

Tilstandskontoll av mellomspenning kabelsystem til vindpark

Ottar Amdal

Master of Science in Electric Power EngineeringInnlevert:juni 2013Hovedveileder:Frank Mauseth, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

Condition Assessment of Wind Farm Cable Systems

Student: Ottar Amdal, ottaram@stud.ntnu.no

Current loading of wind farm cable systems is very different from that observed in traditional distribution systems. Variations in wind power will give huge number of current cycles during service. The current load can vary from full load to zero within minutes and vice versa. The load cycling will give high temperature gradients and variations within the cable systems inducing significant thermo mechanical forces. This can cause severe oxidation of the insulation materials, partial discharges and finally a breakdown even after only a few years of service.

To estimate the degree of ageing is at present the most important tasks of nondestructive diagnostic testing. By such knowledge condition based maintenance actions can be planned, hopefully resulting in reduced number of unexpected failures and reduced maintenance cost.

The project work will be mainly experimental. The main purpose of the work will be to simulate such service conditions in the laboratory on cable joints and to examine the applicability of two different diagnostic methods. The methods are based on partial discharge and dielectric response measurements at different voltage levels and frequencies.

This work will be a continuation of a previous project/master work in 2011/12. It is feasible to continue the study within the Master Thesis work.

Forord

Masteroppgaven er gitt på bakgrunn av et samarbeid mellom SINTEF Energi AS og NTNU utført ved Institutt for Elkraftteknikk våren 2013.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til hovedveileder, Førsteamanuensis Frank Mauseth ved Institutt for Elkraftteknikk, NTNU, samt Dr. Ing. Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi AS. Frank og Sverre har vært til god hjelp gjennom hele prosjektet og begge har bidratt med gode innspill, inspirasjon og tålmodighet.

Horst H Førster og Erik Bjerrehorn har vært gode å ha i forbindelse med det praktiske laboratoriearbeidet. Dominik på verkstedet har vært til god hjelp med det mekaniske.

Halvard Faremo har vært til god hjelp når de dissekerte skjøtene skulle analyseres, og hadde flere gode innspill rundt dette.

Til slutt vil jeg gjerne takke alle som har hjulpet meg underveis, dagene ville ikke vært de samme uten. Takk til mine medstudenter på kontoret. Og til min kone Margit, for lange samtaler om ting du ikke helt forstår. Tusen takk!

Trondheim juni 2013

Star Amdal

Ottar Amdal

Sammendrag

En stor andel av distribusjonsnettene verden over har allerede passert sin tekniske levetid, og med inntoget av distribuert generering (DG) med vindkraft, er det registrert flere feil enn ved tradisjonelt forbruk. Her er skjøter på PEX-kabler sett på som hovedfeilkilden, hvor varmgang i skjøtehylsen er antatt årsak. Denne oppgaven har sett på hvordan de høye strømmene og raske strømendringene fra DG påvirker skjøtene i distribusjonsnett.

Arbeidet i dette prosjektet er basert på en skjøt med redusert elektrisk kontakt. Det er utviklet et laboratorie
oppsett hvor skjøten aldres ved hjelp av strøminduksjon, for deretter å til
standsvurderes ved hjelp av partiell utladningstest (PD-test) utført ved flere frekvenser og dielektrisk respons. Aldringsprosessen er satt til å foregå ved 130 °C og 180 °C med så hurtige temperaturendringer som mulig uten å overgå maksimaltemperatur for selve kabelen.

Ved 130 °C oppstod det ingen tydelig aldring etter 400 timer fordelt på 200 sykler. Ved 180 °C ble det observert PD etter 120 timer fordelt på 60 sykler.

Resultatene fra de laboratoriealdrede skjøtene sammenlignes med målinger utført på et utvalg feltaldrede skjøter for å undersøke om resultater funnet i labben kan brukes til å vurdere tilstanden på kabler aldret i felt.

Det ble observert at skjøter som er aldret med høy temperatur i labben ofte utvikler flere mindre hulrom. Disse hulrommene førte til et høyt antall forholdsvis lave utladninger per periode.

Skjøtene fra felt ser ikke ut til å ha blitt utsatt for høy varme. Her bestod antagelig feilen av en skarp kant mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon fulgt av utilstrekkelig krympet skjøtisolasjon. I disse skjøtene oppstod større hulrom som medførte et lavt antall forholdsvis høye utladninger.

Det kan dermed være mulig å skille mellom aldring som følge av høy temperatur og utilstrekkelig krympet isolasjon over skjøten ved hjelp av antall utladninger per periode.

Dielektrisk respons kan brukes til å si noe om hvor langt i aldringsprosessen skjøtene har kommet om det måles flere ganger under driftsperioden.

Abstract

A large percentage of distribution networks worldwide have already passed their technical life, and with the arrival of distributed generation (DG) of wind power, there are more errors registered than with traditional consumption. Here, the joints of XLPE cables are seen as the main source of error, with overheating in joint ferrule as the supposed cause. This paper looks at how the high currents and fast current changes from DG affects joints in the distribution network.

The work in this project is based on a joint with reduced electrical contact. A laboratory setup has been created where the joints are aged using AC induction. Condition assessments are then preformed using a partial discharge(PD) test and dielectric response. The aging process is set to take place at 130 °C and 180 °C, with as rapid temperature changes as possible without exceeding the maximum temperature of the cable itself.

At 130 $^{\circ}\mathrm{C}$ no aging was apparent after 400 hours and 200 cycles. At 180 $^{\circ}\mathrm{C},$ PD was observed after 120 hours and 60 cycles.

The results from the laboratory aged joints were compared to a selection of field aged joints to determine whether the results found in the lab can be used to assess the condition of the cables aged in the field.

It was observed that joints aged at high temperature in the lab often develops several smaller cavities. These cavities often lead to a high number of relatively low discharges per period.

The joints from the field do not seem to have been exposed to high temperatures. The fault seems to consist of a sharp edge between the joint ferrule and XLPE insulation, followed by insufficiently shrunken joint insulation. In these joints a larger cavity was observed, resulting in a low number of relatively high discharges.

It may thus be possible to distinguish between aging due to high temperatures and insufficiently shrunken insulation over the joint using the number of discharges per period.

Dielectric response can be used to tell how far the aging process of the joints has come if it is measured several times during the operating period.

Innhold

1	Innled	lning	
	1.1	Bakgrur	$nog motivasjon \dots \dots$
		1.1.1	Distribuert produksjon
		1.1.2	Tilstandskontroll
	1.2	Arbeid .	
2	Teori		
	2.1	PEX ka	belsystem
		2.1.1	Skjøt og terminering
	2.2	Aldrings	smekanismer
		2.2.1	Oksidasjon
		2.2.2	Delaminering
		2.2.3	Deformasjon av isolasjon 6
		2.2.4	Aldring av kontaktflater 6
		2.2.5	Partielle utladninger
	2.3	Ikke-des	truktiv diagnostikk
		2.3.1	PD-måling 8
		2.3.2	Dielektrisk respons
		2.3.3	Dielektrisk analyse
	2.4	Destruk	tiv diagnostikk
3	Metoo	1e	
	3.1	Testobje	ekt og preparering
		3.1.1	Skjøt med redusert tverrsnitt
		3.1.2	Feltaldrede skjøter
		3.1.3	PD-fri terminering
		3.1.4	Guard
	3.2	Aldring	av testobjekt
		3.2.1	Bestemme strømbehov
		3.2.2	Styring av indusert strøm
		3.2.3	Benyttede verdier
	3.3	Ikke-des	truktiv Diagnostikk
		3.3.1	PD-måling
		3.3.2	Dielektrisk respons
	3.4	Destruk	tiv Diagnostikk
		3.4.1	Måling av gjennomslagsstyrke
		3.4.2	Dissekering
4	Result	tat	
	4.1	Forsøk 1	L - 130 °C
		4.1.1	Partielle utladninger
			0

\mathbf{E}	Tips	s- og ti	riksspalt	en			35
D	Lab	view p	rogram				32
С	MA C.1 C.2	TLAB Rando Script	skript m script uten rand	lom	•	•	21 21 26
в	Gra	fer					19
A	Mål A.1 A.2 A.3	eresult Forsøk Forsøk Forsøk	ater 1 - 130 ° 2 - 180 ° 3 - Felta	C	•		1 1 4 7
	6 7	Videre	Arbeid .				$\frac{52}{52}$
	G	5.1 5.2 5.3	Forsøk 1 Forsøk 2 Forsøk 3	- 130 °C			48 48 50
	5	Diskus	4.3.4 jon	Disseksjon			46 48
			$\begin{array}{c} 4.3.1 \\ 4.3.2 \\ 4.3.3 \end{array}$	Partielle utladninger		• •	41 44 45
		4.3	4.2.1 4.2.2 4.2.3 Forsøk 3	Partielle utladninger			33 36 38 40
		4.2	4.1.2 4.1.3 Forsøk 2	Dielektrisk respons	• •	•	30 32 32

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Dagens kraftutbygging blir mer og mer fokusert mot fornybar energi, hvor hovedfokuset ligger på vindkraft. Dette fører til at det blir bygd ut flere mindre kraftprodusenter tilkoblet mellomspenningsnettet. Denne typen utbygging kalles ofte distribuert produksjon(DG).

Ved tilkobling av kraftprodusenter til mellomspenningsnettet er det observert et forhøyet antall havari ved skjøter i anlegget kort tid etter installasjon.

1.1.1 Distribuert produksjon

Ved bruk av DG er belastningen på nettet ulikt belastningen fra tradisjonelt forbruk på flere måter. Ved tradisjonelt forbruk vil lasten sjelden ligge på maksimal strømføringsevne og endringene skjer ofte gradvis. Ved DG vil lasten være svært vekslende og kan gå fra full produksjon til ingen produksjon på kort tid[1].

Dette nye belastningsmønsteret har vist seg å skape problemer for mellomspenningsnettet, og ved flere tilfeller har det oppstått sammenbrudd lenge før teknisk og økonomisk levetid. Denne er normalt sett er mellom 20 til 30 år[2]. Det er særlig kabelskjøtene som fremheves som den vanligste feilkilden[3].

For kabelskjøter regnes metallisk dårlig kontakt som et av de største problemene i dagens PEX isolerte mellomspenningsnett[1]. Dette kan ved høy belastning føre til redusert ledeevne som igjen fører til økt varmeutvikling og i flere tilfeller oksidasjon av skjøtens feltstyring, mastik og isolasjon. Ved vekslende belastning vil oksidasjonen og den termiske ekspansjonen av materialene kunne føre til delaminering av skjøtens isolasjonsmateriale, og til slutt sammenbrudd.

1.1.2 Tilstandskontroll

For å forbedre forsyningssikkerheten og unngå store unødige utskiftinger av kabelsystem, er diagnostikk et viktig fokusområde. Ved nøyaktig diagnostikk av kabelsystemene vil vedlikehold og utskiftninger kunne planlegges og utføres til riktig tid på riktig sted. Dermed vil flere strømbruddene som følge av havari på kabler kunne unngås[3].

1.2 Arbeid

Det sterkt varierende belastningsmønsteret fra DG har vist seg å fremprovosere feil i mellomspenningsnettet med flere anledninger enn tradisjonelt forbruk. Satt i sammenheng med at kabelskjøter er den største feilkilden i en slik situasjon, er det sett på hvordan en tilstandskontroll kan brukes til å forutse en fremtidig feil på skjøtene i et kabelsystem. For å knytte resultatene opp mot virkeligheten ble det også utført tilstandskontroll på skjøter med feil tatt ut fra felt. **Tilvirkning og aldring av testobjekter:** Testobjektene ble laget for å kunne modellere en skjøt hvor den elektriske kontakten er redusert. For å sikre reproduserbarheten i forsøket ble testobjektene laget ved hjelp av metallhylser hvor den reduserte elektriske kontakten ble opprettholdt.

Testobjektene utsettes for en aldringsprosess hvor kablene påtrykkes en strøm som sykles i kortere perioder for å simulere den varierende produksjonen fra DG. Det ble utført to aldringsforsøk med kjernetemperaturer på 130 °C og 180 °C. For å være sikker på at aldringen ikke gikk ut over PEX kabelen utenfor skjøten ble ledertemperatur begrenset til 85 °C.

Diagnostikk: For å kunne fastslå om aldringsprosessen har hatt en virkning på testobjektet er flere ulike diagnosemetoder benyttet. Metodene er delt inn i to grupper: Ikke-destruktiv diagnostikk som innebærer måling av partielle utladninger(PD) og dielektrisk respons, og destruktiv diagnostikk som innebærer disseksjon og måling av gjennomslagstyrke. Ikke-destruktiv diagnostikk ble utført periodevis på de lab-aldrede objektene og en gang på de feltaldrede objektene. Destruktiv diagnosikk ble utført på slutten av forsøket, etter at all annen diagnostikk var utført.

2 Teori

Når det oppstår gjennomslag i kabler før forventet økonomisk levetid, er det naturlig å anta at nedbrytningsprosessen i en eller flere av systemets komponenter er akselerert. I dette teorikapittelet skal de ulike nedbrytingsprosessene, samt ikke-destruktiv diagnostikk av kabler utdypes.

2.1 PEX kabelsystem

PEX-kabler kom først til Norge i 1968, og er blitt gradvis forbedret frem til i dag. En PEX-kable er laget av tverrbundet polyetylen(PE) og er en forbedret utgave av PE kabler. I PEX-kabler har molekylene blir tverrbundet i en vulkaniseringsprosess. På denne måten forbedres de termiske og mekaniske egenskapene uten at de elektriske egenskapene endres. Materialet er ikke lenger en termoplast slik PE er, men det mykner og får en slags gummilignende konsistens ved PEs smeltepunkt(105 °C - 115 °C). Denne tilstanden opprettholdes for temperaturer opp til 300 °C. På grunn av dette er PEX-kabler godkjent for kontinuerlig drift på 90 °C. Det er tillatt med kortere perioder på 105 °C i nødssituasjoner[4].

Alle PEX kabler blir avgasset fra fabrikk for å bli kvitt de flyktige stoffene som oppstår i ekstruderingsprosessen. Dermed vil ikke kabelens egenskaper endre seg nevneverdig etter kvalitetskontrollen fra fabrikk[5].

2.1.1 Skjøt og terminering

Hovedformålet med en skjøt eller terminering er å sørge for god elektrisk kontakt mellom to ledere, samt å kontrollere det elektriske feltet for å unngå feltforsterkning.

Kontaktflate

Det er ønskelig å ha så lav overgangsmotstand som overhodet mulig i en skjøt eller terminering, men likevel opprettholde en god mekanisk kontakt som tåler ytre påkjenninger. Ved høy overgangsmotstand risikeres det høy varmeutvikling i og rundt kontaktflaten ved høye strømmer.

Når to komponenter kobles sammen vil bare en liten del av flatene ha kontakt med hverandre. Dette er avhengig av ruheten til materialet, og av trykket som påføres kontaktflatene. Strømmene i sammenkoblingen vil kun gå i områdene hvor det er direkte elektrisk kontakt mellom flatene.

De fleste metalliske flater vil ved kontakt med luft få et tynt oksidlag på overflaten. Dette laget er i de fleste tilfeller elektrisk isolerende og må fjernes eller ødelegges for å oppnå høyest mulig strømførende areal.

Kontaktflatens temperatur

Temperaturen i kontaktpunktet til en sammenkobling kan uttrykkes ved spenningsfallet over kontaktpunktet. Dersom begge materialene er like vil temperaturen på begge sider av kontaktpunktet være symmetrisk. Maksimaltemperatur i kontaktpunktet uttrykkes da med[6] :

$$T_{maks} = \sqrt{\frac{U^2}{4L} + T_0} \tag{1}$$

Hvor U er spenningsfallet over kontaktpunktet, T_0 er absolutt temperatur på elektrodene langt unna kontaktpunktet, L er en konstant og er for de fleste metaller lik $2, 4 \times 10^{-2} V^2 / K^2$.

Resistansen i kontaktpunktet er svært avhengig av temperaturen. Økt temperatur vil gi økt resistivitet i kontaktpunktet. Temperaturstigningen i elektrodene er vanligvis svært lokal på grunn av metallets gode varmeledningsevne.

Feltstyring ved terminering og skjøting av kabler

Feltstyring er en viktig del av PD-fri skjøting og terminering, da det glatter ut feltet som vanligvis oppstår ved overgang fra halvledende ytterkappe til isolasjon. Uten en slik type feltstyring kan det oppstå PD selv med lave påtrykte spenninger[7].



Figur 2.1: Elektrisk feltdistribusjon uten feltstyring[9].



Figur 2.2: Elektrisk feltdistrubusjon med feltstyrende duk[9].

Isolasjon av skjøt

Isolasjonen i en skjøt består ofte av stoffet Etylen propylen-gummi(EPDM) som er et syntetisk gummimateriale. Dette er et stoff med lav mekanisk holdfasthet som ikke endres nevneverdig ved høyere temperaturer, noe som medfører gode aldringsegenskaper. Ved kontinuerlig drift er temperaturen begrenset til 90 °C. Uten mekanisk belastning kan materialet tåle kortere perioder på 250 °C[4].

Isolasjonen i en skjøt blir ofte levert som ferdigtilpassede hylser til kabelen som skal skjøtes. I tillegg til skjøtehylsen og feltstyringshylsen består en vanlig skjøt av mastik og en kombihylse med isolasjon og ytre halvleder. Før de ulike hylsene krympes på skjøten dekkes hulrommene med mastik. Det er også mastik på innsiden av feltstyringshylsen.

Mastiken vil ved krymping av de ulike hylsene over skjøten flyte ut til en nesten sammenhengende masse med høy permittivitet. Prosessen blir ofte ikke helt ferdig, og flyktige stoffer fra mastiken kan flyte ut etter at skjøten er satt i drift dersom varmen blir høy nok.



Figur 2.3: Prinsippskisse av skjøt med krympet isolasjon[9].

2.2 Aldringsmekanismer

Det er flere aldringsmekanismer som virker på et kabelsystem i tørre omgivelser. De viktigste er oksidasjon, delaminering, termisk ekspansjon og PD.

2.2.1 Oksidasjon

Oksidasjon er en kjemisk reaksjon hvor isolasjonsmaterialet reagerer ved kontakt med luft. Reaksjonen virker ved alle temperaturer, men effekten tiltar ved høyere temperaturer. Saltinnholdet i luften vil også være en påvirkende faktor. Da et høyt saltinnhold vil føre akselerert oksidering.

Oksidasjon kan ofte føre til sprøhet i materialet samt en endring i materialets farge. Denne sprøheten regnes som kritisk når strekkfastheten reduseres med 50%[8].

For å hindre degradering som følge av oksidasjon blir kabler tilsatt antioksidanter og nominell temperatur begrenses[9].

2.2.2 Delaminering

Ved varierende belastning vil kabelen utsettes for gjentatt utvidelse og sammentrekning. Dette kan føre til delaminering av isolasjonsmaterialet, ofte som en følge av at oksidasjonsprosessen har gjort materialet sprøtt.

2.2.3 Deformasjon av isolasjon

Deformasjon kan oppstå som følge av den termiske ekspansjonen som oppstår ved oppvarming, og kan virke ødeleggende på kabelens egenskaper. Dersom kabelen er utstyrt med en nøytralleder utenfor ytre-halvleder vil ekspansjonen av isolasjonsmaterialet kunne presse materialet mot metallet i lederen. I ekstreme tilfeller vil dette kunne føre til at ytre halvleder løsner fra isolasjonen og hulromsladninger kan oppstå[10].

2.2.4 Aldring av kontaktflater

Dagens skjøter og termineringer består ofte av hylser i aluminium som enten presses eller skrus over lederne. På denne måten oppnås tilstrekkelig mange kontaktpunkter av god kvalitet, og det oppstår sjelden kontaktproblemer de første årene.

Å opprettholde god kvalitet på kontaktene over hele den økonomiske levetiden til en sammenkobling kan være en stor utfordring. Flere forhold fører til forringelse av koblingene over tid. Stadig variasjon av last, og dermed ledertemperatur, vil føre til utvidelser og sammentrekninger i takt med lastvariasjonene. De store mekaniske påkjenningene dette påfører skjøte-/termineringshylsen kan føre til at kontaktpunktene avtar i antall og kvalitet. Dette fører til økt kontaktmotstand og økt varmeutvikling i sammenkoblingen[6].

2.2.5 Partielle utladninger

PD er en samlebetegnelse for en rekke gnistlignende sammenbrudd i isolasjonsmaterialet, som vanligvis oppstår som en følge av høyt elektrisk felt rundt skarpe kanter eller i hulrom i isolasjonen[11]. I tillegg til høyt elektrisk felt, er PD avhengig av et startelektron som setter igang prosessen. PD anses som den viktigste nedbrytningsmekanismen i et isolasjonssystem, og vil virke ødeleggende på PEX-kabler. Dersom utladningene blir store nok kan de registreres i form av lyd, lys, varme eller kjemiske reaksjoner. De ulike utladningene som dekkes av begrepet PD er i grove trekk[12]:

- 1. Koronautladninger
- 2. Hulromsutladninger
- 3. Overflateutladninger

Koronautladninger

Koronautladninger er utladninger som oppstår som følge av høyt elektrisk felt ved spisse kanter i gassisolerte områder. Dette fører til en ionisering av av gassen i området rundt det forhøyede feltet, og en utladning kan oppstå. Typisk for en slik utladning er at de opptrer ved spenningens toppverdi.

For å unngå eller redusere feltoppbyggingen på skarpe kanter brukes det koronaringer eller -kuler for å jevne ut feltet. Dette er spesielt nødvendig for måleoppsett i laboratorium, da utladningene vil forstyrre målingsprosessen og kunne oppfattes som andre utladninger.

Hulromsutladninger

Hulromsutladninger er utladninger som forekommer i små gass eller væske ansamlinger i det faste isolasjonsmaterialet. Utladninger kan også forekomme i gassbobler i væske.

Hulromsutladninger er en samlebetegnelse for flere ulike typer utladninger.



(a) Isolert hulrom, Hulrom med kontakt til leder

(b) Elektrisk tre utviklet fra hulrom

Figur 2.4: Ulike hulromsutladninger

Maksimalt elektrisk stress E_h i et sfærisk hulrom er gitt av[7]:

$$E_h = \frac{3\epsilon_r}{1+2\epsilon_r} \times E \tag{2}$$

med materialoverganger

Hvor ϵ_r er relativ permitivitet for isolasjonsmaterialet og E feltstyrken over isolasjonen uten hulrom.

Dermed kan det sees av (2) at dersom $\epsilon_r > 1$ og isolasjonens tykkelse er mye større enn lengden av hulrommet, oppstår det en feltforsterkning i hulrommet. Dette kan være kritisk da feltstyrken over isolasjonsmaterialet oftest er dimensjonert for det faste isolasjonsmaterialet med $\epsilon_r > 1$. Gassen i hulrommene har som regel langt lavere holdfasthet enn isolasjonsmaterialet.

Overflateutladninger

Overflateutladninger oppstår vanligvis ved overgangen mellom ulike isolasjonsmaterialer, hvor man kan ha et høyt elektrisk felt. Utladningene begynner vanligvis som koronalignende utladninger, men utarter seg til busklignende utladninger langs overflaten av isolasjonsmaterialet. I områder hvor det har vært overflateutladninger kan karbonisering av materialet forekomme. Overflaten blir da delvis elektrisk ledende på grunn av karbonet. Mønsteret som oppstår kalles ofte «Lichtenbergfigurer».

2.3 Ikke-destruktiv diagnostikk

Ikke-destruktiv diagnostikk betegnes som diagnostikk uten ødeleggende virkninger. Vanligvis regnes diagnostikk som utføres ved $2 \times U_0$ som ikke-destruktiv [12]. De vanligste diagnosemetodene er PD-måling og dielektrisk respons.

2.3.1 PD-måling

Måling av utladninger kan benyttes til å finne feil i isolasjonsystemer, eller til tilstandsestimering av utstyr i drift. PD er avhengig av det elektriske feltet som igjen er avhengig av de ulike spenningskarakteristikkene, deriblant frekvens. Av målemetodene som brukes i dag er det frekvensen og til dels spenningen som skiller de forskjellige testmetodene[13]:

- 1. Offline PD-måling
 - (a) Sinus AC 20-300 Hz
 - (b) VLF (Very low Frequency) 0,01-0,1 Hz
 - (c) Damped AC (DAC) 20-500 Hz
- 2. Online PD-måling 50/60 Hz

Av målemetodene er online-metoden begrenset til nominell spenning og frekvens. Offline-metoden er ikke avhengig av å benytte nominell spenning, og det er mulig å finne start- og slokkespenning. Dermed er det mulig å finne feil som oppstår over det nominelle spenningsnivået. I tillegg gir muligheten til å justere frekvensen fordeler med tanke på størrelsen på måleutstyret. Ved lavere frekvens(VLF) kan høyere spenning oppnås med mer kompakt utstyr da den kapasitive strømmen til testobjektet er mye mindre.

ABC-modellen

ABC-modellen er en vanlig måte å forklare måling av PD på. a, b og c representerer prøveobjektets kapasitanser hvor c er kapasitansen over hulrommet. b er kapasitansen av isolasjonsmaterialet i serie med hulrommet, altså volumet over og under hulrommet. Til slutt er a kapasitansen av den resterende isolasjonen.



Figur 2.5: Skisse av målekrets for PD[18]

Forholdet mellom de ulike kapasitansene antas vanligvis å være:

$$b < c \text{ og } c << a \tag{3}$$

Når en kondensator(her C_k) kobles i parallell med måleobjektet vil den levere en strøm inn til måleobjektet hver gang en utladning oppstår i prøveobjektet. Dette for å utligne spenningsforskjellen som oppstår ved utladningen. Denne lille strømmen C_k leverer til kretsen vil sirkulere i kretsen (Δi).

Denne strømmen kan måles over impedansen i kretsen (Z_m) som en transient spenningspuls. Med antagelsene fra (3) kan en beregne den tilsynelatende utladningen som oppstår i prøveobjektet ved å integrere strømpulsen[14].

$$Q_{tilsynelatende} = q_s = \int \Delta i \times dt = \Delta U \times a \tag{4}$$

En vil aldri kunne måle den virkelige utladningen (q) i hulrommet, men den tilsynelatende ladningen som omsettes i den ytre kretsen vil tilsvare denne[14]. Dette beskrives med formel:

$$\frac{q_m}{q} \approx \frac{C_k}{C_a + C_k} \tag{5}$$

Frekvensavhengighet

Det er flere frekvensavhengige funksjoner som kan oppstå ved PD-måling. Blant de viktigste er:

Statistisk tidsforsinkelse δt_{lag} er tidsforsinkelsen mellom nådd tennspenning og når det oppstår et startelektron på rett sted. Denne deles så inn i to deler: Tiden det tar fra nådd tennspenning til første utladning og tiden det tar mellom utladningene. δt_{lag} regnes som en konstant som fører til at lavere frekvens vil gi et større antall utladninger[15].

$$\delta\phi_{lag} = \frac{\delta t_{lag}}{T} \times 360^{\circ} \tag{6}$$



Figur 2.6: PD per periode med hensyn på frekvens når eneste påvirkning er statistisk tidsforsinkelse[15]

Overflatekonduktivitet Lavere frekvenser vil ha en skjermende effekt i sfæriske hulrom. Dette vil kunne hindre oppbyggingen av ladning, og dermed stoppe eller redusere utladningsaktiviteten.

Faseforskyvning Da utstyret som benyttes til PD-måling er frekvensavhengig kan det forekomme faseforskyvninger, spesielt ved lave frekvenser.

Støy

Signaler som registreres under en PD-test som ikke har opphav i testobjektet regnes som bakgrunnstøy[11]. Typiske støykilder kan være:

- 1. Spenningskilde
- 2. Koblingskapasitans
- 3. Flytende ledende partikler
- 4. Pulsformet interferens
- 5. Radiobølger
- 6. Interferensstrømmer i jordingssystemet til måleapperatet

Analyse av PD

Det benyttes flere metoder til å analysere PD-målingene. Blant de vanligste er faseoppøst PD-plot(PrPDA). Denne gir en enkel og oversiktelig fremstilling av størrelsen på utlandningene, og hvor i fasen de oppstår. Dette gir gode muligheter for å skille mellom ulike defekter og støy.

2.3.2 Dielektrisk respons

En kabel kan sees på som en kondensator på grunn av den kapasitive virkningen mellom ytre halvleder og lederen. Da ingen reelle kondensatorer er tapsfri, vil det oppstå et målbart tap i alle kabler. Dette tapet er vanligvis ganske lite, men kan bli svært avgjørende dersom det blir høyt, da tapet omsettes til varme som igjen kan føre til degradering av kabelen.

Det er ulike metoder for å modellere det dielektriske tapet i en kabel. De vanligste er vist i figur 2.7.



Figur 2.7: A) RC-parallellmodell av kondensator med tap, B) RC-seriemodell av kondensator med tap

Av de ulike modellene er det figur 2.7 A (parallellmodell) som er vanligst å benytte for kabler[7]. I denne modellen representeres varmeutviklingen som en følge av den resistive strømkomponenten I_R som sammen med den kapasitive strømmen I_C danner vinkelen δ [7].

$$tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} \tag{7}$$

Tapsfaktoren $tan\delta$ er et vanlig mål på dielektriske tap og man kan ut fra denne finne effekttapet i isolasjonen[7].

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C tan\delta \tag{8}$$

P vil her være effekten som går tapt i isolasjonsmaterialet, U er spenning over isolasjonsmaterialet, ω er vinkelfrekvens og C er testobjektets kapasitans. Effekten som går tapt vil kunne komme fra flere ulike fenomener kalt tapsmekanismer. De ulike tapsmekanismene vil vanligvis være:

- 1. Dipoltap
- 2. Konduktive tap
- 3. Grenseflatetap
- 4. Partielle utladninger

Av de ulike tapsmekanismene er dipoltap og grenseflatetap regnet som relaksjonsmekanismer. I tillegg til relaksjonsmekanismene finnes det også momentane mekanismer som ikke gir opphav i tap[16].

Dipoltap

En permanent dipol er et molekyl med usymmetrisk plassering av elektroner. Når en dipol utsettes for et varig elektrisk felt, vil de stille seg etter retningen på det påtrykte elektriske feltet. Ved lave frekvenser vil dipolene klare å følge det påtrykte feltet, og ingen dipoltap vil forekomme. Når frekvensen øker til et visst nivå, vil ikke dipolene klare å følge det skiftende feltet, og et dipoltap vil oppstå.

Dersom frekvensen fortsetter å øke vil dipolene slutte å følge det elektriske feltet da endringen blir for rask. Dipoltapet vil da reduseres, og vil ved tilstrekkelig høye frekvenser opphøre helt.

Permittiviteten i isolasjonsmaterialet påvirkes også av dipolenes evne til å rotere etter det påtrykte elektriske feltet. Ved lave frekvenser er permittiviteten konstant høy, men når frekvensen når punktet hvor dipolene ikke lenger klarer å følge feltet, vil permittiviteten synke. Figur 2.8 beskriver sammenhengen mellom permittiviteten og dipoltapet.

Dipoltap oppstår ved frekvenser i området $10^6 - 10^{10}$ Hz[7].



Figur 2.8: Dipoltap som følge av frekvens hvor tapet øker når dipolene ikke lenger klare å følge frekvensen [18].

Konduktive tap

Alle dielektriske materialer vil ha en bestemt konduktivitet avhengig av forurensningsnivået i materialet. Konduktiviteten påvirkes også av fuktighetsnivået og omgivelsestemperatur rundt testobjektet[7].



Figur 2.9: Konduktive tap som følge av frekvens. Her går det frem at det konduktive tapet øker ved lavere frekvenser og dermed blir dominerende.

Grenseflatetap

PEX, som er et vanlig isolasjonsmateriale i kabler, er et delvis krystallinsk materiale. I dette materialet vil en ha både amorfe og krystalline områder, og dermed få grenseflater mellom de ulike områdene.

Grenseflater oppstår også dersom isolasjonen består av ulike lag av forskjellige materialer.

Når isolasjonsmaterialet utsettes for et elektrisk felt, vil eventuelle frie elektroner forflytte seg til grenseflatene i materialet. Dette fører til en grenseflatepolarisajon, da flytting av elektroner fører til en akkumulert ladning. Grensepolarisasjonen gir opphav til det man kaller grenseflatetap.

Grenseflatetap kan oppstå i frekvensområdet $0 - 10^7$ Hz[7].



Figur 2.10: Grenseflatetap som funksjon av frekvens[18].

Partielle utladninger

Dersom testspenningen som benyttes ved måling er høyere enn tennspenningen for utladningene, vil disse kunne bidra til en økning av tapsfaktoren $(tan\delta)$.

Tap fra PD er spenningsavhengige, og ikke frekvensavhengige som tidligere nevnte tapsmekanismer.



Figur 2.11: Tapsfaktor som følge av PD som funksjon av spenning[18]. Ved konstant tapsfaktor måles det ikke utladninger, etter U_t detekteres utladninger.

2.3.3 Dielektrisk analyse

Dielektrisk respons kan måles i tidsdomenet eller frekvensdomenet. I tidsdomenet blir testobjektet påtrykt en DC-spenning, og strømmene måles som funksjon av tid. I frekvensdomenet blir testobjektet påtrykt AC-spenning, kapasitansen og dielektrisk tap blir målt som funksjon av frekvens. Sammenhengen mellom tid- og frekvensdomenet kan finnes ved å bruke en Fourier-transformasjon[16].

Det er flere metoder som baserer seg på måling av dielektrisk tap for å vurdere tilstanden på kabler. De vanligste metodene er å måle tidsdomenet eller frekvensdomenet[16].

Frekvensdomenet: Kompleks permittivitet $\epsilon''(f)$, endring i permittivitet og $\Delta \epsilon'(f)$ og dielektrisk tapsfaktor $tan\delta$ som funksjon av spenning og frekvens

Tidsdomenet: Dipolarisasjonsstrømmer $I_D(f)$ og tilbakevendende spenning $U_R(t)$ som en funksjon av spenning og tid

Av disse er det frekvensdomenet som er aktuelt for denne oppgaven, og fokuset vil ligge på denne metoden.

I frekvensdomenet er det vanskelig å skille mellom tap fra relaksjonsmekanismer og tap som følge av konduktivitet. Ved lave frekvenser kan det være mulig å skille mellom disse, da bidraget fra konduktiviteten kan blir dominerende ved lave nok frekvenser[16]. Som nevnt tidligere kan strømmen gjennom isolasjonen deles opp i en kapasitiv og en resistiv del.

$$\hat{\mathbf{I}} = I(\omega) = jI_C + I_R \tag{9}$$

$$I(\omega) = \omega C_0 U_0(\omega) \left[j(\epsilon_r + \Delta \epsilon_r(\omega)) + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} + \chi''(\omega)\right) \right]$$
(10)

Hvor $\omega = 2\pi f$, f er påtrykt frekvens, u_0 er påtrykt spenning, C_0 er kabelens kapasitans, ϵ_r er permittiviteten, $\Delta \epsilon_r$ er endringen i kapasitans, og $\chi''(\omega)$ er den dielektriske susceptibiliteten som samsvarer med responsfunksjonen f(t) i tidsdomenet[16].

Tapsfaktoren er definert som forholdet mellom imaginær og reell permittivitet[16].

$$tan\delta(\omega) = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_r + \Delta\epsilon_r(\omega)}$$
(11)

2.4 Destruktiv diagnostikk

Destruktiv diagnostikk er en samlebetegnelse for flere ulike diagnosemetoder. Blant de vanligste er dissekering og måling av gjennomslagstyrke. Dette er diagnostikk som vanligvis utføres dersom ikke-destruktiv diagnostikk ikke kan benyttes på grunn av større skader på kabelen eller for å undersøke om antagelsene fra den ikke-destruktive diagnostikken stemmer.

3 Metode

3.1 Testobjekt og preparering

Testobjektetene er sammensatt av fire hovedbestanddeler: Terminering, skjøt, guard og kabel. Kabelen som benyttes er en $95mm^2$ PEX aluminium kabel med en strippbar ytre halvledende skjerm på 2,5-3 meter.



Figur 3.1: Testobjektet: 1: Kabelskjøt, 2:Terminering, 3:Kabel, 4: Kabel hvor ytre halvleder er fjernet, 5: Guard.

3.1.1 Skjøt med redusert tverrsnitt

For å kunne modellere en skjøt med dårlig kontakt som enkelt kan reproduseres på alle testobjektene, ble det ytterste laget med kordeler fjernet fra lederen. På denne måten kan tverrsnittet reduseres fra $95mm^2$ til $38,5mm^2$ på alle testobjektene uten særlig mye avvik. For å bygge opp tverrsnittet på stedet hvor skjøten er, ble det laget en hylse av aluminium.

Leder 95 mm^2
Ytre Halvleder
PEX
Leder 38,5 mm^2

Figur 3.2: Kabel med redusert tverrsnitt.

Det er lagt inn et tynt lag PTFE(Teflon) som isolator i hele metallhylsen utenom en liten del i ene enden. Dermed vil det ikke flyte strøm i hylsen, samtidig som feltet i hele skjøten er på samme nivå.



Figur 3.3: Skjøtehylse med teflon

Skjøtesett fra Raychem av typen RTK-S1P-B/L ble brukt til å isolere metallhylsen etter instruksjonene gitt av leverandør. Før de ulike hylsene som skjøten

består av krympes på, fylles hulrommene i metallskjøtehylsen inn med gul mastik for å hindre hulrom i skjøten. Ved krymping er det viktig å bruke en propanbrenner som gir nok varme for å få fin og jevn krymping.

Den første hylsen i skjøtesettet er feltstyrende og har som oppgave å fordele feltet over hele skjøten. Deretter benyttes en hylse som kombinerer skjøtisolasjon og skjøtens ytre halvleder. Utenfor dette legges det et jordingsnett av fortinnet kobber. Tilslutt legges en isolerende hylse utenpå hele skjøten, denne er noe lenger enn de andre hylsene for å få skjøten vanntett. Alle de ulike hylsene krympes på ved hjelp av propanbrenner hver for seg.



Figur 3.4: Kabelskjøtens oppbygging hvor A: Skjøtehylse, B: Kabelisolasjon, C: Gul mastik, D: Skjøtisolasjon, E: Ytre halvleder kabelskjøt F: Feltkontroll kabelskjøt[20].

3.1.2 Feltaldrede skjøter

For å sammenligne resultatene fra testobjektene med faktiske hendelser ble det utført diagnostikk på en trefase feltaldret kabel med to trefase skjøter. Kabelen kommer fra Eidsiva Energi Anlegg og er en $3 \times 240 mm^2$ montert i 1986.

Lederene har et annet tverrsnitt enn dem som benyttes i testobjektene, skjøtene er alle av typen Raychem som er samme type skjøt som benyttes i prøveobjektene. Diagnostikken påvirkes ikke nevneverdig av tverrsnittet og dermed regnes resultatene som meget sammenlignbare.

Før diagnostiseringen begynte ble skjøtene kappet ut av kabelen og isolasjonsresistiviteten ble målt i hver fase for å få en indikasjon på fuktinnhold og tilstand på isolasjonen. Isolasjonsresistiviteten ble målt ved 2500 V ved hjelp av en Megger. Fasene ble deretter skilt fra hverandre og hver skjøt ble pakket inn i aluminiumsfolie for å være sikker på å holde eventuell fuktighet inne. Det ble laget terminering og guard på samme måte som de andre testobjektene.

Deretter ble skjøtene utsatt for samme diagnostikk som testobjektene. Med unntak av tenn- og slokkespenning som kun ble utført ved 50 Hz.

3.1.3 PD-fri terminering

Termineringene som lages er viktige å få PD-fri for å være sikker på at feilen ikke ligger i termineringen. Dette må gjøres i hver ende av kabelen for å unngå høyt felt hvor den ytre halvlederen er kuttet. For å lage en terminering som er fri for PD, strippes først den ytre halvlederen av kabelen Det er viktig å ha et stykke isolasjon mellom termineringspunkt og ytre halvleder for å unngå krypstrømmer.

Ved stripping er det viktig å unngå skader på PEX-isolasjonen og ytre halvleder, samt å sørge for et rett kutt. Kabelen må sjekkes for skader og støv, vask kabelen om nødvendig. Legg deretter på ca. 2mm med halvledende lakk i overgangen mellom ytre halvleder og isolasjonen. For å få en fin kant på lakken, anbefales det å bruke en limfri tape til å maskere.

Etter dette legges feltstyrende mastik på skjøten. Mastiken skal overlappe ca. 2 cm inn på halvlederen og gå rundt 8 cm ut på isolasjonen. Det er viktig at det ikke setter seg støv under mastiken, og at det det ikke oppstår luftbobler. Deretter legges det selvvulkende tape i 6 lag, hvor tapen begynner og slutter på halvledersiden. Denne tapen skal legges stramt for å være sikker på at det ikke er luftbobler under mastiken.



Figur 3.5: Skisse av terminering

3.1.4 Guard

For å kun utføre dielektrisk respons over skjøten må endeavslutningene isoleres fra skjøten. Dette gjøres ved å lage en guard som fysisk skiller skjøten fra endeavslutningene. Guarden lages ved å file bort en ring på omtrent 4 mm av kabelens halvleder mellom endeavslutningene og skjøten. Deretter pusses PEXisolasjonen glatt. Det er viktig å fjerne minimalt med med isolasjon ved filing. Hakket fylles med silikonfett for å unngå hulrom. Deretter legges det på en krympeslange på omtrent 60 mm. Utenpå krympeslangen legges et lag med aluminiumsfolie over hakket som en skjerm for å forhindre feltforsterkning. Deretter surres aluminiumsfolien med fortinnet kobbertråd for å holde aluminiumsfolien på plass. Tilslutt legges det på et lag isolerende tape for å beskytte guarden. Her er det viktig at omtrentlig en 5 mm av aluminiumsfolien er synlig for fremtidig tilkobling.



Figur 3.6: Prinsippskisse over oppbygging av guard

For å kontollere guarden ble isolasjonsmotstanden målt med en megger og funnet tilstrekkelig høy.

3.2 Aldring av testobjekt

For å aldre testobjektene termisk er det utført kontinuerlige lastsykler med oppvarming og nedkjøling av testobjektene for å kontrollere hvordan dette påvirker skjøtens elektriske egenskaper. Med denne typen test stresses skjøten på to ulike måter. Skjøten blir utsatt for akselerert aldring da temperaturen som benyttes er høyere enn anbefalt driftstemperatur, og skjøten blir utsatt for termisk ekspansjon som kan medføre delaminering.

Oppvarmingen utføres med at det induseres en strøm i testobjektene ved hjelp av en split-core transformator. Transformatoren styres av en variabel strømforsyning som er programmert ved hjelp av Labview. Det ble montert en brannmelder for å kunne stenge av forsøket skulle noe uventet skje.



Figur 3.7: Oppsett for oppvarming av testobjekter med temperaturmåling

3.2.1 Bestemme strømbehov

Det ble laget et testobjekt spesielt for å finne ut hvilke behov det stilles til utstyret som brukes til å varme opp kablene. Denne ble laget på nøyaktig samme måte som de andre testobjektene, men ettersom den ikke skal gjennomgå PD målinger ble det plassert flere temperatursensorer inne i selve skjøten. Dermed ble det mulig å få ut all nødvendig informasjon om temperatur i lagene innenfor jordpotensialet. Det er montert temperatursensorer følgende steder:



Figur 3.8: Plassering av de ulike Termocouple sensorene og en skisse som viser plasseringen av sensorene i de ulike lagene i skjøten.

For å finne ut hvor stor strøm som var nødvendig for å holde en konstant temperatur i skjøten ble det benyttet en kombinasjon av simulering og labforsøk. Simuleringen ble gjort i Comsol Multiphysics, og gav en god indikasjon på hvilken strøm som behøvdes. Det ble deretter kjørt et par lastsykler uten testobjekter for å optimalisere strømmengden.

Etter å ha funnet hvilket strømnivå som var nødvendig for å holde testobjektet stabilt på riktig temperatur, ble det valgt ut fem strømnivåer over dette for å få minst mulig oppvarmingstid uten at ledertemperaturen overstiger nominell temperatur.

3.2.2 Styring av indusert strøm

For å styre strømmene som ble brukt i oppvarmingen ble det benyttet et Labview program. Dette hadde mulighet for å regulere strømmen i kretsen ved hjelp av en måletransformator satt på en av testobjektene. Denne typen tilbakekobling er nødvendig da ledeevnen til testobjektene endrer seg ved endring av temperaturen.

Da programmet ikke hadde mulighet for temperaturmålinger, ble det satt opp til å endre strøm ved faste tidsintervaller. Dette viste seg etter en del tester å være for tidkrevende da tidsintervallene måtte ha stor slingringsmonn for ikke å overstige den valgte temperaturen.

Programmet ble derfor skrevet om til også å kommunisere med temperaturloggeren. Dermed ble forsøket kun avhengig av et program, og oppvarmingstrømmene kunne endres ved forhåndsvalgte temperaturer. Oppvarmingen og nedkjølingen skjer dermed så fort som mulig uten fare for at temperaturene overstiger den valgte temperaturgrensen. Lastsyklingen kan dermed gå uten behov for kontinuerlig tilsyn.

Etter første temperatursykling ble det lagt inn en funksjon i programmet som teller antall fullførte lastsykler, for deretter å stoppe programmet etter et bestemt antall sykler. Labview programmet i sin helhet ligger i vedlegg D

3.2.3 Benyttede verdier

Aldringsprosessen ble utført ved to ulike temperaturer. Dette for å kunne studere aldringsmekanismene på ulike stadier og ved ulike intervaller.

 $130~^\circ\mathrm{C}$ er valgt da aldringen skal emulere en vanlig driftsituasjon med varierende last. Temperaturen i lederen utenfor skjøten ligger da på 80 °C som er 10 °C lavere enn maksimal ledertemperatur.

 $180~^\circ\mathrm{C}$ er valgt for å korte ned aldringstiden. For å oppnå såpass høy temperatur er skjøtene pakket inn i høytemperatur isolasjonsmatter. Ledertemperaturen ligger i dette tilfellet rundt 86 $^\circ\mathrm{C}.$

Det ble laget 3 prøve
objekter til bruk på 130 °C og 2 prøve
objekter til bruk på 180 °C.

For å være sikker på at alle materialene har oppnådd stabil temperatur, er det lagt inn 2 timer med konstant strøm etter at prøveobjektets kjerne har oppnådd ønsket temperatur.

For at oppvarmingen og nedkjølingen skal bruke minst mulig tid, ble det fastsatt at prøveobjektets kjerne ikke behøver å oppnå en lavere temperatur enn 35 °C. Da har PEX-isolasjonen vært tilstrekkelig lenge under 90 °C til å kunne sammenlignes med normal drift.

Prøveobjektene har gjennomgått lastsykling stegvis hvor hvert steg er presentert i tabell 3.1 og 3.2. Det er utført en grundig ikke-destruktiv diagnostikk av prøveobjektene ved de ulike stegene for å kunne gi en detaljert forståelse av hvordan aldringen påvirker kabelsystemet.

Tabell 3.1: Utførte lastsykler ved kjernetemperatur på 130 °C

Lastsykler	20	40	50	100	150	200
Tid [h]	40	80	100	200	300	400

Tabell 3.2:	Utførte	lastsykler	ved k	jernetem	peratur	på	180	$^{\circ}\mathrm{C}$
-------------	---------	------------	-------	----------	---------	----	-----	----------------------

Lastsykler	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Tid[h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120

Som en kontroll ble temperaturene ved jordpotensial på prøveobjektene sammenlignet med testskjøten hvor kjernetemperaturen måles.

En figur som viser hvilke temperaturer skjøten blir utsatt for gjennom aldringen er tilgjengelig i vedlegg B.

Tabell 3.3: Avlest temperatur på jordpotensiale ved kjernetemperatur på 130 $^{\circ}\mathrm{C}$

${f Avlest temperatur jordpotensiale}[^{\circ}C]$							
Prøveobjekt 1 Prøveobjekt 2 Prøveobjekt 3 Testskjø							
81	82	79	84				

Tabell 3.4: Avlest temperatur på jordpotensiale ved kjernetemperatur på 180 $^{\circ}\mathrm{C}$

Avlest temperatur jordpotensiale [$^{\circ}C$]							
Prøveobjekt 4 Prøveobjekt 5 Testskjøt							
112	141	145					

3.3 Ikke-destruktiv Diagnostikk

For å få bedre forståelse om hva som skjer med kabelene underveis ble det benyttet to ulike målemetoder. PD måling benyttes til gi konkrete målinger av

degraderende PD. Dielektrisk respons gir en mer generell tilstandsvurdering av systemets isolasjon men sier lite om konkrete defekter i testobjektet. De ulike målingene ble utført ved omtrentlig samme temperatur i testobjektet.

3.3.1 PD-måling

Utstyret som brukes for å måle PD i testobjektet er av typen Omicron MP600. For å kunne måle PD med flere frekvenser uten å bytte komponenter i oppsettet ble det benyttet en høyspenningsforsterker (TREK) koblet til en digital variabel signalgenerator. For å kontrollere spenningene og frekvensen i kretsen, er det satt opp et oscilloskop som måler spenningen ut fra signalgeneratoren, høyspenningsforsterkeren og lavpassfilteret.



Figur 3.9: Oppsett av målekrets med Omicron MP600[21].

Figur 3.9 viser oppsettet av målesystemet. Måleenheten MPD 600 er koblet via en multimode fiber til en mediakonverter som deretter er koblet til en datamaskin via USB. I tillegg er måleenheten koblet til en måleimpedans(CPL 542) via BNC kabler, samt spenningsforsynt via et batteri for å redusere støyen i målingen. Måleimpedansen er deretter tilkoblet i bunnen av koblingskondensatoren.

Utstyret kalibreres med en kjent ladning mellom koblingskondensatoren og jord hver gang oppsettet endres eller et nytt testobjekt skal måles. Det samme gjøres med spenningen og frekvens.

Da en PD-måling plukker opp en del støy fra omgivelsene i tillegg til utladninger er det viktig å bestemme støygrensen for å redusere datamengden. Dette gjøres ved å ta en måling og se hvor det legger seg et bånd som dekker hele perioden. Dette båndet kalles et støybånd, alt under dette båndet vil være lite relevant for målingen, og kan derfor fjernes ved å justere filtreringen i programvaren. Dette reduserer også lagringskapasiteten som behøves.
Koblingskondensatoren (C_k) er en 150 kV, 800 pF HV kapasitans montert på en jordet metallplate. Det er ønskelig at C_k er større eller lik kapasitansen til testobjektet, noe denne oppfyller da testobjektene er målt til å ligge mellom 200-300 pF.

Faseforskyvning

For å finne ut hvor mange grader faseforskyvning som har oppstått ble det plassert en ståltråd på en ledende del av testobjektet. Man er dermed sikker på å få tydelige koronautladninger som er lett gjenkjennelig på faseplotten. Disse skal ligge på kurvens høyeste punkt. Ligger utladningene utenfor dette vil det være mulig å måle faseforskyvningen mellom utladningene og høyeste punkt på kurven. Faseforskyvningen kan da legges inn i antall grader og programvaren vil sørge for å kompensere for dette.

Slokk-/tennspenning

I tillegg til registrering av PD måles også tenn- og slukkespenning ved de ulike frekvensene. Dette gjøres ved at spenningen reduseres stegvis fra målespenningen ved en bestemt tidsintervall. Hvert steg utgjør 250 V og benyttes i fire minutter. Spenningsnivået hvor det ikke lenger registreres PD kalles slukkespenning.

Tennspenningen finnes ved å påtrykke en spenning som ikke gir PD for deretter å øke spenningen stegvis. Dette gjøres med samme steglengde og intervall som for slukkespenning

Støyredusksjon

For å forhindre støy fra koronautladninger, blir det montert koronaringer på steder hvor det kan oppstå høyt felt. På endeavslutningen ble coronaringen festet med bolt til kabelskoen for å eliminere dårlig kontakt og vibreringer. Da dette ikke var nok for å oppnå ønsket målenøyaktighet ble alt eksternt elektrisk utstyr tilkoblet cellens uttak fjernet. Dette reduserte støynivået ytterlig.

Det er benyttet et lavpassfilter i kretsen for å filtrere ut støy generert av høyspenningsforsterkeren og signalgeneratoren. Da målingene som skal utføres ikke gjøres ved høyere frekvens enn 100 Hz, er knekkfrekvensen lagt til mellom 200-800 Hz, avhengig av den kapasitive lasten. Filteret er designet til å brukes på laster mellom 400 pF og opp til 4 nF på spenningsnivåene som benyttes i testen. Testobjektet og koblingskondensatoren ligger til sammen på rundt 1 nF.

Behandling av måleresultater

Data fra PD-målingen ble eksportert til filer i et MATLAB støttet format og siden behandlet i numerisk programvare. Det ble laget et script som hentet ut 600 tilfeldig valgte perioder fra målingene med mer enn 600 perioder. På denne måten kan resultatene bedre sammenlignes. Resultatene blir presentert som faseplot(PrPDA) som gir en grunnleggende oversikt over utladningenes plassering og størrelse.

Det er også hentet ut statistiske data som totalt antall utladninger, utladninger per periode og middelverdier presentert i tabell.

Scriptene som er benyttet i oppgaven er tilgjengelig i vedlegg D

Måleparameter

Ved tilstandskontroll er det vanlig å begrense spenningen til $2 \times U_0$ for å ikke påføre objektet skade under måling. Det er valgt testfrekvenser mellom 0,1 Hz og 100 Hz basert på de ulike kommersielle målemetodene. U_0 på de ulike testobjektene er 6 kV_{rms} , målespenning blir da 12 kV_{rms} .

Da PD er en stokastisk variabel må den måles over tid. Derfor er måletiden satt til minimum 600 perioder. For at ikke all tid skal gå med på PD-måling, vil det ikke bli målt med alle frekvensene i hvert forsøk. Målingene utføres først ved 50 Hz og dersom det ikke observeres utladninger i noen av testobjektene ved denne frekvensen, fortsettes degraderingsprosessen. Dersom det registreres utladninger testes objektene ved alle frekvenser.

Tabell 3.5: Testfrekvenser, antall perioder og måletid for hver frekvens

Frekvens[Hz]	Perioder	Nødvendig tid[h]
0,1	600	1,7
1	600	0,2
10	3000	0,1
50	15000	0,1
100	30000	0,1

3.3.2 Dielektrisk respons

Instrumentet som er benyttet for dielektrisk responsmåling er isolasjonsdiagnostiseringssystemet IDA 200. Dette kan sammen med IDA HVU(High Voltage Unit) levere 30 kV_{peak} i frekvensområde 0,1 mHz - 100 Hz.

IDA 200 er et system for inspeksjon og analyse av dielektriske materialer. Metoden som benyttes er dielektrisk spektroskopisk. Dette er en metode som måler de dielektriske egenskapene til objektet som funksjon av frekvens. Ved å studerer de dielektriske egenskapene ved ulike frekvenser er det mulig å skille de ulike tapsmekanismene.



Figur 3.10: Oppsett for impedansmåling med IDA[18]

Systemet påtrykkes en sinusspenning med en fastsatt frekvens og måler spenningen samt lekkasjestrømmen gjennom testobjektet. Spenningen måles med Voltmeteret i figur 3.10. Strømmen måles med Elektrometeret i serie med testobjektet. IDA konverterer signalene til digitale signaler. Data fra denne målingen danner grunnlaget for beregningene i isolasjonsdiagnostiseringssystemet.

Systemet kan modellere testobjektet etter hvilke parameter det er ønskelig å studere. Modellene kan være:

- 1. RC serie/paralellmodell (R, C)
- 2. Dielektrisk modell ($\epsilon', \Delta \epsilon', \epsilon'', tan \delta$)
- 3. Resistiv modell (ϵ, ρ, σ)
- 4. Kompleks kapasitan
smodell $(C',\,C'',\,\Delta C')$

Det er valgt å benytte kompleks kapasitansmodell for denne oppgaven på grunn av testobjektets avanserte geometri. Med eksempelvis dielektrisk modell er det behov for eksakt kjennskap av testobjektets geometri for å forstå verdiene for permittivitet, noe som ikke er nødvendig med kompleks kapasitansmodell. Kompleks kapasitansmodell tar også hensyn til endring av dielektriske egenskaper under testing.

Reell permittivitet ϵ' tilsvarer reell kapasitans C', kompleks permittivitet ϵ'' tilsvarer kompleks kapasitans C" når den komplekse kapasitansmodellen benyttes.



Figur 3.11: Måleoppsett for UTS på IDA 200 ved dielektrisk respons[18]

Måleoppsettet for impedansmåling med IDA 200 er vist på figur 3.11. Målingene er gjort etter måleoppsettet UTS (Ungrounded Specimen Test) med guard.

Måleparameter

Dielektrisk respons utføres ved flere ulike spenningsnivåer og frekvenser. 12 kV_{rms} er valgt som høyeste spenningsnivå for å gi best mulig sammenligning med PDmåling. Det er valgt intervaller på $\frac{U_0}{2}$ og $\frac{U_0}{4}$. 100Hz ble valgt som høyeste frekvens på grunn av utstyrsbegrensninger, laveste frekvens er valgt til 0,1Hz for å unngå romladninger[22]. Tabell 3.6: Testfrekvenser og spenninger benyttet ved dielektrisk respons målinger

Spenningsniv å $[kV_{rms}]$:	1 - 1,5 - 3 - 4,5 - 6 - 9 - 12 - 6 - 1,5
Frekvens[Hz]:	0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 -5 - 10 - 20 - 50 - 100

3.4 Destruktiv Diagnostikk

Destruktiv diagnostikk er utført på de ulike objektene etter at all ikke-destruktiv diagnostikk er utført. Gjennomslagsstyrke ble ikke målt på testobjektet hvor gjennomslag oppstod under aldring.

3.4.1 Måling av gjennomslagsstyrke

Gjennomslagsstyrken ble målt ved å utsette objektene for en stadig stigende spenning. Det ble på forhånd antatt at gjennomslag vil oppstå ved en spenning høyere enn $10 \times U_0$. For å være sikker på at gjennomslaget oppstod i skjøten og ikke i termineringen eller guard, ble disse erstattet med vanntermineringer.

Lederen i objektet ble koblet til høyspenningskilden og ytre halvleder ble jordet. Spenningen ble satt til å øke ved et intervall på omtrentlig 500 V/s. Etter IEC 60243-1 skal mesteparten av gjennomslagene oppstå mellom 120 s og 240 s[24]. Spenningen vil da ligge mellom 60 kV og 120 kV innenfor det fastsatte tidsrommet og det er naturlig å anta at gjennomsalgene vil oppstå i dette tidsrommet.

3.4.2 Dissekering

Det er utført disseksjon på alle prøveobjektene hvor det er oppstått PD, i tillegg er det utført disseksjon på et par av objektene hvor det ikke er oppstått PD for å vurdere aldringen. Testobjektene med PD ble nøye undersøkt for å finne lokasjonen for utladningene og for å finne ut hvor gjennomslaget har oppstått. Dette ble utført med en skarp kniv hvor hvert lag i skjøten ble skåret på langs, fotografert og deretter fjernet. Selve PEX isolasjonen inne i skjøten ble skåret i skiver på 0,25mm ved hjelp av en mikroton for å kunne analyseres nøye mot en hvit overflate eller med mikroskop.

4 Resultat

I dette kapittelet presenteres de viktigste måleresultatene fra laboratorieforsøkene.

Forsøkene er delt inn i tre deler: To laboratorieforsøk med ulik kjernetemperatur og en diagnose av feltaldret kabel.

4.1 Forsøk 1 - 130 °C

Lastsyklingen ble avsluttet etter 200 sykler og tilsammen 400 timer på kjernetemperatur 130 °C da det ikke ble observert utladninger i løpet av den tiden. For dette forsøket er det laget tre testobjekt (1-3)

4.1.1 Partielle utladninger

Partielle utladninger er målt etter hver fullførte temperatursykling. Målingene ble utført med 12 kV $(2 \times U_0)$ ved 50 Hz. Resultatene er presentert for testobjekt 2. Målinger for de resterende objektene etter 200 lastsykler ligger i vedlegg A.



Figur 4.1: PD måling etter 200 lastsykler på testobjekt 2

4.1.2 Dielektrisk respons

Dielektrisk respons er målt etter hver fullførte temperatursykling. Resultatene er presentert med kompleks kapasitans (C'') ved testspenning på 1 og 12 kV på testobjekt 2. Det er også laget en figur som viser spenningsavhengigheten i målingene.



Figur 4.2: Kompleks kapasitans i testobjekt 2 ved 1kV



Figur 4.3: Kompleks kapasitans i testobjekt 2 ved 12kV



Figur 4.4: Spenningsavhengighet ved dielektrisk respons på testobjekt 2 etter 200 lastsykler

Målinger fra de resterende testobjektene ligger i vedlegg A.

4.1.3 Disseksjon

Testobjekt 2 ble dissekert for å visuelt vurdere aldringen av skjøtene.



(a) Testobjekt 2 viser lite tegn til okside- (b) Noe misfarget mastik på innsiden av ring

den feltstyrende hylsen.

Figur 4.5: PEX-isolasjon i prøveobjektet viser lite tegn til aldring

4.2Forsøk 2 - 180 °C

For dette forsøket ble det laget to testobjekter(4-5).

Testobjekt 4 viste tidlig tegn til mekanisk feil da målt temperatur i skjøtens jordpotensial, tabell 3.4, lå hele 33 °C under referansetemperaturen.

Lastsyklingen ble avsluttet etter 65 sykler da det oppstod gjennomslag i testobjekt 5.

4.2.1 Partielle utladninger

PD ble observert i testobjekt 5 ved 12 kV (2 × U_0) ved alle frekvenser, etter 60 sykler, og tilsammen 120 timer på kjernetemperatur 180 °C. Det ble ikke registrert PD i testobjekt 4. Her presentert ved 50 og 0,1 Hz, da dette er de mest brukte målefrekvensene.

PRPD for testobjekt 4 og resterende frekvenser for testobjekt 5 ligger i vedlegg A.



Figur 4.6: PRPD ved 12 kV og 50Hz for testobjekt 5, aldret i 60 sykler, og 120 timer ved kjernetemperatur 180 °C.



Figur 4.7: Fasekompensert PRPD ved 12 kV og 0,1Hz for testobjekt 5, aldret i 60 sykler, og 120 timer ved kjernetemperatur 180 °C.

Faseforskyvning

Ved frekvensen 0,1 Hz oppstod det en faseforskyvning mellom målt spenning ut av lavpassfilteret og Omicron instrumentet. Faseforskyvningen ble målt til omtrent -60 grader.



Figur 4.8: Sammenligning av faseplot med og uten fasekompensering på 0,1Hz

Statistiske måleresultater

Det er samlet statistiske data for alle frekvenser på testobjekt 5. For å øke lesbarheten er det laget figurer av benyttede data. Hele målingene er tilgjengelig

i vedlegg A

Det ble observert en stor ulikhet i antall utladninger som følge av frekvens i testobjekt 5. Gjenomsnittstørrelsen på utladningene ved de ulike frekvensene i samme testobjekt varierer også noe.



Figur 4.9: Antall registret PD i løpet av 600 tilfeldige sykler i testobjekt 5 etter 60 lastsykler.



Figur 4.10: Gjennomsnittlig størrelse på PD i løpet av 600 tilfeldige sykler i testobjekt 5 etter 60 lastsykler.

Tenn- og slokkespenning

Tenn- og slokkespenningen synker som følge av reduskjon av frekvens i testobjekt5



Figur 4.11: Tenn og slokkespenning på testobjekt 5 ved de ulike frekvensene etter 60 sykler på 180 °C.

4.2.2 Dielektrisk respons

Dielektrisk respons ble målt etter hver fullførte temperatursykling. Resultatene er presentert med kompleks kapasitans (C'') ved testspenning på 1 og 12 kV. For å øke leseligheten er det presentert målinger for hver tyvende sykling. Testobjekt 4 er bare presentert med 1 kV da 12 kV målingene er tilnærmet like.



Figur 4.12: Kompleks kapasitans i testobjekt 4 ved 1kV.



Figur 4.13: Kompleks kapasitans i testobjekt 5 ved 1kV.



Figur 4.14: Kompleks kapasitans i testobjekt 5 ved 12kV.



Figur 4.15: Spenningsavhengighet ved dielektrisk respons på testobjekt 5 etter 60 lastsykler.

4.2.3 Disseksjon

Testobjekt 4 og 5 ble dissekert for å vurdere aldringen av skjøtene. I testobjekt 5 ble det forsøkt å finne hvor gjennomslaget/-ene kan ha oppstått. Skjøten ble kappet opp på langs og delene ble fjernet lag for lag.

Det var ved disseksjon tydelig at testobjekt 5 var utsatt for høye temperaturer. Isolasjonen i skjøten var sterkt misfarget og det meste av mastiken fra de ytre lagene var presset ut av kantene på skjøten. Den indre feltstyrende hylsen var veldig sprø og viste tydelige tegn til oksidasjon. Testobjekt 4 viste lite tegn til oksidasjon.

Det ble observert flere hulrom i PEX-isolasjonen fra innsiden av skjøten.



Figur 4.16: Mastik som er blitt presset ut a skjøten.





Figur 4.17: Sammeligning av testobjekt 4 og 5. Testobjekt 5 er øverst på bildet og viser tydelig aldring. Testobjekt 4 er nederst, og viser tilnærmet ingen tegn til aldring



(a) PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten

(b) Snitt av (a)

Figur 4.18: PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten, omtrent 2 cm fra skjøte
hylsen. Det er tydelige deformeringer av indre halvleder, samt bobler i PEX-isolasjonen



sett fra siden.

(a) PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten (b) Utsnitt av (a) hvor PEX-isolasjonen er tydelig deformert

Figur 4.19: PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten, omtrent 2,5 cm fra skjøtehylsen. Det viser tydelig bobledannelse i PEX materialet.



(a) PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten (b) Utsnitt av (a) hvor indre halvleder er i testobjekt 5

tydelig deformert

Figur 4.20: PEX-isolasjon fra innsiden av skjøten, omtrent 1,5 cm fra skjøtehylsen. Det er tydelig deformasjon av indre halvleder .

Forsøk 3 - Feltaldret kabel 4.3

For dette forsøket ble det benyttet 6 feltaldrede skjøter(A-F).

Før videre diagnose ble tilstanden på skjøtene vurdert med en isolasjonsresistansmåling.

Feltskjøt	$Isolasjonsresistans[\Omega]$		
А	643 G		
В	2,47 T		
С	2,46 T		
D	2,47 T		
Е	2,48 T		
F	2,47 T		

Tabell 4.1: Isolasjonsresistans på de ulike feltaldrete skjøtene.

Basert på isolasjonsresistansen ble feltaldret skjøt A nærmere undersøkt, og det ble funnet et tydelig gjennomslag. På grunn av dette ble det ikke utført videre målinger på dette objektet.

4.3.1 Partielle utladninger

Det ble registrert PD i alle feltaldrede skjøter ved 12 kV (2 × U_0). For å redusere mengden data er det plukket ut to måleserier(feltskjøt C og E) som presenteres her. PRPD er presentert ved 50 og 0,1 Hz, da dette er de mest brukte målefrekvensene.

Målingene for de resterende objektene og frekvenser er presentert i vedlegg A.



Figur 4.21: PRPD ved 12 kV og 0,1Hz i feltaldret skjøt C.



Figur 4.22: PRPD ved 12 kV og 50Hz i feltaldret skjøt C.



Figur 4.23: PRPD ved 12 kV og 0,1Hz i feltaldret skjøt E.



Figur 4.24: PRPD ved 12 kV og 50Hz i feltaldret skjøt E.

Statistisk måleresultat

Det er samlet statistiske data for alle frekvenser for de ulike feltaldrede skjøtene. Hele målingen er tilgjengelig i vedlegg A.

For å øke lesbarheten er det laget en figur hvor antall PD per periode ved 50 Hz sammenlignes med testobjekt 5 fra forsøk 2.



Figur 4.25: Antall PD per periode målt ved 50 Hz

Tenn- og slokkespenning

Tabell 4.2: Tenn- og slokkespenninger for de ulike feltaldrede skjøtene ved 50 Hz.

Feltskjøt	Tennspenning [kV]	Slokkespenning [kV]
В	11,75	11,5
С	11,25	11,0
D	11,25	9,0
Е	9,5	8,5
F	10,0	9,5

4.3.2 Dielektrisk respons



Figur 4.26: Kompleks kapasitans i de ulike feltaldrede skjøtene ved 1kV



Figur 4.27: Kompleks kapasitans i de ulike feltaldrede skjøtene ved 1kV



Figur 4.28: Spenningsavhengighet ved dielektrisk respons på Feltaldret skjøt B ved 0,1 og 50 Hz

4.3.3 Gjennomslagsstyrke

Det er observert at alle gjennomslagstyrkene er større enn $10 \times U_0$. Resultater merket med > indikerer at målingen ble avbrutt manuelt.

Feltskjøt	Gjennomslagstyrke [kV]
В	87,9
С	63,2
D	> 98, 1
Е	93,0
F	> 92, 1

Tabell 4.3: Gjennomslagstyrke målt på feltaldrede skjøter.

4.3.4 Disseksjon

Ved disseksjon av de 5 feltaldrede kablene ble det ikke observert noen klare tegn til aldring som en følge av varme og oksidering.



Figur 4.29: De feltaldrede skjøtene viser lite tegn til aldring. PEX kabelen har her fin farge og mastiken er fleksibel dog noe mørk gul

Det ble observert skader og misfarginger som tyder på hulromsutladninger ved overgangen fra skjøtehylse til PEX isolasjon på alle 5 skjøtene. De tydeligste ble funnet i skjøt D. Det kan også bemerkes at det er betydelige ujevnheter i påføringen av halvlederlakken ved overgang mellom PEX og ytre-halvleder.



(a) Hvite flekker hvor isolasjonen er brent(b) Steder hvor halvlederlakken er lagt påbort og fyllstoffet er igjen.noe ujevnt.

Figur 4.30: Hvite flekker hvor isolasjonen er brent og noe ujevn halvlederlakk. Her representert med feltskjøt D.

Feltaldret skjøt D viste et tydelig gjennomslag etter gjennomslagstestene. Også dette oppstod i overgangen mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon.



(a) Gjennomslag i isolasjonen utenfor felt-styrende hylse
(b) Gjennomslag i feltstyrende slange ved overgangen fra skjøtehylse

Figur 4.31: Tydelig gjennomslag i både skjøtens isolasjon og feltstyrende slange som ble funnet mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon.

5 Diskusjon

5.1 Forsøk 1 - 130 °C

PD-målingene i figur 4.1 viser ingen klare utladninger, og det er dermed naturlig å anta at aldringstiden og temperaturen ikke er tilstrekkelig for å oppnå utladninger. 130 °C var den høyeste temperaturen det var mulig å oppnå uten ekstra isolasjon over skjøten samtidig som temperaturen i selve lederen ikke overgikk 80 °C.

Måleresultatene indikerer et klart støybånd på 1,5 pC, som er nivået hvor loggeterskelen bør ligge. Støybåndet stammer antageligvis fra en støykilde utenfor selve måleoppsettet, men støyen er såpass lav at det er uproblematisk å filtrere ut målingene under dette nivået.

Det var ikke forventet utladninger på dette tidspunktet i aldringsprosessen basert på tidligere forsøk utført med samme skjøt-temperatur[10]. Resultatene er dermed som ventet.

Dielektrisk respons målingene viser ingen tydelig endring som følge av aldringen. Man kan se av figur 4.2 og 4.3 at prøveobjektets komplekse kapasitans varierer med både prøvespenning og med antall lastsykler som er utført.

Variasjonen ved samme spenningsnivå er såpass liten at det er vanskelig å si om årsaken er en endring i selve skjøten, eller om endringen kommer av unøyaktighet ved måling.

Det observeres en ulikhet når målingene ved de forskjellige spenningsnivåene sammenlignes. Dette fremtrer ved lavere frekvenser, noe som antyder at tapet stammer fra konduktive tap. Dette bekreftes ytterligere med formel (10) hvor en lavere frekvens vil gjøre ledningsevnen σ mer dominerende. Dette viser også igjen ved spenningsavhengighet i figur 4.4, hvor det kommer frem at 0,1 Hz er betydelig mer spenningsavhengig enn 50 Hz.

5.2 Forsøk 2 - 180 °C

Testobjekt 4 ligger 33 °C under forventet temperatur under aldringsprosessen. Dette fører til en sterkt redusert aldring i dette objektet. Dersom sammenhengen mellom temperatur ved jordpotensialet og skjøtehylse er konstant, vil dette bety en temperatur ved skjøtehylsen på omtrentlig 145 °C. Sett i sammenheng med resultatene fra forsøk 1 tyder det på at aldringen i dette prøveobjektet ikke vil nå kritisk nivå før lenge etter testobjekt 5. Det er naturlig å anta at årsaken til den lave temperaturen er at skjøtehylsen har oppnådd kontakt med lederen, noe som fører til økt ledeevne og dermed lavere temperaturutvikling. Dette støttes opp om av dielektrisk respons, vist i figur 4.12, hvor endringene i tap gjennom aldringsprosessen er marginal. Fraværet av aldring ble videre bekreftet ved en disseksjon hvor skjøten viste lite tegn til aldring.

Det ble ikke observert PD i testobjekt 4. Dette stemmer godt med antagelsene.

PD-målingene fra testobjekt 5 viser utladninger ved alle frekvensene. Utladningene ser ut som hulromsutladninger med den karakteristiske buen som kan observeres i figur 4.6.

Disse utladningene antyder at aldringen har nådd et nivå hvor det er oppstått hulrom i kabelisolasjonen. Dette bekreftes ved disseksjon av skjøten. PEXisolasjonen som lå inne i selve skjøten var tydelig oksidert og ganske sprø, med flere små hull i materialet, vist i figur 4.19. Dette kan tyde på at isolasjonen har vært utsatt for høy varme, og at det er varmen i sammenheng med økt sprøhet og oksidasjon som er årsaken til hulrommene.

Det må bemerkes at skjøten er aldret i fem nye sykluser på 180 °C mellom tiden PD-målingene ble utført og disseksjonen. Dette kan ha ført til et økt antall hulrom, og dermed er ikke nødvendigvis hulrommene funnet i disseksjonen de samme hulrommene som medførte utladningene.

I tillegg til hulrommene observert i PEX-isolasjonen, ble det i isolasjonen nærmest skjøtehylsen, vist i figur 4.20, observert en deformering av indre-halvleder. Det kan også observeres et tydelig hulrom mellom indre-halvleder og PEXisolasjonen. Det er flere slike hulrom som varierer i størrelse og antall fordelt over et område på 3-4 cm, vist i figur 4.18.

Ved laveste målefrekvens ble det observert tydelig faseforskyvning. Dette kommer antageligvis av RLC-kretsen som benyttes ved måling av PD i sammenheng med den lave frekvensen som benyttes. Faseforskyvingen ble korrigert i programvaren etter at vinkelen ble målt mot koronautladninger ved samme frekvens. Da koronautladninger vanligvis ligger helt på toppen av sinuskurven vil dette være en rimelig nøyaktig metode.

Det observeres i figur 4.9 en økning i antall utladninger ved synkende frekvens, noe som antageligvis henger sammen med statistisk tidsforsinkelse δt_{lag} skissert i figur 2.6.

Tenn- og slokkespenningen, vist i figur 4.11, viser en tydelig frekvensavhengighet hvor både tenn- og slokkespenningen blir lavere ved lavere frekvens. Dette stemmer godt med resultater funnet i [25] og kan stamme fra en økt dominans av ledningsevnen. Det kan også observeres at den gjennomsnittlige størrelsen på ladningene går opp ved lavere frekvens. Dette er presentert i figur 4.10.

Dielektrisk respons måling av testobjekt 5 viser ikke konduktive tap før aldringen har begynt. Dette kan sees i figur 4.13 og 4.14, og tyder antagelivis på store mengder flyktige stoffer i skjøten. Etter påbegynt aldring kan det observeres en økning i de konduktive tapene frem til 40 utførte lastsykler. Det økende tapet kan komme av flyktige stoffer som fordamper fra skjøten, og at materialene i skjøten oksiderer. Dette vil føre til et økt tap over isolasjonsmaterialet.

Etter 40 lastsykler synker tapet. Dette stammer antageligvis av at mastik presses ut av endene på skjøten, noe som ble observert i løpet av aldringen. Når mastik forsvinner ut av skjøten, vil dette endre på selve dimensjonen på prøveobjektet, noe som vil påvirke målingene.

Spenningsavhengigheten ved dielektrisk respons i figur 4.15 viser ingen tydelig endring i tap ved de ulike spenningene på 50 Hz. Dette antyder at det ikke er mulig å observere PD ved dielektrisk respons ved denne graden av aldring. Dette kan ha sammenheng med at størrelsen på utladningene er forholdsvis lav. Ved 0,1 Hz kan det observeres en svak økning av tapet ved økning av frekvens. Dette kan forklares med konduktive tap diskutert i forsøk 1.

Årsaken til gjennomslaget i prøveobjektet ble ikke funnet under disseksjon av kabelen. Basert på sprøheten av materialene og antallet hulrom i isolasjonen er det mulig å forstå at gjennomslaget har oppstått.

5.3 Forsøk 3 - Feltaldret skjøt

Ved måling av isolasjonsmotstanden i de ulike feltaldrede skjøtene ble det funnet høy isolasjonsmotstand i alle skjøtene utenom skjøt A. Den høye isolasjonsmotstanden kan antyde at skjøtene ikke inneholder store mengder fuktighet, da dette ville ført til betydelig lavere verdier. De målte verdiene stemmer godt overens med verdiene for tørr kabel fra en tidligere masteroppgave [18].

Feltskjøt B og C viser minimalt med utladninger ved 50 Hz, og ingen utladninger ved 0,1 Hz. Ved 50 Hz har utladningene den karakteristiske bueformen som antyder hulromsutladninger, hvilket kan tyde på at begynnende PD ikke vil være synlig ved lave frekvenser. Antagelig er årsaken til dette overflatekonduktivitet som hindrer oppbygging av felt ved lave frekvenser. Valget med å starte PD-målinger på 50 Hz virker derfor fornuftig.

Feltskjøt D, E og F viser tydelige utladninger av en større skala, med utladninger godt over 2 nC ved 50 Hz. Dette er en høy verdi da PD vanligvis ligger i pC størrelsen.

Det kan fra disseksjonen observeres at skjøtene ikke er utsatt for veldig høy varme, da PEX-isolasjonen ikke har blitt brunlig av oksidasjon, og mastiken fremdeles er gul. Det er dermed lite trolig at årsaken til hulromsutladningene er redusert ledeevne i skjøtehylsen som har ført til for høy varme.

En mulig årsak til hulromsutladningene ble funnet på utsiden av den feltstyrende hylsen. Her ble det observert flere blålige felt rett ved overgangen mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon. Dette ble observert på samtlige skjøter og kan tyder på et hulrom hvor det har vært utladninger. På feltskjøt D ble det i tillegg observert hvite flekker hvor isolasjonsmaterialet har brent bort og fyllstoffet ligger igjen. Dette kan tyde på at utladningene her har pågått i lenger tid enn på de andre skjøtene.

Årsaken til at det har oppstått hulromsutladninger mellom den feltstyrende kappen og isolasjonen i skjøten er antageligvis at det er en skarp kant mellom skjøtehylsen og PEX-isolasjonen. I tillegg til at skjøtisolasjonen ikke er tilstrekkelig krympet, og det er oppstått hulrom mellom den og skjøtens feltstyrende hylse.

En sammenligning av de statistiske måledataene gjort i figur 4.25 viser at det er en betydelig større mengde utladninger per periode i prøveobjekt 5 fra forsøk 2 enn det er i feltaldret skjøt E. Dette kan tyde på at det er et betydelig større antall hulrom i prøveobjekt 5 enn det er i feltaldret skjøt E, noe som ble bekreftet av disseksjonen. Dette kan være en mulig måte å skille de ulike feilene fra hverandre. Det er vanskelig å si noe om hvor langt kabelisolasjonen har kommet i aldringsprosessen ut fra dielektrisk respons målingene, da målingene kun er utført en gang. Dielektrisk respons er sterkt avhengig av objektets dimensjoner, og det mangler derfor et sammenligningsgrunnlag for de feltaldrede skjøtene. Dette fører til at ulikheter i målingene like gjerne kan skyldes selve skjøteprosessen.

Det kan observeres et noe lavere tap over hele målingen på skjøtene D, E og F, som er skjøtene med høyest utladning. Dette er likt ved både 1 og 12 kV, og det er dermed lite sannsynlig at dette indikerer PD. Det forholdsvis lave tapet kan derimot indikere lite oksidering av isolasjonsmaterialet, noe som ble bekreftes av disseksjon.

Dielektrisk respons viser noe som kan ligne på utladninger i feltskjøt B hvor det er en tydelig økning i tapet på frekvenser over 2 Hz. Dette er tilfelle på både 1 og 12 kV noe som svekker mistanken da 1 kV er langt lavere enn slokkespenningen for PD i feltskjøt B, vist i tabell 4.2. De målte utladningene ved PD-måling av samme skjøt er også omtrentlig 100 ganger lavere enn kabel E som ikke viser tegn til dette, noe som svekker mistanken ytterligere.

Den målte gjennomslagstyrken i de ulike skjøtene ble målt for å kunne vurdere hvordan aldringsprosessen har påvirket gjennomslagspenningen. Alle målingene ligger over $10 \times U_0$ noe som kan tyde på at skjøtene kunne overlevd i felt en god stund til. Tennspenningen ved 50 Hz på de ulike kablene var heller ikke lav nok til at det vil oppstå målbar PD under normal driftsituasjon.

Av de ulike gjennomslagene ble det bare funnet tydelig gjennomslag i feltskjøt D. Antageligvis er de øvrige gjennomslagene såpass små at de ikke er synlige med det blotte øye.

6 Konklusjon

Resultatene viser at termisk lastsykling av kabler er en tilstrekkelig god måte å utsette kabelskjøter for en akselerert, tørr aldringsprosess tilnærmet lik aldringen som ville oppstått i felt.

Effekten av å utsette en kabelskjøt for en temperatur på 130 °C i 400 timer fordelt på 200 sykler viser ingen klar aldring av testobjektene. Det er naturlig å anta at forholdet mellom tid og temperatur ikke var tilstrekkelig til å oppnå aldring.

En skjøt utsatt for 180 °C i 120 timer fordelt på 60 sykler viser tydelige tegn til aldring. Her har varmgangen i skjøtehylsen akselerert oksidasjonsprosessen tilstrekkelig i skjøtens isolasjonsmaterialer. Dette medførte dannelse av flere mindre hulrom i selve PEX-isolasjonen, samt at indre-halvleder løsnet fra PEX-isolasjonen og dannet hulrom på denne måten.

Resultatene fra målinger og disseksjon viser at skjøtene fra felt ikke er aldret på grunn av varmgang i skjøtehylsen som følge av høy overgangsmotstand. Det ble ved disseksjon observert en skarp overgang mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon, samt tydelige spor av PD mellom skjøtens feltstyrende hylse og isolasjon. Dette tyder på at aldringen oppstod som en kombinasjon av høyt felt i overgangen mellom skjøtehylse og PEX-isolasjon og ikke tilstrekkelig krymping av skjøtens ulike hylser.

Det kan være mulig å skille mellom hulromsutladninger som følge av aldring med høy temperatur fordelt på flere sykler og hulromsutladninger i ikke tilstrekkelig påkrympet skjøtehylser ved å studerer antallet utladninger som oppstår per periode. Et større antall mindre utladninger vil kunne tyde på at hulrommene er små, men mange. Et mindre antall store utladninger vil kunne tyde på et fåtall større hulrom.

Dielektrisk respons sier lite om kabelens tilstand dersom målingen ikke kan utførers flere ganger under aldringsprosessen. Ved målinger strukket ut over aldringsprosessen kan dielektrisk respons gi en indikasjon på hvor langt i aldringsprosessen skjøten er kommet ved å studere endringen i tap, men det er vanskelig å si når aldringen når et kritisk punkt. Det ble ikke observert PD med denne typen måling selv når utladningene var over 2 nC.

7 Videre Arbeid

Et forøk med en temperatur midt i mellom de temperaturene som er benyttet i denne oppgaven vil kunne være fordelaktig. Dette fordi aldringsprosessen ved 180 °C går noe hurtig, og 130 °C tar for lang tid. Det vil dermed være mulig å gå mer i dybden på aldringsprosessen og oppnå en bedre forståelse av hva som foregår.

Som en tilleggsundersøkelse, for å kunne konkludere hva som er årsaken til aldringen av skjøten, er det tenkt utført flere suplementerende forsøk. Strekktesting og FTIR-spektroskopi av skjøtens materialer i ulike deler av aldringsprosessen vil si noe om hvordan materialene aldres. Det vil også kunne være relevant å se hvordan skjøtens komponenter påvirker hverandre. Aldringen kan da utføres i varmeskap, hvor skjøtens komponenter kan aldres både enkeltvis og samlet.

Bibliografi

- Frank Mauseth, Diagnostic Testing of Thermally Aged Medium Voltage XL-PE Cable Joints NTNU, 2011
- [2] F. de Vries, Experiences with PD measurements on MV cables in wind farms in the Netherlands ICC,2009 http://www.pesicc.org/ iccwebsite/subcommittees/subcom_f/F05/Presentations/2009Fall/ F12-ExperienceswithPDmeasurementsonMVcablesinwindfarmsintheNetherlands. pdf
- [3] Hampton, Nigel and Hartlein, Rick and Begović, Miroslav and Perkel, Josh, Validating Cable Diagnostic Tests" Georgia Institute of Technology, 2007
- [4] ABB, XLPE Land Cable System User's Guide 5. utgave ABB, 2012
- [5] Kemper M.S. Philippczyk C. Rayzak R.J. Waschk V., A New Method for the Detection and Quantification of Residual Volatiles in XLPE Electrical Cable Using Large-Spot Raman Power Delivery, IEEE Transactions on. IEE, 2011
- [6] Magne Runde, TET4195 High Voltage Equipment, Current Interruption in Powergrids. NTNU, 2010
- [7] Erling Ildstad, *High Voltage Insulation Materials* NTNU, August 2011
- [8] Ontario Hydro Technologies, Long Term Reliability of Polymer Cables at High Temperatures Canadian Electricity Association, 1997
- [9] Erling Ildstad, TET4195 High Voltage Equipment, Cable technology. NTNU, 2009
- [10] Cable Technology Laboratories INC, Thermal Overload Characteristics of Extruded Dielectric Cables Electric Power Research Institute,1988
- [11] IEC,60270 High-voltage test techniques IEC, 2000-12
- [12] Eberhard Lemke, Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270 Cigrê,2008
- [13] IEEE, Power and Energy Society, IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above. IEEE, 2012

- [14] Lars Lundgaard, Partielle utladninger Begreper, måleteknikk og mulige anvenelser for tilstandskontroll SINTEF, 1996
- [15] U.Gafvert, H.Edin and C.Forssen Modelling of Partial Discharge Spectra Measured with Variable Applied Frequency Royal Institute of Technology, 2003
- [16] Sverre Hvidsten, ELK-30 Condition Assessment of High Voltage Apparatus NTNU, 2012
- [17] Erling Ildstad, ELK-30 Condition Assessment of Power Apparatus NTNU, 2012
- [18] Knut Dahle Hammervoll, Masteroppgave: Ikke-destruktiv tilstandskontroll av kabelskjøter i distibusjonsnett NTNU, 2010
- [19] Nattrass, D.A., Electrical Insulation Magazine Volume:9, Issue: 4 IEEE, 1993
- [20] Tyco electronics GmbH, produktinformasjon Tyco electronics, 2010 http: //energy.tycoelectronics.com/getDocument.aspx?PRD_ID=2723
- [21] Hans Lavoll Halvorsen, Masteroppgave: Condition Assessment of Wind Farm Medium Voltage Cable Joints NTNU, 2012
- [22] j.Densley, Non-destructive Water-tree Detection in XLPE Cable Insulation Cigrê,2012
- [23] S. Mousavi Gargari, P.A.A.F. Wouters, P.C.J.M. van der Wielen and E.F.Steennis, Statistical Analysis of Partial Discharge Patterns and Knowledge Extraction in MV Cable Systems Eindhoven University of Technology, 2008
- [24] IEC, Electrical Strenght of Insualting Materials Test Metods IEC,1998
- [25] Cavallini, A.; Krotov, V.; Montanari, G.C.; Morshuis, P. H F; Mariut, L. E, The role of supply frequency in the evaluation of partial discharge inception voltage in XLPE-embedded cavities Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on,2012

Tillegg A

Måleresultater

A.1 Forsøk 1 - 130 $^{\circ}C$

PD måling



Figur A.1: PD måling etter 200 lastsykler på testobjekt 1



Figur A.2: PD måling etter 200 lastsykler på testobjekt 3





Figur A.3: Kompleks kapasitans i testobjekt 1 ved 1kV



Figur A.4: Kompleks kapasitans i testobjekt 1 ved 12kV



Figur A.5: Kompleks kapasitans i testobjekt 3 ved 1kV



Figur A.6: Kompleks kapasitans i testobjekt 3 ved 12kV

A.2 Forsøk 2 - 180 °C

PD måling

Tabell A.1: Statistisk fremstilling av	måledata ved	testobjekt 5.
--	--------------	---------------

PD-målingor 60 syklor	Frekvens[Hz]				
I D-maninger ob sykler	0,1	1	10	50	100
Antall PD registrert	686674	165196	75827	62739	50036
Antall PD registrert per Periode	935,130	275,122	25,374	4,182	1,666
Antall Positive ladninger	581021	153879	71474	57623	44746
Antall Negative ladninger	686674	165196	75827	62739	50036
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	12,999	8,879	7,989	7,872	8,376
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	44,987	48,831	44,577	36,648	34,517
Gjennomsnitt ladning[pC]	17,921	11,616	10,089	10,219	11,140



Figur A.1: PRPD kompensert for faseforskyving ved 12 kV 0,1 Hz for testobjekt 5 aldret i 60 sykler og 120 timer ved kjernetemperatur 180 °C



Figur A.2: PRPD ved 12 kV 1 Hz for testobjekt 5 aldret i 60 sykler og 120 timer ved kjernetemperatur 180 $^{\circ}\mathrm{C}$


Figur A.3: PRPD ved 12 kV 10 Hz for testobjekt 5 aldret i 60 sykler og 120 timer ved kjernetemperatur 180 $^{\circ}\mathrm{C}$



Figur A.4: PRPD ved 12 kV 100 Hz for testobjekt 5 aldret i 60 sykler og 120 timer ved kjernetemperatur 180 $^{\circ}\mathrm{C}$

A.3 Forsøk 3 - Feltaldret kabel

Partielle utladninger



Figur A.1: PRPD ved 12 kV 0,1 Hz for feltaldret skjøt B



Figur A.2: PRPD ved 12 kV 1 Hz for feltaldret skjøt B



Figur A.3: PRPD ved 12 kV 10 Hz for feltaldret skjøt B



Figur A.4: PRPD ved 12 kV 50 Hz for feltaldret skjøt B



Figur A.5: PRPD ved 12 kV 100 Hz for feltaldret skjøt B



Figur A.6: PRPD ved 12 kV 1 Hz for feltaldret skjøt C



Figur A.7: PRPD ved 12 kV 10 Hz for feltaldret skjøt C



Figur A.8: PRPD ved 12 kV 100 Hz for feltaldret skjøt C



Figur A.9: PRPD ved 12 kV 0,1 Hz for feltaldret skjøt D



Figur A.10: PRPD ved 12 kV 1 Hz for feltaldret skjøt D



Figur A.11: PRPD ved 12 kV 10 Hz for feltaldret skjøt D



Figur A.12: PRPD ved 12 kV 50 Hz for feltaldret skjøt D



Figur A.13: PRPD ved 12 kV 100 Hz for feltaldret skjøt D



Figur A.14: PRPD ved 12 kV 1 Hz for feltaldret skjøt E



Figur A.15: PRPD ved 12 kV 10 Hz for feltaldret skjøt E



Figur A.16: PRPD ved 12 kV 100 Hz for feltaldret skjøt E



Figur A.17: PRPD ved 12 kV 0,1 Hz for feltaldret skjøt F



Figur A.18: PRPD ved 12 kV 1 Hz for feltaldret skjøt F



Figur A.19: PRPD ved 12 kV 10 Hz for feltaldret skjøt F



Figur A.20: PRPD ved 12 kV 50 Hz for feltaldret skjøt F



Figur A.21: PRPD ved 12 kV 100 Hz for feltaldret skjøt F

Statistisk måleresultat

Tabel	l A.1:	Statistisk	fremstilling	av måledata	ved	feltaldret	skjøt	В
-------	--------	------------	--------------	-------------	-----	------------	-------	---

PD-målingor foltskigt B	${f Frekvens[Hz]}$						
i D-maninger leitskjøt D	0,1	1	10	50	100		
Antall PD registrert	4152	13028	1868	3095	1927		
Antall PD registrert per Periode	5,620	$20,\!875$	0,623	0,207	0,064		
Antall Positive ladninger	3886	11081	1500	805	1405		
Antall Negative ladninger	266	1947	368	2290	522		
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	3,510	$2,\!195$	2,799	3,355	2,892		
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	3,508	2,164	2,910	3,473	2,969		
Gjennomsnitt ladning[pC]	3,509	2,190	2,820	3,444	2,912		

Tabell A.2: Statistisk fremstilling av måledata ved feltaldret skjøt C

PD-målinger foltskigt C	Frekvens[Hz]					
i D-mannger leitskjøt C	0,1	1	10	50	100	
Antall PD registrert	110950	25517	2975	1520	2523	
Antall PD registrert per Periode	161,980	41,577	0,997	0,101	0,084	
Antall Positive ladninger	85822	23166	2687	1360	2184	
Antall Negative ladninger	25128	2351	288	160	339	
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	2,108	2,144	2,464	3,973	$3,\!451$	
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	2,111	2,118	2,510	4,146	$5,\!047$	
Gjennomsnitt ladning[pC]	2,109	2,142	2,468	3,991	$3,\!666$	

PD-målingor foltskigt D	Frekvens[Hz]					
i D-mannger leitskjøt D	0,1	1	10	50	100	
Antall PD registrert	490240	20783	21980	5799	10865	
Antall PD registrert per Periode	$628,\!138$	32,442	7,332	0,387	0,363	
Antall Positive ladninger	346025	10754	12579	3130	5692	
Antall Negative ladninger	144215	10029	9401	2669	5173	
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	16,0	244,0	214,0	381,0	405,0	
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	26,0	262,0	284,0	444,0	446,0	
Gjennomsnitt ladning[pC]	19,0	253,0	244,0	410,0	424,0	

Tabell A.3: Statistisk fremstilling av måledata ved feltaldret skjøt D

Tabell A.4: Statistisk fremstilling av måledata ved feltaldret skjøt E

PD-målingor foltskigt F	${ m Frekvens}[{ m Hz}]$						
i D-mannger leitskjøt E	0,1	1	10	50	100		
Antall PD registrert	45224	26753	42386	5734	10067		
Antall PD registrert per Periode	57,935	39,597	14,164	0,382	0,336		
Antall Positive ladninger	31362	16972	33670	3326	5235		
Antall Negative ladninger	13862	9781	8716	2408	4832		
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	58,0	131,0	62,0	472,0	241,0		
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	121,0	223,0	228,0	669,0	266,0		
Gjennomsnitt ladning[pC]	77,0	165,0	96,0	555,0	253,0		

Tabell A.5: Statistisk fremstilling av måledata ved feltaldret skjøt F

PD-målinger feltskigt F	Frekvens[Hz]					
i D-mannger teitskjøt i	0,1	1	10	50	100	
Antall PD registrert	199634	72921	21580	4230	5283	
Antall PD registrert per Periode	332,467	116,300	7,211	0,282	$0,\!176$	
Antall Positive ladninger	112475	55604	14256	2373	3105	
Antall Negative ladninger	87159	17317	7324	1857	2178	
Gjennomsnitt Positiv ladning[pC]	16,0	36,0	69,0	275,0	190,0	
Gjennomsnitt Negativ ladning[pC]	17,0	69,0	115,0	353,0	269,0	
Gjennomsnitt ladning[pC]	16,0	44,0	85,0	310,0	223,0	

Tillegg B

Grafer



Figur B.1: Temperaturer ved lastsykling 130 °C



Figur B.2: Temperaturer ved last sykling 180 $^{\circ}\mathrm{C}$

Tillegg C

MATLAB skript

C.1 Random script

Script for å hente ut 600 tilfeldige perioder fra målingene og deretter lage PRPD og statistiske data

```
_1 % Clear all variables, windows and the screen before
      running program
   clear all;
2
<sup>3</sup> clc;
4 close all;
5 tic
7 %folder = current folder name;
s folder=pwd;
9 %user define frequency
10 f=input('Enter the frequency in Hz: ');
11 %user define noise level for raw data
  noise=input ('Enter the noise level, example: 2.5e-12: ')
12
      ;
13
14 % Import Q-data
  [q_tm, q]=importQData(folder, 'unit1.1');
15
16 % Import phase-data
17 phase = importPHData(folder, 'unit1.1');
  phase=phase *360;
18
19
20 % Import voltage-data
<sup>21</sup> %[v_tm, v] = importVData(folder, 'unit1.1');
22
23 %create matrix with all needed raw data (charge time,
      charge, phase relation)
_{24} qq = [q_tm,q,phase];
25 %Velg ut random faser
```

```
%user define frequency
27
   noRand=input('Number of Random cykles:
                                                    ');
^{28}
   tid=input('Antall sekund maalt: ');
29
   Tper=tid /(1/f);
30
31
   b = zeros(10000000, 1);
32
   c=randi(Tper, 1, noRand);
33
   \operatorname{start} = [1]
^{34}
   for k=1:noRand
35
        a = find(((c(k)*1/f+qq(1,1)) \le qq(:,1)) \& ...
36
        (qq(:,1) <= (c(k)*1/f+qq(1,1)+(1/f)));
37
        na = length(a) + start;
38
        b(start:na-1,1)=a;
39
        \operatorname{start} = (\operatorname{na});
40
   end
^{41}
^{42}
   for k=1:noRand
43
      \% aa=b(k,:);
                       %
44
        lastNo=find (b==0,1,'first'); %forste null i vektor
45
        ut (1: lastNo - 1, 1) = qq(b(1: lastNo - 1), 1);
46
        ut (1: lastNo - 1, 2) = qq(b(1: lastNo - 1), 2);
47
        ut (1: lastNo - 1, 3) = qq(b(1: lastNo - 1), 3);
^{48}
   end
49
50
   %deletes PDs that are assumed to be background noise from
51
        raw data
   Ip=ut(:,2) <= noise;
52
   qqp=ut(~Ip,:);
53
   In=ut(:,2) >=-noise;
54
   qqn=ut(~In,:);
55
   qq = [qqn;qqp];
56
   qq = sortrows(qq, 1);
57
58
   %make copy of raw data
59
   qqqq=qq;
60
61
   %clear counters
62
   clear('Ip')
                   ;
63
   clear ('In')
64
   clear('qqn');
65
   clear('qqp') ;
66
67
   %matrix with positive/negative charge only
68
   Ip=qqqq(:,2) < 0;
69
   qqp=qqqq(~Ip,:); %all the positive charges
70
   In = qqqq(:,2) > 0;
^{71}
   qqn=qqqq(~In,:); %all the negative charges
72
73
  %matrix with sortet positive/negative charge
\mathbf{74}
```

26

```
qqpch=sort(qqp(:,2),'descend');
75
   qqnch=sort(qqn(:,2), `ascend');
76
77
   %Extract the top 1% of the positive and negative charges
78
   R1=numel(qqpch)*0.01;
79
   r = 1;
80
    for r=1:R1;
81
        qqpch2(r,1)=qqpch(r,1);
82
        r=r+1;
83
      end;
84
   R1=numel(qqnch)*0.01;
85
   r = 1;
86
    for r=1:R1;
87
        qqnch2(r,1)=qqnch(r,1);
88
        r=r+1;
89
      end;
90
91
   \% calculations of statistics
^{92}
   \% =
93
94
   %time recorded
95
   ttot = max(qqqq(:,1));
96
    disp('Total time recorded')
97
    disp(ttot)
98
99
   % number of cycles
100
   Ns=ttot*f;
101
   disp('Total number of cycles')
102
    disp(Ns)
103
104
   %noise level
105
   disp('noise level')
106
    disp(noise)
107
108
   %sum of positive charge
109
   Qptot=sum(qqp(:,2));
110
    disp('sum of positive charge')
111
    disp(Qptot)
112
113
   %sum of negative charge
114
    Qntot = sum(qqn(:,2));
115
   disp('sum of negative charge')
116
    disp(Qntot)
117
118
   %sum of charge
119
    Qtot=Qptot-Qntot;
120
121
   %number of PD's registered
122
   Npd=numel(qqqq(:,2));
123
   disp('number of PD registered')
124
```

```
disp (Npd)
125
126
   %number of positive PD's registered
127
   Npdp=numel(qqp(:,2));
128
    disp('number of positive PD')
129
    disp(Npdp)
130
131
132
   %number of negative PD's registered
133
   Npdn=numel(qqn(:, 2));
134
    disp('number of negative PD')
135
    disp(Npdn)
136
137
   % mean positive charge
138
   qavp=Qptot/Npdp;
139
    disp('mean positive charge')
140
    disp(qavp)
141
142
   % mean negative charge
143
   qavn=Qntot/Npdn;
144
    disp('mean negative charge')
145
    disp (qavn)
146
147
   %mean charge
148
    qav=Qtot/Npd;
149
    disp('mean charge')
150
   \operatorname{disp}(\operatorname{qav})
151
152
   %PDs pr cycle
153
   Nps=Npd/Ns;
154
   disp('number of PD pr cycle')
155
    disp(Nps)
156
157
   %max positive charge calculated from top 1%
158
   qmax=sum(qqpch2)/numel(qqpch2);
159
    disp('maximum charge recorded')
160
    \operatorname{disp}(\operatorname{qmax})
161
162
   %max negative charge calculated from bottom 1%
163
    qmin=sum(qqnch2)/numel(qqnch2);
164
    disp('minimum charge recorded')
165
    disp (qmin)
166
167
    savefile='dataexport.txt';
168
   save(savefile, 'ttot', 'Ns', 'noise', 'Qptot', 'Qntot', 'Npd'
169
        , 'Npdp', 'Npdn', 'qavp', 'qavn', 'qav', 'Nps', 'qmax', 'qmin', '-ascii');
    [s, msg] = replaceinfile('.',',', 'dataexport.txt');
170
171
   savefile='chargedata.mat';
172
```

```
save(savefile, 'qqqq', '-ascii');
173
174
    pdplot = [qq(:,2), qq(:,3)];
175
176
    aksex = 0:0.001:360;
177
    sinusy=sind(aksex);
178
   PH=pdplot(:,2);
179
   Q=pdplot(:,1);
180
181
   % Create figure
182
    figure1 = figure;
183
184
   \% Create axes
185
    axes1 = axes('Parent', figure1, 'YTick', [-2500e-012, -1000e]
186
        -012 -100e -012 0 100e -012 1000e -012 2500e -012,...
         'YGrid', 'on',...
187
         'YColor', [0 0 1],...
'XGrid', 'on');
188
189
   % Uncomment the following line to preserve the X-limits
190
        of the axes
   xlim(axes1, [0 \ 360]);
191
   % Uncomment the following line to preserve the Y-limits
192
        of the axes
    ylim (axes1, [-2500e-012, 2500e-012]);
193
    box(axes1, 'on');
194
    hold(axes1, 'all');
195
196
   % Create plot
197
    plot (PH,Q, 'Parent', axes1, 'MarkerSize', 3, 'Marker', 'x', '
198
        LineStyle', 'none',...
         'DisplayName', 'pd activity');
199
200
   % Create ylabel
201
    ylabel('Q [C]', 'Color', [0 0 1]);
202
203
   % Create axes
204
    axes2 = axes('Parent', figure1, 'YTick', [-1 -0.5 0 0.5]
205
        1],...
         'YAxisLocation', 'right',...
206
         'YColor', \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}, \dots
207
         'ColorOrder', [0 \ 0.5 \ 0;1 \ 0 \ 0;0 \ 0.75 \ 0.75;0.75 \ 0
208
             0.75; 0.75 0.75 0; 0.25 0.25 0.25; 0 0 1], \ldots
         'Color', 'none');
209
   % Uncomment the following line to preserve the X-limits
210
        of the axes
   xlim(axes2, [0 \ 360]);
211
   % Uncomment the following line to preserve the Y-limits
212
        of the axes
   % ylim (axes2, [-1 \ 1]);
213
   hold(axes2, 'all');
214
```

```
25
```

```
215
   % Create plot
216
   plot(aksex, sinusy, 'Parent', axes2, 'LineWidth', 2, '
217
       DisplayName', 'voltage pu');
218
   \% Create xlabel
219
   xlabel('phase [degrees]');
220
221
   % Create ylabel
^{222}
   ylabel('V [pu]', 'VerticalAlignment', 'cap', 'Color', [0 0.5]
223
       0]);
224
   % Create plot
225
    plot(aksex, sinusy, 'Parent', axes2, 'LineWidth', 2);
226
227
   saveas(gca, 'Faseplot.png');
228
   saveas(gca, 'Faseplot.eps');
229
   % User interface for input of times
230
   \%t1=input('Enter the t1 in s: ');
231
   \%t2=input('Enter the t2 in s: ');
232
233
   % find row numbers containing t1 and t2
234
   \%r1= find (qqq(:,1)>t1);
235
   \%r2 = find(qqq(:,1)>t2);
236
   \%r1=r1(1);
237
   \%r2 = r2(1);
238
239
   % create matrix with data between the given times t1 and
240
       t2
   \%qq=qqq(r1:r2-1,:);
241
242
   toc
^{243}
```

C.2 Script uten random

Script for å behandle målinger hvor det kun er 600 perioder i målingen og deretter lage PRPD og statistiske data

```
% Clear all variables, windows and the screen before
1
      running program
  clear all;
2
  clc;
3
  close all;
4
  tic
5
6
  %folder = current folder name;
7
  folder = pwd;
8
9 %user define frequency
```

```
f=input('Enter the frequency in Hz: ');
10
  %user define noise level for raw data
11
   noise=input('Enter the noise level, example: 2.5e-12: ')
12
13
  % Import Q-data
14
   [q_tm, q]=importQData(folder, 'unit1.1');
15
  % Import phase-data
16
   phase = importPHData(folder, 'unit1.1');
17
   phase=phase *360;
18
19
  % Import voltage-data
20
  %[v_tm, v] = importVData(folder, 'unit1.1');
^{21}
^{22}
  %create matrix with all needed raw data (charge time,
^{23}
      charge, phase relation)
   qq = [q_tm, q, phase];
^{24}
25
  %deletes PDs that are assumed to be background noise from
26
       raw data
  Ip=qq(:,2) <= noise;
27
   qqp=qq(~Ip,:);
28
   In=qq(:,2)>=-noise;
29
   qqn=qq(~In ,:);
30
   qq = [qqn;qqp];
31
   qq = sortrows(qq,1);
32
33
  %make copy of raw data
34
   qqqq=qq;
35
36
  %clear counters
37
   clear('Ip') ;
38
   clear('In');
clear('qqn');
39
40
   clear('qqp') ;
^{41}
42
  %matrix with positive/negative charge only
43
   Ip=qqqq(:,2) < 0;
^{44}
   qqp=qqqq(~Ip,:); %all the positive charges
45
   In=qqqq(:,2) > 0;
46
   qqn=qqqq(~In ,:); %all the negative charges
47
48
  %matrix with sortet positive/negative charge
49
   qqpch=sort(qqp(:,2), 'descend');
50
   qqnch=sort(qqn(:,2), 'ascend');
51
52
  %Extract the top 1% of the positive and negative charges
53
_{54} R1=numel(qqpch) *0.01;
  r = 1;
55
56 for r=1:R1;
```

```
qqpch2(r,1)=qqpch(r,1);
57
        r=r+1;
58
59
      end;
   R1=numel(qqnch)*0.01;
60
   r = 1;
61
    for r=1:R1;
62
        qqnch2(r,1)=qqnch(r,1);
63
        r = r + 1;
64
      end;
65
66
   \% calculations of statistics
67
   \% =
68
69
   %time recorded
70
   ttot = max(qqqq(:,1));
71
   disp('Total time recorded')
72
   disp(ttot)
73
74
   % number of cycles
75
   Ns=ttot*f;
76
   disp('Total number of cycles')
77
   disp(Ns)
78
79
   %noise level
80
   disp('noise level')
81
   disp(noise)
82
83
   %sum of positive charge
84
   Qptot=sum(qqp(:,2));
85
   disp('sum of positive charge')
86
   disp(Qptot)
87
88
   %sum of negative charge
89
   Qntot = sum(qqn(:,2));
90
   disp('sum of negative charge')
^{91}
   disp (Qntot)
^{92}
93
   %sum of charge
^{94}
    Qtot=Qptot-Qntot;
95
96
   %number of PD's registered
97
   Npd=numel(qqqq(:,2));
98
    disp('number of PD registered')
99
    disp(Npd)
100
101
   %number of positive PD's registered
102
   Npdp=numel(qqp(:,2));
103
   disp('number of positive PD')
104
    disp(Npdp)
105
106
```

```
%number of negative PD's registered
108
   Npdn=numel(qqn(:, 2));
109
    disp('number of negative PD')
110
    disp(Npdn)
111
112
   % mean positive charge
113
   qavp=Qptot/Npdp;
114
    disp('mean positive charge')
115
    disp(qavp)
116
117
   % mean negative charge
118
    qavn=Qntot/Npdn;
119
    disp('mean negative charge')
120
    disp(qavn)
121
122
   %mean charge
123
    qav=Qtot/Npd;
124
    disp('mean charge')
125
    \operatorname{disp}(\operatorname{qav})
126
127
   %PDs pr cycle
128
   Nps=Npd/Ns;
129
    disp('number of PD pr cycle')
130
    disp(Nps)
131
132
   %max positive charge calculated from top 1%
133
   qmax=sum(qqpch2)/numel(qqpch2);
134
    disp('maximum charge recorded')
135
    disp (qmax)
136
137
   %max negative charge calculated from bottom 1%
138
    qmin=sum(qqnch2)/numel(qqnch2);
139
    disp('minimum charge recorded')
140
    \operatorname{disp}(\operatorname{qmin})
141
142
    savefile='dataexport.txt';
143
    save(savefile, 'ttot', 'Ns', 'noise', 'Qptot', 'Qntot', 'Npd'
144
         'Npdp', 'Npdn',...
         'qavp', 'qavn', 'qav', 'Nps', 'qmax', 'qmin', '-ascii'
145
            );
    [s, msg] = replaceinfile('.',',', 'dataexport.txt');
146
147
    savefile='chargedata.mat';
148
    save(savefile, 'qqqq', '-ascii');
149
150
    pdplot = [qq(:,2), qq(:,3)];
151
152
   aksex = 0:0.001:360;
153
   sinusy=sind(aksex);
154
```

107

```
29
```

```
.
```

```
PH=pdplot(:,2);
155
156
   Q=pdplot(:,1);
157
   % Create figure
158
   figure1 = figure;
159
160
   % Create axes
161
   axes1 = axes('Parent', figure1, 'YTick', [-4e-012, -2e-012, 0]
162
        2e - 012 4e - 012,...
         'YGrid', 'on',...
'YColor',[0 0 1],...
163
164
         'XGrid', 'on');
165
   % Uncomment the following line to preserve the X-limits
166
        of the axes
   xlim(axes1, [0 \ 360]);
167
   % Uncomment the following line to preserve the Y-limits
168
        of the axes
   \% ylim (axes1, [-4e-012 4e-012]);
169
   box(axes1, 'on ');
170
   hold(axes1, 'all');
171
172
   % Create plot
173
    plot (PH,Q, 'Parent', axes1, 'MarkerSize', 3, 'Marker', 'x', '
174
        LineStyle', 'none',...
         'DisplayName', 'pd activity');
175
176
   % Create ylabel
177
    ylabel('Q [pC]', 'Color', [0 0 1]);
178
179
   % Create axes
180
    axes2 = axes('Parent', figure1, 'YTick', [-1, -0.5, 0, 0.5]
181
        1],...
         'YAxisLocation', 'right',...
182
         'YColor', \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix},...
183
         'ColorOrder', [0 \ 0.5 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0.75 \ 0.75; 0.75 \ 0
184
             0.75; 0.75 \ 0.75 \ 0; 0.25 \ \dots
        0.25 0.25;0 0 1], 'Color', 'none');
185
   % Uncomment the following line to preserve the X-limits
186
        of the axes
   xlim(axes2, [0 \ 360]);
187
   % Uncomment the following line to preserve the Y-limits
188
        of the axes
   % ylim ( axes 2, [-1 \ 1] );
189
   hold(axes2, 'all');
190
191
   % Create plot
192
    plot(aksex, sinusy, 'Parent', axes2, 'LineWidth', 2, '
193
        DisplayName', 'voltage pu');
194
  % Create xlabel
195
```

```
xlabel('phase [degrees]');
196
197
198
   % Create ylabel
    ylabel('V [pu]', 'VerticalAlignment', 'cap', 'Color', [0 0.5
199
        0]);
200
   % Create plot
201
    plot(aksex, sinusy, 'Parent', axes2, 'LineWidth', 2);
202
203
    saveas(gca, 'Faseplot.png');
204
205
   \% User interface for input of times
206
   \%t1=input('Enter the t1 in s: ');
207
   \%t2=input('Enter the t2 in s: ');
208
209
   % find row numbers containing t1 and t2
210
   \%r1{=}\ {\rm find}\,(\,{\rm qqq}\,(\,:\,,1\,){>}t1\,)\;;
211
  \%r2= find (qqq(:,1)>t2);
212
   \%r1=r1(1);
213
   \%r2=r2(1);
214
215
   % create matrix with data between the given times t1 and
216
       t2
   %qq=qqq(r1:r2-1,:);
217
218
   \operatorname{toc}
219
```

Tillegg D

Labview program



Figur D.1: Front panel (VI)



Figur D.2: Back panel: Hoved løkke



Figur D.3: Back panel: Løkke for å skrive til .txt fil



Figur D.4: Back panel: Program for aldringsykling

Tillegg E

Tips- og triksspalten

Faseforskyving og måling ved 0,1 Hz

Ved måling på 0,1 Hz kan det oppstå faseforskyvning av PD-målingene og problemer med å få OMICRON systemet til å trigge på spenningen. Dette fikses med å manuelt sette Threshold til omtrentlig 1,9 kV i V fanen på OMICRONsoftwaren. Da trigger den fint, men sinuskurven vil bli forskjøvet. Dette ordnes med å manuelt sette starttiden i Replay funksjonen til det stedet hvor kurven starter. Faseforskyvingen ordnes deretter med å måle koronautladninger og korrigere vinkelen i Q fanen.

Thermocouple

Husk å doble opp med temperatursensorer da de har en stygg tendens til å ta kvelden etter en stund. Med to sensorer på hvert sted er måleresultatene sikret på best mulig måte.

Labview

Labview kan være litt kranglete når det gjelder kommunikasjon med temperaturloggeren. For å få det til å virke bør alle programmer avsluttes inkludert Labview's egen kommunikasjons sak som dukker opp når du plugger inn støttet USB-utstyr.