen. Jfr. kapittel 5.3 vil en reduksjon i reluktansen øke den magnetiske fluksen som igjen vil øke den gjensidige induktansen.



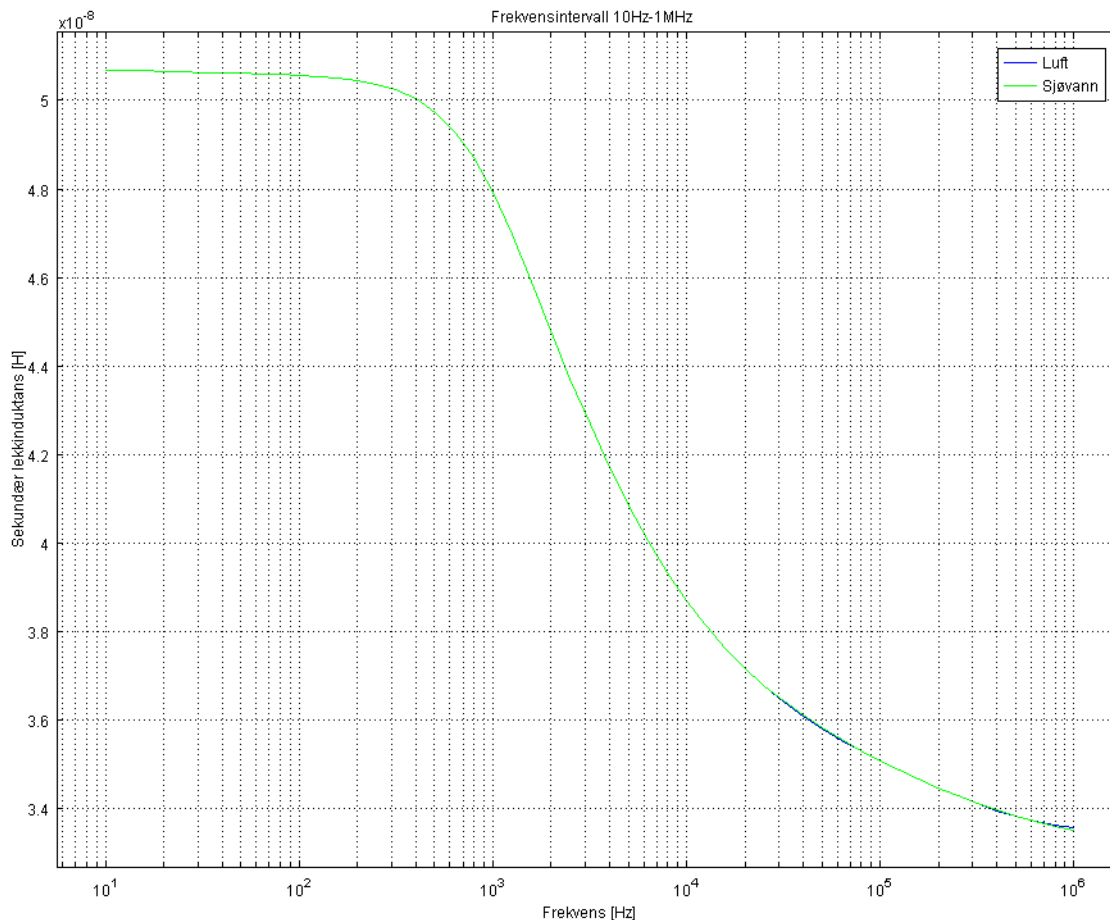
Figur 27 viser sekundærinduktans som funksjon av frekvensen for "optimal" jernkjerne.

I Figur 28 under kan man se den gjensidige induktansen for en "optimal" jernkjerne. Ved å sammenligne den gjensidige induktansen for en "ikke-optimal" jernkjerne vist i Figur 24 kan man også i dette tilfellet se at trenden i begge tilfellene er tilnærmet lik. Man skal også i dette tilfellet legge merke til at den gjensidige induktansen for den "optimale" jernkjernen har økt betraktelig. For den "ikke-optimale" ved 20kHz fikk man en gjensidig induktans på omtrent $1,42 \cdot 10^{-7}H$ og omtrent $2,57 \cdot 10^{-7}H$ for den "optimale" dette vil si en økning på mer enn 80 %. I dette tilfellet også kan økningen skyldes reduksjonen i reluktansen som følge av mer jern rundt primærspolen.



Figur 28 viser gjensidig induktans som funksjon av frekvensen for en "optimal" jernkjerne.

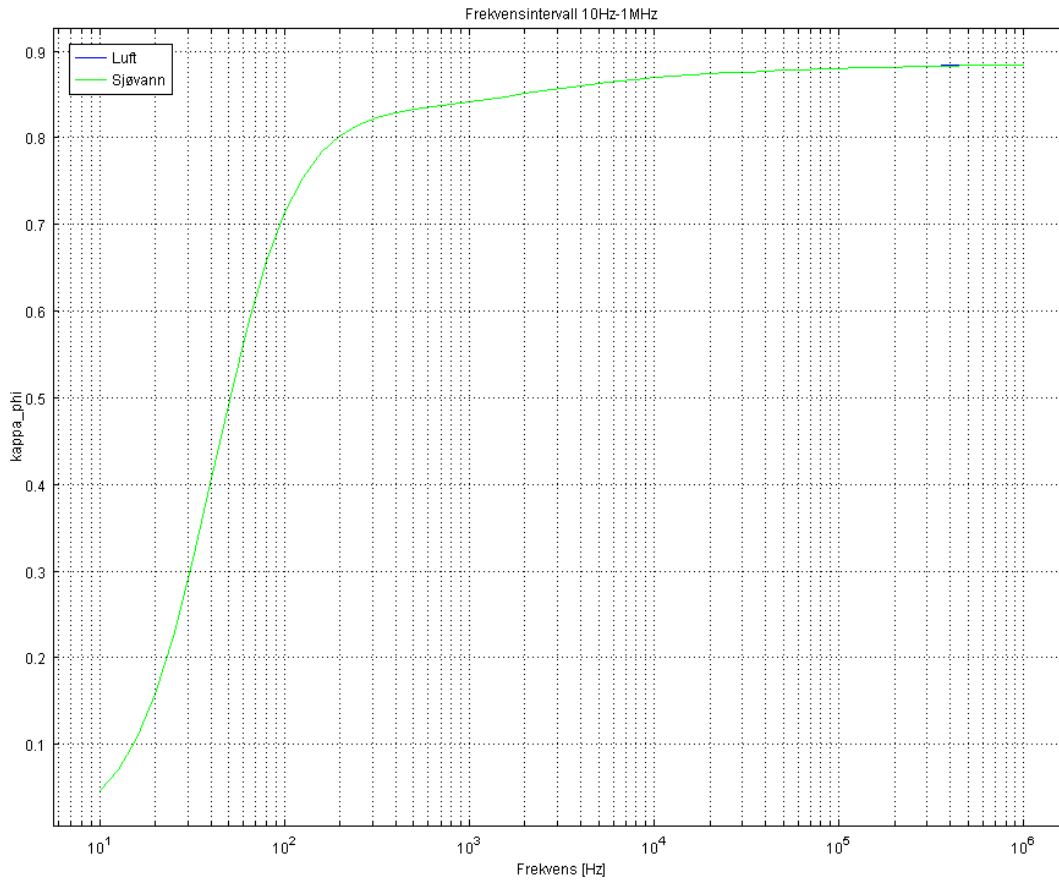
Det at sekundærinduktansen har økt 37 % og den gjensidige induktansen 80 % tilsier ut fra formel (12) at en reduksjon i den sekundære lekkinduktansen kan forventes. Dette kommer tydelig frem ved å sammenligne lekkinduktansen for den "ikke-optimale" vist i Figur 25 med lekkinduktansen for den "optimale" vist i Figur 29 under. Ved 20kHz viser Figur 25 en lekkinduktans på omtrent $7,30 \cdot 10^{-8}H$ og Figur 29 en lekkinduktans på $3,70 \cdot 10^{-8}H$ dette er en reduksjon på nesten 50 %.



Figur 29 viser sekundær lekkinduktans som funksjons av frekvensen for en "optimal" jernkjerne.

I formel (27) hadde man et uttrykk for koblingsfaktoren κ_ϕ som viste en reduksjon i den sekundære lekkinduktansen. I Figur 30 under har man at koblingsfaktoren ved 20kHz har økt fra omtrent 0,66 til 0,88 noe som sannsynligvis skyldes reduksjonen i lekkinduktansen vist over. Økningen tilsvarer en økning på over 33 %.

I kapittel 9.1 ble det presentert en artikkel som hevdet at et system med E-formet jernkjerne normalt har en koblingsfaktor på omtrent 0,65. Grunnen til at resultatene har en bedre koblingsfaktor enn det som er normalt kan skyldes at man kun har simulert systemet med 1 sekundærvikling. Flere viklinger vil øke tapet som muligens vil gi et negativt utslag på koblingsfaktoren. En annen forklaring kan være at jernkjernen i dette tilfellet omslutter mer av primærspolen enn det som er vanlig for et induktivt overføringssystem med E-formet jernkjerne.



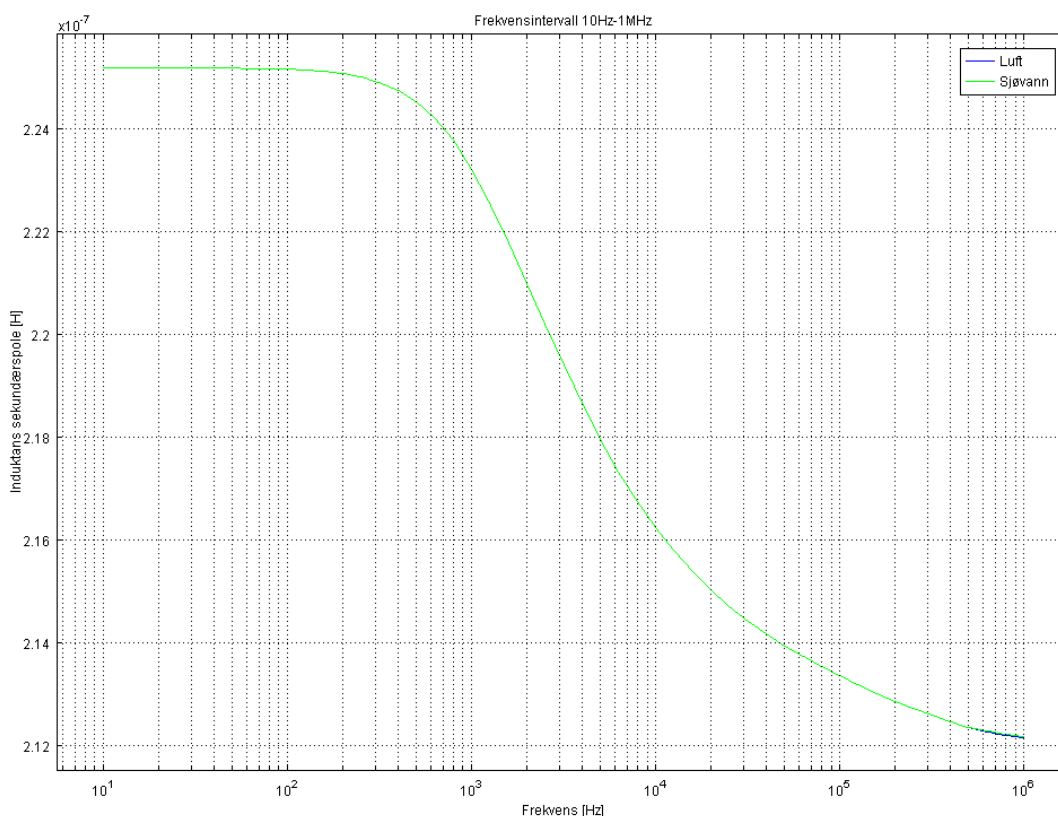
Figur 30 viser koblingsfaktoren κ_ϕ som funksjon av frekvensen for en "optimal" jernkjerne.

9.3 Sjøvann uten konduktivitet

For å se på hvilken påvirkning permittiviteten for sjøvannet hadde for resultatene isolert sett ble det gjort en simulering hvor konduktiviteten for sjøvann ble fjernet. I dette tilfellet ble det simulert med den ”ikke-optimale” jernkjernen for å ha mer sjøvann mellom primærspolen og jernkjernen.

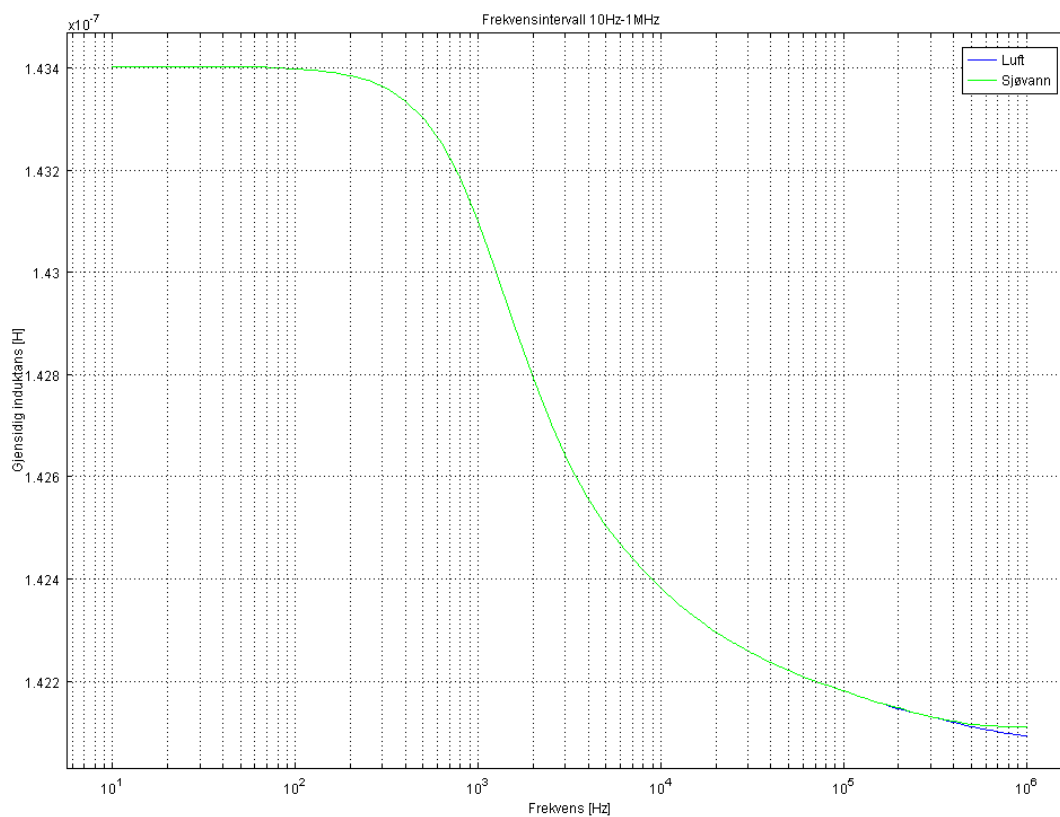
I Figur 31 under kan man se at sekundærinduktans for luft og for sjøvann er identiske med unntak av frekvenser over 600kHz. Ved 600kHz og oppover ser man en marginal forskjell. Ved å studere nøye i det øvre frekvensområdet kan man se at sekundærinduktans for sjøvann er høyere enn for luft, dette skyldes sannsynligvis kapasitive lekkstrømmer fra primærspolen til sekundærspolen. Man bør legge merke til at simuleringmodellen kun simulerer primærspole i det området som er dekket av sekundærspolen. I praksis vil man sannsynligvis få kapasitive overføringer mellom lederne for primærspolen som vil bidra til tap. I og med at den simulerte primærspolen er på 60mm og et system i praksis vil være nærmere 30 000mm er det grunn til å forvente at de kapasitive tapene vil overgå de kapasitive bidragene betydelig.

Resultatene i figuren er med på å underbygge sannsynlighetene gjort tidligere om at de induktive tapene skyldes virvelstrømstap som følge av konduktiviteten i sjøvannet. Dette forklares med at differansen som man så hvor induktansen var lavere for sjøvann enn for luft, er borte nå som konduktiviteten i sjøvann er fjernet.



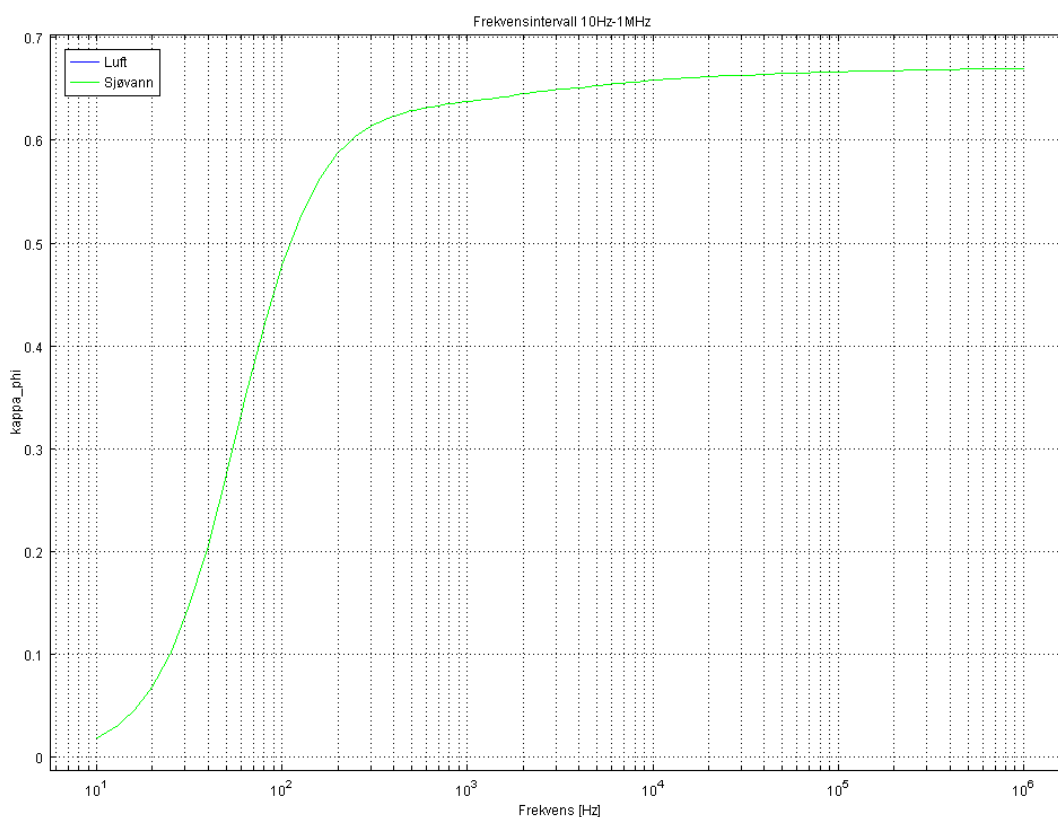
Figur 31 viser induktans for sekundærspole ved simulering av sjøvann uten konduktivitet.

Figur 32 under viser det samme som for sekundærinduktansen hvor man tydeligere kan se det at den gjensidige induktansen for sjøvann er høyere enn for luft. Dette kan også i dette tilfellet skyldes kapasitive lekkstrømmene.



Figur 32 viser den gjensidige induktansen ved simulering av sjøvann uten konduktivitet.

Koblingsfaktoren i Figur 33 under viser ingen differanse mellom luft og sjøvann noe som også her er forventet med forankring i samme begrunnelse som tidligere.



Figur 33 viser koblingsfaktoren som funksjon av frekvens ved simulering av luft sammenlignet med sjøvann uten konduktivitet.

9.4 Oppsummering

Simuleringene viser at forskjellen mellom sjøvann og luft for både gjensidig induktans, sekundærinduktans og sekundær lekkinduktans kan betegnes som marginale. Frem til omtrent 100kHz var det vanskelig å se forskjell mellom disse to mediene. Over omtrent 100kHz og frem til høyeste simulerte frekvens som var 1MHz økte differansene lineært, men kunne allikevel betegnes som marginale.

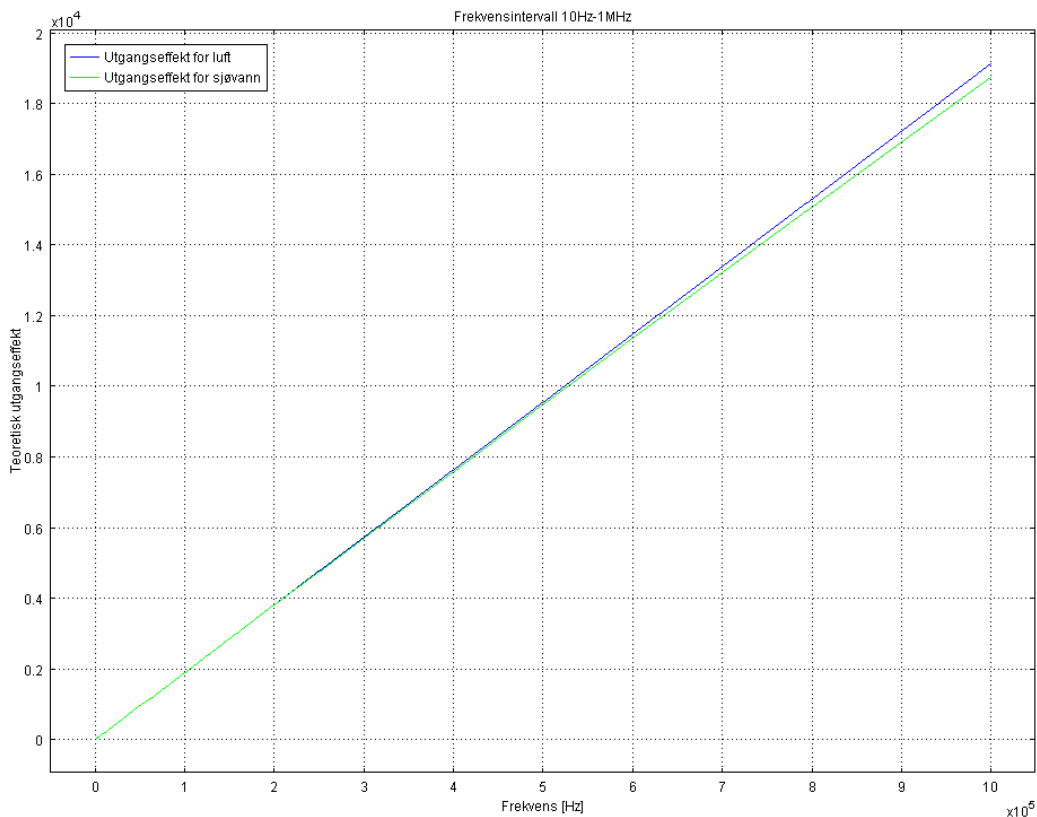
Simuleringene viste også at jernkjernen rundt primærspolen kunne ha betydelig effekt. Simuleringen viste en økt gjensidig induktans på opp til 80 % ved å fylle opp mer jernkjerne rundt primærspolen.

I simuleringen som ble gjort uten konduktivitet viste det seg at gjensidig induktans for sjøvann var høyere enn for luft i det øvre frekvensområdet, omtrent over 500kHz. Dette kan skyldes kapasitive lekkstrømmer mellom primærspole og sekundærspole som følge av permittiviteten i sjøvann.

10 Beregnet effektuttak

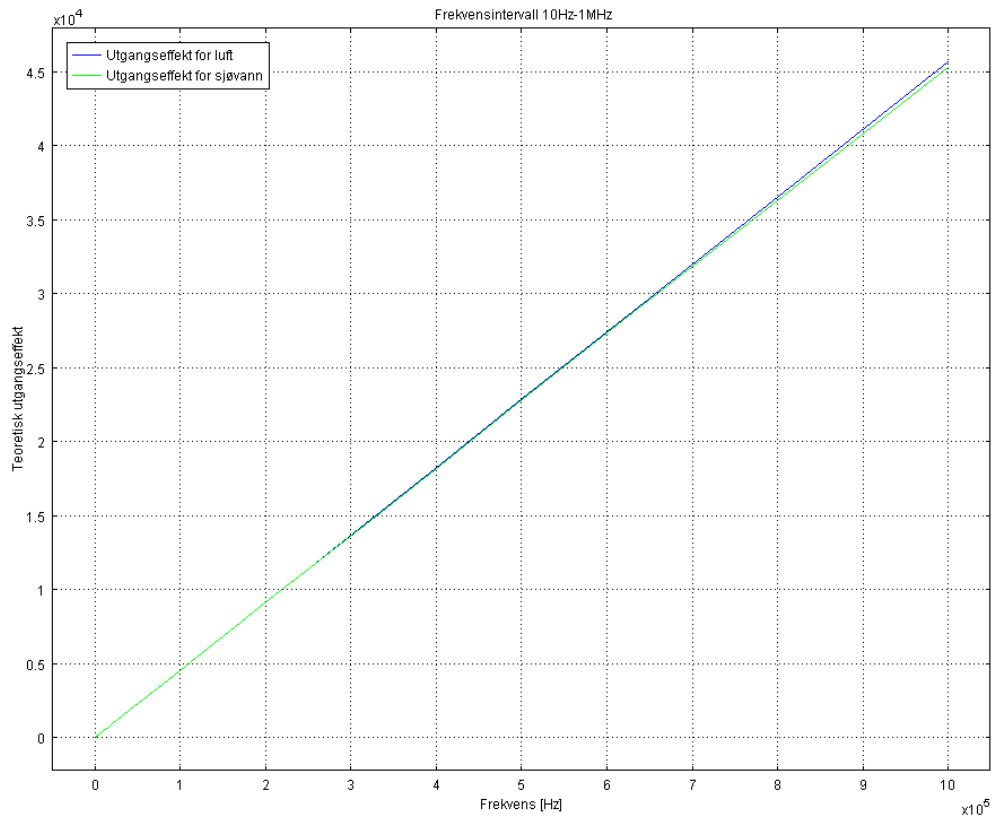
For å se på forskjellene oppgitt i effekt ble teoretisk effekt beregnet ut fra formel (22) og med kvalitetsfaktor $Q = 5$. I simuleringsmodellen ble primærspolen forsynt fra en konstant strømkilde på 80A. Utgangseffekten ble beregnet ut fra en simulering for både ”ikke-optimal” og ”optimal” jernkjerne.

I Figur 34 under kan man se utgangseffekten som funksjon av frekvensen. Resultatene viser at differansen mellom utgangseffekt for luft og for sjøvann ikke er synlig før frekvensen går over 200kHz. Differansen vil øke lineært med frekvensen, men selv opp til og med 1MHz vil den være marginal.



Figur 34 viser teoretisk utgangseffekt som funksjon av frekvensen for den ”ikke-optimale” jernkjernen.

Figur 35 under viser effekten som funksjon av frekvensen for den ”optimale” jernkjernen. Sammenlignet med utgangseffekten vist Figur 34 kan man se en betraktelig økning. Ved 100kHz viser Figur 34 en utgangseffekt på omtrent 2kW og Figur 35 omtrent 5kW. Dette er en betraktelig økning som tilsvarer 150 %. En økning i effekten er ikke uventet da man kan se ut fra formel (18) at en økning i den gjensidige induktansen vil gi en økning i åpen kretsspennning som igjen i følge formel (17) vil øke utgangseffekten. Det samme gjelder for kortslutningsstrømmen i formel (21) hvor en økning i den gjensidige induktansen i forhold til sekundærinduktansen vil øke kortslutningsstrømmen. Dette vil igjen i følge formel (21) øke utgangseffekten.



Figur 35 viser teoretisk utgangseffekt som funksjon av frekvensen for den "optimale" jernkjernen.

11 Designkriterier

11.1 Ytre miljø

Et av hovedkriteriene til manipulatorarmen er som tidligere nevnt at den skal kunne være nede på havbunnen permanent og i utgangspunktet uten behov for – eller med svært lange intervaller for - reparasjon og vedlikehold. Dette innfører flere utfordringer i forhold til miljøet den skal stå i, jfr. kapitel 3 ”Tekniske utfordringer ved havbunnsmiljøet”, hvor man har høyt trykk, høy korrosjonsfaktor og biologisk vekst. Finmekaniske komponenter som lys, kamera, spyledyse og elektriske/hydrauliske koblinger vil være mest utsatt.

Med bakgrunn i at utstyret skal installeres permanent på havbunnen vil det være gyldig å ta utgangspunkt i levetids- og omgivelseskriteriene til et havbunnsjuletre. Med utgangspunkt i Aker Solutions dypvannsjuletre [18] bør systemet designes for 25 års levetid og 3000 meter som tilsvarer omtrent 300 bars trykk.

I og med at utstyret ikke er direkte i kontakt med prosessmedier som kan gi store termiske påkjenninger er det nærliggende å ta utgangspunkt i ISO-standarden for undervannsutstyr. Utstyret bør derfor designes for temperaturer -10°C til $+70^{\circ}\text{C}$ ref [19. s9].

Dersom utstyret skal plasseres på grunnere områder, omtrent under 200 meter, må det tas hensyn til store forekomster av biologisk vekst. Dette kan utgjøre en vesentlig faktor i forhold til valg av material. Eksempelvis vil rommet mellom primærspole og sekundærspole for et induktivt overføringsystem være et kritisk område i forhold til biologiske vekster.

11.2 Effektforkbruk

På grunn av mange usikkerhetsfaktorer er det ikke utført detaljberegninger i denne oppgaven i forhold til forventet effektforkbruk. Faktorer som løftekapasitet, hastighet og samhandlinger vil være ledende. Med bakgrunn i [21] som viser et eksempel på en manipulatorarm med effektforkbruk på 1,5 kW er det grunn til å tro at $\sim 5\text{kW}$, inklusive kraft til fremdriftssystem og 15 % tap i den elektriske overføring, kan brukes som utgangspunkt for diskusjon. I forhold til tap gjøres det referanse til eksempelet til ”The University of Auckland” [11] hvor systemet hadde 85 % virkningsgrad.

12 Diskusjon

12.1 Metodiske utfordringer

FEM-analyseverktøy ("Finite Element Method") som Comsol Multiphysics AC/DC er uten tvil et kraftig verktøy for å analysere elektromagnetiske system som induktivt overføringssystem i dette tilfellet. Når en modell først er oppe er det enkelt å "leke" med systemet for så innen relativt kort tid å kunne se effekten av endringene.

En av de store utfordringene i dette tilfellet var å definere systemet i en simuleringsmodell innenfor verktøyets rammer. For et 2D-simuleringstilfelle var det ikke mulig å hente ut parametrene gjensidig induktans, induktans, lekkinduktans, koblingsfaktor og utgangseffekt direkte. Formler uttrykt i forhold til blant annet induert åpenkretsspennning og kortslutningsstrøm måtte utledes og implementeres i modellen.

En annen utfordring var å simulere kortsluttet utgang i samme simulering som åpenkrets. Dette måtte gjøres på grunn av at data fra disse 2 tilfellene skulle presenteres i samme graf. I tillegg skulle data kryssutveksles mellom kortsluttet og åpenkrets tilfellet.

12.2 Usikkerhet

Kapittel 8.3 diskuterte antakelsen om at egenskapene for sjøvann er konstante. Sjøen kan ha ulikt saltinnhold ved ulike dybder og kan muligens variere rent geografisk også. Dette vil påvirke konduktiviteten til sjøvannet noe som muligens kan gi ulike resultat. Systemet ble simulert med en konduktivitet som er relativt normalt i sjøvann noe som viste i resultatene hadde marginal innflytelse på den induktive overføringen.

Også beskrevet i samme kapittel var at primærspolen ble simulert med en betraktelig kortere lengde enn det som den vil være i praksis. Den delen av primærspolen som ikke blir dekket av sekundærspolen ble ikke simulert, det kan imidlertid forventes at det vil gå noen kapasitive lekkstrømmer internt i dette området. Det resistive tapet kan for primærspolen også forventes å være større for et system i praksis.

For å få et inntrykk av omfanget til de kapasitive lekkstrømmene internt i primærspolen kan det gjøres et enkelt regneeksempel med formel (29). Man antar en sløyfe på 30 meter. I simuleringsmodellen hadde man en avstand på 0,065 meter mellom lederne og en kabelradius på $2,8 \cdot 10^{-3}$ meter. Ved å sette inn i formel (29) får man:

$$C = \frac{2\pi \cdot 8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 85 \cdot 30}{\ln \left[\frac{0,065}{2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}} + \sqrt{\left(\frac{0,065}{2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}} \right)^2 - 1} \right]} = 4,5 \cdot 10^{-8} F$$

Ut fra simuleringsresultatene kunne man lese ut 2,6V på primærspolen ved 20kHz for tilfellet med den "optimale" jernkjernen. Ved å sette inn i formel (30) får man:

$$I = j20 \cdot 10^3 \cdot 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2,6 = j2,34mA$$

Anslagene viser at det man sannsynligvis har med veldig små strømmer å gjøre i forhold til sammenhengen.

Sekundærspolen ble simulert med kun 1 vikling, i praksis vil denne ha flere, noe som i dette tilfellet også vil gi et større resistivt tap. På den annen side vil flere viklinger i sekundærspolen gi den fordel at den effektive fluks kan multipliseres med antall viklinger.

12.3 Videre arbeid

Videre arbeid bør se nærmere på omfanget av kapasitive lekkstrømmer mellom lederne for primærspolen. Modellen ble simulert med lengde på primærspolen på 60mm, men i virkeligheten er denne nærmere 30 000mm noe som vil gi større kapasitans mellom lederne.

Før og under utvikling av et fullstendig system bør man ha et spesielt fokus på følgende:

- Den mekaniske utformingen av skinnesystemet, noe som vil ha betydelig innvirkning på valg av utforming av jernkjerne
- Optimalisering av jernkjerne
- Beskyttelsesmaterialet med hensyn til vanninntrengning, begroing og påvirkning på det magnetiske feltet

I simuleringene ble det vist at det skjedde en kapasitiv overføring av strøm mellom primær- og sekundærspole som følge av permittiviteten i sjøvannet. Videre arbeid bør derfor se nærmere på om et kapasitivt overføringsprinsipp vil kunne være aktuelt. Et sãnt system vil kunne dra nytte av egenskapene til sjøvann, det refereres da til permittiviteten. Et kapasitivt system vil sannsynligvis kunne være enklere og mer kompakt da det i prinsippet kun består av 2 plater hvor sjøvannet fungerer som dielektrikum.

13 Konklusjon

Et induktivt kraftoverføringssystem opererer vanligvis rundt 20kHz. Simuleringsresultatene viser ingen differanse mellom luft og sjøvann for den induktive overføringen under 100kHz. Over 100kHz var disse differansen å betegne som marginale. På bakgrunn av dette kan det antas at et induktivt overføringssystem for bruk i sjøvann under normal operasjonsfrekvens kan forventes å ha opp mot samme virkningsgrad som for et system på land, det vil si rundt 85 %.

Differansene i den induktive overføringen som ble observert skyldes sannsynligvis virvelstrømstap som følge av konduktiviteten i sjøvann.

Ved å omslutte mest mulig av primærspolen kan man oppnå betydelig økning i utgangseffekten. Simuleringsresultatene viser at denne kan økes 150 % bare ved å redusere avstanden mellom primærspole og jernkjerne fra 22mm til 10mm.

For et system som opererer på havbunnen vil sannsynligvis de materialtekniske utfordringene i forhold til vanninntrengning, begroing og korrosjon være det mest utfordrende å løse. I forhold til den elektromagnetiske delen for induktive kraftoverføringssystem er det flere artikler som presenterer vitenskapelig arbeid som kan benyttes for et system på havbunnen eksempelvis optimalisering av jernkjerne i forhold til flukskanselleringer i luft.

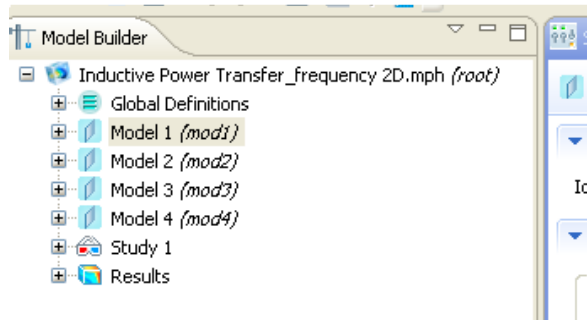
14 Referanser

- (1) Young, Hugh D., Freedman, Roger A., University Physics With Modern Physics, 10th edition.
- (2) ISO 13628-1 Design and Operation of Subsea Production Systems – General Requirements and Recommendations, 1th edition.
- (3) Einar Bardal, Korrosjon og korrosjonsvern, Trondheim, 2001
- (4) Sunde, G., Sundt, Y., Concept Review - Subsea Maintenance and Monitoring System, OTG SOL-60150, rev. 05, 2010.
- (5) A. M., Abdeen, Electric conduction In Ni-Zn ferrites, Physics Department, Faculty of Science, Tanta University, journal of Magnetism and Magnetic Materials 185, 1998..
- (6) Dag Bjerketvedt og Arne Pedersen, Grunnleggende biologi og miljølære, Oslo, 4 utgave 1996.
- (7) Artsdatabanken, Marine miljø. Tilgjengelig fra: <http://www.artsdatabanken.no/Article.aspx?m=269&amid=8241>. [Nedlastet 22/2-11] 2010.
- (8) Statoil, Kort om havbunnsanlegg. Tilgjengelig fra: <http://www.statoil.com/no/TechnologyInnovation/FieldDevelopment/AboutSubsea/Pages/KortOmHavbunnsanlegg.aspx>. [Nedlastet 5/6-11].
- (9) Van Den Steen, L., Shell Research BV, Conductive Inductive and Capacitive Subsea Connectors – Horses for Courses, volume 22 Subsea Control and Data Acquisition 47-65, April 4-5, 1990. Tilgjengelig fra: www.onepetro.org.
- (10) Dalva, M., Thorsen, O. V., Elektriske maskiner og omformere, Gyldendal Norsk Forlag, 1. utgave, 1. opplag 2001.
- (11) Covic, G., Boys, J., The University of Auckland, presentasjon fra seminar September 2010, Inductive Power Transfer (IPT) Powering our future. Tilgjengelig fra: <http://ceme.ece.illinois.edu/seminars.html>. [Nedlastet 7/2-11].
- (12) Grant, A. J., Elliott, S. R., Grant, A. Covic, John, T. B., Multiphase Pickups for Large Lateral Tolerance Contactless Power-Transfer System, IEEE Transaction on industrial electronics, vol. 57, no. 5, May 2010.
- (13) Wikipedia, Skin effect. Tilgjengelig fra: http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect. [Nedlastet 12/6-11].
- (14) Arnold Magnetic Technologies, Soft Magnetic Application Guide, Februar 2003, revisjon B. Tilgjengelig fra <http://www.arnoldmagnetics.com/Content1.aspx?id=4948>. [Nedlastet 2/3-11].
- (15) Dariusz, K., Grant, C., John, T. B., The University of Auckland, Faculty of Engineering, An Improved Magnetic Design for Inductively Coupled Power Transfer System Pickups, Year 2005. Tilgjengelig fra: <https://researchspace.auckland.ac.nz/bitstream/handle/2292/232/232.pdf?sequence=1>. [Nedlastet 14/5-11].
- (16) Igus, Invis Power. Tilgjengelig fra: <http://www.igus.eu/wpck/default.aspx?PageNr=3460>. [Nedlastet 19/4-11].
- (17) Ing. H. Asmyhr AS, Kabelvogn. Tilgjengelig fra: <http://www.asmyhr.no/index.php?module=2&pr=pr4|lang=no&idm=4&lang=no>. [Nedlastet 25/4-11].
- (18) Aker Solutions ASA, datablad undervannsjuletre. Tilgjengelig fra: <http://www.akersolutions.com/en/Global-menu/Products-and-Services/technology-segment/Subsea-production-systems-and-products/Subsea-production-systems-and-technologies/Subsea-trees/>. [Nedlastet 29/4-11].
- (19) ISO 13628-6 Design and Operation of Subsea Production Systems – Subsea production control system, 1th edition.
- (20) Robert, C., Monique, R., Patrick, H., The University of Auckland, An Inductive Coupled Universal Battery Charger, Part IV Project Report 2003. Tilgjengelig fra: <http://www.instructables.com/files/orig/FK9/HKLG/FAQDX9YM/FK9HKLGFQAQDX9YM.pdf>. [Nedlastet 14/5-11].
- (21) ROV Cylinders and Manipulators, Hydro International. Tilgjengelig fra: http://www.hydro-international.com/news/id4666-ROV_Cylinders_and_Manipulators.html. [Nedlastet 7/5-11].
- (22) Boys, J. T., Elliott, G. A. J., Covic, J. A., An appropriate magnetic coupling co-efficient for the design and comparison of ICPT pickups, IEEE Transactions on power electronics, vol. 22, no. 1, pp. 333-335, Jan. 2006
- (23) Han, K. H., Lee, B. S., Baek, S. H., The design evaluation of inductive power-transformer for personal rapid transit by measuring impedance, Journal of Applied Physics; Apr2008, Vol. 103 Issue 7, p07E928, 3p
- (24) Epcos, Ferrittmateriale. Tilgjengelig fra: www.epcos.com. [Nedlastet 23/3-11].
- (25) Patrick, K. B., Design of a Reliable Embedded Radio Transceiver Module with Applications to Autonomous Underwater Vehicle Systems, University of Washington, 2008. Tilgjengelig fra: <http://vger.aa.washington.edu/publications/>. [Nedlastet 28/5-11].
- (26) H., W. Beaty, Donald, G. F., Standard Handbook for Electrical Engineers, 15th edition,

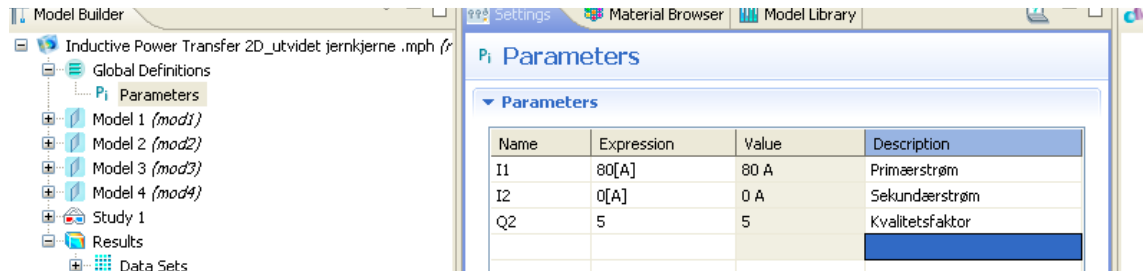
Vedlegg A: Modeloppsett i Comsol Multiphysics

Vedlegg A.1: Generelt

Modellen ble satt opp med 4 forskjellige modeller hvor modell 1 simulerte åpen krets for luft, modell 2 simulerte kortsluttet krets for luft, modell 3 åpen krets for sjøvann og modell 4 kortsluttet krets for sjøvann.

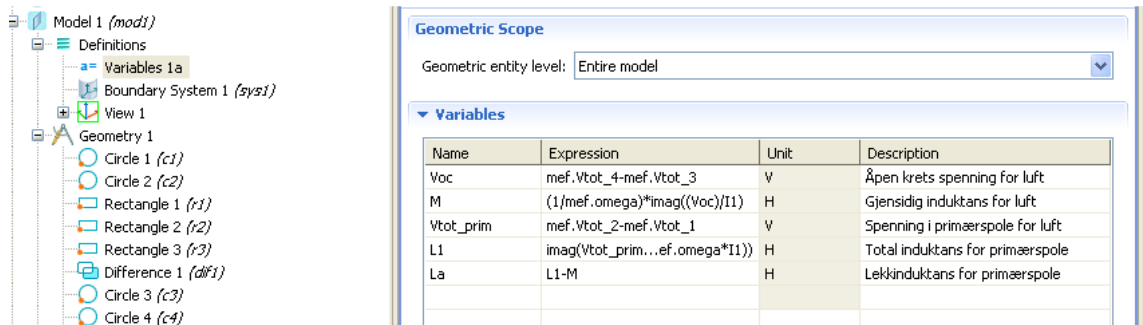


Vedlegg A.2: Globale definisjoner

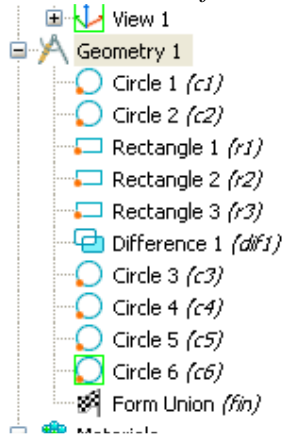


Vedlegg A.3: Modell 1

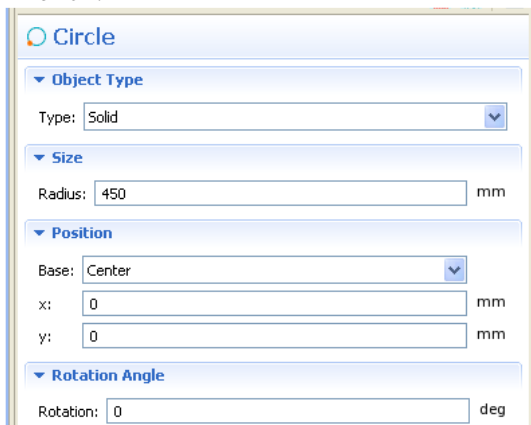
Variabler:



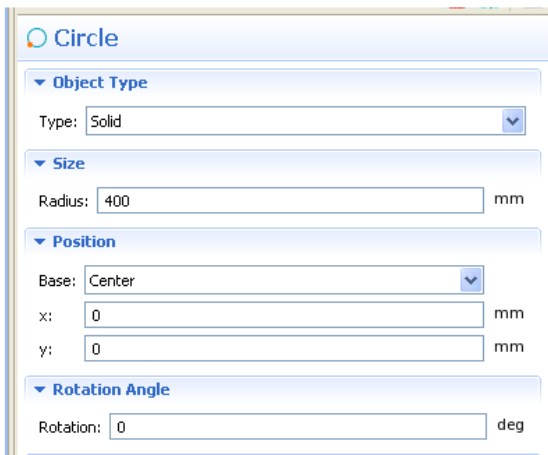
Geometristruktur for den "ikke-optimale" jernkjernen:



Sirkel c1:



Sirkel c2:



Rektangel r1:

Rectangle

Object Type
Type: Solid

Size
Width: 130 mm
Height: 60 mm

Position
Base: Corner
x: -65 mm
y: -30 mm

Rotation Angle
Rotation: 0 deg

Rektangel r2:

Rectangle

Object Type
Type: Solid

Size
Width: 45 mm
Height: 50 mm

Position
Base: Corner
x: -55 mm
y: -20 mm

Rotation Angle
Rotation: 0 deg

Rektangel r3.

Rectangle

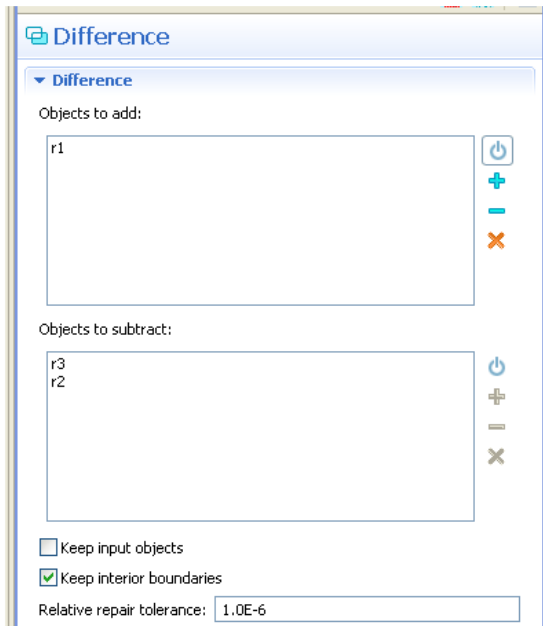
Object Type
Type: Solid

Size
Width: 45 mm
Height: 50 mm

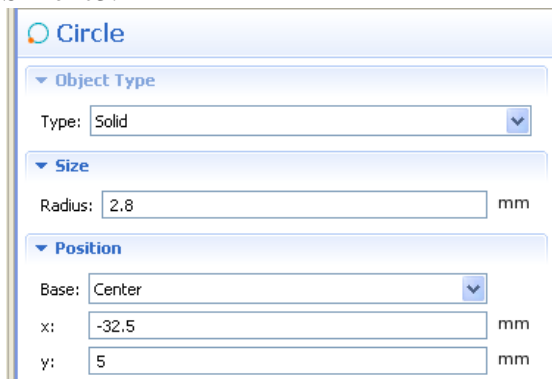
Position
Base: Corner
x: 10 mm
y: -20 mm

Rotation Angle
Rotation: 0 deg

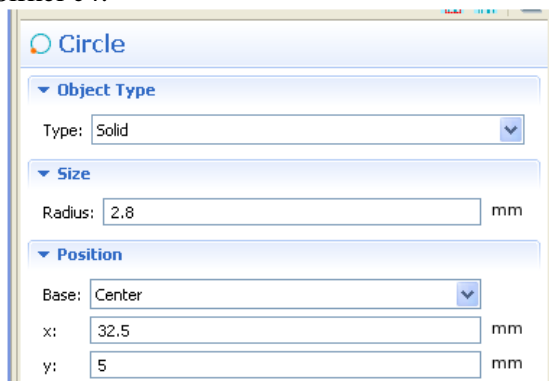
Differanse dif1:



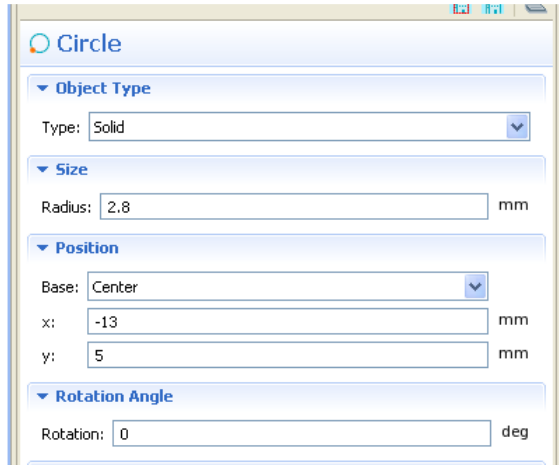
Sirkel c3:



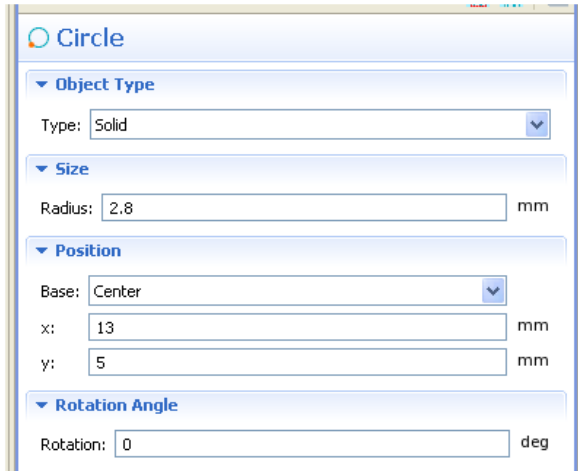
Sirkel c4:



Sirkel c5:



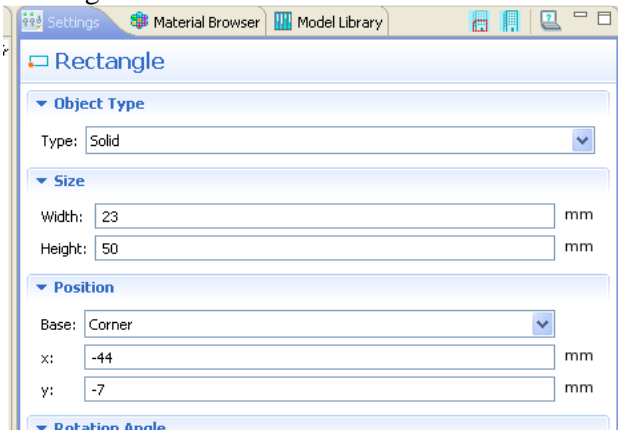
Sirkel c6:



Geometristruktur for den "optimale" jernkjernen:

Geometrien var den samme for den "ikke-optimale" jernkjernen, utklippene viser kun elementene i geometrien som var ulike.

Rektangel r2:



Rektangel r3:

The screenshot shows the 'Rectangle' dialog box with the following settings:

- Object Type:** Type: Solid
- Size:** Width: 23 mm, Height: 50 mm
- Position:** Base: Corner, x: 21 mm, y: -7 mm

Sirkel c3:

The screenshot shows the 'Circle' dialog box for object c3 with the following settings:

- Object Type:** Type: Solid
- Size:** Radius: 2.8 mm
- Position:** Base: Center, x: -32.5 mm, y: 5 mm

Sirkel c4:

The screenshot shows the 'Circle' dialog box for object c4 with the following settings:

- Object Type:** Type: Solid
- Size:** Radius: 2.8 mm
- Position:** Base: Center, x: 32.5 mm, y: 5 mm

Sirkel c5:

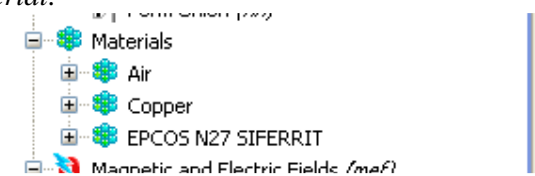
The screenshot shows the 'Circle' dialog box for object c5 with the following settings:

- Object Type:** Type: Solid
- Size:** Radius: 2.8 mm
- Position:** Base: Center, x: -24 mm, y: 5 mm

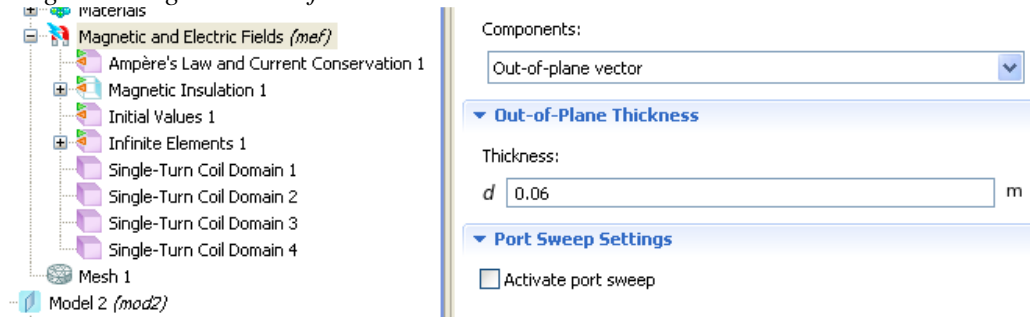
Sirkel c6:



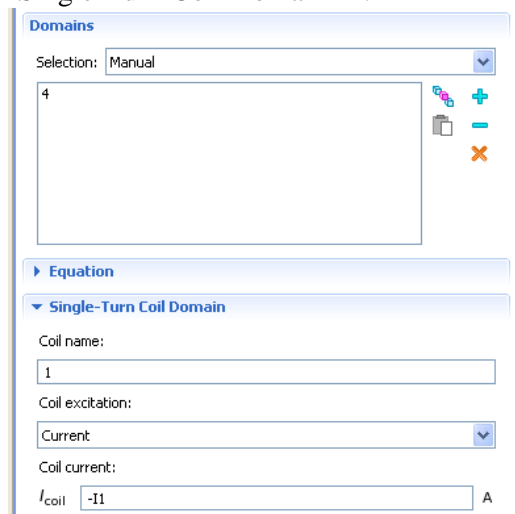
Material:



Magnetiske og elektriske felt:



”Single-Turn Coil Domain 1”:



”Single-Turn Coil Domain 2”:

Domains

Selection: Manual

7

Equation

Single-Turn Coil Domain

Coil name: 2

Coil excitation: Current

Coil current: I_{coil} 11 A

”Single-Turn Coil Domain 3”:

Domains

Selection: Manual

5

Equation

Single-Turn Coil Domain

Coil name: 3

Coil excitation: Current

Coil current: I_{coil} -12 A

”Single-Turn Coil Domain 4”:

Domains

Selection: Manual

6

Equation

Single-Turn Coil Domain

Coil name: 4

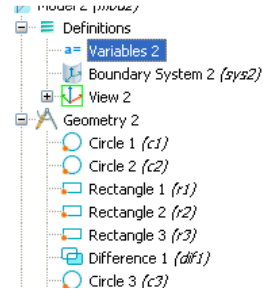
Coil excitation: Current

Coil current: I_{coil} 12 A

Vedlegg A.4: Modell 2

Modell 2 er helt lik modell 1 i oppsett med unntak definerte variabler og oppsett av sekundærspole, forskjellene vil bli vist videre.

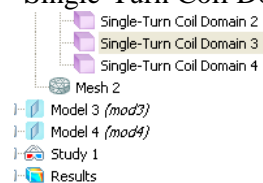
Variabler:



Geometric entity level: Entire model

Name	Expression	Unit	Description
Isc	mef2.Itot_3	A	Kortslutningsstrøm for luft
L2	(mod1.M*I1)/Isc	H	Sekundærinduktans
kphi	mod1.M/L2		
Lb	L2-mod1.M	H	Sekundær lekkinduktans for luft
P2	(Q2*mef2.omeg...)*(I1^2))/L2	W	Utgangseffekt ved luft

”Single-Turn Coil Domain 3”:



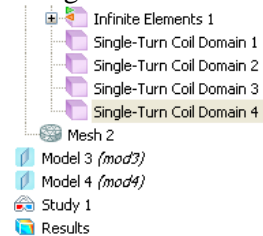
Coil name: 3

Coil excitation: Voltage

Coil potential: V_{coil} 0[V] V

-2C

”Single-Turn Coil Domain 4”:



Coil name: 4

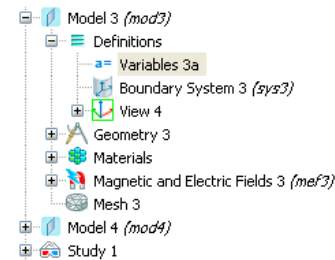
Coil excitation: Voltage

Coil potential: V_{coil} 0[V] V

Vedlegg A.5: Modell 3

Modell 3 er identisk med modell 1 med unntak variabler og material, forskjellene vil bli vist videre.

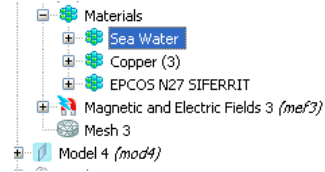
Variabler:



Geometric entity level: Entire model

Name	Expression	Unit	Description
Voc	mef3.Vtot_4-mef3.Vtot_3	V	Åpen krets spenning for sjøvann
M	(1/mef3.omega)*imag((Voc)/I1)	H	Gjensidig induktans for sjøvann
Vtot_prim	mef3.Vtot_2-mef3.Vtot_1	V	Spenning i primærspole for sjøvann
L1	imag(Vtot_pri...f3.omega*I1))	H	Total induktans p...spole for sjøvann
La	L1-M	H	Lekkindutans prim...pole for sjøvann

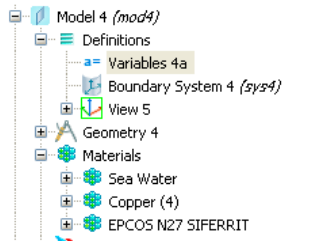
Material.



Vedlegg A.6: Modell 4

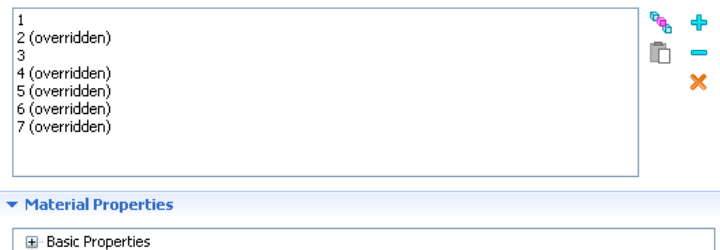
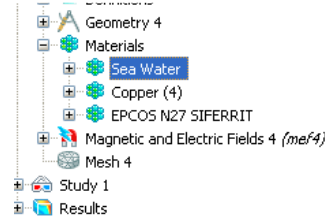
Modell 4 er identisk med modell 2 med unntak av variabler og material, forskjellene vil bli vist videre.

Variabler:

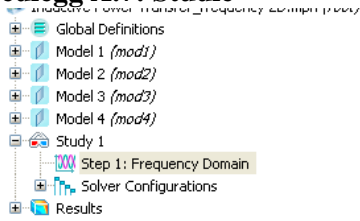


Name	Expression	Unit	Description
Isc	mef4.Itot_3	A	Kortslutningsstrøm for sjøvann
L2	(mod3.M*I1)/Isc	H	Sekundærinduktans
kphi	mod3.M/L2		
Lb	L2-mod3.M	H	Sekundær lekkinduktans for sjøvann
P2	(Q2*mef4.omeg...)*(I1^2))/L2	W	Effektuttak for sjøvann

Material:



Vedlegg A.7: Studie



Frequency Domain

Study Settings

Frequencies: Hz

Load parameter values:

Results While Solving

Mesh Selection

Geometries:

- Geometry 1
- Geometry 2
- Geometry 3
- Geometry 4

Mesh:

Physics Selection

Physics interfaces:

- Magnetic and electric fields (mef)
- Magnetic and electric fields (mef2)
- Magnetic and electric fields (mef3)
- Magnetic and electric fields (mef4)

Use in this study

Discretization: