

Espen Torlei Olsen

# Impuls holdfasthet til polymerfolier ved påkjenning av DC-spenning med overlagret lynimpuls

Innvirkning av temperatur, polaritet og størrelse på DC-forspenning

Masteroppgave i Electric Power Engineering

Veileder: Erling Ildstad

Medveileder: Frank Mauseth

Mai 2022



Espen Torlei Olsen

# **Impuls holdfasthet til polymerfolier ved påkjenning av DC-spenning med overlagret lynimpuls**

Innvirkning av temperatur, polaritet og størrelse på DC-forspenning

Masteroppgave i Electric Power Engineering  
Veileder: Erling Ildstad  
Medveileder: Frank Mauseth  
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden



NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET

NTNU



## MSc-Thesis, Spring 2022

Candidate Name: Espen T. Olsen                      espentol@stud.ntnu.no

Degree Program: MSc in Electric Power Engineering, MIENERG  
Electric Power Engineering

Thesis title (Norwegian/English):

**Impuls holdfasthet til polymerfolier ved påkjenning av DC-spenning med overlagret lynimpuls.**

**Impulse breakdown strength of Polymer foils stressed at DC voltage superimposed lightning impulses.**

High Voltage DC cables insulated with polymeric insulation are increasingly replacing subsea cables insulated with mass-impregnated paper (MIND), even at the highest HVDC voltage levels. To improve maximum load capacity and long-term endurance it is, however, of particular importance to better understand how the local electric field within the insulation varies during current load variations and voltage polarity reversals.

The main purpose of the work presented here is to experimentally examine how the impulse breakdown strength of polymeric films are affected by the polarity of the applied DC voltage. The effects of temperature, time, and magnitude of voltage application are of particular interest for development of more relevant test procedures for polymer insulated HVDC cables.

During the experimental work the impulse breakdown strength will be measured using thin laboratory scale samples of Polypropylene (PP) and Polyethylene terephthalate (PET) films.

The MSc-thesis is expected to constitute:

- A literature survey, including theory and principle of interface charging during DC and impulse voltage application, forming the base of the proposed experimental method and suggested interpretation of the results.
- Design and execution of laboratory experiments aiming at determining the impulse breakdown strength of the examined polymeric films during different DC voltage levels and superimposed lightning impulse voltages. Derive material parameters as AC breakdown strength, conduction or charge decay if needed for the interpretation.
- Discussion and evaluation of the measured results with respect to proposed theoretical considerations.
- Suggested practical applications of the results obtained.

The details of the test program are to be decided in cooperation with the supervisors.

Start: 20. January 2022  
Submission: 20. June 2022

Supervisor: Prof. Erling Ildstad ( [erling.ildstad@ntnu.no](mailto:erling.ildstad@ntnu.no) )  
Co-supervisor: F.aman Frank Mauseth

---

## Abstract

For an extensive period of time, polymer cables have been used in HVAC energy distribution. In particular, XLPE has been the preferred choice of insulation material because of its excellent electrical and mechanical qualities, its reliability and low production costs. For HVDC transmission however, mainly paper-insulated (MIND) cables have been used. In recent times, polymer-insulated HVDC cables have gained an increasing share of the market, offering several advantages compared to the traditional paper-insulated oil cable, such as reduced environmental impact, as well as allowing higher conductor temperature and being easier to repair. One challenge, however, is the presence of space charges that are particularly hazardous during polarity reversal and is considered to be the predominant cause of faults in polymer insulated HVDC cables.

The formation of space charges makes it difficult to predict how the electric field will be distributed in HVDC cable insulation. Space charges causes field enhancements and reduce the breakdown strength, especially in the case of rapid reversal of the voltage polarity. The purpose of this thesis has been to study how the impulse breakdown strength in polymer foils is affected by DC voltage, polarity and temperature. Experiments have been performed on thin films of polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) with parallel plate electrodes. The test objects were first applied a DC voltage for 60 seconds before a lightning pulse was imposed which led to a breakdown. Experiments were also performed with DC-voltage levels between 2 and 12 kV to study the effect of the prestressed field.

The effect of DC-prestress was that breakdown strength at lightning impulses with equal polarity increased 40-60 % in PET and 20 % in PP, compared with the impulse breakdown strength. With lightning pulses of opposite polarity, the breakdown strength decreased by 20-30 % in both materials. This supports the assumption that a thin layer of homo charges is formed near the electrodes under prestressed DC voltage and reduced the breakdown strength at lightning impulses of negative polarity. The results showed higher and more temperature-dependent electrostatic charging in PET film. Experiments with increasing values of DC prestress voltage showed a linear increase in breakdown strength in both materials. There was no sign of space charge accumulation in PP-film at DC-prestress voltages below 4 kV.

---

## Sammendrag

Polymerkabler har i lang tid vært brukt ved HVAC-energidistribusjon. Særlig XLPE har vært et foretrukket valg av isolasjonsmateriale siden det har gode elektriske og mekaniske kvaliteter, er pålitelig og har lave produksjonskostnader. For HVDC-overføring er det i hovedsak papirisolerte (MIND) kabler som har vært brukt. I nyere tid har polymerisolerte HVDC-kabler fått en økende andel av markedet, og tilbyr flere fordeler sammenlignet med den tradisjonelle papirisolerte oljekabelen, som redusert miljøpåvirkning, samt at den tillater høyere ledertemperatur og er enklere å reparere. En utfordring er derimot tilstedeværelsen av romladninger som er spesielt risikabelt ved polaritetendring og blir sett på som den dominerende årsaken til feil i polymerisolerte HVDC-kabler.

Dannelse av romladninger gjør det vanskelig å forutsi hvordan det elektriske feltet distribueres i HVDC-kabelisolasjon. Romladninger fører til forsterkning av det elektriske feltet og reduserer holdfastheten, spesielt ved rask polaritetendring av spenningen. Formålet med denne oppgaven har vært å studere hvordan impulsholdfastheten i polymerfolier påvirkes av DC-spenning, polaritet og temperatur. Forsøk er utført på tynne filmer av polypropylen (PP) og polyetylen tereftalat (PET) med parallelle plateelektroder. Testobjektene ble først tilført en DC-spenning i 60 sekunder før det ble påtvunget lynimpuls som førte til gjennomslag. Det ble også utført forsøk med DC-spenningsnivå mellom 2 og 12 kV for å studere effekten av det forspente feltet.

Virkningen av DC-forspenning var at holdfastheten ved lynimpulser ved lik polaritet økte med 40-60% i PET og 20% i PP, sammenlignet med impulsholdfastheten. Ved lynimpulser med motsatt polaritet sank holdfastheten med 20-30% i begge materialer. Dette støtter teorien om at det dannes et tynt lag med homo-ladninger i materialet nær elektrodene under forspent DC-spenning som svekker holdfastheten ved lynimpulser ved motsatt polaritet. Resultatene viste høyere og mer temperaturavhengig elektrostatisk oppladning i PET-film. Forsøk med økende verdier av DC-forspenning viste en lineær økning av holdfasthet for begge materialer, men det var ingen tegn til romladningsdannelse i PP-film ved DC-forspenning under 4 kV.



---

## Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet som siste ledd i den 2-årige masterutdannelsen *Electric Power Engineering* ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Studiet startet høsten 2020 og avsluttes nå med innlevering av masteroppgaven i juni 2022. Det har vært en bratt læringskurve og det har gått med mye tid, både på kvelder og i helger. Det er ikke alltid like enkelt å balansere et hektisk småbarnsliv med det å være student, men det gikk. Når jeg ser tilbake på de siste fem årene kan jeg oppsummere med at det harde arbeidet belønnes med faglig nyttig kunnskap og en fullført utdanning som sivilingeniør. Til høsten ser jeg frem til å begynne et nytt kapittel når jeg trer tilbake til arbeidslivet. Det første året av masterutdannelsen var sterkt preget av nedstenging med mye fjernundervisning pga covid-19 og førte til uønsket alenetid og lite sosialt samvær med andre studenter. Heldigvis er den tiden over nå. Hovedparten av det siste halvåret har blitt tilbragt på laboratoriet med utføring av eksperimentelle tester på ulike polymermaterialer. Den største utfordringen med oppgaven har vært å forstå de komplekse prosessene som skjer i polymermaterialer når de påføres HVDC og å prøve å forklare hvorfor mine resultater ble som de ble.

Jeg vil takke min veileder Prof. Erling Ildstad for et spennende og lærerikt samarbeid med masteroppgave og ved skriving av forskningsartikkel. En takk går også til medveileder, førsteammenuensis Frank Mauseth for god hjelp på laboratoriet. I tillegg vil jeg takke Bård Almås og resten av gjengen ved servicelaben for all den hjelp de har bidratt med det siste året og Pål Keim Olsen som har produsert testcellen jeg brukte i laboratoriet.

Sist men ikke minst, familien min. Til mine foreldre som alltid har stilt opp og har latt meg få utforske verden og nysgjerrigheten min. En hjertelig takk til Ann Elida som har holdt oppe humøret og motivasjonen når jeg har trengt det som aller mest. Du er uvurderlig.

Espen Torlei Olsen

Trondheim

---

## Figurer

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Isolasjonsresistivitetsens påvirkning på temperatur og elektriske felt i LDPE-kabel vises i figur (a). Serie 1: $E = 17\text{kV/mm}$ , Serie 2: $E = 22\text{ kV/mm}$ , Serie 3: $E = 28\text{ kV/mm}$ . Hvordan det elektriske feltet forandrer seg i en HVDC-kabel ved ulike $\Delta T$ , sammelignet med HVAC-kabel vises i figur (b) [21]. . . . . | 5  |
| 2  | Elektriske felt i HVDC-kabel . . . . .   | 7  |
| 3  | Feltfordeling i HVDC polymerkabel ved varierende last og temperatur [24]. . . . .  | 7  |
| 4  | Øverste bilde viser de ulike stegene som oppstår når en kobler til og fra DC-spenning. Nederste bilde viser de ulike stegene som oppstår etter en polaritetendring. Den prikkete linjen representerer vekst og forfall av romladninger i isolasjonsmaterialet [15]. . . . .  | 8  |
| 5  | Forenklet skisse av romladninger i det elektriske feltet mellom parallelle elektroder. Figur (i) viser injeksjon av homoladning som reduseres feltet langs elektrodene og øker det i midtpartiet. Figur (ii) viser injeksjon av heteroladning som øker feltet langs elektrodene og reduserer det i midtpartiet. . . . .                                | 9  |
| 6  | Definisjon på spenningene $U_{DC}$ og $U_b$ [24]. . . . .  | 11 |
| 7  | Total feltdistribusjon $E_{tot}$ ved overlaget lynimpuls med motsatt polaritet. $E_{DC}$ viser DC-feltdistribusjon. Pilene viser det kapasitive feltet $E_{AC}$ ved enkelte målepunkter r. . . . .   | 12 |
| 8  | Feltstyrke ved kableleder ved lynimpulser overlappet på DC-forspenning med lik og motsatt polaritet. . . . .   | 12 |
| 9  | Holdfasthet i 0,19mm PET-film med overlappet lynimpuls med varierende DC-prestress tid fra 60 til 7200s. . . . .   | 14 |
| 10 | Koblingsskjema testkrets for måling av AC-holdfasthet . . . . .  | 15 |
| 11 | Koblingsskjema testkrets for måling av holdfasthet ved kombinert HVDC og lynimpuls . . . . .   | 16 |
| 12 | Eksempel på utført test med gjennomslag ved DC-prestress og overlappet lynimpuls med positiv polaritet. $U_{DC} = 8\text{ kV}$ , $U_{LI} = 20\text{ kV}$ and $U_{b+} = 26\text{ kV}$ . . . . .   | 16 |
| 13 | Gjennomslag ved DC-prestress og overlappet lynimpuls med negativ polaritet. $U_{DC} = 8\text{ kV}$ , $U_{LI} = -25\text{ kV}$ og $U_{b+} = -13\text{ kV}$ . . . . .  | 17 |
| 14 | Oljeholdig testcelle med temperaturregulerbar spole . . . . .  | 18 |
| 15 | Materialstruktur PET . . . . .   | 18 |
| 16 | Materialstruktur PP . . . . .  | 19 |
| 17 | Flytskjema - Testprosedyre for målinger av holdfasthet ved DC og lynimpuls . . . . .   | 20 |
| 18 | Resultat fra DSC-analyse av PET-film . . . . .   | 21 |
| 19 | Resultat fra DSC-analyse av PP-film . . . . .  | 21 |
| 20 | AC holdfasthet i PP og PET-film ved temperaturer fra 22 til 80 °C. Alle målinger er RMS-verdier. . . . .   | 22 |
| 21 | Sammenligning av holdfasthet i 0,10mm PET-film ved påført lynimpuls med både positiv og negativ polaritet. Målinger utført ved temperaturer fra 22 til 100 °C. DC = 0 kV . . . . .   | 23 |
| 22 | Sammenligning av holdfasthet i 0,08mm PP-film ved påført lynimpuls med både positiv og negativ polaritet. Målinger utført ved temperaturer fra 22 til 100 °C. DC = 0 kV . . . . .  | 24 |
| 23 | Holdfasthet i 0,10mm PET-film med overlappet lynimpuls på 8 kV DC-prestress spenning. Målinger utført ved temperaturer fra 22-100°C. . . . .   | 25 |
| 24 | Holdfasthet i 0,08mm PP-film med overlappet lynimpuls på 8 kV DC-prestress spenning. Målinger utført ved temperaturer fra 22-100°C. . . . .  | 27 |

---

|    |  |    |
|----|--|----|
| 25 | Holdfasthet i 0,125mm PET-film med overlagret lynimpuls på varierende DC-prestress spenning. . . . . | 30 |
| 26 | Holdfasthet i 0,08mm PP-film med overlagret lynimpuls på varierende DC-prestress spenning. . . . .   | 32 |

---

## Forkortelser

|              |   |
|--------------|---|
| <b>DSC</b>   | Differential Scanning Calorimetry           |
| <b>EPR</b>   | Ethylene Propylene Rubber                   |
| <b>HPTE</b>  | High Performance Thermoplastic Elastomer    |
| <b>HVAC</b>  | High Voltage Alternating Current            |
| <b>HVDC</b>  | High Voltage Direct Current                 |
| <b>IMRoD</b> | Introduksjon, Metode, Resultat og Diskusjon |
| <b>LCC</b>   | Line Commutated Converter                   |
| <b>LDPE</b>  | Low Density Polyethylene                    |
| <b>LI</b>    | Lynimpuls                                   |
| <b>MIND</b>  | Mass Impregnated Non Drain                  |
| <b>PEA</b>   | Pulsed Electro-Acoustic                     |
| <b>PET</b>   | Polyetylen tereftalat                       |
| <b>PP</b>    | Polypropylen                                |
| <b>SCLC</b>  | Space Charge Limited Current                |
| <b>TSO</b>   | Transmission System Operator                |
| <b>VSC</b>   | Voltage Source Converter                    |
| <b>XLPE</b>  | Tverrbundet polyetylen                      |

---

## Symboler

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| $D$        | Elektrisk flukstetthet         |
| $E_{AC}$   | Kapasitiv elektrisk feltstyrke |
| $E_{DC}$   | DC feltstyrke                  |
| $E_{tot}$  | Total elektrisk feltstyrke     |
| $\epsilon$ | Permittivet                    |
| $\sigma$   | Konduktivitet                  |
| $J$        | Strømtetthet                   |
| $\rho$     | Ladningstetthet                |
| $\tau$     | Tidskonstant                   |
| $U_b$      | Gjennomslagsspenning           |
| $U_{DC}$   | DC-spenning                    |

---

# Innhold

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abstract</b>   | <b>v</b>    |
| <b>Sammendrag</b>   | <b>vi</b>   |
| <b>Forord</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>Figurliste</b>   | <b>viii</b> |
| <b>1 Innledning</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 Problemstilling, bakgrunn og motivasjon                               | 1           |
| 1.2 Mål   | 1           |
| 1.3 Forsknings spørsmål   | 2           |
| 1.4 Rapportens struktur   | 2           |
| <b>2 Teori og litteraturanalyse</b>                                       | <b>3</b>    |
| 2.1 Romladninger, ledningsevne og feltdistribusjon                        | 3           |
| 2.2 Beregning av elektriske felt i HVDC-kabler                            | 6           |
| 2.3 Homo- og heteroladning ved elektroder                                 | 8           |
| 2.4 Impulser overlagret på DC-spenning                                    | 11          |
| 2.5 Prosjektoppgave   | 13          |
| <b>3 Eksperimentell metode</b>  | <b>15</b>   |
| 3.1 Målinger av AC holdfasthet  | 15          |
| 3.2 Målinger av holdfasthet ved DC og lynimpuls                           | 15          |
| 3.3 Testcelle   | 17          |
| 3.4 Prøveobjekter   | 18          |
| 3.4.1 PET-film  | 18          |
| 3.4.2 PP-film   | 19          |
| 3.5 Testprosedyre   | 19          |
| <b>4 Resultat og diskusjon</b>  | <b>21</b>   |
| 4.1 Kapasitansmåling og DSC-analyse                                       | 21          |
| 4.2 Holdfasthet ved AC 50 Hz  | 22          |
| 4.3 Holdfasthet ved lynimpuls uten DC-prestress                           | 23          |
| 4.3.1 Resultater fra forsøk på PET-film                                   | 23          |
| 4.3.2 Resultater fra forsøk på PP-film                                    | 24          |
| 4.3.3 Diskusjon av resultater   | 24          |
| 4.4 Holdfasthet ved overlagret lynimpuls på 8 kV DC-prestress             | 25          |
| 4.4.1 Resultater fra forsøk på PET-film                                   | 25          |
| 4.4.2 Diskusjon av resultater fra forsøk på PET-film                      | 26          |
| 4.4.3 Resultater fra forsøk på PP-film                                    | 27          |
| 4.4.4 Diskusjon av resultater fra forsøk på PP-film                       | 28          |
| 4.5 Holdfasthet ved overlagret lynimpuls på ulike verdier av DC-prestress | 30          |
| 4.5.1 Resultater fra forsøk på PET-film                                   | 30          |
| 4.5.2 Diskusjon av resultater fra forsøk på PET-film                      | 31          |
| 4.5.3 Resultater fra forsøk på PP-film                                    | 31          |
| 4.5.4 Diskusjon av resultater fra forsøk på PP-film                       | 32          |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5 Konklusjon og videre arbeid</b>   | <b>33</b> |
| 5.1 Konklusjon . . . . .               | 33        |
| 5.2 Videre arbeid . . . . .            | 34        |
| <b>Referanser</b>                      | <b>35</b> |
| <b>Vedlegg</b>                         | <b>38</b> |
| A - NordIS-paper . . . . .             | 38        |
| B - Utstyrliste . . . . .              | 44        |
| C - Flytskjema testprosedyre . . . . . | 46        |

---

# 1 Innledning

## 1.1 Problemstilling, bakgrunn og motivasjon

Det er et økende behov for distribusjon av energi over lengre avstander, spesielt i underjordiske og undersjøiske kabler. HVDC-kabler er det eneste alternativet på avstander over 60 km. Bruk av HVAC-kabler over lengre strekninger begrenses av økende kapasitans i kabel og krever kostbart og plasskrevende utstyr for produksjon av reaktiv effekt [1].

Inntil nylig er det kabler med olje-impregnert papirisolasjon som har vært mest brukt for HVDC-distribusjon, men et økende miljøfokus og ønske om å redusere vedlikeholdsbehovet på kabler introduserer polymerisolerte kabler som et mer miljøvennlig, fornybart og rimeligere alternativ for HVDC-distribusjon. De mest brukte polymerisolerte kablene for HVDC er LDPE, XLPE, EPR og HPTE og har utmerkede termiske, mekaniske og elektriske egenskaper [2, 3]. Men en nevneverdig utfordring i polymerisolerte kabler er påvirkningen av romladninger under HVDC.

Tilstedeværelsen av romladninger er spesielt risikabelt ved polaritetendring av DC-spenning og blir sett på som den dominerende årsaken til feil i polymerisolerte HVDC-kabler [4]. Det finnes få publikasjoner som ser på hvordan HVDC-kabler med polymerisolasjon påvirkes av DC-spenning med overlagrede lynimpulser, og da spesielt ved polaritetendring og påvirkning av temperatur. De fleste publikasjoner omhandler XLPE-isolasjon [5, 6, 7]. Materialer som polypropylen (PP) og polyetyleneteraftalat (PET) har kortere produksjonstid og er resirkulerbare, og fremstår som fremtidige alternativ til HVDC-kabelisolasjon. Det vil derfor være av akademisk interesse å studere hvilken påvirkning DC-spenning og overlagrede lynimpulser med polaritetendring har på PP og PET.

Våren 2022 ble det basert på denne masteroppgaven skrevet en forskningsartikkel som ble presentert på Nord-IS symposium i juni 2022 [8]. Artikkelen er en konsentrasjon av denne masteroppgaves funn og beskriver en metode for å beregne akkumulert romladning i polymerfilm. Artikkelen er vedlagt i Vedlegg A.

## 1.2 Mål

Målet med denne masteroppgaven og en påfølgende forskningsartikkel som ble skrevet sammen med mine veiledere [8] har vært å eksperimentelt studere hvordan impulsholdfastheten til polymer-film av PET og PP påvirkes av polariteten til den påførte DC-spenningen. DC-spenning fører til akkumulering av romladninger i polymerisolasjon og en polaritetendring vil skape store feltpåkjenninger inne i materialet som i verste fall kan føre til havari. Ved å undersøke effekten av temperatur, tid og størrelsen på DC-spenningen vil en kunne påvirke utviklingen av mer relevante testprosedyrer for polymerisolerte HVDC-kabler.

Oppgavens delmål kan oppsummeres slik:

- Utføre materialanalyse av PP og PET
- Utføre referansemålinger av holdfasthet i PP og PET ved AC 50 Hz ved ulike temperaturer
- Utføre referansemålinger av impulsholdfasthet i PP og PET ved ulike temperaturer
- Utføre holdfasthetsmålinger i PP og PET med lynimpuls overlagret på DC-spenning
- Studere hvilken effekt størrelsen på DC-spenning har på holdfastheten til PP og PET



---

### 1.3 Forskningsspørsmål

Forskningsspørsmålet i denne oppgaven er definert som:

- Undersøk hvordan impulsholdfastheten i polymerfolier påvirkes av HVDC-spenning og hvilken innvirkning temperatur, polaritet og størrelse på HVDC-spenningen har.

### 1.4 Rapportens struktur

Rapporten er basert på IMRoD-modellen som brukes til vitenskapelige artikler innen naturvitenskap.

Kapittel 2 gir en oversikt over relevant teori innen romladning, elektriske felt, feltfordeling og holdfasthet ved overlagrede lynimpulser i HVDC polymerisolasjon. Den gir også en oppsummering av relevante litteratur som brukes til å tolke resultatene i denne oppgaven.

Kapittel 3 beskriver den eksperimentelle metoden, testprosedyre, testobjekter og måleteknikk som brukes under utførelse av testene. Her presenteres alle komponentene i detalj.

Kapittel 4 viser en systematisk presentasjon av resultater og diskusjon av resultatene. Usikkerheter knyttet til resultatene blir også nevnt her.

Kapittel 5 gir en overordnet konklusjon og presenterer forslag til fremtidig arbeid.

---

## 2 Teori og litteraturanalyse

Dette kapittelet gir en oversikt over relevant teori innen romladning, elektriske felt, feltfordeling og holdfasthet ved overlagrede lynimpulser i HVDC polymerisolasjon. Den gir også en oppsummering av relevante litteratur som brukes til å tolke resultatene i denne oppgaven.

### 2.1 Romladninger, ledningsevne og feltdistribusjon

Et ideelt isolasjonsmateriale ansees som homogent, har ingen elektrisk ledningsevne ( $\sigma = 0$ ) og permittiviteten  $\epsilon$  blir sett på som uavhengig av frekvens og temperatur. Derfor er et ideelt isolasjonsmateriale tapsfritt. Feltdistribusjonen i et slikt materiale er uavhengig på den påførte spenningen (impuls, AC eller DC). Ved bruk av lagvise isolasjonsmaterialer vil spenningsfordelingen bestemmes av permittiviteten til materialene. Dette kalles kapasitiv spenningsdistribusjon og er uavhengig av formen på spenningen. Ved bruk av ikke-ideelle (ekte) isolasjonsmaterialer med en viss form for ledningsevne vil en DC-spenning etter en gitt stund resultere i en resistiv spenningsdistribusjon, avhengig av resistiviteten som er temperatur og feltavhengig. Ved påføring av DC-spenning vil spenningsdistribusjonen være kapasitiv i starten. En forbigående synkende polariseringsstrøm vil flyte gjennom materialet før en statisk lekkstrøm blir opprettet. I denne perioden vil det bygges opp ladning i materialet mot elektrodene med varierende feltstyrke. Ved AC og støt-spenninger vil spenningsdistribusjonen bli ansett som kapasitiv [9].

Romladning kan sees på som overskudd av elektrisk ladningstetthet i et isolasjonsmateriale. Elektrisk ladning som dannes på overflaten til lederne eller andre grenseflater kan også anses som romladning, men blir vanligvis oppfattet som overflateladning. Nyere forskning viser at degradering av polymerisolasjon under høy elektrisk belastning er assosiert med dannelse av romladninger [10]. Det er også et velkjent fenomen at feltdistribusjonen over isolasjonen er sterkt avhengig av romladninger [11]. Romladninger kan påvirke oppførselen til kabelsystemet, da spesielt den langvarige påliteligheten og levetiden til kabelen. Når en HVDC-spenning påføres et polymer vil det dannes romladninger for å balansere virkningen av injisert ladning ved elektrodene i tillegg til lokale forskjeller i elektrisk ledningsevne og permittivitet. Ledningsdominert dannelse av romladning er en treg prosess sammenlignet med den raske injeksjonsprosessen nær elektrodene. I tillegg er det en utfordrende oppgave å skille mellom ledningsmekanismer forårsaket av enten ioner eller elektroner. Dannelse av romladninger endrer den elektriske feltfordeling i isolasjonen og forårsaker høy lokal feltforsterkning og redusert holdfastheten ved rask polaritetsendring. Om romladningstettheten blir høy nok kan den lokale feltstyrken overskride holdfastheten til isolasjonsmaterialet og føre til havari.

Det er publisert flere metoder for beregning av felt og romladninger i kabelisolasjon [12, 13, 14, 15]. Samtlige publikasjoner antar at mengden konduktivitet/resistivitet i isolasjonen avhenger av temperatur og det elektriske feltet. En slik tilnærming brukes normalt av ingeniører som utvikler HVDC-kabler og fungerer som en viktig referanse. For forskning og utvikling er metodene beskrevet i publikasjonene ikke tilfredsstillende av to grunner:

1. Ledningsmekanismene som virker i isolasjonen under driftforhold er veldig komplekse og involverer ladingssinnspøyning fra elektrodene gjennom halvlederskjermer, ladingsoppbygging nær elektrodene, ladingsoverføring og feller.
2. Det må tas hensyn til at det ikke finnes homogene materialer og derfor vil lokale vilkår sterkt påvirke ladingssprosessene. Materialforskyvninger, urenheter, kjemiske og fysiske defekter vil lokalt endre isolasjonsmaterialet og gjør det vanskelig å analytisk behandle

---

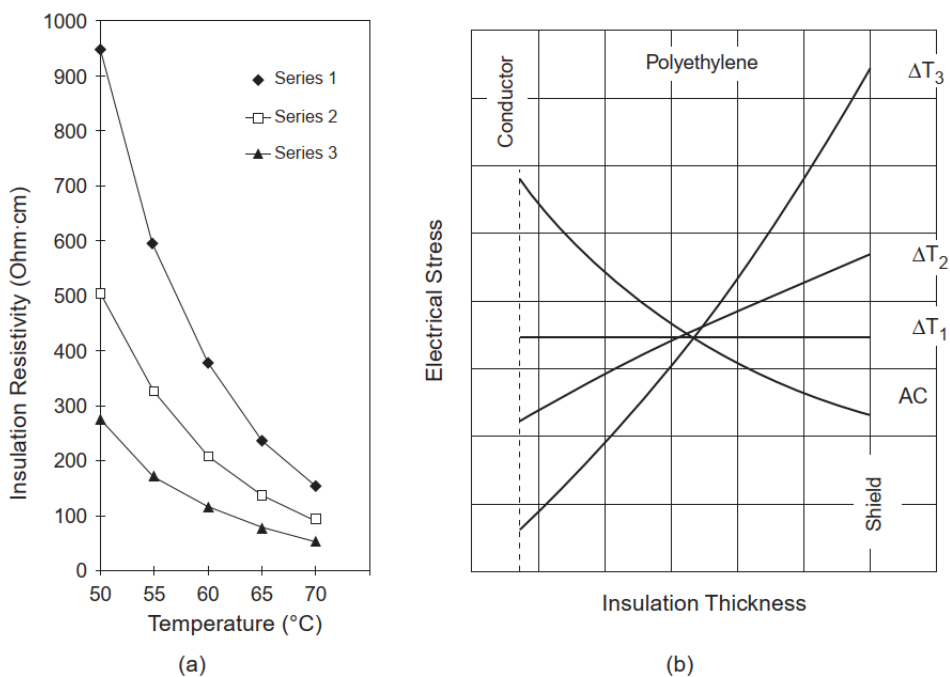
ledningsmekanismene. Dette krever komplekse numeriske simuleringer som tar i betraktning defekter og mangler.

Alternativ til metodene beskrevet i nevnte publikasjoner [12, 13, 14, 15] er at det kan utføres laboratoriemålinger for å anslå hvordan et materiale oppfører seg under varierende belastning. Derfor blir målinger normalt utført under kabeltester for å evaluere de ulike ledningsmekanismene som er foreslått. Denne eksperimentelle tilnærmingen er undersøkt vidt og bredt av kabelprodusenter og forskere.

CIGRE TB-219 som nå er erstattet av TB-496, beskriver eksperimentelle DC-kabler med polyetylenisolasjon som på 60-tallet ble produsert og testet ved 200kV. Kablene hadde en tendens til å havare under polaritetsendring, som ble forklart at inntraff på grunn av feltforsterkning i isolasjonsmaterialet rett etter polaritetsendring [16].

Konseptet romladning ble opprinnelig introdusert for å identifisere andre typer ladninger enn overflateladning, som er den eneste ladningen tilstede i ideelle isolasjonsmaterialer [17]. Betydelig arbeid har blitt gjort på romladninger i faste isolasjonsmaterialer de siste femti årene og det finnes omfattende teoretisk og eksperimentell litteratur tilgjengelig [18, 19].

McAllister et al. [20] beviste i 1994 ved hjelp av elektrisk felt-teori at oppbygging av romladninger i faste isolasjonsmaterialer er en konsekvens av isolasjonsresistansens påvirkning fra temperatur og felt. Denne påvirkningen av temperatur kan sees i Figur 1a. Påvirkningen fører også til en speilvendning av feltet når lasten (og ledertemperaturen) i kabelen øker, som vist i figur 1b.



**Figur 1:** Isolasjonsresistivitetsens påvirkning på temperatur og elektriske felt i LDPE-kabel vises i figur (a). Serie 1:  $E = 17\text{ kV/mm}$ , Serie 2:  $E = 22\text{ kV/mm}$ , Serie 3:  $E = 28\text{ kV/mm}$ . Hvordan det elektriske feltet forandrer seg i en HVDC-kabel ved ulike  $\Delta T$ , sammelignet med HVAC-kabel vises i figur (b) [21].

Ishizaki et al. [10] studerte i 2002 romladningsdannelse i 0,19mm tykk PET-film ved høy temperatur og elektrisk felt. De observerte negative ladninger nær anode-elektroden. Mengden av negativ ladning økte med økende temperatur. Ved polaritetsendring ved høy temperatur ble det observert at positive ladninger erstattet de akkumulerte negative ladningene. Fra resultatene ble det antatt at akkumulert negativ heteroladning ble injisert fra katoden. Siden den akkumulerte negative ladningen forsterket det elektriske feltet i grenseflaten mellom elektrode og PET-film, ble det også injisert positiv ladning. Dette resulterte i en observasjon av positive ladninger etter polaritetsendring.

Du et al. [22] studerte i 2019 DC-holdfasthet og romladninger i PP-film ved 30, 60 og 90°C. Resultatene viste høyere injeksjon av homo-ladning fra elektrodene ved økende temperatur og dannelse av negativ ladning i isolasjonsmaterialet, nær katode. I tillegg viste resultatene at den elektriske feltdistribusjonen ble forvrengt ved økende temperatur, med et sterkt felt nær katode og synkende felt nær anode. Målinger av DC-holdfasthet viste også en synkende holdfasthet ved økende temperatur.

---

## 2.2 Beregning av elektriske felt i HVDC-kabler

Ved lave elektriske felt kan et isolasjonsmateriales avhengigheten til spenning og strøm uttrykkes med Ohm's lov som sier at strømtettheten  $J$  gjennom et materiale kan uttrykkes som [23]

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho_E} \quad (1)$$

der  $E$  er det påførte elektriske feltet,  $\sigma$  er den elektriske ledningsevnen og  $\rho_E$  er den elektriske resistiviteten til materialet. Ohmsk ledning i isolerende polymermaterialer forklares vanligvis ved to modeller, felle-frie og felle-begrenset ohmsk ledning [23].

Beregning av elektriske felt i HVDC-kabler er komplisert sammenlignet med HVAC. Dette er pga at konduktiviteten til kabelisolasjonen er temperatur- og felt-avhengig. Feltdistribusjonen i HVDC-kabler kan være kapasitiv, resistiv eller en mellomting av de to. Det elektriske feltet avhenger av hvilket stadium kabelen befinner seg i; om spenning nettopp har blitt tilført, om det har vært en polaritetendring eller om feltdistribusjonen har stabilisert seg. For hvert stadium vil det være ulike metoder for å beregne feltet. Normalt kan effekten av varmen som oppstår i isolasjonsmaterialet pga lekkstrøm neglisjeres. Men i enkelte tilfeller der kabeltemperatur og påført spenning er høy nok, vil feltdistribusjonen bli påvirket av isolasjonstapene. De kan til og med føre til ustabilitet og i verste fall føre til kabelhavari. En kabel i drift kan bli utsatt for koblings- og lynimpulser overlappet på DC-spenningen. Det mest alvorlige tilfellet er ved overlappet impuls på DC-spenning med motsatt polaritet [15].

Beregning av elektriske felt i HVAC-kabler er enklere. Feltdistribusjonen avhenger av permittiviteten til isolasjonsmaterialet,  $\epsilon_r$ , geometrien til kabelen og den påførte spenningen. I de aller fleste tilfeller er geometrien sylindrisk. Permittiviteten er i stor grad uavhengig av eksterne parametre som temperatur, i allefall innenfor driftssegmentet [0-90° C]. I de fleste tilfeller består isolasjonen til en HVAC-kabel av kun ett materiale og permittiviteten kan tas ut av formel for utregning av felt-distribusjonen:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_o}{R_i}} \quad (2)$$

Elektriske felt i HVDC-kabler er mer krevende å beregne. Feltdistribusjonen avhenger av permittivitet  $\epsilon$ , konduktivitet  $\sigma$ , kabelgeometri og påført spenning. Konduktiviteten er i tillegg sterkt avhengig av temperatur  $T$  og elektrisk felt  $E$ .

$$\sigma(T, E) = \sigma_0 \exp[a(T - T_0) + b(E - E_0)] \quad (3)$$

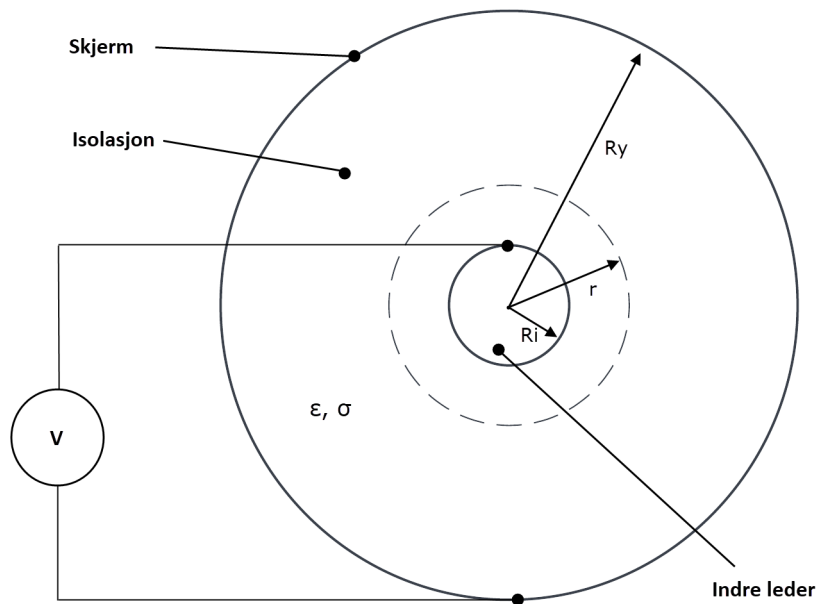
$T_0$  = referansetemperatur [273 K]

$E_0$  = referanseverdi elektrisk belastning [kV/mm] (ofte ansett som lik null)

$\sigma_0$  = isolasjonskonduktivitet ved referansetemperatur  $T_0$  og elektrisk belastning  $E_0$  [S/m]

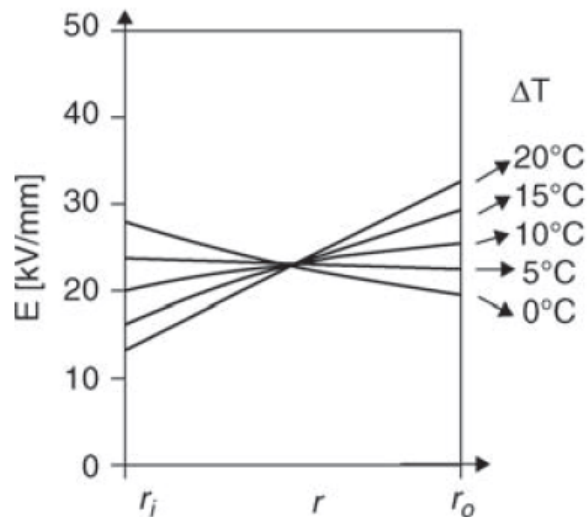
$a$  = temperatuavhengig koeffisient til elektrisk konduktivitet [1/K eller 1/Celcius]

$b$  = belastningskoeffisient til elektrisk konduktivitet [mm/kV]



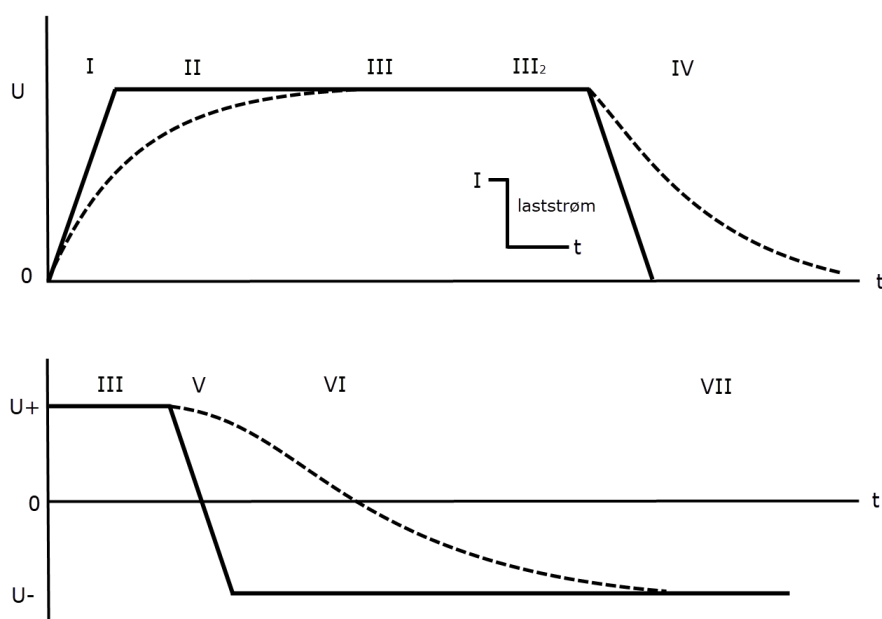
Figur 2: Elektriske felt i HVDC-kabel

I en ubelastet kabel er det høyest feltstyrke nær den indre lederen. Når kabelen belastes vil isolasjonsmaterialet oppleve temperaturvariasjon  $\Delta T$ , mellom indre leder og ytre skjerm. Isolasjonsmaterialets temperaturavhengighet blir synliggjort ved at økende  $\Delta T$  gir en gradvis speilvendning av det elektriske feltet mellom ytre og indre del av isolasjonen. Dette kan en se i Figur 3.



Figur 3: Feltfordeling i HVDC polymerkabel ved varierende last og temperatur [24].

Det vil ikke oppstå et DC-felt i kabelen like etter at en har påført spenning. Feltdistribusjonen vil først være kapasitiv, og vil videre via et forbigående tidsavhengig felt endres til en rent resistiv feltfordeling. (men det vil ta tilnærmet uendelig med tid for at det skal bli rent resistivt). Etter en polaritetendring vil det oppstå en ny feltfordeling i kabelen. Siden fordeling av feltet i kabelen varierer mellom de ulike stegene må det derfor benyttes ulike beregningsmetoder for hvert steg. De ulike stegene beskrives i Figur 4.



**Figur 4:** Øverste bilde viser de ulike stegene som oppstår når en kobler til og fra DC-spenning. Nederste bilde viser de ulike stegene som oppstår etter en polaritetendring. Den prikkete linjen representerer vekst og forfall av romladninger i isolasjonsmaterialet [15].

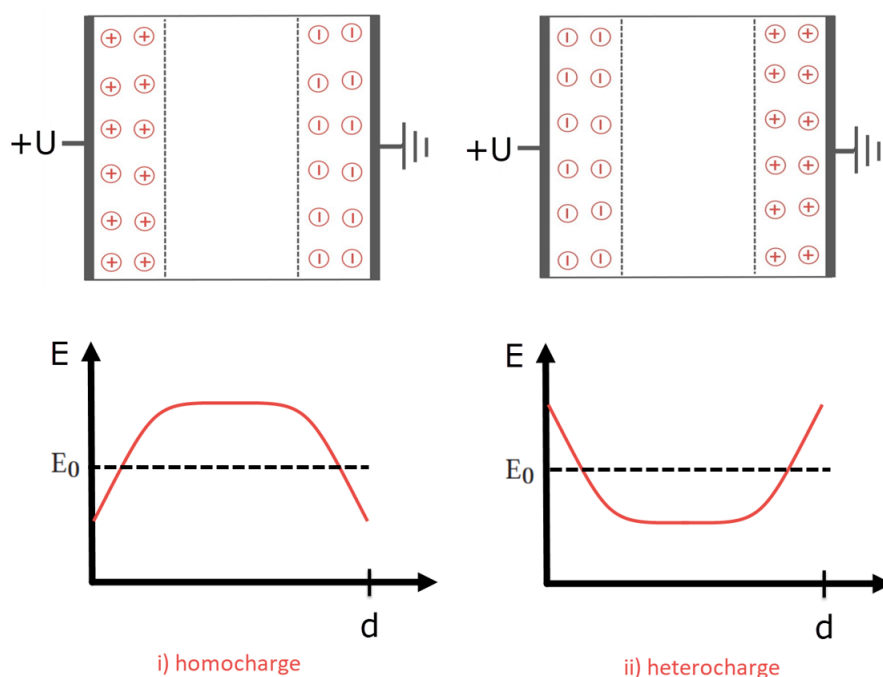
I steg I blir det påført DC-spenning. I begynnelsen inneholder kabelen ingen romladning og det er ingen temperaturvariasjon i isolasjonen. Det elektriske feltet bestemmes kun av geometrien og permittiviteten  $\epsilon$ . Her er det en kapasitiv feltdistribusjon. I steg II har den påførte spenningen stabilisert seg og det elektriske feltet endres fra kapasitiv til resistiv feltdistribusjon. I dette steget er feltet tidsavhengig. I steg III har vi et rent resistivt felt. I steg I til III er det en laststrøm tilstede som tilfører varme i lederen. I steg III<sub>2</sub> skrur lasten av og laststrøm går til null. I steg IV synker spenningen til null. Det er fortsatt et elektrisk felt tilstede etter at spenningen er slått av. Steg V og VI viser en polaritetendring. I steg VII har feltet stabilisert seg etter polaritetendringen.

### 2.3 Homo- og heteroladning ved elektroder

Spenningsnivået som forårsaker elektrisk sammenbrudd i et isolasjonsmateriale bestemmes i all hovedsak av størrelsen på den elektriske feltpåkjenningen som oppstår inne i materialet [21]. For å kunne forklare de fysiske fenomenene bak holdfastheten til materialet må en bruke teori relatert til elektriske felt i slike materialer, spesielt knyttet til elektriske felt som oppstår fra

støtspenninger påtvunget på DC-spenning. Når DC-spenning påtrykkes et isolasjonsmateriale kan det oppstå romladninger nær elektrodene. Dette skjer når isolasjonsmaterialet har en annen ledningsevne enn elektrodene og derfor leder ladning i et annet tempo. Dannelse av romladninger i polymer er normalt knyttet til ionisering av enkelte kjemiske arter som kan inntreffe under materialproduksjon, f.eks antioksidanter, biprodukter fra kryssbinding eller andre urenheter [25, 23]. Under påføring av DC-spenning kan romladninger ved elektrodene defineres i to ulike typer:

1. Homoladninger (ladning med lik polaritet som elektrodene) kan oppstå ved injeksjon av elektroner ved katoden og hull (mangel på elektroner) ved anoden. Ved å anta at homoladninger injiseres fra begge elektrodene (se Figur 5 (i)) vil det elektriske feltet i grenseflaten til elektrodene bli lavere enn det gjennomsnittlige elektriske feltet  $E_0$  og føre til et større felt i hovedparten av isolasjonsmaterialet. Effekten av injisert homo-lading er at det elektriske feltet nær elektrodene reduseres og belastningen øker i hoveddelen av isolasjonen [25].
2. Heteroladninger (ladning med motsatt polaritet som elektrodene) kan oppstå ved akkumulering av kjemiske ioniserte arter i grenseflaten mellom isolasjon og elektrodene. Ved påføring av et elektrisk felt vil elektroner og positive ioner som dannes gjennom spalting, vandre mot elektrodene med motsatt polaritet og fanges der. Effekten av dette gir en forsterkning av feltet nær elektrodene og en reduisering av feltet i midten av isolasjonen, som vist i Figur 5 (ii).



**Figur 5:** Forenklet skisse av romladninger i det elektriske feltet mellom parallelle elektroder. Figur (i) viser injeksjon av homoladning som reduseres feltet langs elektrodene og øker det i midtpartiet. Figur (ii) viser injeksjon av heteroladning som øker feltet langs elektrodene og reduserer det i midtpartiet.



---

Dannelse av romladninger i isolasjonsmaterialet deformerer det elektriske feltet og skaper soner med høy feltpåkjenning. Om romladningstettheten er tilstrekkelig høy nok vil den lokale feltstyrken overskride holdfastheten til materialet og føre til havari. [26]. Ved dannelse av homoladninger er det en polaritetendring av den påførte spenningen som vil påvirke det elektriske feltet mest. I et slikt tilfelle vil homoladningene endres til heteroladninger og underspente punkter vil plutselig bli utsatt for et mye høyere felt. Dette ble bevist av Montanari et al. [27] i 2005 som viste at polaritetsendring fører til redusert levetid for isolasjonsmaterialet.

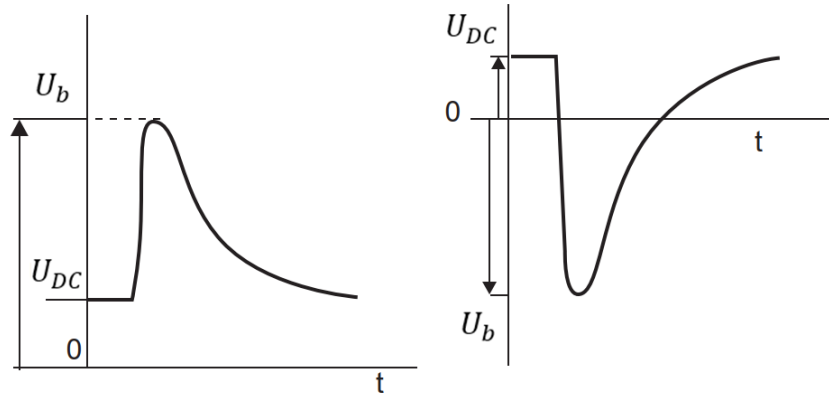
For enkelte materialer er det tilstedeværelsen av heteroladninger som kan føre til problemer under polaritetendring. Oppbyggingen av heteroladninger betyr at ladningstransporten styrer over ladningsinjiseringen, som en følge av at mesteparten av den injiserte ladningen blir transportert gjennom materialet og samler seg ved den andre elektroden. Når det oppstår en rask polaritetsendring vil oppsamlet heteroladning nær elektroden bli omgjort til homoladning og føre til at oppsamlet ladning fra hver elektrode vil krysse materialet i høyt tempo og føre til rekombinasjon og muligens skade på materialstrukturen [28].

Hvor ofte idriftssatte kabler blir utsatt for polaritetsendringer bestemmes av hvilken type omformer kabelsystemet bruker. I HVDC-anlegg med LCC-omformer er en polaritetsendring enes-te måte å endre effektflyten i systemet på. I anlegg med VSC-omformer er det mulig å endre lastflyten ved å enten reversere strømmen, eller reversere både strøm og spenning. Det er verdt å nevne at i HVDC-system kan en endring i lastflyt deles opp i to ulike scenarioer.

1. Treg polaritetendring planlegges av TSO og begynner først med en flere minutter lang periode der spenningen kjøres rolig ned før en periode på flere titalls sekunder der spenningen kjøres ned i et raskere tempo til den når null. Deretter blir lederen jordet i en lengre periode før spenningen økes med motsatt polaritet med samme prosedyre som ved nedkjøring.
2. Rask polaritetendring inntreffer når HVDC-systemet får i oppgave å raskt støtte nettet (ofte pga uforutsette årsaker) gjennom en øyeblikkelig effektomgjøring i kabelforbindelsen. En rask polaritetendring gjennomføres normalt iløpet av et sekund uten jording. En rask polaritetendring påfører betydelig høyere påkjenning på kabelisolasjonen.

## 2.4 Impulser overlagret på DC-spenning

En HVDC-kabel vil ofte oppleve forbigående koblings- og lynimpulser. En kabel i drift vil få impulsene overlagret på DC-driftsspenningen. Når dette inntreffer blir det sett på som at impulser med en toppspenning  $U_p$  blir påtvunget/overlagret på driftsspenningen  $U_{DC}$ . Impulsene kan ha lik eller motsatt polaritet som DC-spenningen. Se Figur 6.



Figur 6: Definisjon på spenningene  $U_{DC}$  og  $U_b$  [24].

Det totale elektriske feltet ved en impuls kan uttrykkes på følgende måte:

$$E_{tot} = E_{DC} + E_{AC} \quad (4)$$

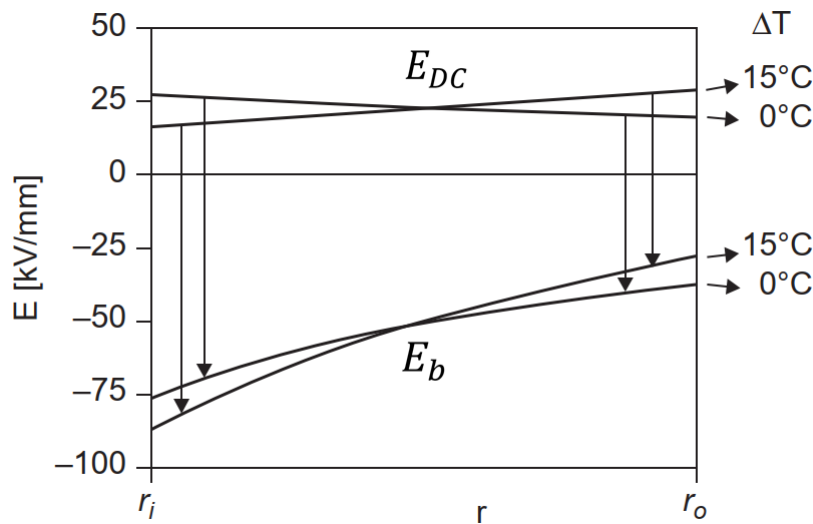
der

$$E_{AC} = \frac{U_b - U_{DC}}{r \ln \frac{r_y}{r_i}} \quad (5)$$

Det kapasitive feltet  $E_{AC}$  menes som svingningen i elektrisk felt fra DC til AC-distribusjon som en konsekvens av den resulterende toppspenningen  $U_p$  til den overlagrede impulsen på den eksisterende DC-spenningen. Derfor er absoluttverdien til  $E_{AC}$  høyere for impulser med motsatt polaritet.

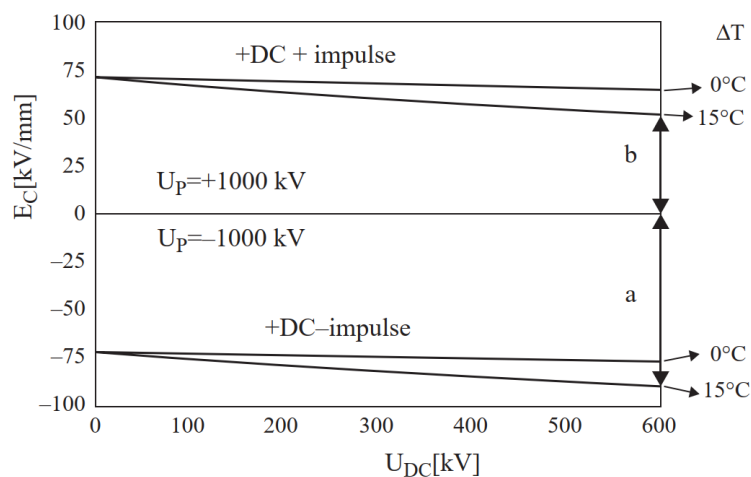
$$|-U_b - U_{DC}| > |U_b - U_{DC}| \quad (6)$$

Figur 7 viser beregninger av det elektriske feltet i en HVDC-kabel med overlagret lynimpuls med motsatt polaritet. Utregningene er gjort av Jeroense(1998) [15] ved  $U_{dc} = +450\text{kV}$  og  $U_b = -1000\text{ kV}$ . Feltet er beregnet kabel uten last ( $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ ) og for kabel med last ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ). Feltstyrken ved en slik overlagret impuls vil være høyest ved lederen både med og uten last. Men en kabel med last vil gjennomgå en høyere total feltstyrke  $E_{tot}$ .



**Figur 7:** Total feltistribusjon  $E_{tot}$  ved overlaget lynimpuls med motsatt polaritet.  $E_{DC}$  viser DC-feltistribusjon. Pilene viser det kapasitive feltet  $E_{AC}$  ved enkelte målepunkter  $r$ .

Figur 8 er også hentet fra Jeroense(1998) [15] og viser hvordan feltet nærmest leder,  $E_c$  endrer seg ved ulike DC-forspenninger, lynimpulser med motsatt eller lik polaritet som DC-forspenningen og med og uten last (endring i  $\Delta T$ ). Absoluttverdi til toppspenningen  $U_p$  er satt til 1000kV. Feltstyrken ved leder synker med økende DC forspenning for overlagrede impulser med lik polaritet som DC-spenning. Ved impulser med motsatt polaritet øker feltstyrken ved kabelleder ved økende DC-forspenning. Høyere temperaturdifferanse bidrar også til denne økningen. Ved å studere feltstyrken i figuren kan en observere at overlagrede impulser med motsatt polaritet (a) fører til høyere feltstyrke nær lederen sammenlignet med overlagrede impulser med samme polaritet (b) [15].



**Figur 8:** Feltstyrke ved kabelleder ved lynimpulser overlagret på DC-forspenning med lik og motsatt polaritet.

Forsøk utført av Pays et al.(1988) [29] og Maekawa et al.(1991) [30] viser også at holdfastheten er betydelig høyere i forsøk med overlagret impuls med samme polaritet som DC-spenningen, og støtter opp under forsøkene til Jeronsen(1998) [15]. Dette fenomenet kan forklares ved at det dannes tynne lag med homopolar romladning nær elektrodene under DC forspenning. Denne romladningen kan betraktes som en ny *virtuell* elektrode som glatter ut mikroskopiske inhomogeniteter ved grenseflatene [8]. Dette reduserer belastning i isolasjonen og øker holdfastheten. Dette er gyldig dersom utvidelsen av romladningsområdene er små sammenlignet med isolasjonstykkelsen. Hvis oppbygging eller fjerning av homo romlading trenger lengre tid enn den korte (1,2/50  $\mu$ s) impulsen, er det svært sannsynlig at slik homo-ladning kan ha en skadelig effekt på holdfastheten ved lynimpulser med motsatt polaritet. For EPR-isolasjon førte ulike DC spenningsnivå til betydelig påvirkning av holdfastheten, mens lengden på DC forspenning ikke endret effekten av romladning [31].

Tilsvarende rask lading og langsom nedbrytingsmekanismer ble også funnet i forsøk på DC holdfasthet i poly-p-xylen (PPX) filmer. Romladningen i PPX-filmen ble dannet på mindre enn 1 sekund, men ble værende i mer enn 500s etter kortslutning [32].

Impulsholdfasthet for samme polaritet som DC-prestress er angitt som medvirkende felt,  $E_{b+}$ , mens impulsholdfasthet for motsatt polaritet som DC-prestress er angitt som motvirkende felt  $E_{b-}$ . Impulsholdfasthet uten DC-prestress er angitt som  $E_{b0}$  og beskriver det gjennomsnittlige elektriske feltet, altså påført spenning delt på tykkelsen til hvert prøveobjekt. Kaneko et al.(1991) [33] gjorde forsøk basert på SCLC-metoden for å estimere mengden romladninger som ble dannet i isolasjonsmaterialet under DC-prestress. I følge SCLC-metoden blir homoladninger injisert inn i isolasjonen helt til den elektriske belastningen nær elektrode er null,  $E_{elektrode} = 0$ . De antok at differansen i impulsholdfasthet mellom medvirkende felt  $U_{b+}$  og uten DC-prestress  $U_{b0}$  gav den totale mengden av injisert dannet romladning, der C er kapasitansen til prøveobjektet:

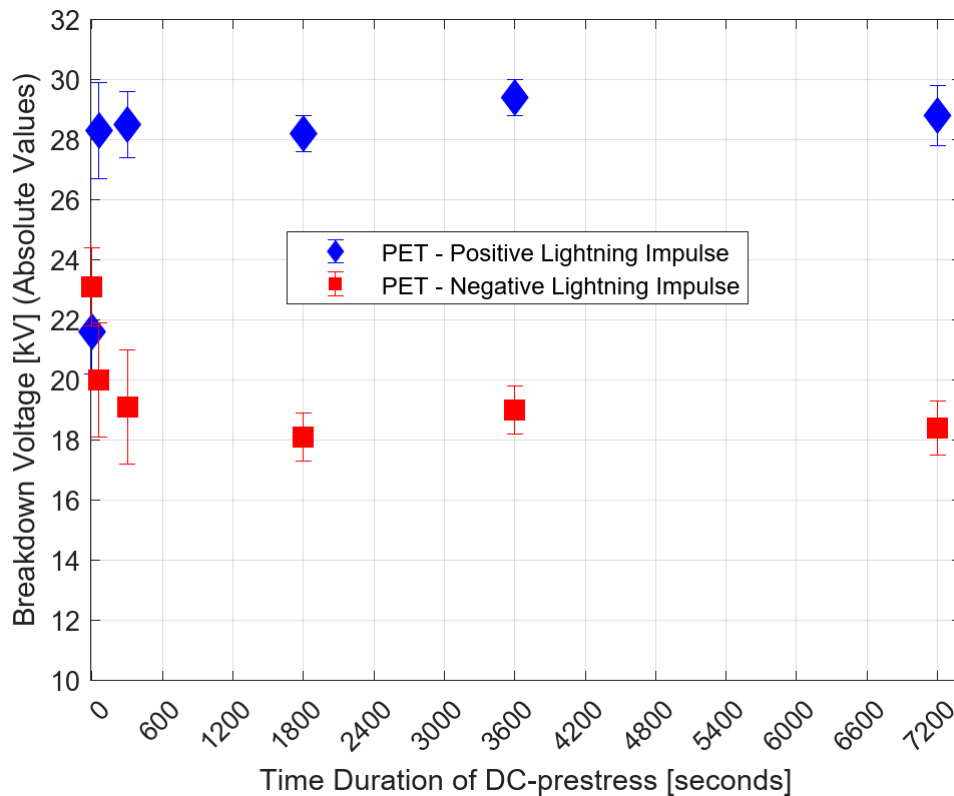
$$\Delta Q_+ = C \cdot \Delta U_{b+} = C \cdot (U_{b+} - U_{b0}) \quad (7)$$

Pga geometrisk symmetri vil mengden total injisert eller akkumulert romladning også estimeres ved å observere differansen i impulsholdfasthet mellom motvirkende felt  $U_{b-}$  og uten DC-prestress  $U_{b0}$ :

$$\Delta Q_- = C \cdot \Delta U_{b-} = C \cdot (U_{b0} - U_{b-}) \quad (8)$$

## 2.5 Prosjektoppgave

For å studere effekten av hvilken påvirkning varigheten til DC-prestress har på holdfastheten ble det i prosjektoppgaven [34] (2021) utført målinger med ulike DC-prestress varigheter på PET-film. Det ble utført målinger med DC-prestress på 11 kV med varighet på 1, 5, 30 og 60 minutt. Det ble også utført referansemålinger på impulsholdfasthet uten DC-prestress. Alle målinger ble utført på 0.19mm PET film i romtemperatur. Resultatene fra prosjektoppgaven er plottet på ny i Figur 9 og viser holdfasthet og standardavviket ved lynimpulser med lik (positiv) og motsatt (negativ) polaritet som DC-spenning.



**Figur 9:** Holdfasthet i 0,19mm PET-film med overlagret lynimpuls med varierende DC-prestress tid fra 60 til 7200s.

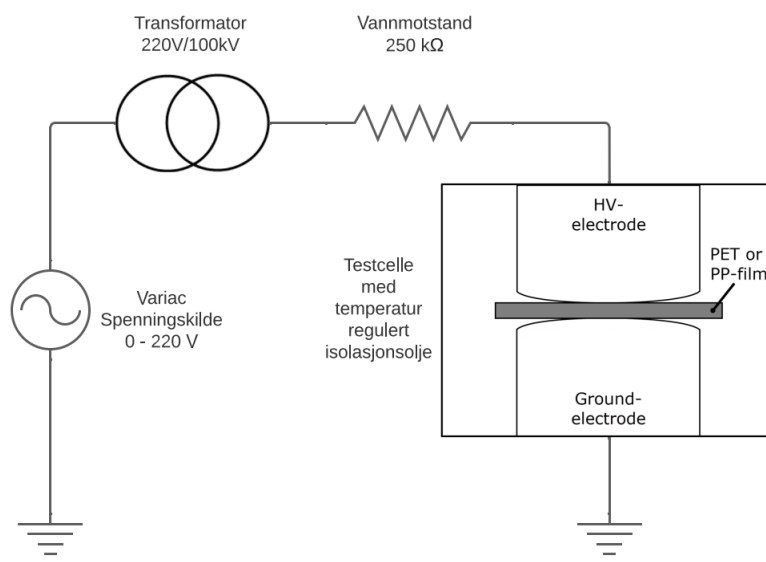
Romladninger i PET-film akkumuleres i løpet av 1 sekund under DC-prestress og blir lagret i materialet i over 30 minutter ved romtemperatur [35]. Resultatene fra prosjektoppgaven viste at holdfastheten ved lynimpulser overlagret på DC-prestress med lik polaritet ikke endret seg når varigheten på DC-prestress var lengre enn 60 sekunder. Ved lynimpulser overlagret på DC-prestress med motsatt polaritet ble det observert små variasjoner i holdfastheten og at holdfastheten ikke endret seg når varigheten på DC-prestress var lengre enn 300 sekunder. Varigheten på DC-prestress påvirket altså ikke holdfastheten i PET-film når en sammenligner tidsvariasjoner mellom 1 og 120 minutter for positive lynimpulser og mellom 5 og 120 minutter for negative lynimpulser. Det var flere usikkerhetsmomenter knyttet til resultatene fra prosjektoppgaven. Det ble ikke benyttet mekaniske lodd på testcellen under målingene. Lynimpulsene ble påført med en økende amplitude på 500 V/s frem til påvist gjennomslag, og ikke ved en enkel lynimpuls som garanterte gjennomslag ved første forsøk. Dette kan ha spilt inn på de endelige resultatene fra prosjektoppgaven.

### 3 Eksperimentell metode

Dette kapittelet beskriver den eksperimentelle metoden som er brukt for å kunne undersøke endring av gjennomslagsstyrke under påvirkning av DC-spenning og lynimpulser med ulik polaritet. Forsøk er gjort på filmer av polyetyleterftalat (PET) og polypropylen (PP). Underkapitlene gir detaljert forklaring på hvordan testene er utført, hvilken oppkobling som er brukt, testcellen, metode for måling, testprosedyre og prøveobjektet brukt under forsøkene. Alle komponenter brukt under forsøkene er beskrevet i Vedlegg B.

#### 3.1 Målinger av AC holdfasthet

Det har blitt gjort målinger av AC holdfasthet i materialene som brukes som referanseverdier. For å måle AC holdfasthet i PET- og PP-film ble det brukt en testkrets med en 100kV transformator, en 250 k $\Omega$  vannmotstand og testcelle som vist i Figur 10. Det ble utført målinger ved temperatur på 22, 40, 60 og 80 °C. Påført spenning hadde en frekvens på 50 Hz og ble gradvis økt med 500V/s til påvist gjennomslag i testobjekt. Det ble utført 5 målinger per film og temperatur.

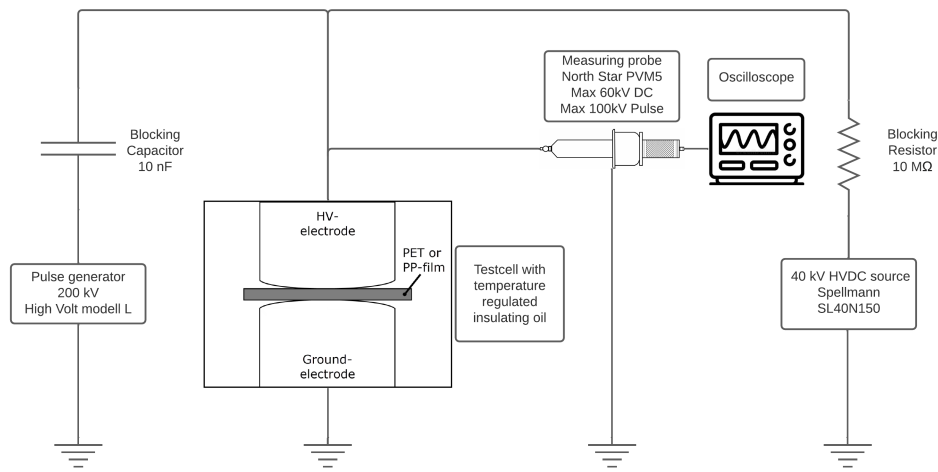


Figur 10: Koblingsskjema testkrets for måling av AC-holdfasthet

#### 3.2 Målinger av holdfasthet ved DC og lynimpuls

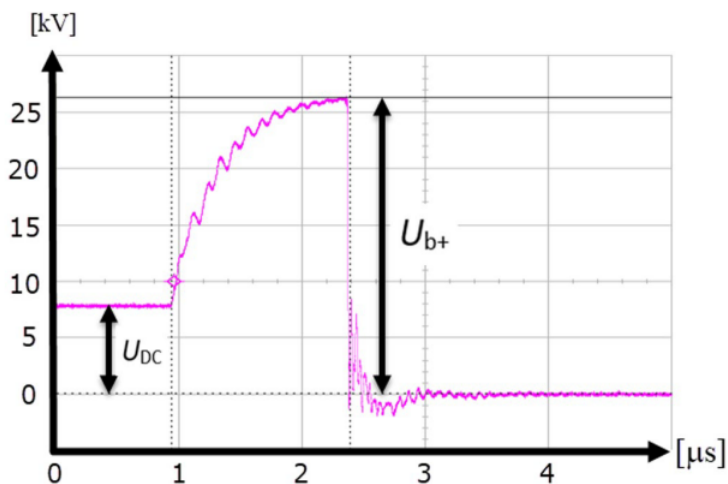
Det er benyttet en testkrets som består av en DC-kilde og en impulsgenerator som genererer støtspenninger. For å unngå at de påvirker hverandre er det satt inn en 10 M $\Omega$  blokkeringsmotstand i serie med DC-kilden og en 10nF blokkeringskondensator i serie med impulsgeneratoren. Motstanden og kondensatoren fungerer som et høypass-filter og tillater at høyfrekvent strøm slipper gjennom, mens DC blir blokkert. For å kunne måle og dokumentere spenning over testcellen brukes en måleprobe med forhold 1:1000 som gjør det mulig å lese av verdier i oscilloskopet. Det ble utført målinger ved temperaturer på 22, 40, 60, 80 og 100 °C. Figur 11

viser hvordan testkretsen er satt opp. Typebetegnelse og modellnummer for de ulike komponentene i testkretsen er beskrevet i Vedlegg B. Testkretsen er utformet etter inspirasjon fra Jacob og Fattal [36] som i 2016 utviklet et testoppsett som kombinerte HVDC- og impuls-spenning.

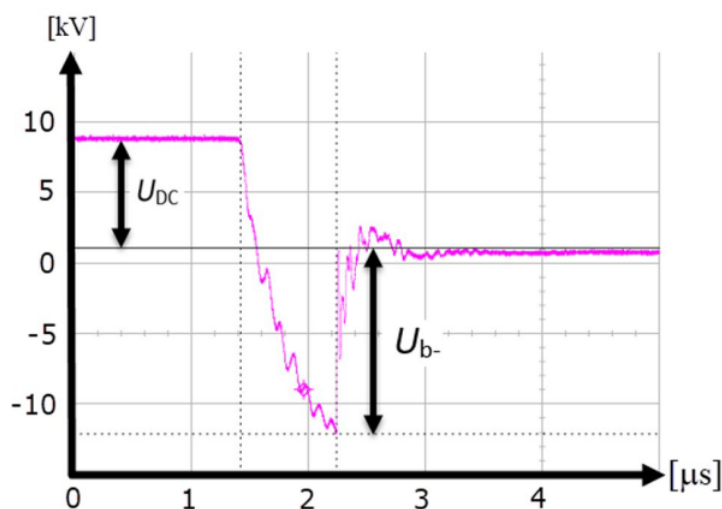


**Figur 11:** Koblingsskjema testkrets for måling av holdfasthet ved kombinert HVDC og lynimpuls

For å måle gjennomslagsspenningen i prøveobjektet ble det brukt en Messwandler Bau PVM-5 måleprobe med forhold 1:1000 og et RTB2004 oscilloskop som trigges til å ta bilde ved gjennomslag i prøveobjektet. Gjennomslagsspenningen  $U_{b+/-}$  og tid til gjennomslag  $\Delta T$  dokumenteres fra oscilloskopet. Figur 12 og 13 viser eksempel på tester utført med positiv og negativ lynimpuls.



**Figur 12:** Eksempel på utført test med gjennomslag ved DC-prestress og overlagret lynimpuls med positiv polaritet.  $U_{DC} = 8$  kV,  $U_{LI} = 20$  kV and  $U_{b+} = 26$  kV.



**Figur 13:** Gjennomslag ved DC-prestress og overlagret lynimpuls med negativ polaritet.  $U_{DC} = 8$  kV,  $U_{LI} = -25$  kV og  $U_{b+} = -13$  kV.

Resultatene fra testene er stokastiske verdier, så en statistisk behandling av dataene er nødvendig for å tolke resultatene. Alle resultater er presentert ved middelverdier og er arrangert i plot i henhold til aritmetisk gjennomsnitt som er beskrevet i Formel 9.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

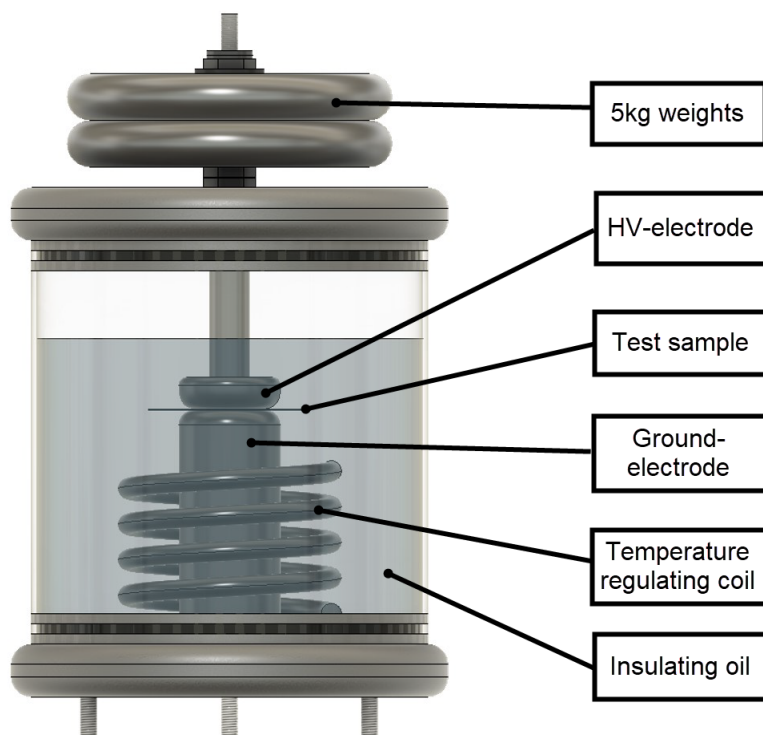
Standardavvik regnes ut etter Formel 10 og gir en god indikasjon på hvor stor spredningen det er mellom de ulike resultatene.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

### 3.3 Testcelle

Testcellen består av to parallelle plateelektroder i messing innkapslet i pleksiglass. Elektrodene er Rogowski-formet med en diameter på 50 mm og en krumming på 4 mm. Testcellen er olje-, vakuum- og lufttett. Det mekaniske trykket som påføres mellom elektrodene bestemmes av 2 stk 2,5 kg lodd som er montert på toppen av testcellen. Cellen ble modellert og utviklet av Olsen [37] i 2020 til hans doktorgradsavhandling. Temperaturen i oljen styres av en varmespole og reguleres av en ekstern styringsenhet og variac. Det ble brukt isolerende olje av type Nytro 10XN som hindrer partielle utladninger i området rundt elektrodene og sørger for at utladningene skjer i prøveobjektet. Testcellen gjør det mulig å spenningsette prøveobjektene over lang tid og ved høye temperaturer.





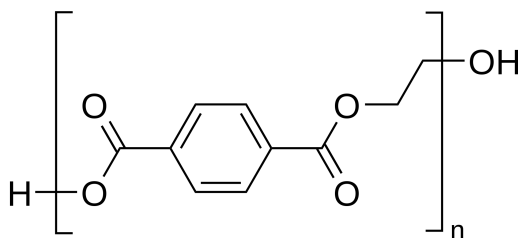
Figur 14: Oljeholdig testcelle med temperaturregulerbar spole

### 3.4 Prøveobjekter

Det er gjort eksperimentelle forsøk på to ulike typer isolasjonsmaterialer, polyetylentereftalat og polypropylen. Begge kjennetegnes for gode dielektriske egenskaper, høyt smeltepunkt og er velegnet som kabelisolasjon for HVDC.

#### 3.4.1 PET-film

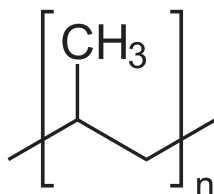
Polyetylentereftalat er et biaksialt orientert termoplastisk produkt og er et lett gjenvinnbart materiale. PET er kjent som et sterkt og stivt materiale og har gode elektriske egenskaper, også i høy fuktighet og temperatur. I denne oppgaven har det blitt brukt PET-film av type Hostaphan RN50-350 fra Mitsubishi Polyester Film GmbH med tykkelser på 0,1 mm og 0.125 mm. Materialstrukturen til PET er vist i Figur 15.



Figur 15: Materialstruktur PET

### 3.4.2 PP-film

Polypropylen er også et termoplastisk produkt, og har lignende egenskaper som PE. Det er stivere, men tåler høyere temperatur og spenning, i tillegg til gode elektriske egenskaper. PP er 100% resirkulerbart og har en betydelig lavere produksjonskostnad enn f.eks XLPE. Dette gjør PP til et ettertraktet isolasjonsmateriale for fremtiden. I denne oppgaven brukes det hyllekjøpt PP-film med tykkelse 0,08 mm. Materialstrukturen til PP er vist i Figur 16.



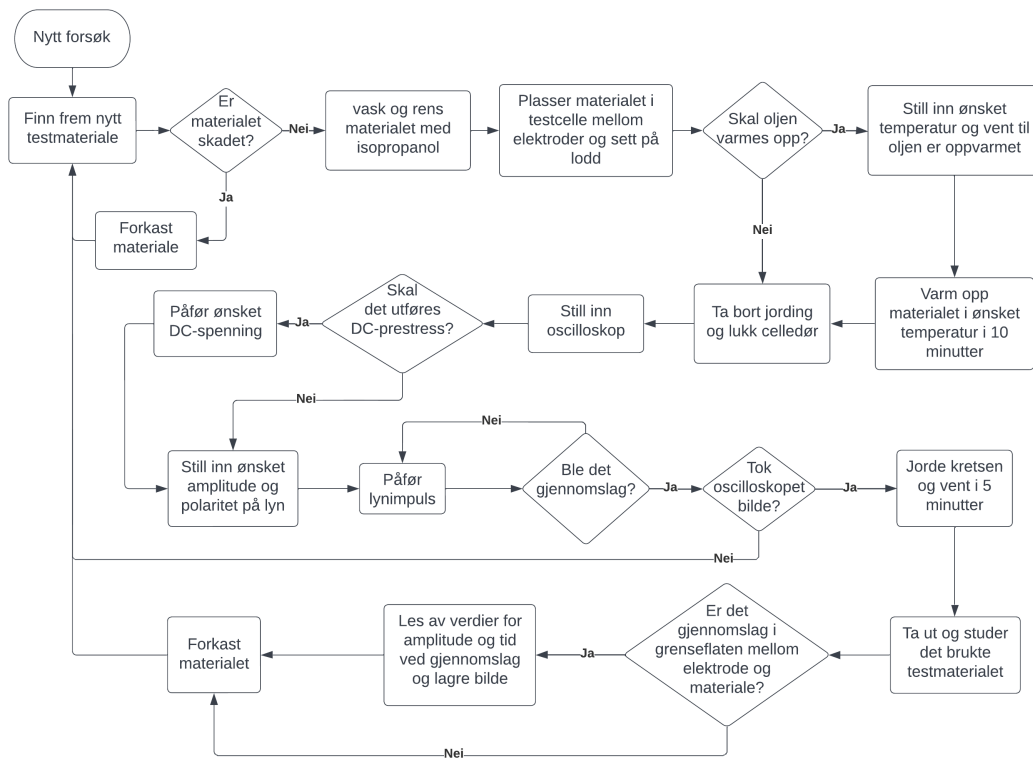
Figur 16: Materialstruktur PP

### 3.5 Testprosedyre

Her beskrives prosedyren for utførelse av det eksperimentelle testene. Siden det er blitt gjort et stort antall tester er det et stort behov for en enkel, systematisk og godt beskrevet prosedyre.

Før hver test blir hvert isolasjonsmateriale vasket og renset med isopropanol. Hvert testobjekt blir nøye studert før hver test for å avdekke feil eller skader, isåfall blir objektet sortert bort. Testmaterialet blir så senket ned i den oljefylte testcellen og nøye plassert mellom elektrodene før mekaniske lodd plasseres på toppen. Testmaterialet blir varmet opp i 10 minutter i gjeldende temperatur før spenning påføres, avhengig av hvilken temperatur testen skal utføres i. I denne perioden er det viktig å påse at styringsenheten for varmekolben opprettholder så jevn temperatur som mulig i oljen, slik at forsøkene blir mest mulig sammenlignbare.

Når isolasjonsmaterialet er oppvarmet fjernes jordingsstav og døren til høyspenningscellen lukkes. Oscilloskopet stilles inn og klargjøres til bildetaking. Ved tester med prestress DC stilles HVDC-kilde inn til ønsket spenning før den påføres over testcellen. Impulsgenerator klargjøres til ønsket amplitude og polaritet. Etter endt DC-prestress tid påføres lynimpulsen over testcellen slik at lynet overlages på DC-spenningen og fører til gjennomslag i isolasjonsmaterialet. Verdier for spenningsamplitude og tid ved gjennomslag leses av på oscilloskopet før bildet lagres og dokumenteres. Deretter jordes kretsen. Etter fem minutter fjernes det brukte materialet og det kontrolleres at gjennomslaget har skjedd i grenseflaten mellom elektroder og materialet. Nytt isolasjonsmateriale kan klargjøres til test. Testprosedyren er også beskrevet i Figur 17 og Vedlegg C.



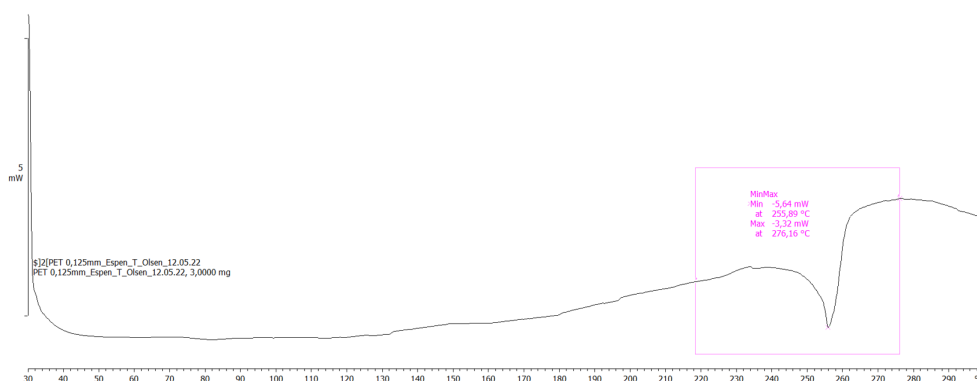
Figur 17: Flytskjema - Testprosedyre for målinger av holdfasthet ved DC og lynimpuls

## 4 Resultat og diskusjon

Dette kapitlet presenterer de målte resultatene som består av DSC-analyser og holdfasthetsmålinger av de to ulike isolasjonsmaterialene ved ulike temperaturer ved kombinasjoner av lynimpuls overlagret på DC-prestress. Resultatene blir også grundig diskutert opp imot teori i hvert underkapittel.

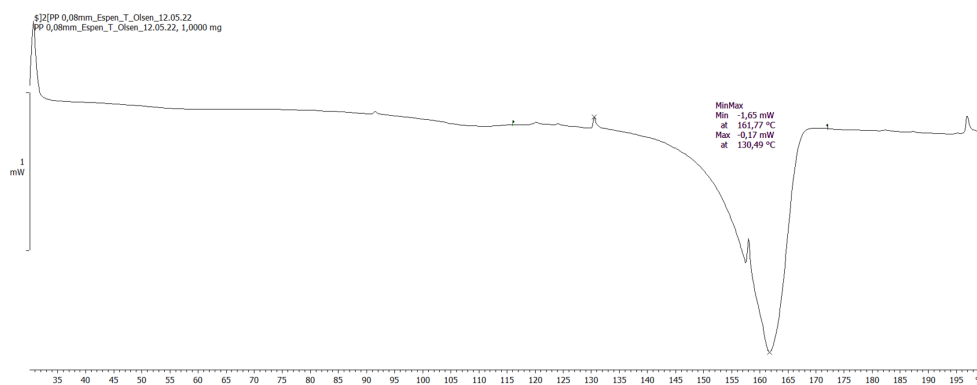
### 4.1 Kapasitansmåling og DSC-analyse

Kapasitansen til 0.10 mm PET-film ble målt til 0,17 nF. DSC-analyse viste et smeltepunkt på 276 grader, som vist i Figur 18.



Figur 18: Resultat fra DSC-analyse av PET-film

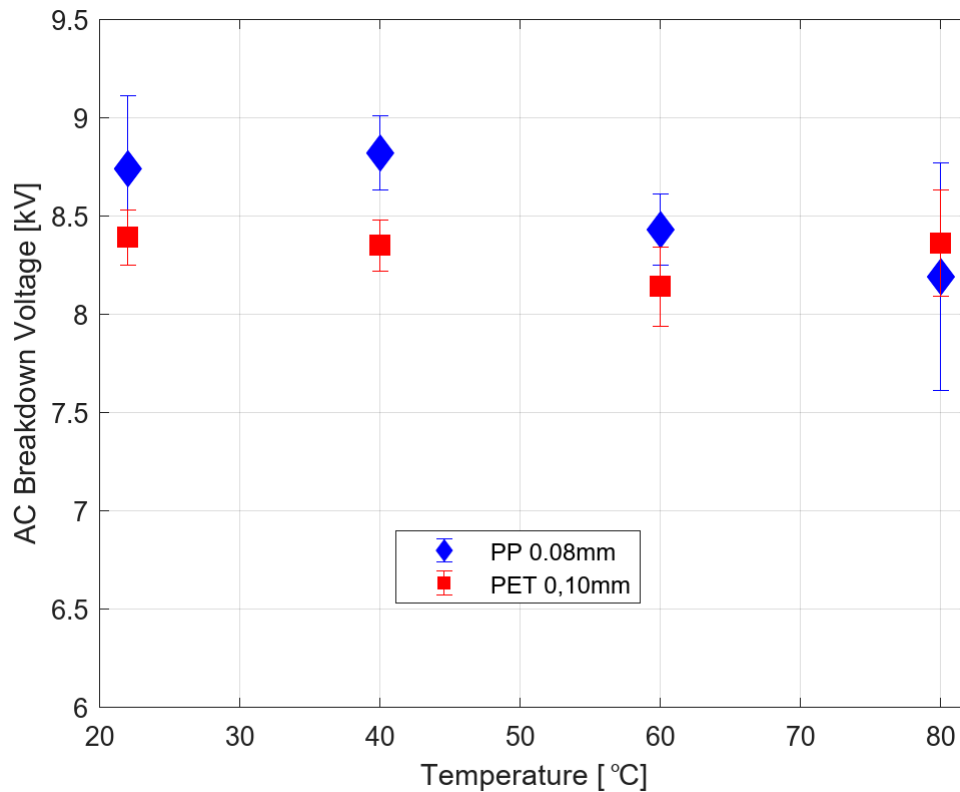
Kapasitansen til 0.08 mm PP-film ble målt til 0,16 nF. DSC-analyse viser et smeltepunkt ved 161 grader, som vist i Figur 19.



Figur 19: Resultat fra DSC-analyse av PP-film

## 4.2 Holdfasthet ved AC 50 Hz

Resultater fra AC holdfasthetsmålinger for PP- og PET-film er presentert i Figur 20. De viser at for temperaturer under 60°C er den gjennomsnittlige holdfastheten til PP omtrent 25% høyere enn for PET. AC holdfastheten til PET er derimot mindre temperaturavhengig enn PP, noe DSC-analysen viste med smeltepunkt på 161°C for PP og 276°C for PET. Det er stor spredning i resultatene for PP ved 80°C, som kan forklares av temperaturavhengigheten.



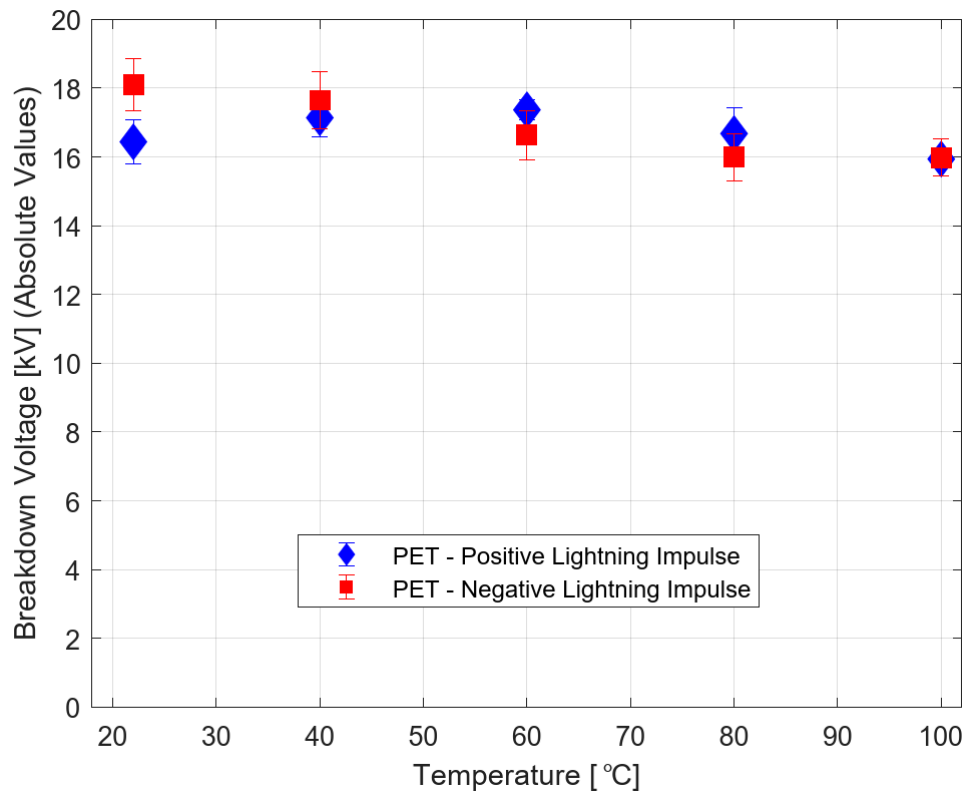
**Figur 20:** AC holdfasthet i PP og PET-film ved temperaturer fra 22 til 80 °C. Alle målinger er RMS-verdier.

At PET og PP-film har betydelig lavere holdfasthet ved AC sammenlignet med DC, kan forklares med dielektriske tap som inntreffer i isolasjonsmaterialet som påvirkes av AC-spenning, og at romladninger oppfører seg annerledes ved AC-spenning sammenlignet med DC-spenning [38]. Dielektriske tap ved AC-spenning fører til betydelig varmedannelse i isolasjonsmaterialet. Varmen påvirker den dielektriske ytelsen til materialet og fører til havari ved lavere spenningsnivå [39]. Når isolasjonsmaterialer utsettes for AC- og DC-spenning vil strukturen og dannelsen av romladninger være ulik. Ved AC-spenning dannes romladninger rundt elektrodene og har en heterogen struktur. Ved DC-spenning har romladningene en homogen struktur og akkumuleringspunktene til ladningen er i midten av isolasjonsmaterialet. Dannelse av heteroladninger nær elektrodene fører til en drastisk feltforvrenging ved elektrodene, i motsetning til ved DC-spenning. Dette forklarer hvorfor holdfastheten er betydelig lavere ved AC, sammenlignet med DC-spenning.

### 4.3 Holdfasthet ved lynimpuls uten DC-prestress

#### 4.3.1 Resultater fra forsøk på PET-film

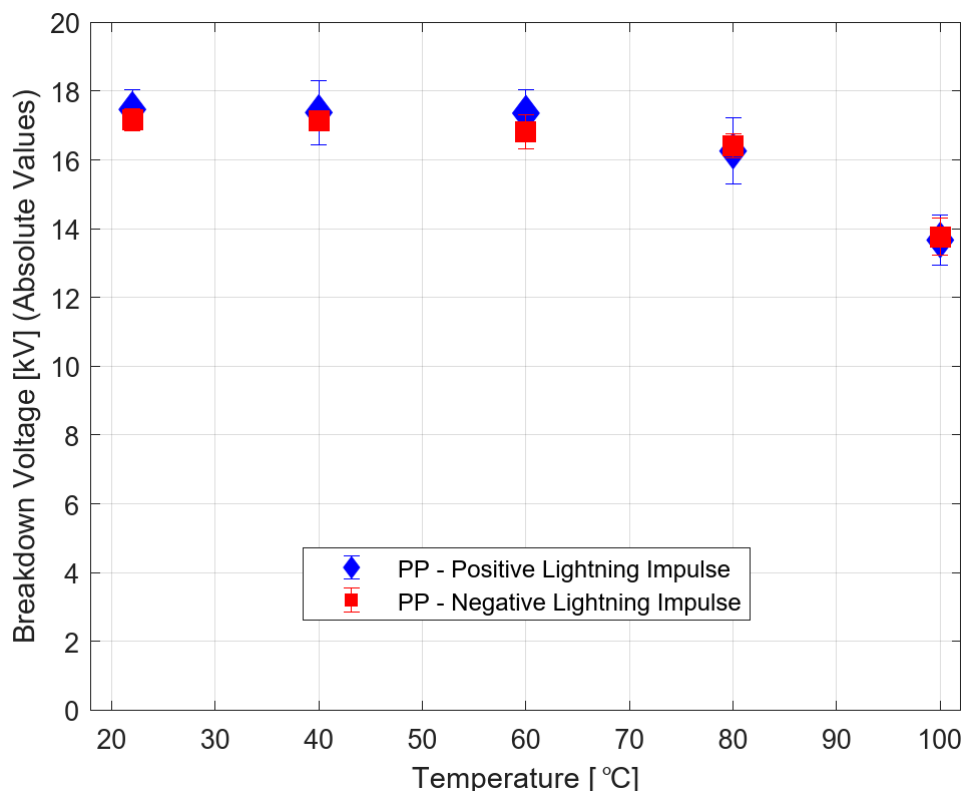
Resultater fra holdfasthetsmålinger ved lynimpuls uten DC-prestress for PET-film er presentert i Figur 21. En observerer en noe uventet polaritetseffekt, spesielt i målinger ved romtemperatur, som kan være skapt av dannelse av romladninger under lagringen av testobjektene. I ettertid har det blitt utført supplerende forsøk der testobjektene ble jordnet i 7 dager før holdfasthetsmåling ved lynimpuls. Resultatene viste holdfasthetsverdier på 17.7 kV for både positive og negative lynimpulser. Det observeres en liten reduksjon i holdfasthet ved økende temperatur i PET-film. Det er liten variasjon i måleresultatene ved både positive og negative lynimpulser.



**Figur 21:** Sammenligning av holdfasthet i 0,10mm PET-film ved påført lynimpuls med både positiv og negativ polaritet. Målinger utført ved temperaturer fra 22 til 100 °C. DC = 0 kV

### 4.3.2 Resultater fra forsøk på PP-film

Resultater fra holdfasthetsmålinger ved lynimpuls uten DC-prestress for PP-film er presentert i Figur 22. Her observeres ikke polaritetseffekten, men en ser en tydelig temperaturavhengighet. Holdfasthetsmåling ved lynimpuls ved 100°C viser en reduksjon på over 20% sammenlignet med verdier ved lavere temperaturer. Det er liten variasjon i måleresultatene ved både positive og negative lynimpulser.



Figur 22: Sammenligning av holdfasthet i 0,08mm PP-film ved påført lynimpuls med både positiv og negativ polaritet. Målinger utført ved temperaturer fra 22 til 100 °C. DC = 0 kV

### 4.3.3 Diskusjon av resultater

Impulsholdfastheten til PET er tilnærmet identisk for målinger med positiv og negativ lynimpuls ved alle temperaturer, bortsett fra ved romtemperatur. Dette kan som nevnt tidligere forklares med at det dannes romladninger under lagring av materialene før test. Det ble observert en liten reduksjon i holdfastheten når temperaturen økte, dette betyr at PET-film er lite temperaturavhengig, noe en også så i DSC-analysen som viste et smeltepunkt ved 276°C.

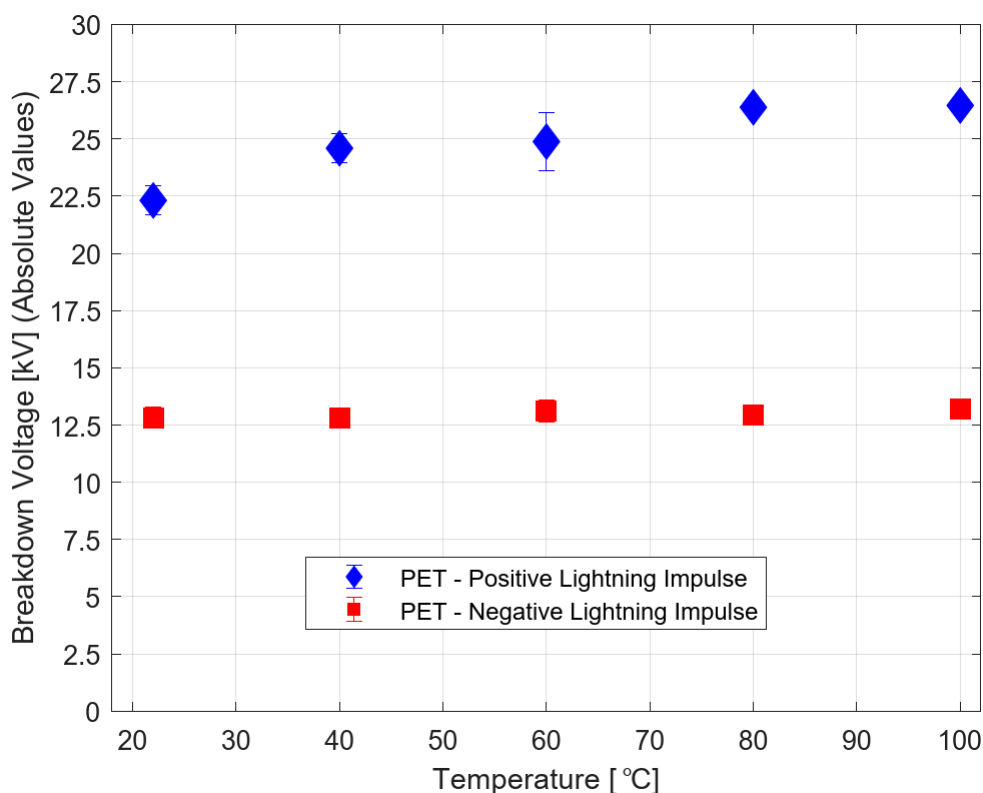
Impulsholdfastheten til PP er identisk for målinger med positiv og negativ lynimpuls ved alle temperaturer. Det ble observert en reduksjon i holdfastheten på 20% ved 100°C. Dette betyr at PP-film er temperaturavhengig, som også ble bevist i DSC-analysen som gav et smeltepunkt ved 161°C.

## 4.4 Holdfasthet ved overlagret lynimpuls på 8 kV DC-prestress

Resultatene i dette delkapittelet viser tydelig at holdfastheten øker med DC-prestress av samme polaritet som overlagret lynimpuls, og reduseres når DC-prestress har motsatt polaritet. Dette kan en se på alle målte verdier for PP og PET ved alle temperaturer.

### 4.4.1 Resultater fra forsøk på PET-film

Den målte effekten av DC-prestress på impulsholdfastheten er presentert i Figur 23. Resultatene viser ingen negative tegn på temperaturavhengighet. Det kan derimot observeres en gradvis økning i impulsholdfasthet med DC-prestress av samme polaritet ved økende temperatur i PET-film. Holdfastheten øker med nesten 20% sammenlignet med romtemperatur. Ved å sammenligne resultatene i Figur 23 med resultatene fra impulsholdfasthet i Figur 21 kan en se at holdfastheten øker med 40% ved temperaturer mellom 22-60°C og 60% ved temperaturer mellom 80-100°C, ved lynimpuls med samme polaritet som DC-prestress. Ved lynimpulser med motsatt polaritet synker holdfastheten i PET-film med 20-30% sammenlignet med impulsholdfasthet.



**Figur 23:** Holdfasthet i 0,10mm PET-film med overlagret lynimpuls på 8 kV DC-prestress spenning. Målinger utført ved temperaturer fra 22-100°C.



#### 4.4.2 Diskusjon av resultater fra forsøk på PET-film

Økende holdfasthet ved lynimpuls av samme polaritet som DC-prestress gir en god indikasjon på at impulsholdfastheten påvirkes positivt av homoladninger som dannes under DC-prestress. Ved polaritetendring vil lynimpulser med motsatt polaritet som DC-prestress virke som heteroladning og bidrar til å øke det elektriske feltet i isolasjonen. Dette gir lavere impulsholdfasthet. Ved DC-prestress vil romladningene få en homogen struktur og akkumuleringspunktene til ladningen vil være i midten av PET-filmen. Dette fører til en økning i holdfastheten ved lynimpuls overlappet på DC-prestress, sammenlignet med lynimpuls. Resultatene i denne oppgaven er sammenlignbare med resultatene fra [15, 29, 30].

Akin et al. [38] gjorde i sin forskning holdfasthetsmålinger i 0.3mm tykke PET-filmer ved AC og DC ved romtemperatur og fikk like resultater som er presentert i denne oppgaven. Den observerte økende holdfastheten ved økende temperatur for målinger med lynimpuls overlappet på DC-spenning med lik polaritet kan forklares med at det akkumuleres mer romladning i PET-film ved økende temperatur, ved homoladning. Denne økte akkumuleringen av romladninger reduserer det elektriske stresset ytterligere og fører derfor til en økning i holdfasthet ved høyere temperaturer.

En sammenligning av holdfasthet i PET-film ved lynimpuls( $U_{b0}$ ) med en kombinasjon av lynimpuls og DC-spenning( $U_b$ ) er vist i Tabell 1. Total mengde tilsynelatende injisert romladning,  $\Delta Q$  er regnet ut vha. ligning 7 og 8. En burde antatt at spenningsdifferansen,  $\Delta U$  var lik som DC-prestress, men en kan tydelig se at det ikke er tilfellet. Vi ser en økende  $\Delta U$  ved økende temperatur for målinger med positiv lynimpuls. I temperaturområdet 22-60°C er det en spenningsdifferanse mellom 6-7 kV. Ved 80 og 100°C øker spenningsdifferansen betraktelig, til 9.7 og 10.6 kV. Ved negativ lynimpuls ser vi en gradvis synkende  $\Delta U$  når temperaturen øker, spesielt i temperaturområdet 60-100°C. Dette kan indikere en asymmetrisk distribusjon av den injiserte ladningen eller en hurtigere og økt ladning/utladning under den overlappede impulsspenningen.

| Temp [°C] | Medvirkende felt (PET+) |                       | Motvirkende felt (PET-) |                       |
|-----------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
|           | $\Delta U$ [kV]         | $\Delta Q$ [ $\mu$ C] | $\Delta U$ [kV]         | $\Delta Q$ [ $\mu$ C] |
| 22        | 5.9                     | 1.003                 | 5.3                     | 0.901                 |
| 40        | 6.5                     | 1.105                 | 4.9                     | 0.833                 |
| 60        | 6.9                     | 1.173                 | 3.5                     | 0.595                 |
| 80        | 9.7                     | 1.649                 | 3.1                     | 0.527                 |
| 100       | 10.6                    | 1.802                 | 2.8                     | 0.476                 |

**Tabell 1:** Differanse mellom holdfasthet ved lynimpuls og lynimpuls overlappet på 8 kV DC-spenning i 60 s for PET-film 0.1mm ved ulike temperaturer. Verdiene for akkumulert homo-ladning ved elektrodene er utregnet i henhold til Formel 7 og 8.  $C_{PET} = 0.17$  nF

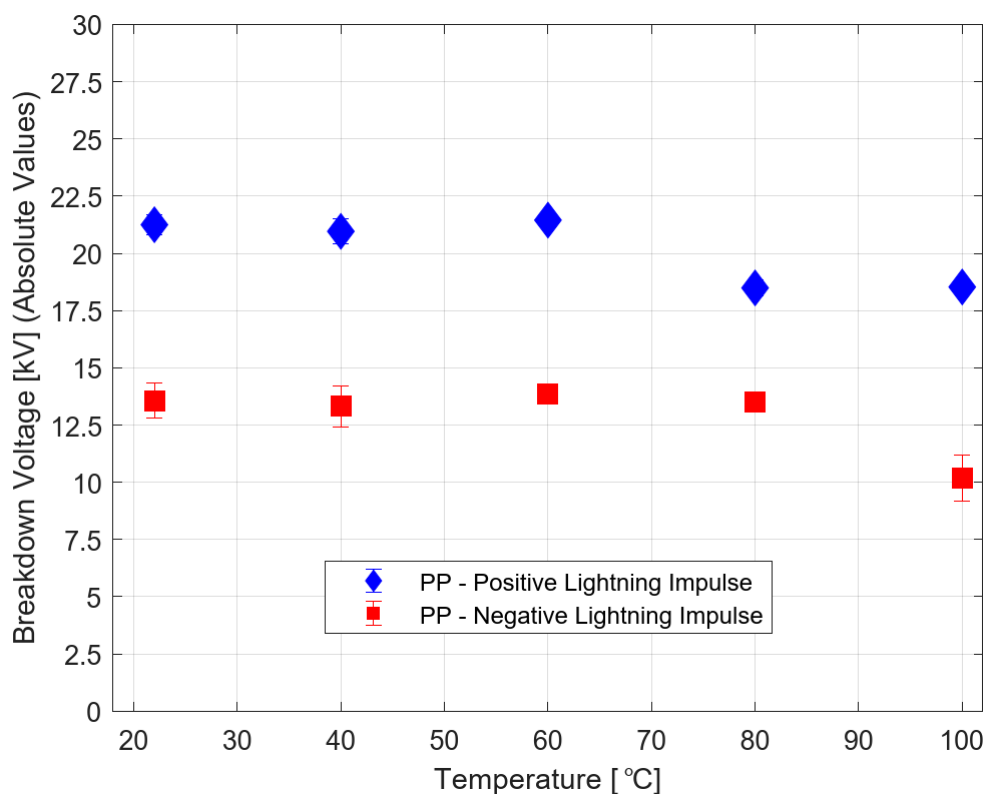
Økningen i  $\Delta Q$  ved økende temperatur for målinger med positiv lynimpuls tyder på en økende akkumulert romladning i PET-film ved økende temperatur ved homoladning. Ishizaki et al. [10] observerte at mengden av negativ ladning i PET-film økte med økende temperatur. Dette kan forklare den økende holdfastheten ved økende temperatur. Ved negativ lynimpuls ser vi en gradvis synkende  $\Delta Q$ . Resultatene til Ishizaki [10] viste at positive ladninger erstattet de akkumulerte negative ladningen i PET-film ved polaritetendring ved høy temperatur. Dette kan være bevis på synkende akkumulert romladning i PET ved økende temperatur ved heterolad-

ning, men ble ikke observert i resultatene presentert i denne oppgaven. De viste tilnærmet lik akkumulering av romladninger ved alle temperaturer ved heteroladning, ved å sammenligne holdfasthetsverdier ved negativ lynimpuls.

Effekten av akkumulert homo-ladning under DC-prestress er å betydelig redusere det elektriske stresset ved elektrodene. Ved å anta at romladningen befinner seg i grenseflaten nær elektrodene, vil det resulterende elektriske feltet ved elektroden reduseres fra 80 til 22 kV/mm i PET-film ved romtemperatur og DC-prestress på 8 kV i 60 s.

#### 4.4.3 Resultater fra forsøk på PP-film

Den målte effekten av DC-prestress på impulsholdfastheten er vist i Figur 24. Temperaturavhengigheten til PP kommer tydelig frem i resultatene. For målinger med lynimpuls med samme polaritet som DC-prestress synker holdfastheten med 13% ved temperaturer over 60°C. For målinger med lynimpuls med motsatt polaritet som DC-prestress synker holdfastheten med 28% når temperaturen øker fra 80°C. Det er veldig liten variasjon i måleresultatene, som tyder på stabile målinger. Ved å sammenligne resultatene i Figur 24 med resultatene fra impulsholdfasthet i Figur 22 observeres det at holdfastheten øker med 20% ved alle temperaturer ved lynimpulser med lik polaritet som DC-prestress. Når en sammenligner resultatene fra lynimpulser med motsatt polaritet synker holdfastheten i PP-film med 20% sammenlignet med resultater fra impulsholdfasthet.



**Figur 24:** Holdfasthet i 0,08mm PP-film med overlagret lynimpuls på 8 kV DC-prestress spenning. Målinger utført ved temperaturer fra 22-100°C.

#### 4.4.4 Diskusjon av resultater fra forsøk på PP-film

Økende holdfasthet ved lynimpuls av samme polaritet som DC-prestress viser at impulsholdfastheten påvirkes positivt av homoladninger som dannes under DC-prestress. Ved polaritetendring vil lynimpulser med motsatt polaritet som DC-prestress virke som heteroladning og bidrar til å øke det elektriske feltet i isolasjonen. Dette gir lavere impulsholdfasthet. Ved DC-prestress vil romladningene få en homogen struktur og akkumuleringspunktene til ladningen vil være i midten av PP-filmen. Dette fører til en økning i holdfastheten ved lynimpuls overlagret på DC-prestress, sammenlignet med lynimpuls. Resultatene fra PP-film er sammenlignbare med resultatene fra [15, 29, 30].

Kannus et al. [40] studerte holdfasthet i 0.2mm PP-film ved DC-spenning og lynimpuls i romtemperatur. Resultatene viste at lynimpuls overlagret på DC-prestress gir en høyere holdfasthet sammenlignet med impulsholdfastheten til PP-film. Resultatene i denne oppgaven var noe høyere sammenlignet med Kannus, men det kan forklares i ulike materialegenskaper i de to PP-filmene.

Tabell 2 viser sammenligningen av holdfasthet for PP-film ved lynimpuls( $U_{b0}$ ) med en kombinasjon av lynimpuls og DC-spenning( $U_b$ ). Den totale mengde tilsynelatende injisert romladning er regnet ut vha. ligning 7 og 8. Sammenlignet med resultater fra PET-film observeres det ingen jevn økende eller synkende endring i  $\Delta U$ . For målinger med positiv lynimpuls er det stor variasjon i  $\Delta U$ , spesielt mellom 60 og 100 grader. Dette betyr at temperaturen har større påvirkning på PP-film enn PET-film. Målinger med negativ lynimpuls viser liten påvirkning av temperatur på  $\Delta U$ .

| Temp [°C] | Medvirkende felt (PP+) |                        | Motvirkende felt (PP-) |                        |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|           | $\Delta U$ [kV]        | $\Delta Q$ [ $\mu C$ ] | $\Delta U$ [kV]        | $\Delta Q$ [ $\mu C$ ] |
| 22        | 3.8                    | 0.608                  | 3.1                    | 0.496                  |
| 40        | 3.6                    | 0.576                  | 3.8                    | 0.608                  |
| 60        | 4.8                    | 0.768                  | 3                      | 0.480                  |
| 80        | 2.2                    | 0.352                  | 2.9                    | 0.464                  |
| 100       | 4.8                    | 0.768                  | 3.6                    | 0.576                  |

**Tabell 2:** Differanse mellom holdfasthet ved lynimpuls og lynimpuls overlagret på DC-spenning for PP-film 0.08mm ved ulike temperaturer. Verdiene for akkumulert homo-ladning ved elektrodene er utregnet i henhold til Formel 7 og 8.  $C_{PP} = 0.16$  nF

Målinger med positiv lynimpuls viser stor variasjon i  $\Delta U$  mellom 60-100 grader, som viser hvor temperaturavhengig PP-film er. Du et al. [22] observerte i sine eksperiment høyere injeksjon av homo-ladning fra elektrodene ved økende temperatur. Målinger av DC-holdfasthet viste en synkende holdfasthet ved økende temperatur. Det ble også observert dannelse av negative ladninger i PP-filmen, nær katode. Resultatene deres viste at feltdistribusjonen ble forvrengt ved økende temperatur, noe som kan forklare hvorfor holdfastheten sank betydelig for alle målinger over 60 °C. For målinger med negativ lynimpuls er det nesten ingen endring i  $\Delta U$ . Det kan tolkes som at akkumulert romladning i PP ikke endres ved økende temperatur ved heteroladning. Dette støttes også av resultatene fra temperaturer mellom 22-80°C, men ikke av resultatene fra 100°C.

---

Effekten av akkumulert homo-ladning under DC-prestress er å betydelige redusere det elektriske stresset ved elektrodene. Ved å anta at romladningen befinner seg i grenseflaten nær elektrodene, vil det resulterende elektriske feltet ved elektroden reduseres fra 100 til 48 kV/mm i PP-film ved romtemperatur og DC-prestress på 8 kV i 60 s.

Romladningsoppførsel i polymerisolasjon er en kompleks prosess, spesielt når temperatur er involvert [11]. Under denne prosessen har feller sterk innflytelse på energibåndet til molekylet [41]. Når ladebærerne overføres fra en elektrode til en annen, kan bærerne være fanget av feller og vil redusere homo-ladningsinjeksjon og dermed begrense lademobiliteten. Ved lave temperaturer vil injiserte ladninger fanges ved grunne feller på grunn av deres relativt lave energi og romladningsformasjonen vil ligge i nærheten av elektrodene [42]. Ved høye temperaturer vil den akselererte lademobilitet gjøre det vanskeligere for feller å fange ladningene fordi de fangede ladningene er termisk magnetiserte.

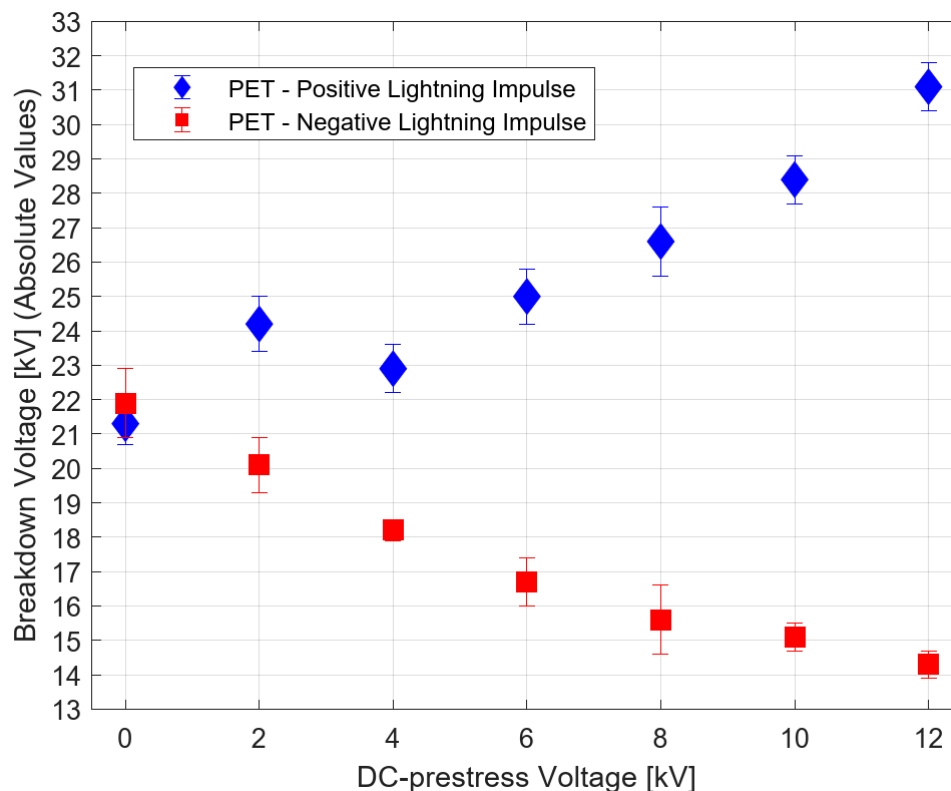
## 4.5 Holdfasthet ved overlagret lynimpuls på ulike verdier av DC-prestress

For å studere effekten av hvilken påvirkning spenningsnivået til DC-prestress har på holdfastheten ble det også utført målinger med ulike DC-spenninger. Verdier på DC-prestress varierte fra 2 til 12 kV og ble sammenlignet med referansemålinger uten DC-prestress. Alle målinger ble utført i romtemperatur og det ble gjort målinger på både PP- og PET-film.

### 4.5.1 Resultater fra forsøk på PET-film

Resultater fra målinger på PET-film er presentert i Figur 25. For målinger utført med positiv lynimpuls og DC-prestress på 2 kV viser resultatene betydelig økning sammenlignet med referansemålingen uten DC-prestress. Det observeres en økning på +3 kV i holdfastheten. For målinger med DC-prestress mellom 4-10 kV ser vi en jevn gradvis økning med +2 kV mellom hver måling. Med DC-prestress på 12 kV økte holdfastheten med +3 kV, sammenlignet med DC-prestress på 10 kV.

For målinger utført med negativ lynimpuls observeres det en synkende holdfasthet ved DC-prestress fra 2-6 kV på -2 kV per måling før holdfastheten begynner å flate ut ved økende DC-prestress. I målinger med DC-prestress fra 6-12 kV synker holdfastheten med kun -1 kV. En kan observere at effekten av DC-prestress når et metningspunkt ved de høyeste temperaturene.



Figur 25: Holdfasthet i 0,125mm PET-film med overlagret lynimpuls på varierende DC-prestress spenning.

---

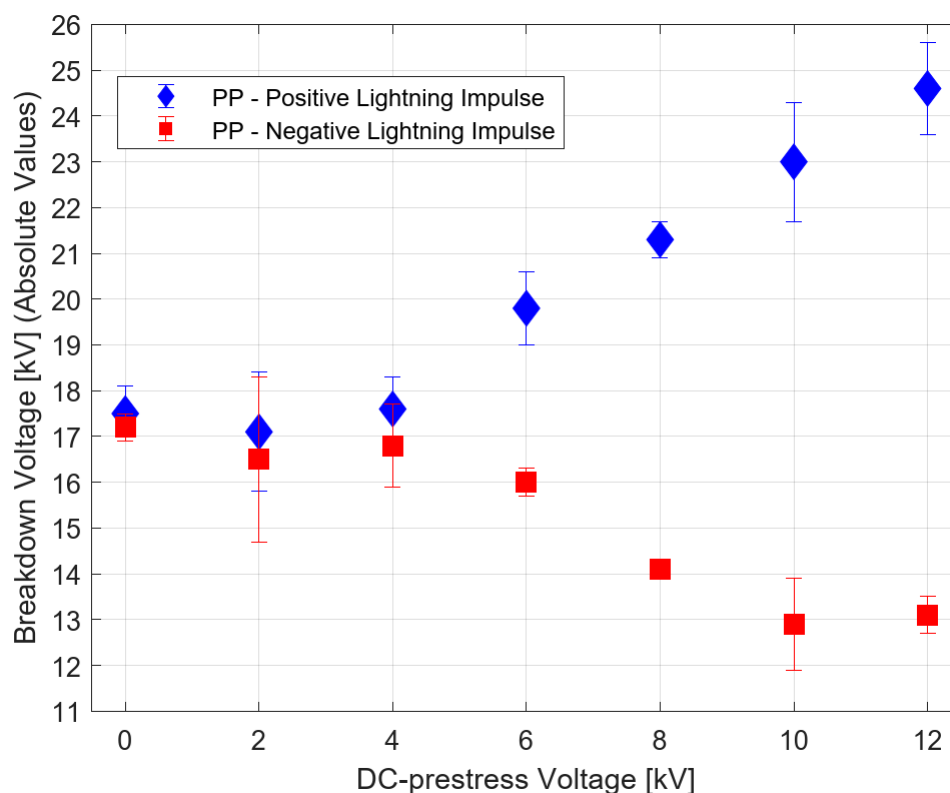
#### 4.5.2 Diskusjon av resultater fra forsøk på PET-film

Resultatene fra PET-film viser at styrken på DC-prestress har en gradvis innvirkning på holdfastheten. Dette beviser dannelse av romladning som lineært øker med nivået til DC-prestress. Det er spesielt interessant at holdfastheten økte ved DC-prestress på 2 kV, men var betydelig lavere ved 4 kV, for målinger utført med lynimpuls av samme polaritet som DC-prestress. Det er vanskelig å forklare hvorfor dette fenomenet inntreffer. Siden resultatet ved 2 kV DC-prestress skilte seg sånn ut, ble det gjort ti nye målinger for å prøve å luke ut eventuelle målefeil. De nye målingene viste ingen endring i holdfastheten og var identiske med resultatene som vises i Figur 25. Dersom det antas at det dannes en større andel homoladninger i PET-film ved DC-prestress på 2 kV med lik polaritet som lynimpuls kan dette forklare det unike fenomenet. Det finnes ingen litteratur på effekten av varierende DC-prestress på PET-film, så det har vært vanskelig å sammenligne resultatene. Det etterlyses mer forskning på dette feltet i fremtiden og anbefales å studere dette fenomenet nærmere.

#### 4.5.3 Resultater fra forsøk på PP-film

Resultater fra holdfasthetsmålinger for PP-film er presentert i Figur 26. For målinger utført med positiv lynimpuls og DC-prestress på 2-4 kV observeres det ingen effekt av forspent DC-spenning. Holdfastheten er tilsvarende referansemålingen utført uten DC-prestress. Målinger utført med DC-prestress mellom 6-12 kV viser en jevn økende holdfasthet med omtrent 1.5 kV mellom hver måling.

For målinger utført med negativ lynimpuls observeres det liten effekt av den forspente DC-spenningen i målinger mellom 2-4 kV. Verdiene er tilsvarende referansemålingen utført uten DC-prestress. Ved DC-prestress på 6 kV synker holdfastheten med 1 kV. For målinger utført med DC-prestress fra 8-12 kV kommer det en betydelig endring. Holdfastheten synker med 3-4 kV sammenlignet med referansemålingen.



Figur 26: Holdfasthet i 0,08mm PP-film med overlagret lynimpuls på varierende DC-prestress spenning.

#### 4.5.4 Diskusjon av resultater fra forsøk på PP-film

Resultatene fra PP-film viser at styrken på DC-prestress først har innvirkning på holdfastheten når størrelsen på DC-prestress er 6 kV eller høyere, både for DC-prestress med lik og motsatt polaritet. Dette beviser at PP tåler DC-prestress bedre og at det akkumuleres mindre romladning i PP-film ved DC-prestress under 4 kV. Mori et al. [32] viste i sin forskning at ulike DC spenningsnivå hadde påvirkning på holdfastheten i PPX-film, og er forsøkt sammenlignet med resultatene presentert i denne oppgaven. Resultatene deres viste lavere holdfasthet ved DC-prestress sammenlignet med impulsholdfasthet, og stemmer med resultatene gjort i denne oppgaven, men kun ved DC-prestress på 2 og 4 kV. Det antas at romladningene akkumuleres nærmere elektrodene ved lavere DC-prestress verdier, og at dette fører til feltforsterkning i området nær elektrodene. Dette fører da til lavere holdfasthet ved lave DC-prestress verdier.

---

## 5 Konklusjon og videre arbeid

Dette kapittelet inneholder de viktigste konklusjonene av resultater og diskusjoner og besvarer forskningsspørsmålet som ble spesifisert i introduksjonen. I tillegg presenterer det forslag til fremtidige forsøk innen samme tema.

### 5.1 Konklusjon

Denne masteroppgaven har undersøkt hvordan impulsholdfastheten i polymerfolier påvirkes av HVDC-spenning og hvilken innvirkning temperatur, polaritet og størrelse på HVDC-spenningen har. Dette er av spesiell interesse for å kunne utvikle mer relevante testprosedyrer for polymerisolerte HVDC-kabler.

De viktigste konklusjonene er:

- PET og PP har betydelig lavere holdfasthet ved AC sammenlignet med lynimpuls. Det kan forklares med dielektriske tap i materialene som påvirkes av AC-spenning og fører til varmedannelse som påvirker isolasjonsytelsen og fører til tidligere havari. PP viste seg å være mer temperaturavhengig enn PET, noe også smeltepunktanalysen beviste.
- Impulsholdfastheten til PET-film var lite påvirket av temperatur. Impulsholdfastheten til PP-film viste seg å være temperaturavhengig ved temperaturer over 70 °C. Det ble observert en reduksjon i impulsholdfasthet på 20 % ved 100 °C sammenlignet med romtemperatur.
- Holdfastheten økte når det ble påført DC-prestress med lik polaritet som lynimpuls. Økningen var 40-60% i PET-film og 20% i PP-film sammenlignet med impulsholdfasthet. Økningen i holdfasthet skyldes homoladninger som akkumuleres under DC-prestress. I PET-film økte den akkumulerte ladningen ved høyere temperaturer.
- Ved lynimpulser med motsatt polaritet som DC-prestress sank holdfastheten i begge materialer med 20-30 % sammenlignet med impulsholdfasthet. Svekkelsen i holdfasthet skyldes heteroladninger som øker feltpåkjenningen i polymerfilmene nær elektrodene og fører til tidligere havari.
- Spenningsnivået til DC-prestress har en effekt på holdfastheten. I PET-film økte holdfastheten lineært ved DC-prestress fra 2-12 kV. Spesielt interessant var det at holdfastheten økte betydelig ved DC-prestress på 2 kV med lik polaritet som lynimpuls. I PP-film ble det ikke observert en effekt av DC-prestress ved spenninger under 4 kV. Det kan bety at romladninger ikke akkumuleres ved lave DC-spenninger i polypropylen.

Hvordan et gjennomslag inntreffer i et materiale er en komplisert prosess og påvirkes av faktorer som spenningstype, -størrelse og -hastighet, alderen på materialet, geometrien til elektrodene, romtemperatur, -trykk og -fuktighet. Det er derfor viktig at en ved måling av holdfasthet tar hensyn til de nevnte faktorene og at målinger utføres med forsiktighet.

Akkumulering av romladninger i polymer ved DC-prestress og påvirkningen av lynimpulser med motsatt polaritet påvirker ytelsen til kabelisolasjonen. Dette bør det tas hensyn til ved fremtidig utførelse av typetester som er beskrevet i CIGRE TB-496 for å kunne bevise at kablene har tilfredsstillende ytelsesegenskaper for sine tilsktede bruksområder.



---

## 5.2 Videre arbeid

Dette er forslag fremtidige forsøk innen samme tema:

- Utarbeide en testkrets basert på PEA-metoden til å måle romladningsdistribusjon i PP- og PET-film ved ulike temperaturer og spenningsnivå. Ved å sammenligne resultatene i denne oppgaven med den faktiske romladningsdistribusjonen i filmene vil en få et klarere bilde på hvor mye romladning som akkumuleres og hvordan de fordeler seg i isolasjonsmaterialet.
- Utføre feltmåling og utladningstid i PP og PET ved ulike temperaturer og spenningsnivå. Slike målinger kan gi nøyaktige svar på hvor lang tid det tar for den akkumulerte romladningen å lades ut av materialene.
- Studere effekten av DC-prestress med varighet mellom 1 og 60 sekunder har på PP og PET. Som resultatene fra prosjektoppgaven viste, spilte ikke varigheten på DC-prestress inn på holdfastheten når varigheten var mellom 1 og 120 minutter. Det vil derfor være av interesse å studere holdfastheten ved kortere varighet på DC-prestress. Dette vil kunne si noe om hvor lang raskt romladningene akkumuleres i polymer-filmene.

---

## Referanser

- [1] Joseph Song-Manguelle, Maja Harfman Todorovic, Song Chi, Satish K. Gunturi, and Rajib Datta. Power transfer capability of hvac cables for subsea transmission and distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(4):2382–2391, 2014.
- [2] Giuseppe Lagrotteria, Davide Pietribiasi, and Marco Marelli. HvdC cables - the technology boost. In *2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC)*, pages 1–5, 2019.
- [3] Giovanni Mazzanti. Issues and challenges for hvdc extruded cable systems. *Energies*, 2021.
- [4] Chenyuan Teng, Ling Zhang, Yuanxiang Zhou, Zekai Lu, and Yanchao Sha. Comparison of space charge evolution between polypropylene and cross-linked polyethylene under polarity reversal voltage. In *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, pages 94–97, 2018.
- [5] Sarath Kumara, Thomas Hammarström, and Yuriy V. Serdyuk. Polarity effect on electric tree inception in hvdc cable insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(5):1819–1827, 2021.
- [6] Mattewos Tefferi, Zongze Li, Hiroaki Uehara, Qin Chen, and Yang Cao. Characterization of space charge and dc field distribution in xlpe and epr during voltage polarity reversal with thermal gradient. In *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, pages 617–620, 2017.
- [7] Y. Tanaka, R. Koderu, T. Kato, H. Miyake, H. Mori, and Y. Yagi. Observation of space charge accumulation behavior in cross-linked polyethylene at voltage polarity reversal. In *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pages 23–26, 2015.
- [8] E. Ildstad, F. Mauseth, and E.T. Olsen. Breakdown voltage of polymeric hvdc insulation at dc stress and superimposed lightning impulse voltages. 2022.
- [9] Erling Ildstad. Tet4160 insulating materials for high voltage applications. Digital Compendium, 2000.
- [10] S. Ishizaki, K. Miyatake, Y. Tanaka, and T. Takada. Space charge accumulation process in pet film at high temperature under high electric stress. In *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 660–663, 2002.
- [11] D. Fabiani, G.C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, and L. A. Dissado. HvdC cable design and space charge accumulation. part 3: Effect of temperature gradient [feature article]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(2):5–14, 2008.
- [12] B. Aladenize, R. Coelho, J.C. Assier, H. Janah, and P Mirebeau. Field distribution in hvdc cables: Dependence on insulating materials. 1999.
- [13] C. K. Eoll. Theory of stress distribution in insulation of high-voltage dc cables: Part i. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-10(1):27–35, 1975.
- [14] R.N. Hampton. Feature article - some of the considerations for materials operating under high-voltage, direct- current stresses. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(1):5–13, 2008.
- [15] M.J.P. Jeroense and P.H.F. Morshuis. Electric fields in hvdc paper-insulated cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(2):225–236, 1998.

- 
- [16] Working Group 21-01. Cigre tb-219 - recommendations for testing dc extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 250 kv. 2003.
- [17] Working Group B1.32. Cigre tb-496 - recommendations for testing dc extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kv. 2012.
- [18] Z. Croitoru. Space charges in dielectrics. *Progress in Dielectrics*, 1965.
- [19] J. J. O'Dwyer. The effect of collision-ionization space-charge on high field conduction in solids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-15(3):264–269, 1980.
- [20] I.W. McAllister, G.C. Crichton, and A. Pedersen. Proceedings of 1994 ieee international symposium on electrical insulation. pages 212–216, 1994.
- [21] M. Salah Khalil. International research and development trends and problems of hvdc cables with polymeric insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 13(6):35–47, 1997.
- [22] B. X. Du, Z. H. Hou, Z. L. Li, and J. Li. Temperature dependent space charge and breakdown strength of pp/uldpe/graphene nanocomposites for hvdc extruded cable insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(3):876–884, 2019.
- [23] Leonard Alexander Dissado. The theory of everything in the electrical breakdown of polymeric dielectrics: Maybe. In *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*, pages 1–5, 2018.
- [24] G. Mazzanti and M. Marzinotto. *Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development*. 06 2013.
- [25] T. Takada. Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics. In *1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.99CH36319)*, pages 1–14 vol.1, 1999.
- [26] T.L. Hanley, R.P. Burford, R.J. Fleming, and K.W. Barber. A general review of polymeric insulation for use in hvdc cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(1):13–24, 2003.
- [27] G.C. Montanari, J. Ghinello, F. Peruzzotti, and M. Albertini. Endurance characteristics of xlpe compounds under dc voltage. In *ICSD'98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No.98CH36132)*, pages 439–442, 1998.
- [28] P. Morshuis and M. Jeroense. Space charge measurements on impregnated paper: a review of the pea method and a discussion of results. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 13(3):26–35, 1997.
- [29] M. Pays, M. Louis, J. Perret, and C. Alquie. Behavior of extruded hvdc power cables. 1988.
- [30] Y. Maekawa, A. Yamaguchi, C. Ikeda, and M. Hara. Research and development of dc xlpe cables. *Jicable, B9 Cables and Accessories for HVDC Links—Submarine Cables*, pages 562–569, 1991.
- [31] F. Selle and D. Schulte. Electrical breakdown of epr-insulated cables at dc and impules voltages. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-22(2):139–143, 1987.
- [32] T. Mori, T. Matsuoka, and T. Mizutani. The breakdown mechanism of poly-p-xylylene film. prestress effects on the breakdown strength. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(1):71–76, 1994.

- 
- [33] K. Kaneko, A. Umemura, M. Hikita, A. Fujii, Y. Suzuoki, T. Mizutani, and M. Ieda. Consideration of space charge effect on electrical breakdown of poly-p-phenylene sulfide films. In [1991] *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pages 1057–1060 vol.2, 1991.
- [34] Espen Torlei Olsen. Elektrisk holdfasthet i polymerisolasjon ved dc spenning - innvirkning av påtvunget lynimpuls med varierende tid og polaritet. Digital Project Report, 2021.
- [35] K. Miyatake, K. Tatehana, Y. Tanaka, and T. Takada. Space charge accumulation in pet film under process of rising and falling temperature. In *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.00CH36347)*, volume 1, pages 42–45 vol.1, 2000.
- [36] N. D. Jacob and F. A. Fattal. A practical test circuit for combined high direct voltage and switching impulse voltage multi-stress tests. In *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 623–626, 2016.
- [37] Pål Keim Olsen. Internal partial discharges at high dc voltage and the effect of superimposed ac voltage, 2020.
- [38] Firat Akin, Oktay Arıkan, and Cihat Cagdas Uydur. Investigation of ac and dc breakdown behavior on different solid insulating materials. In *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pages 142–146, 2021.
- [39] S. Grzybowski, E.A. Feilat, P. Knight, and L. Doriott. Breakdown voltage behavior of pet thermoplastics at dc and ac voltages. In *Proceedings IEEE Southeastcon'99. Technology on the Brink of 2000 (Cat. No.99CH36300)*, pages 284–287, 1999.
- [40] K. Kannus, P. Harju, K. Lahti, J. Pelto, and M. Paajanen. Electrical properties of polypropylene and polyaniline compounds. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004.*, volume 1, pages 67–70 Vol.1, 2004.
- [41] N. Haque, S. Dalai, B. Chatterjee, and S. Chakravorti. Studies of the effect of temperature on the charge trapping and de-trapping processes of polymeric insulators through depolarization current measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(3):1896–1904, 2017.
- [42] Masayuki Ieda. Dielectric breakdown process of polymers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-15(3):206–224, 1980.

---

## Vedlegg A- NordIS-artikkel

# Breakdown Voltage of Polymeric HVDC Insulation at DC Stress and Superimposed Lightning Impulse Voltages

E. Ildstad, F. Mauseth and E.T. Olsen

*NTNU, Department of Electrical Power Engineering, Trondheim, Norway*

## Abstract

Space charge formation makes it difficult to predict the resulting electric field distribution within HVDC cable insulation.

The main purpose of the work presented here has been to experimentally study how the lightning impulse breakdown strength of thin (0.1 mm thick) insulation foils of polypropylene (PP) and Polyethylene Terephthalate (PET) are affected by DC prestress, polarity of the impulse voltage and the temperature.

Tests were performed using parallel plate electrodes and prior to DC prestressing the lightning impulse breakdown strengths were found to be approximately 17.5 kV for samples of both PP and PET. Prior to superimposing lightning impulse breakdown voltages, a DC voltage of 8 kV was applied for 60 seconds. The effect of DC prestressing was to significantly increase the impulse breakdown strength during aiding and reduce the breakdown strength during opposing impulse polarity. This strongly support the assumption of homo-charge formation close to the metal electrodes during DC stress. The results showed higher and more temperature dependent charge accumulation in samples of PET. It is indicated that at 22 °C the homo-charge formed during DC stressing approximately reduced the electric field at the electrodes from 100 to 48 kV/mm in the PP samples and from 80 to 22 kV/mm in the PET samples, respectively.

## 1. Introduction

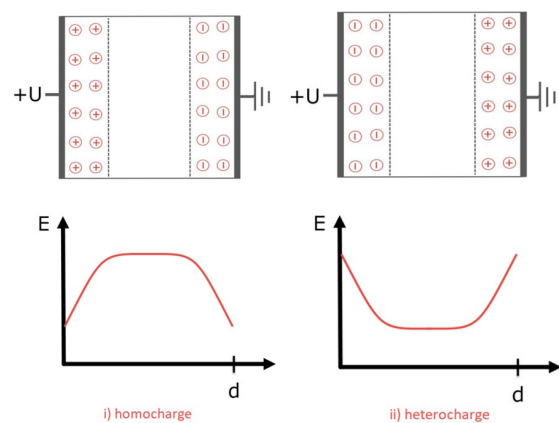
If high voltage DC stress is applied to a polymer, space charges are formed to balance the effects of charge injected at the electrodes and any local differences in electrical conductivity and permittivity. In general, the conduction dominated space charge formation within the insulation is slow compared to the rapid injection processes near the electrodes. In addition, it is a challenging task to distinguish between conduction mechanisms caused by either ions or electrons.

Anyway, such space charge formation alters the electric field distribution within HVDC insulation, causing high local field enhancements and reduced breakdown strength in case of rapid reversal of the voltage polarity. While XLPE, PE and EPR cable insulation have been thoroughly examined with respect to AC, DC and impulse breakdown strength [1-4], few reports have been published on the electrical performance of alternative insulating materials as Polypropylene (PP) and Polyethylene terephthalate (PET).

The aim of this ongoing investigation is to study how the impulse breakdown strength of thin foils of such

polymers are affected by the polarity of the DC prestress voltage. In addition, reference measurements of AC 50 Hz as well as lightning impulse breakdown strength were performed at selected temperatures from 20 to 100 °C.

## 2. Brief Theoretical background



**Figure 1** – Illustrations of possible resulting electric field distribution due to the combined effect of an applied voltage and space charge located close to the electrodes. i) In case same polarity of the space charge as the adjacent electrode (homo-charge) and ii) in case of opposite polarity of the charge (hetero-charge).

When considering charges trapped near the electrodes, it is common to distinguish between two types of dominating space charge distributions, either homo-charge or hetero-charge. As shown in Figure 1, the homo-charge has the same polarity as the electrode, while hetero-charge has opposite polarity to the electrode.

During DC voltage application, homo-charge can be considered created by injection of electrons or holes (lack of electrons) at the cathode and anode, respectively. While hetero charge can be created by accumulation of chemical ionized species in the polymer.

The effect of injected homo-charge is to reduce the electric field close to the electrodes and increase the stress in the bulk of the insulation. Hetero charge has an opposite effect.

In the following, it is assumed that electric breakdown by impulse occur when the local maximum field reaches the critical impulse breakdown field  $E_{\text{breakdown}}$ , and that such breakdown is caused by electronic avalanche processes associated with statistical and formative time lag.

It is previously documented that if the applied superimposed impulse voltage is of the same polarity as the DC stress, the breakdown strength will be increased. A phenomenon explained by formation of a thin layers of

homopolar space charges near the electrodes during DC prestressing. This space charge can be considered a new “virtual electrode” that will smooth out microscopic inhomogeneities at the interfaces. The result of such decreased stress is to increase the breakdown strength of the insulation [1]. This is valid if the expansion of the space charge regions is small compared to the insulation thickness.

If the buildup or removal of homo space charge need longer time than that of the short (1.2/50  $\mu$ s) impulse, it is very likely that such homo-charge has a detrimental effect of opposite polarity impulse breakdown strength. In case of EPR cable insulation, different levels of DC prestress cause a considerable influence of the impulse breakdown strength, whereas longer periods of DC prestress did not alter the effect of space charge, varied from 15 min – 100 hours [1].

Such relative rapid charging and slow decay mechanism was also found when examining DC prestress effects on impulse breakdown strength of Poly-p-xylene (PPX) films.

The space charge in the PPX film was formed in less than 1 second but remained for more than 500 s after short circuit [5].

In the literature, the impulse breakdown strength for the same polarity as the DC prestress is denoted field aiding  $E_{b+}$ , and for the opposite impulse polarity, field opposing  $E_{b-}$ . The impulse breakdown strength, without DC pre-charge is denoted  $E_{b0}$  and is the average electric stress, i.e., the applied voltage divided by the thickness of each sample.

In ref. [6] an attempt was made to estimate the amount of homo space charge accumulated in the specimens during the DC prestress. In these thin films, space charge limited current (SCLC) was considered, which is based upon free injection of electrons at the cathode, reducing the cathode stress to  $E = 0$ .

This means that the difference in impulse breakdown voltage between the field aiding  $U_{b+}$  and the strength in case of no DC prestress  $U_{b0}$ , yields the total amount of injected accumulated space charge:

$$\Delta Q_+ = C \cdot \Delta U_{b+} = C \cdot (U_{b+} - U_{b0}) \quad (1)$$

where  $C$  is the capacitance of the examined test object.

In case of geometric symmetry, the amount of total injected or accumulated space charge can in a similar manner be determined by the observed difference between the opposing impulse breakdown strength  $U_{b-}$  and the strength prior to DC stressing,  $U_{b0}$ :

$$\Delta Q_- = C \cdot \Delta U_{b-} = C \cdot (U_{b0} - U_{b-}) \quad (2)$$

### 3. Experimental Methods

Experiments were performed using 60 x 60 mm squared samples cut from foils of both Polypropylene (PP), with

a thickness of 0.08 mm, and Polyethylene 0.01 mm thick films of terephthalate (PET).

During testing the sample was placed between two Rogowski-shaped brass-electrodes with a diameter of 50 mm. The edge curvature of the electrodes is 4 mm. A weight of 5 kg was put on top of the test cell as shown in Fig. 2. To prevent external flashover, the electrode system was submerged in insulating oil at selected temperatures

The DC prestress voltage level was set to +8 kV for both PET 0.10 mm and PP 0.08 mm. A voltage level selected to be close to the effective AC (50 Hz) breakdown voltage, which was found to be slightly higher than 8 kV for both materials. Combined DC and impulse voltage were applied using a lightning impulse generator, connected to the sample and the DC source via a 10 nF blocking capacitor, as shown in Figure 3. During impulse breakdown testing the breakdown value was measured using a high voltage measuring probe, resulting in typical graphs as shown in Figure 4. The surge impulse generator was charged such that breakdown always occurred within the raising front of the voltage with a raise time of 40 kV/ $\mu$ s. The duration of the DC-prestressing was in all cases set to 60 seconds and the temperature was varied from 20 to maximum 100 °C.

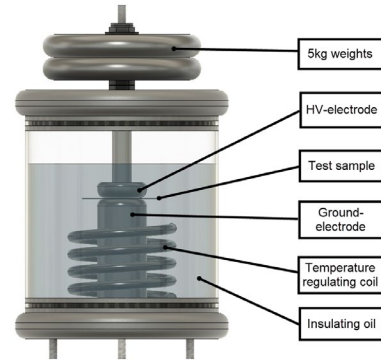


Figure 2 - Test cell with electrodes and heating elements.

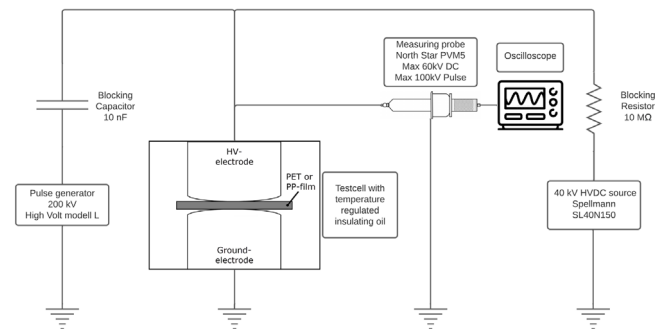
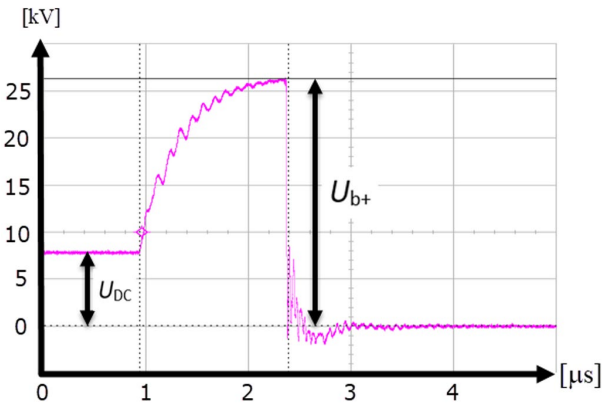
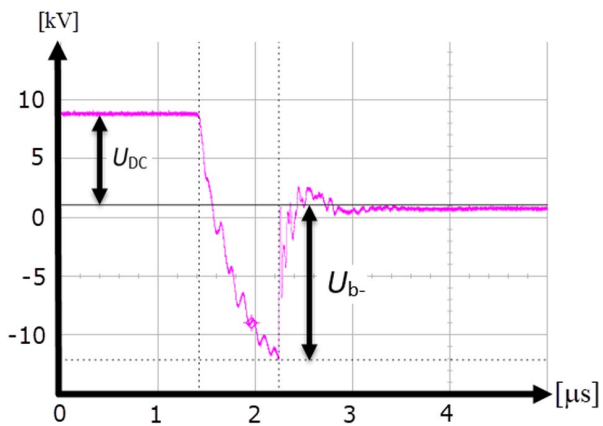


Figure 3 - Circuit diagram for DC pre-stressing and LI impulse testing. The test cell is described in Fig. 2.



**Figure 4** – Breakdown at DC-prestress and superimposed lightning impulse at positive polarity.  $U_{DC} = 8$  kV,  $U_{LI} = 20$  kV and  $U_{b+} = 26.3$  kV.

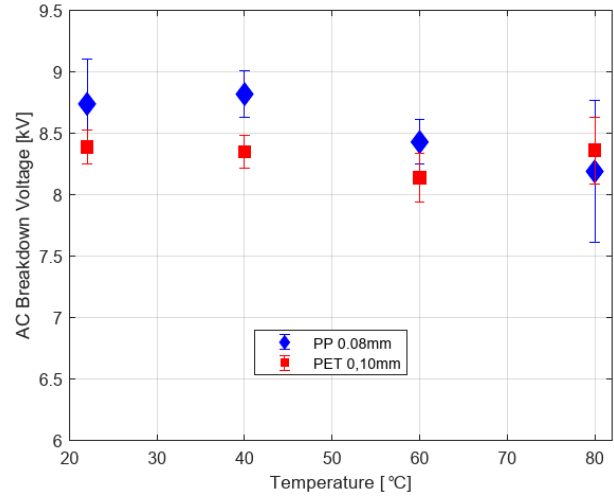


**Figure 5** – Breakdown at DC-prestress and superimposed lightning impulse at negative polarity.  $U_{DC} = 8$  kV,  $U_{LI} = -25$  kV and  $U_{b-} = -13.1$  kV.

#### 4. Results and discussion

The AC breakdown strength of the PP and PET-samples are presented in Fig. 6. It shows that at temperatures

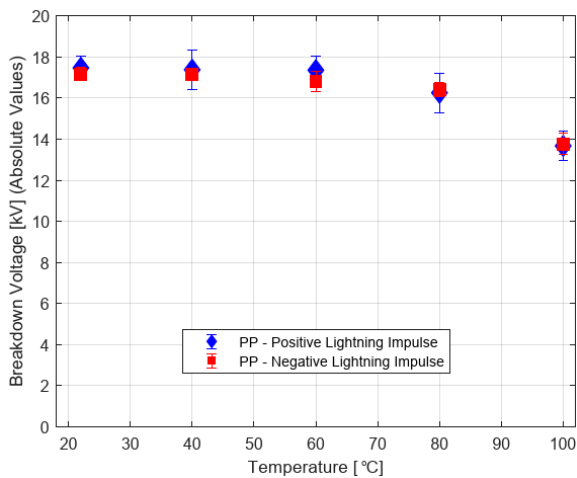
below 60 °C, the average AC breakdown field strength of PP is approximately 25% higher than that of PET. The AC breakdown strength of PET is, however, less temperature dependent than the PP samples. A reasonable difference considering the typical melting point of 160 and 260 °C for PP and PET, respectively.



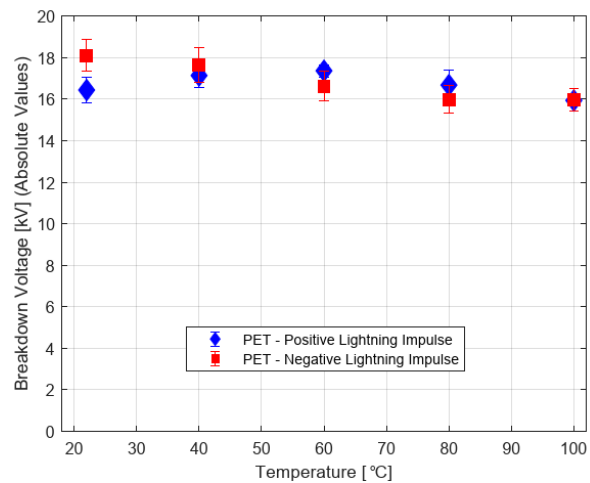
**Figure 4** - AC Breakdown Voltage of PP- and PET-film at temperatures from 22 to 80 °C. All measurements are RMS-values.

The measured impulse breakdown values of the reference sample, i.e., prior to applying DC stress, are presented in Fig. 7. The somewhat unexpected polarity effect could be caused by initial space charge formation during storage of the samples. An additional test was therefore performed on PET-samples, which were kept grounded for 7 days before impulse breakdown testing. This resulted in coherent breakdown values of 17.7 kV for both negative and positive lightning impulse.

The measured effects of DC prestressing on the impulse breakdown strengths are summarized in Figure 8. The results clearly demonstrate that the impulse strength is increased by aiding and reduced by opposite polarity of



a) Reference 0.10 mm PET-film (DC = 0 kV)

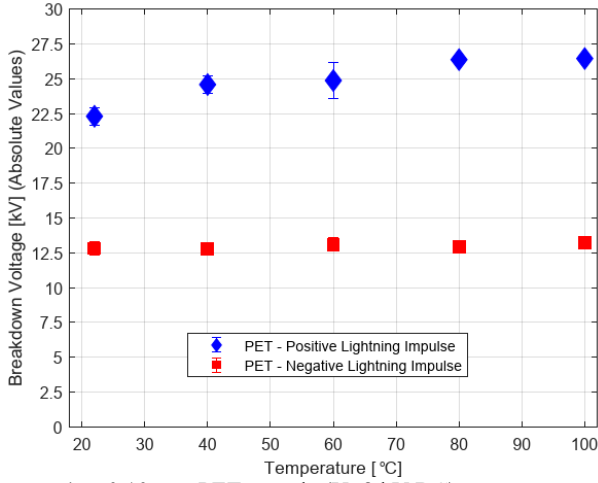


b) Reference sample 0.08 mm PP-film (DC = 0 kV)

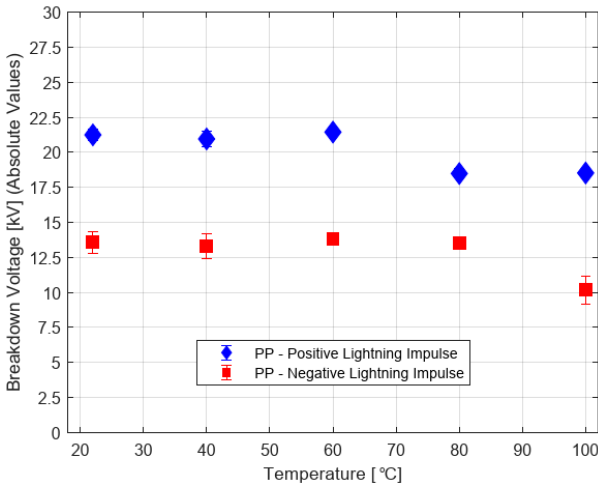
**Figure 7** - Initial measured impulse breakdown strength versus temperature, prior to DC prestressing. Comparison of applied lightning impulses of both positive and negative polarity.



the superimposed voltage impulse. An observation valid for samples of both PP and PET and at all examined temperatures up to 100°C. It strongly indicates that the impulse breakdown strength is affected by homocharge formation during the DC prestress period. Acting as heterocharge causing field enhancement during application of opposing polarity impulse voltages.



a) 0.10 mm PET-sample (U=8 kV DC)



a) 0.08 mm PP -sample

**Figure 8** – Results from measurements of impulse breakdown voltage superimposed 8 kV DC-voltage, versus test temperature

The changes in breakdown voltage compared to that of the non-DC stressed reference objects are given in table 1. The total amounts of apparent injected space charge associated with these values are also presented, using eq. 1 and 2 with measured sample capacitances. In case of the PP samples, it is shown that the amount of injected space charge was nearly temperature independent and also independent of the method of estimation, as equal charge magnitudes were estimated from impulse breakdown values obtained during aiding or opposing breakdown impulses. This indicates that in samples of

**Table 1.** Observed increase and reduction of superimposed lightning impulse breakdown strength after 60 s DC stressing at 8 kV at aiding and opposing voltage polarity, respectively. The indicated values of accumulated homo-charge at the electrodes are calculated according to Eq. (1) and (2), based upon measured values of capacitance.

| PP+ (aiding)                            |                      |                      |                      |                      |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Temp [°C]                               | 22                   | 60                   | 80                   | 100                  |
| $\Delta U_+$ [kV]                       | 3.8                  | 3.7                  | 2.3                  | 4.8                  |
| $\Delta Q = C_{PP} \cdot \Delta U$ [C]  | $0.61 \cdot 10^{-6}$ | $0.59 \cdot 10^{-6}$ | $0.37 \cdot 10^{-6}$ | $0.77 \cdot 10^{-6}$ |
| PP- (opposing)                          |                      |                      |                      |                      |
| $\Delta U_-$ [kV]                       | 3.6                  | 3                    | 2.9                  | 3.6                  |
| $\Delta Q = C_{PP} \cdot \Delta U$ [C]  | $0.76 \cdot 10^{-6}$ | $0.48 \cdot 10^{-6}$ | $0.46 \cdot 10^{-6}$ | $0.58 \cdot 10^{-6}$ |
| PET+ (aiding)                           |                      |                      |                      |                      |
| $\Delta U_+$ [kV]                       | 5.8                  | 7.5                  | 9.7                  | 10.5                 |
| $\Delta Q = C_{PET} \cdot \Delta U$ [C] | $0.99 \cdot 10^{-6}$ | $1.28 \cdot 10^{-6}$ | $1.65 \cdot 10^{-6}$ | $1.79 \cdot 10^{-6}$ |
| PET- (opposing)                         |                      |                      |                      |                      |
| $\Delta U_-$ [kV]                       | 5.3                  | 3.5                  | 3.1                  | 2.8                  |
| $\Delta Q = C_{PET} \cdot \Delta U$ [C] | $0.9 \cdot 10^{-6}$  | $0.59 \cdot 10^{-6}$ | $0.53 \cdot 10^{-6}$ | $0.48 \cdot 10^{-6}$ |
| $C_{PP}$ [nF]                           |                      | $C_{PET}$ [nF]       |                      |                      |
| 0.16                                    |                      | 0.17                 |                      |                      |

PP the homo-space charge formed during DC prestressing does not easily decay during the short (1  $\mu$ s) duration of the applied lightning impulse voltage.

In case of PET samples higher total average accumulated charge was observed, particularly so at temperatures above 60°C. In addition, the amount of injected charge in the PET samples was found to increase with increasing temperature while decreasing at opposing impulse voltages.

This asymmetry, either indicate a more non-symmetric distribution of injected space charge prior to the impulse breakdown testing or more rapid and increased charging/discharging during the period of superimposed aiding/opposing impulse voltage. The latter mechanism is supported by the observed increasing asymmetry with increasing temperature.

The overall effect of the homo-charge accumulated during the period of DC stressing is to significantly reduce the electric stress at the electrodes. If at room temperature (22 °C), the space charge is considered located in a thin region close to the metallic electrodes, the resulting electric field at the electrode is approximately reduced from 100 to 48 kV/mm in the PP samples and from 80 to 22 kV/mm in the PET samples.

#### 4. Conclusion

The impulse breakdown strength of both PP and PET films are strongly affected by homocharge injected during a short period of DC prestressing.

Such space charge effects must be taken into account when discussing impulse breakdown strength of HVDC insulation.

#### 5. References

- [1] F. Selle, D. Schulte, "Electric Breakdown of EPR-insulated Cables at DC and Impulse Voltages", IEEE Trans. on El. Insl. Vol EI-22, April 1987
- [2] A. Bradwell, R. Cooper and B. Varlow, "Conductivity in Polyethene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength", Proceedings of IEE, Vol 118, No.1, pp 247-254, 1971.
- [3] G. Mazzanti and M. Marzinotto, "Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development", Book, pp 104, 2003, doi 10.1002/9781118590423.
- [4] T.L. Hanley, R.P. Burford, R.J. Fleming, and K.W. Barber. "A General Review of Polymeric Insulation for Use in HVDC Cables." IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 19, No.1, pp. 14-24, Feb 2003.
- [5] Tatso Mori, et. al. "The breakdown mechanism of Poly-p-xylyene Film, Prestress Effects on Breakdown strength", IEEE Trans. on El. Insl. Vol 1, No.1 February 1994
- [6] K. Kaneko et al.. "Consideration of space charge effects on electrical breakdown of Poly-p-Phenylene sulfide films" Proceedings of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials", July 8-12, 1991, Tokyo, Japan

---

## Vedlegg B - Utstyrliste

| Utstyr              | Modell        | Leverandør              | Brukes til   |
|---------------------|---------------|-------------------------|--|
| Lynimpuls-generator | Series L      | High Volt               | Brukes til skape lynimpulser som påføres prøveobjektet                                       |
| DC-kilde            | SL40N150      | Spellmann HV            | Påfører DC-spenning over prøveobjektet   |
| Måleprobe           | PVM-5         | North Star High Voltage | Skalerer ned avlest spenning over testcellen til 1:1000 for å kunne lese av på oscilloskopet |
| Kondensator         | 10 nF         | Messwandler Bau         | Blokkerer DC-strømmen og leder den høyfrekvente strømmen                                     |
| Motstand            | 10 M $\Omega$ |                         | Blokkerer lynimpulsene mot DC-kilden   |
| Oscilloskop         | RTB 2004      | Rohde & Schwartz        | Brukes til å avlese den totale spenningen over prøveobjektet ved gjennomslag                 |
| Isolatorer          |               | Messwandler Bau         | Separerer kondensator fra jord og annet utstyr   |
| Testcelle           |               |                         | Innkapsler prøveobjektet i transformator-olje under forsøkene                                |
|                     |               |                         |  |
|                     |               |                         |  |
|                     |               |                         |  |
|                     |               |                         |  |

---

## Vedlegg C - Flytskjema Testprosedyre

