

Nikolai Brodin

Tidsdomene dielektrisk respons for tilstandskontroll av statorviklinger fra driftsaldret vannkraftgenerator

Masteroppgave i Electric Power Engineering

Veileder: Erling Ildstad

Juli 2022

Nikolai Brodin

Tidsdomene dielektrisk respons for tilstandskontroll av statorviklinger fra driftsalderen vannkraftgenerator

Masteroppgave i Electric Power Engineering
Veileder: Erling Ildstad
Juli 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: Nikolai Brodin nikolabr@stud.ntnu.no

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

Thesis title (Norwegian/English):

**Tids-domene dielektrisk respons for tilstandskontroll av stator
viklinger fra driftsaldrede vannkraft generator.**

**Time-domain dielectric response measurements for
condition assessment of service aged Hydro-generator
stator bars using**

Diagnostic testing and condition assessment is increasingly becoming important part of the maintenance procedures of many critical power components. The main aim is to ensure reliable and economic long-term operation preventing unexpected breakdowns and unnecessary replacements. Hydropower generators are examples of such old but increasingly important equipment.

The majority of the Norwegian hydropower generators have been in service for more than 40 years, and several have already passed their expected design lifetime. In addition, new and tougher service conditions, including higher load and more frequent starts and stops, challenge the insulation beyond what it originally was designed for. Factors which increase the uncertainty regarding the rate of ageing and estimation of remaining expected lifetime.

Today, dielectric response measurements is one of several diagnostic techniques applicable for assessing the insulation quality of generator rods. Unfortunately, wide application of this technique is hampered by uncertain interpretation and lack of clear assessment criteria.

The main purpose of this thesis work is to address these issues and to use techniques available for detection changes in dielectric response, i.e changes of permittivity and dielectric loss, of service aged stator rods. The effect of DC voltage magnitude, stress duration and temperature are of particular interest.

Relevant samples of in-service aged generator rods are available at NTNU for this purpose.

The MSc thesis is expected to constitute:

- A literature survey, including theory and experience of dielectric response measurements, forming the base for condition assessment of generator rods.
- Design of a laboratory experiment setup for measuring dielectric response of generator rods, using a Megger for measuring pol/depolarization currents versus time, DC voltage and temperature.
- Discussion of the validity and the practical applicability of the results obtained.

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

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

Supervisor: Prof. Erling Ildstad (erling.ildstad@elkraft.ntnu.no)

Sammendrag

Flertallet av generatorer i norske vannkraftverk har allerede passert forventet levetid. For å undersøke om generatorene fortsatt kan benyttes etter endt forventet levetid, kan de analyseres og diagnostiseres. Feilene som oftest resulterer i havari forekommer i isolasjonen til statorviklingene. Det er nettopp isolasjonen til statorviklingene som blir nøyere undersøkt i denne studien ved å benytte dielektrisk responsmåling. En generatorstav som er driftsaldret i 52 år, hentet fra Suldal I generator G2 blir undersøkt. Målingene blir utført med Megger S1-1568: En likestrømsisolasjonstester som er enkel i bruk og portabel. En påtrykt likespenning vil gi resultat i tidsplanet og for å regne om dette til frekvensplanet blir det benyttet Hamon approksimasjon. Siden måleobjektet i denne studien aldri blir fullstendig polarisert vil måleresultatet aldri bli ren likespenning, men heller VLF (Veldig lav frekvens). Hovedformålet er å oppdage aldringstegn i isolasjonen, dette blir gjort ved å undersøke spenningsavhengighet, frekvensavhengighet og temperaturavhengigheten til dielektrisk respons. Studien tar óg for seg om Megger S1-1568 kan benyttes til måling av tapsfaktor $\tan \delta$.

Studien konkluderer med at Megger S1-1568 er et egnet instrument til å utføre målinger av tapsfaktor, om visse forbehold utvises ved bruk. Polarisasjonsindeksen tilsier at isolasjonen er i utmerket stand, uten tegn til aldring. Studien konkluderer med at det er for mye frekvensavhengighet i dielektrisk respons til å sikkert kunne sammenligne målte $\tan \delta$ verdier med tidligere målte $\tan \delta$ verdier ved frekvenser utenfor målt område. Studien har observert en ikkelineær spenningsavhengighet mellom 8kV og 9kV. Dette spenningsnivået samsvarer med PDIV (partial discharge inception voltage) funnet i tidligere studier på generatorstaver fra samme generator. Ved både omtrent 70°C og ved omtrent 100°C inntreffer det ulineariteter i målingene av dielektrisk respons og ledningsevne. DSC termisk analyse bekrefter at det forekommer endringer i de termiske materialegenskapene ved samme temperaturer.

Abstract

The majority of generators in Norwegian hydropower plants have already exceeded their expected service life. To investigate whether the generators can still be used after the end of their expected service life, they can be analyzed and diagnosed. The faults that result in a breakdown most often occur in the insulation of the stator windings, which are examined in more detail in this study by using dielectric response measurements. A stator bar that has been in operation for 52 years, extracted from Suldal I generator G2 is being examined. The measurements are performed with Megger S1-1568: A direct current insulation tester, that is simple to operate and portable. An applied direct voltage gives results in the time domain, and to convert to the frequency domain, Hamon approximation is utilized. Since the stator bar in this study is never completely polarized, the measurement result will never be pure DC voltage, but rather VLF (Very low frequency). The main purpose is to detect signs of aging in the insulation, this is done by examining voltage dependence, frequency dependence and the temperature dependence of the dielectric response. The study also addresses the use of Megger S1-1568 for measuring dielectric loss factor $\tan \delta$. The study concludes that the Megger S1-1568 is a suitable instrument for performing dielectric loss factor measurements, if certain precautions are demonstrated during use. The polarization index indicates that the insulation is in excellent condition, with no signs of aging.

The study concludes that there is too much frequency dependence in the dielectric response to be able to reliably compare the values to frequencies outside the measured range. The study has observed a nonlinear voltage dependence between 8kV and 9kV. This voltage level corresponds to PDIV (partial discharge inception voltage) found in previous studies on generator rods from the same generator. At about 70°C and at about 100°C, nonlinearities occur in the measurements of dielectric response. DSC thermal analysis confirms that there are changes in the thermal material properties at the same temperatures.

Forord

Dette er avsluttende masteroppgave for det to-årige internasjonale sivilingeniørstudiet Electric Power Engineering ved NTNU Trondheim.

Jeg vil spesielt takke min veileder Erling Ildstad, samt Amar Abideen for gode diskusjoner og veiledning.

Jeg ønsker også å takke mine medstudenter for god faglig og sosial støtte i utarbeidelse av denne studien.



Nikolai Brodin 02/06/2022

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	iii
Abstract	iv
Forord	v
Introduksjon	1
1 Grunnleggende teori	2
1.1 Generatorstaver	2
1.2 Feilårsaker elektriske maskiner	2
1.3 Diagnostikk med likespenning	2
1.3.1 Punkt-test	2
1.3.2 Ramp-test	3
1.3.3 PI-Polariseringsindekstest	3
1.3.4 Dielektrisk utladningstest	3
1.4 Aldringsmekanismer	3
1.5 Polariseringsmekanismer	3
1.5.1 Elektronisk polarisering	4
1.5.2 Ionisk polarisering	4
1.5.3 Orienterende polarisering	4
1.5.4 Tverrsnittspolarisering	4
1.5.5 Polariseringsstrøm	4
1.5.6 Depolariseringsstrøm	5
1.6 Kompleks permittivitet og dielektrisk tap	6
1.7 Dielektrisk respons	7
1.7.1 Debye-tilnærming	7
1.7.2 Curie-von Schweiderler-tilnærming	8
1.8 Termisk aktivering	8
1.8.1 Arrhenius lov	9
1.9 Hamon approksimasjon	9
1.10 Tidskonstant	9
1.11 Tan δ som diagnostiseringsverktøy	10
1.12 Ionisk konduktivitet	10
1.13 Temperatur	11
1.13.1 Mekaniske egenskaper	11
1.13.2 Elektriske egenskaper	11
1.14 Ikkelineariteter	12
2 Megger S1-1568	12
2.1 Databehandling	13
2.2 Tester som kan utføres med Megger S1-1568	13
2.3 Guardterminal	13
2.4 Sensitivitet	14
3 Måleobjekter	14
3.1 Generatorstav	15
3.2 Isolasjon	15
3.2.1 Mica	15
3.2.2 Epoksy	15

3.2.3	Leder	15
3.2.4	Feltstyrende lakk	16
3.3	Dimensjoner	16
3.4	Generatorstaver fra generator G2 fra Suldal 1	16
3.4.1	O84R	16
4	Metode	16
4.1	Oppkobling	16
4.2	Depolariseringstid	17
4.3	Omgivelsestemperaturendring	17
4.3.1	Ventetid	17
4.3.2	Temperaturmåling	17
4.4	Kapasitansmåling	17
4.5	Spenningsnivå	17
4.6	Tiltak som må gjennomføres ved anvendelse av Megger S1-1568 til dielektrisk respons måling	18
4.7	Termisk analyse	18
4.8	Databehandling	19
4.9	Plan for målinger	19
4.9.1	Målinger utover planen	19
5	Resultater og diskusjon	20
5.1	Termisk analyse	20
5.2	Polariseringsstrøm	21
5.3	Polarisasjonsindeks	22
5.4	Tapsfaktor $\tan \delta$	23
5.5	Ledningsevne σ	26
	Konklusjon	29
	Referanser	31
	Vedlegg	32
A	Oppkobling	32

Introduksjon

Flertallet av de norske vannkraftgeneratorene har vært i drift i mer enn 40 år, og flere har allerede passert forventet levetid. I tillegg utfordrer nye og tøffere driftsforhold, deriblant høyere belastning og hyppigere start og stopp. Dette betyr at isolasjonen utfordres utover det den opprinnelig var designet for. Slike faktorer øker usikkerheten rundt aldringshastigheten, samt estimering av gjenværende levetid. [1] For å avgjøre om generatoren fortsatt er trygg å benytte, selv etter forventet levetid kreves det at man diagnostiserer generatoren. Den mest hyppige årsaken til at en generator havarerer er isolasjonssvikt i statorviklingen [2]. Isolasjonen kan tilstandskontrolleres med forskjellige målinger, både med vekselspanning og likespenning. Denne studien ser nærmere på dielektrisk respons med påtrykt likespenning.

I dag er dielektriske responsmålinger en av flere diagnostiske teknikker som kan brukes for å vurdere isolasjonskvaliteten til generatorstaver. Dessverre er vid anvendelse av denne teknikken hemmet av usikker tolkning og mangel på klare vurderingskriterier.

Hovedformålet med denne oppgaven er å adressere disse problemstillingene og å bruke tilgjengelige teknikker for å oppdage endringer i dielektrisk respons, dvs. endringer i permittivitet og dielektrisk tap, av tjenestealdrede statorstaver. Effekten av spenningsstørrelse, spenningsvarighet og temperatur er av spesiell interesse.

Fordelen med å kunne diagnostisere isolasjon med en likestrøm isolasjonstester er at måleutstyret er billigere, enklere i bruk og mer portabelt enn ved testing med vekselstrøm.

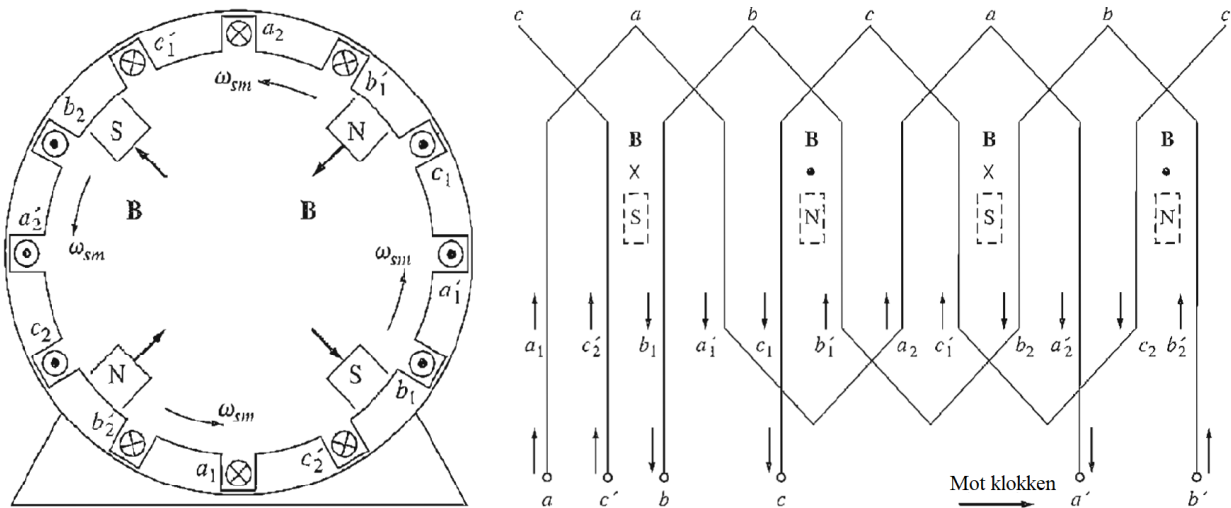
Diagnostisk testing og tilstandsvurdering blir en stadig viktigere del av vedlikeholdsprosedyrene for mange kritiske høyspenningskomponenter. Hovedmålet er å sikre pålitelig og økonomisk langsiktig drift, samt forhindre uventede driftsavbrudd og unødvendige utskiftninger. Vannkraftgeneratorer er eksempler på gammelt, men likevel stadig mer essensielt utstyr.

En Megger S1-1568 blir benyttet til å utføre målinger av dielektrisk respons i tidsplanet.

1 Grunnleggende teori

1.1 Generatorstaver

Generatorstaver er den delen av en statorvikling som er helt rett, altså partiet mellom endeviklingene, illustrert i figur 1.1. Den materialtekniske oppbyggingen av generatorstaven er illustrert i figur 3.1



Figur 1.1: En enkel fire pols statorvikling med resulterende poler (t.v.), med tilhørende viklingsdiagram (t.h.). Viklingen er en diamantvikling, og det lodrette partiet i viklingsdiagrammet er det som i denne oppgaven blir benevnet som generatorstaver. [3]

1.2 Feilårsaker elektriske maskiner

Elektriske maskiner feiler oftest grunnet isolasjonsskade, og 40% av skadene oppstår mellom stator, fase mot fase, fase mot jord. Isolasjonsskader oppstår oftest grunnet aldring, forurensning eller interne partielle utladninger. [2] Aldring, forurensning og interne partielle utladninger henger ofte sammen: Nedbrytning av isolasjon grunnet aldring fører til hulrom i isolasjonen. Hulrommet fører til interne partielle utladninger, som gjør at det danner seg ozon, som reagerer med lufta og danner salpetersyre. Salpetersyren er korrosiv og fører til at overflaten på isolasjonen aldres raskere, hvilket resulterer et hvitt pulver på isolasjonen. [4]

1.3 Diagnostikk med likespenning

Med likespenning har man fire typiske tester: Punkt-test, ramp-test, PI-polariseringsindekstest og DD-Dielektrisk utladningstest. [5]

1.3.1 Punkt-test

En punkt-test blir utført ved å påtrykke en spenning og måle motstanden. Testen vil bare kunne determinere om tilstanden på isolasjonen er bra nok eller for dårlig til å benyttes forsvarlig. En tommelfingerregel her er at isolasjonen skal ha $1M\Omega$ per kV driftsspenning. Punkt-test krever at isolasjonen har nådd et signifikant nedbrutt nivå før en forverring i tilstanden kan stadfestes.

1.3.2 Ramp-test

En ramp-test er en trinnvis økning av spenning; man øker spenningen og ser på utviklingen av konduktiviteten til isolasjonsmaterialet. Denne testen vil kunne si mer om utviklingen i tilstanden til isolasjonen enn en punkt-test.

1.3.3 PI-Polariseringsindekstest

En PI-test utføres ved at man påtrykker spenning på isolasjonen, for å undersøke polariseringsstrømmen i forhold til tid. Denne testen vil kunne si noe om tilstanden til isolasjonen, men ikke før isolasjonen har nådd et visst nivå av nedbrytning. Diagnostiseringsverdier for polariseringsindeks er vist i tabell 1.1. Temperatur for måling skal være 40°C [6]

Polarisasjonsindeks	Tilstand på isolasjonen
<1	Dårlig
1-2	Tvilsom
2-4	Ok
>4	Bra

Tabell 1.1: Grenseverdiene fra IEEE standard 43-2013 [5][6]

I noen tilfeller kan det forekomme verdier over 5, dette er ofte et tegn på sprø isolasjon.

Temperatur klassifisering	Minimum polarisasjonsindeks
Klasse 105 (A)	1,5
Klasse 130 (B) og over	2,0

Tabell 1.2: Anbefalt minimum polariseringsindeks [6]

1.3.4 Dielektrisk utladingstest

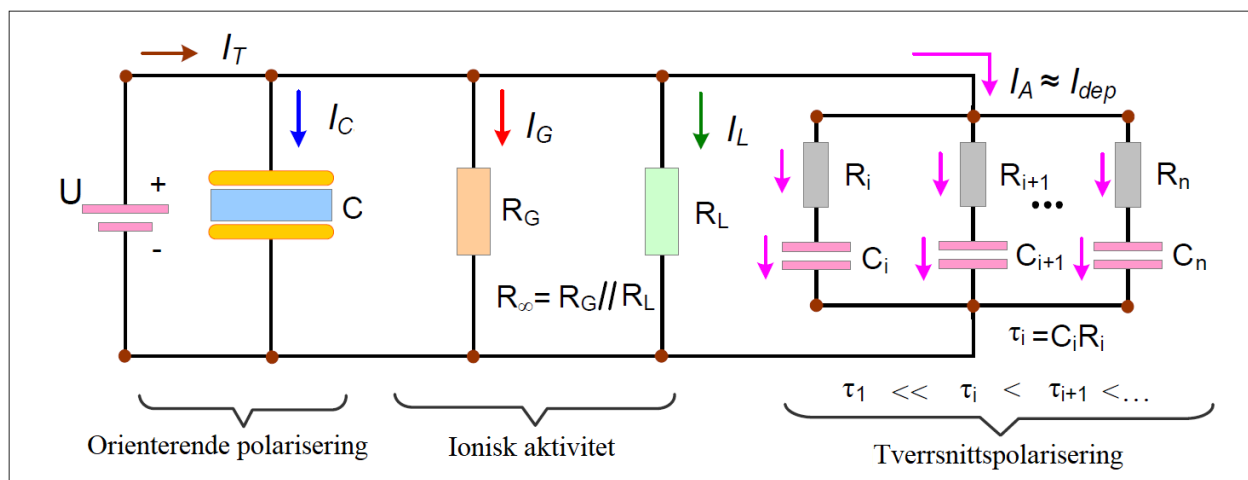
Denne testen utføres ved å påføre en likespenning i en gitt tid, deretter frakobles påtrykt spenning. Strømmen gjennom måleobjektet måles i tidsplanet. [5][7]

1.4 Aldringsmekanismer

Isolasjonen er som oftest påført lagvis for hånd. Dette blir gjort for hånd fordi geometrien til viklingene er for komplisert til at det kan gjøres maskinelt. Dog vil en konsekvens av å legge isolasjon manuelt, føre til at det er praktisk umulig å unngå dannelse av små luftbobler i isolasjonsmaterialet. Boblene vil over tid øke i størrelse grunnet partielle utladninger. [8]

1.5 Polariseringsmekanismer

Ulike polariseringsmekanismer forekommer når et dielektrisk materiale blir utsatt for en polaritetsforandring. Dette som følge av en påført elektrisk spenning. Disse mekanismene er klassifisert i fire forskjellige mekanismer: Elektronisk, ionisk, orienterende og tverrsnittspolarisering. Elektronisk og ionisk polarisering, skjer omtrent umiddelbart etter påtrykt spenning. Orienterende polarisering som skjer relativt hurtig og tverrsnittspolarisering som er den tregeste mekanismen. Figur 1.2, viser ekvivalentkrets med Debye-tilnærming for polariseringsmekanismene.



Figur 1.2: Ekvivalentkrets for polariseringsmekanismer i et dielektrisk materiale, med en Debye-tilnærming [9] [10]

1.5.1 Elektronisk polarisering

Elektronisk polarisering er mekanismen som orienterer elektronene rundt et nucleus i et atom med det elektriske feltet. Dette skjer umiddelbart og effekten avtar umiddelbart da det elektriske feltet ikke lenger påvirker det dielektriske materialet.

1.5.2 Ionisk polarisering

Ionisk polarisering er orienteringen av ionene i molekyler med symmetrisk ordnede elektroner i forhold til det elektriske feltet.

1.5.3 Orienterende polarisering

Molekyler med asymmetrisk ordning av molekyler vil generelt ha dipolene forlagt tilfeldig i fravær av et elektrisk felt. Et elektrisk felt vil orientere dipolene i samme retning. Denne effekten er relativt hurtig og temperaturavhengig.

1.5.4 Tverrsnittspolarisering

Tverrsnittspolarisering er en mekanisme som trer i kraft når det er flere enn ett dielektrisk materiale i isolasjonen. Denne mekanismen bruker relativt lang tid på å retningsorientere seg med det elektriske feltet, og omtrent ti ganger så lang tid på å avta.

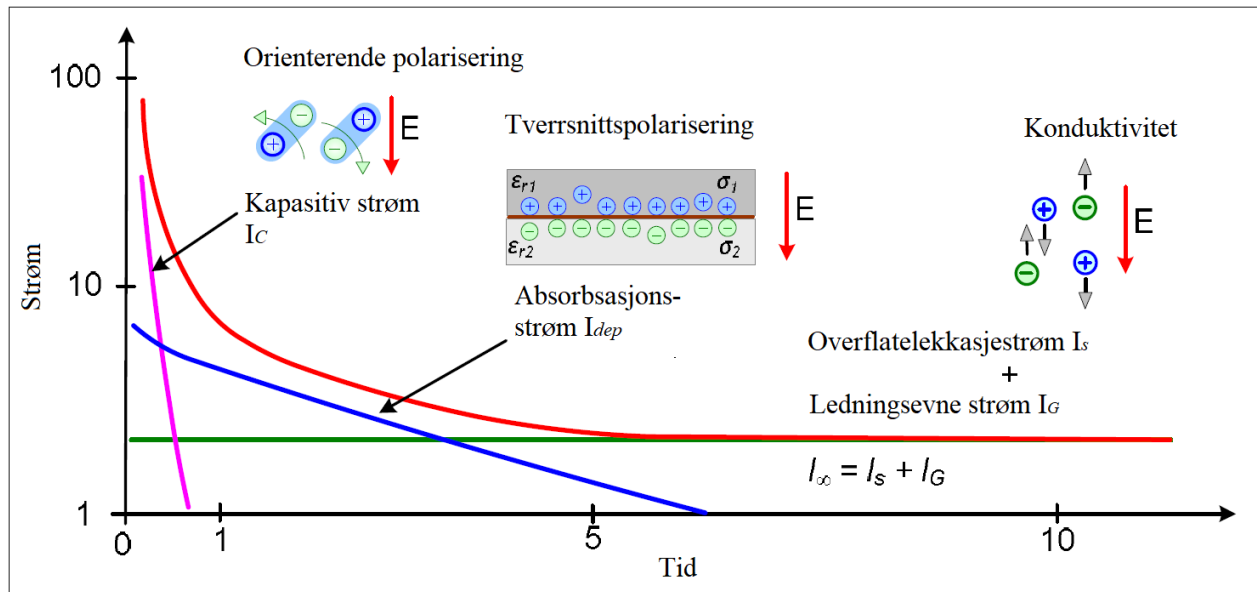
1.5.5 Polariseringsstrøm

Polariseringsstrømmen er som følger:

$$i(t) = C \frac{dU}{dt} + U \cdot \frac{dC}{dt} + \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

$$C_0 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (1.2)$$

Polariseringsmekanismene vil skape en strøm i tidsplanet gjennom det dielektriske materialet som i 1.3.



Figur 1.3: Polariseringsstrømmen gjennom et dielektrisk materiale. [10]

Siden det blir benyttet guard i målingene vil I_S være neglisjérbar. Ledningsevnen vil være:

$$I_\infty = I_S = I_{pol} - I_{depol} \quad (1.3)$$

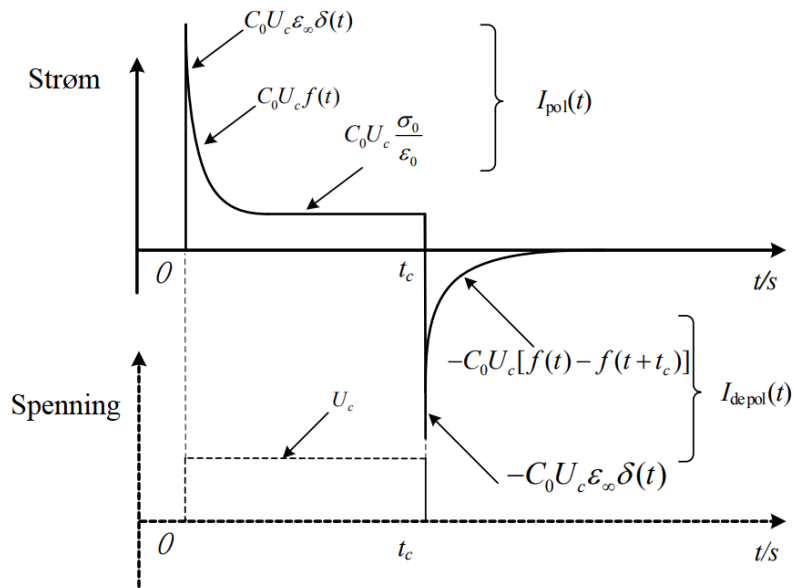
Polariseringsstrømmen er en eksponentiell funksjon.

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n \frac{U}{R_i} \cdot [1 - \exp(-T_c/\tau_i)] \cdot \exp(-t/\tau_i) \quad \text{for } t > T_c \quad (1.4)$$

$$i_p(t) = \sum_{i=1}^n \frac{U}{R_i} \cdot 1 - \exp(-t/\tau_i) + \frac{U}{R_\infty} \quad \text{for } 0 < t < T_c \quad (1.5)$$

1.5.6 Depolariseringsstrøm

Når et dielektrisk materiale frakobles påtrykt spenning vil materialet depolariseres. Dette skjer på samme måte som polarisering, bare at strømmen går motsatt vei og $I_\infty \rightarrow 0$, som vist i figur 1.4.



Figur 1.4: Typisk polariserings- og depolariseringsstrøm, der polarisering er fra 0 til t_c og depolarisering er fra t_c . [11]

Litteratur fra tidligere studier hevder at for å få bra depolariseringsresultater må polariseringstiden være ti ganger så lang som depolariseringstiden [12].

1.6 Kompleks permitivitet og dielektrisk tap

Orienteringsprosessen av molykære dipoler er en relativt treg prosess. Kun ved lav nok frekvens vil fullstendig polarisering (tidskonstant) være oppnådd. Relativ permitivitet (ϵ_r) vil kunne deles inn i to relative permitiviteter; den statiske (ϵ_s) som skjer etter rikelig med tid til polarisering, og den umiddelbare (ϵ_∞). ϵ_s vil være en høy verdi og ϵ_∞ vil være en lav. Når et dielektrisk materiale blir utsatt for et elektrisk felt (E), vil amplituden til feltet E_0 og vinkelhastigheten (ω) påvirke permitiviteten til materialet.

$$E = E_0 \cos(\omega t) \quad (1.6)$$

Siden et påtrykt elektrisk felt vil produsere polariseringsmekanismer, vil dipolene skape en faseforskyvning (δ) som kan uttrykkes som:

$$D = D_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (1.7)$$

som vil kunne utledes til.

$$D = D_1 \cos(\omega t) + D_2 \sin(\omega t) \quad , \text{ der } D_1 = D_0 \cos \delta \text{ og } D_2 = D_0 \sin \delta \quad (1.8)$$

Dette gjør at det kan defineres to relative permitiviteter:

$$\epsilon' = \frac{D_1}{\epsilon_0 E_0} \text{ og } \epsilon'' = \frac{D_2}{\epsilon_0 E_0} \quad (1.9)$$

som henger sammen med tapsfaktoren.

$$\frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \tan \delta \quad (1.10)$$

Strømmen vil kunne utregnes slik

$$I = \epsilon^* C_0 \frac{dV}{dt} = i\omega \epsilon^* C_0 V = \omega C_0 (\epsilon'' + i\epsilon') V \quad (1.11)$$

Dette betyr at det vil være en kapasitiv og en resistiv komponent av strømmen

$$I_C = i\omega C_0 \epsilon' V \quad (1.12)$$

$$I_R = \omega C_0 \epsilon'' V \quad (1.13)$$

[13]

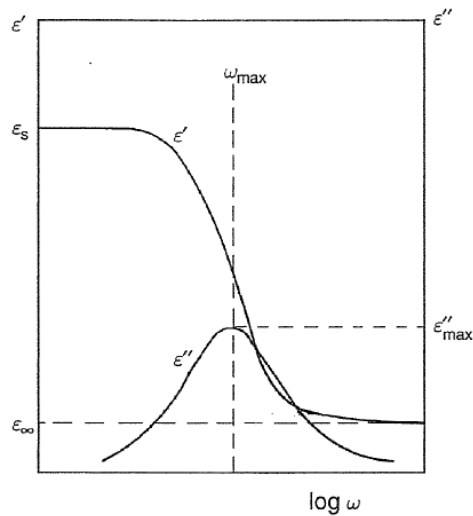
1.7 Dielektrisk respons

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 E + P}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 + \chi \quad (1.14)$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon E \quad (1.15)$$

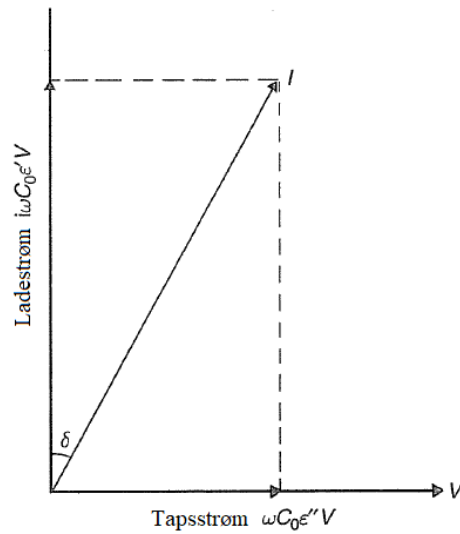
$$D(t) = \epsilon_0 [\epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \Psi(t)] E_0 \quad (1.16)$$

1.7.1 Debye-tilnærming



Figur 1.5: Debye dielektrisk spredningskurve [13]

Debye-tilnærmingen deler kompleks relativ permitivitet inn i imaginær del (ϵ'') og reell del (ϵ').



Figur 1.6: Argand-diagram med kompleks permitivitet, der reell komponent er plottet mot imaginær komponent [13]

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.17)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (1.18)$$

Teorien bak dielektrisk respons utviklet av Debye, baserer seg på eksponentiell tilnærming til likevekt og anvendelsen av superposisjonsprinsippet. Dielektrisk respons vil være avhengig av tidskonstant (τ) og relativ permitivitet. [14]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{\epsilon_s + \epsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \quad (1.19)$$

1.7.2 Curie-von Schweiderler-tilnærming

CVS(Curie-von Schweiderler) tilnærmingen sier at strømmen i et dielektrisk materiale avtar ihht. potensloven. Der er polariseringstrømmen regnet

$$J(t) = kt^{-n} \quad (1.20)$$

Ladetiden t og forfallskonstanten n er funnet ved

$$t^{-n} = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^\infty \tau^{-(n+1)} e^{-t/\tau} d\tau \quad (1.21)$$

$\Gamma(n)$ er gammafunksjonen. Som beviser forholdet mellom potensloven og uendelig summeringer av Debye-repsonser. [12]

1.8 Termisk aktivering

Termisk aktivering har mange forskjellige tilnærminger, avhenging av materiale. Arrhenius lov er den som er mest relevant for oppgaven.

1.8.1 Arrhenius lov

Arrhenius' lov:

$$\ln(\tau) = \frac{\Delta U^*}{kT} + \text{konstant} \quad (1.22)$$

ΔU^* er aktiveringssenergien, τ er tidskonstanten som omtrent kan defineres som $1/k_a$. Et Arrhenius plot vil være en strak linje som en funksjon av $\ln\tau$ mot $1/T$, det T er temperatur i Kelvin. Et Arrhenius plot der man plotter $\log\sigma$ mot $1/T$, vil stigningstallet til kurven gi $\Delta W/2\epsilon_s$

Fra Blythe sine utledninger:

$$\tau = \frac{1}{k_A} = \frac{h}{kT} e^{-\Delta S^*/r} e^{\Delta H^*/RT} \quad (1.23)$$

h er Plancks konstant, ΔS^* er molar entropi, ΔH^* er molar entalpi. [13]

1.9 Hamon approksimasjon

For å få målinger utført med likestrøm overført fra tidsplanet til frekvensplanet, kan Hamon approksimasjon vist i formel 1.28 benyttes. [15]

$$\tan(\delta) \approx \tan(\delta_1) + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_r'\epsilon_0} \quad (1.24)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1.25)$$

$$2\pi f = \frac{\pi}{5} \quad (1.26)$$

$$f = \frac{\pi}{5 \cdot 2\pi} = \frac{0,1}{t} \quad (1.27)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \approx \frac{I_{(f)} \cdot t}{\omega t} \cdot \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot V} \quad (1.28)$$

Hamon approksimasjon er en delvis anvendelse av CVS-modellen. Den er gyldig innenfor begrensningene $(0,3 < n < 1,2)$. Forvittringsfunksjonen vil kunne skrives: [15]

$$\Phi(t) = \beta \cdot C_0 \cdot t^{-n} = A \cdot t^{-n} \quad (1.29)$$

Hamon approksimasjon er en presis approksimasjon ved frekvenser høyere enn avspenningsfrekvensen (f_r), som er den frekvensen der den dielektriske tapsfaktoren (ϵ'') er størst vist i figur 1.5. [16]

En canadisk studie gjort i 2008 påstår at polariseringsstrømmen er bedre egnet enn depolariseringsstrømmen til å estimere $\tan(\delta)$. [17]

1.10 Tidskonstant

Tidskonstant τ_0 er tiden et dielektrisk materiale trenger for å polarisere seg med påtrykt likespenning. [18]

$$\tau_0 = \frac{\epsilon_r}{\sigma} \quad (1.30)$$

Der σ er:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I_{DC}}{U_{DC}} \cdot \frac{d}{A} \quad (1.31)$$

Tidskonstant er en forenkling ihht. fysikken. Det er allikevel en tilnærming som i høyeste grad blir benyttet til tross for at den er relativt inkonsekvent.[13] En mer presis tidskonstant (τ) kan finnes ved å ta hensyn til dielektrisk respons ved frekvensavhengighet. [19]

$$\tau = \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_{rb}(\omega) + \frac{db}{dc} \epsilon_{rc}}{\sigma_b(\omega) + \frac{db}{dc} \sigma_c} \quad (1.32)$$

For at et dielektrisk materiale skal få påtrykt sann likespenning, må materialet være fullstendig polarisert. Dette kan regnes ut teoretisk med formelen

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho \quad (1.33)$$

Der ρ er motstand per meter [Ω/m] i materialet.

$$R = \frac{U}{I} = \rho \cdot \frac{d}{A} \rightarrow \rho = \frac{A}{d} \cdot \frac{U}{I} \quad (1.34)$$

Selv om det er likespenning som er påtrykt testobjektet, vil det være å regne som VLF inntil frekvensen der testobjektet er fullstendig polarisert. Når materialet er fullstendig polarisert vil kun ledningsevnen bestå som strømførende krets gjennom materialet.

1.11 Tan δ som diagnostiseringsverktøy

Tan δ målinger har to forskjellige aspekter som er relevante å undersøke: først er verdien ved en gitt frekvens og temperatur. Den andre er formen på tan δ kurven ift. frekvens. [10]

1.12 Ionisk konduktivitet

Ionisk konduktivitet er elektrisk konduktivitet som følge av bevegelse av ionisk ladning. Ionisk konduktivitet kan i likhet med elektrisk konduktivitet dekomponeres i tre deler: Ladningsbærer (q), antall partikler per enhet volum (n) og mobiliteten (b)

$$\sigma = qbn \quad (1.35)$$

Ioner har vanligvis mye lavere mobilitet enn elektroner. Ionisk mobilitet er tilnærmet identisk med det elektrokjemiske konseptet ekvivalent konduktivitet (λ_i), som kan utledes med spesifikk konduktivitet, molar konsentrasjon (c_i) og ladningsnummeret (z_i)

$$\lambda_i = \frac{\sigma_i}{|z_i|c_i} = Fb_i \quad (1.36)$$

hvor F er Faradays konstant. Total ionisk konduktivitet er summen av alle frie ioner.

$$\sigma = \sum q_i n_i b_i = \sum |z_i| c_i \lambda_i \quad (1.37)$$

Ionene vil óg kunne være positive og negative.

$$\sigma = e \left(\sum_i q_i^+ n_i^+ b_i^+ + \sum_j q_j^- n_j^- b_j^- \right) \quad (1.38)$$

Om det antas at den ionske delen kun består av ett par positive og ett par negative ioner.

$$AB \rightarrow A^+ + B^- \quad (1.39)$$

$$\sigma = (K_0 n_0)^{1/2} e (b^+ + b^-) \exp\left(-\frac{\Delta W}{2\epsilon_r kT}\right) \quad (1.40)$$

$$j \approx \exp \frac{-(\Delta W/2\epsilon_s + \Delta U^*)}{kT} \sinh \frac{eaE}{2kT} \quad (1.41)$$

[13] [20]

1.13 Temperatur

Temperaturendring kan ha den effekten at det endrer både elektriske og mekaniske egenskaper i et materiale. For et amorf materiale, vil materialet generelt bli mekanisk mykere og elektrisk mer ledende ved økning av temperaturer.

1.13.1 Mekaniske egenskaper

Termoherdende polymerstoffer har to forskjellige tilstander avhengig av temperatur, glass og gummitilstand. Temperaturskille mellom glass og gummitilstand blir benevnt som T_g . [21] Ved hvilken temperatur epoksy endrer tilstand vil være avhengig av hvilken epoksy som er benyttet, samt hvilken temperatur den ble herdet under.

1.13.2 Elektriske egenskaper

Temperatur har den effekten på isolasjon at når temperaturen øker, går motstanden i isolasjonen ned og dermed øker strømmen gjennom isolasjonen. Det varierer ut fra hvilke egenskaper materialet har. En generell forventning til økning av polariseringsstrøm, er omtrent dobling for hver økte $10^\circ C$. [5]

Målt kapasitans vil ikke være temperaturavhengig for materialer benyttet i denne studien. [22]

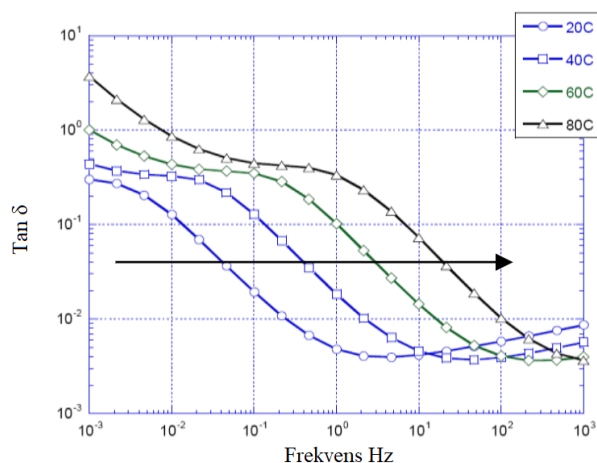
Som nevnt i formel 1.40 vil σ være temperaturavhengig, dermed vil tidskonstant τ endres ved temperatur.

Når et polymermateriale endres fra glass til gummi, vil ikke Arrhenius lov lenger være lineær. Dipolar tidskonstant (τ) avhengig av temperatur vil være

$$\log a_T = \log \frac{\tau T}{\tau T_g} = -\frac{C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g} \quad (1.42)$$

Der C_1 og C_2 er universielle konstanter. [13]

Det er forventet at $\tan \delta$ kurven forflytter seg i frekvensplanet med temperatur, men beholder den samme formen, som vist i figur 1.7. [23]



Figur 1.7: $\tan \delta$ kurven beholder samme form, men forskyver seg ift. frekvensplanet ved temperaturendring [23]

1.14 Ikkelineariteter

Fra tidligere forsøk på generatorstaver fra samme generator har det blitt oppdaget ikkelineariteter ved omtrent 100°C [24] Det kan oppstå ikkelineære effekter i polymerisolasjon, dette kan skyldes at isolasjonen når sin glasstemperatur (T_g). [13]

2 Megger S1-1568

Måleutstyret som blir anvendt til måling av polariseringsstrøm er en Megger S1-1568 isolasjonstester. Den er drevet av eget batteri og kan derfor være helt frakoblet overliggende nett som kan gi interferens i måleresultater. Den kan levere likespenning i intervallet 40V til 1kV med 10V intervaller, i intervallet 1kV til 15kV i 25V intervaller. Den kan måle resistans opp til 35TΩ. Den har en måleusikkerhet vist i Tabell 2.1

15 kV	+5% +20%	3TΩ 30TΩ
10 kV	+5% +20%	2TΩ 20TΩ
5 kV	+5% +20%	1TΩ 10TΩ
2,5 kV	+5% +20%	0,5TΩ 5TΩ
1 kV	+5% +20%	0,2TΩ 2TΩ

Tabell 2.1: Måleusikkerhet Megger S1-1568 [5].

Som vist i Figur 2.1 har Megger S1-1568 tre tilkoblinger; positiv, negativ og guard.



Figur 2.1: Meggeren som blir benyttet i denne studien

2.1 Databehandling

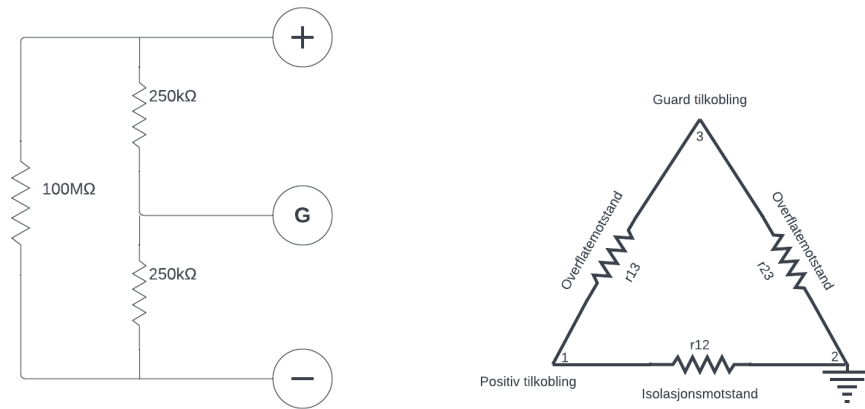
Måleresultatene blir direkte sendt hvert sekund til tilkoblet datamaskin via programmet PowerDB.

2.2 Tester som kan utføres med Megger S1-1568

Isolasjonstesteren har en rekke ulike tester som kan utføres. Testen som er mest relevant for denne studien er DD-Dielectric Discharge. Testen påtrykker en likespenning i en gitt tid og måler oppladningstrømmen i intervaller på ett sekund. Etter gitt tid blir likestrømmen frakoblet og utladningstrømmen måles i gitt tid i ett sekunds intervaller.

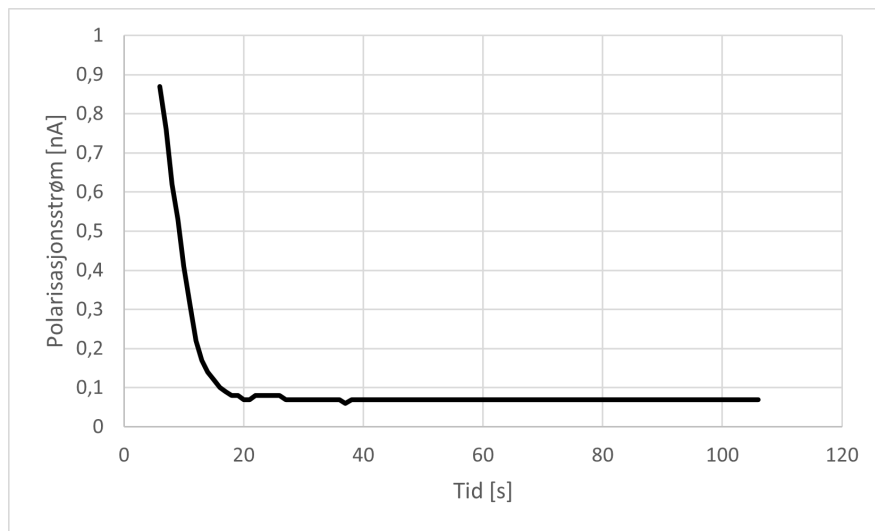
2.3 Guardterminal

Når et dielektrisk materiale blir påtrykt en spenning, vil strømmen ha to mulige veier å gå. Den ene vil være gjennom isolasjonen, og den andre vil være over isolasjonens overflate. Dersom en tredje leder tilkobles vil det være mulig å skille disse strømmene, som vist i figur 2.2.



Figur 2.2: Guardterminal, eksakte verdier på motstander er ikke oppgitt, men størrelsesordenen er lik [5]

2.4 Sensitivitet



Figur 2.3: Måling utført uten tilkoblede måleledninger

Denne målingen antyder at det er polariseringsmekanismer eller filtermekanismer i måleapparatet som er målbare. Verdiene er i en størrelsesorden som ikke påvirker resultatet fra måleobjektet.

3 Måleobjekter

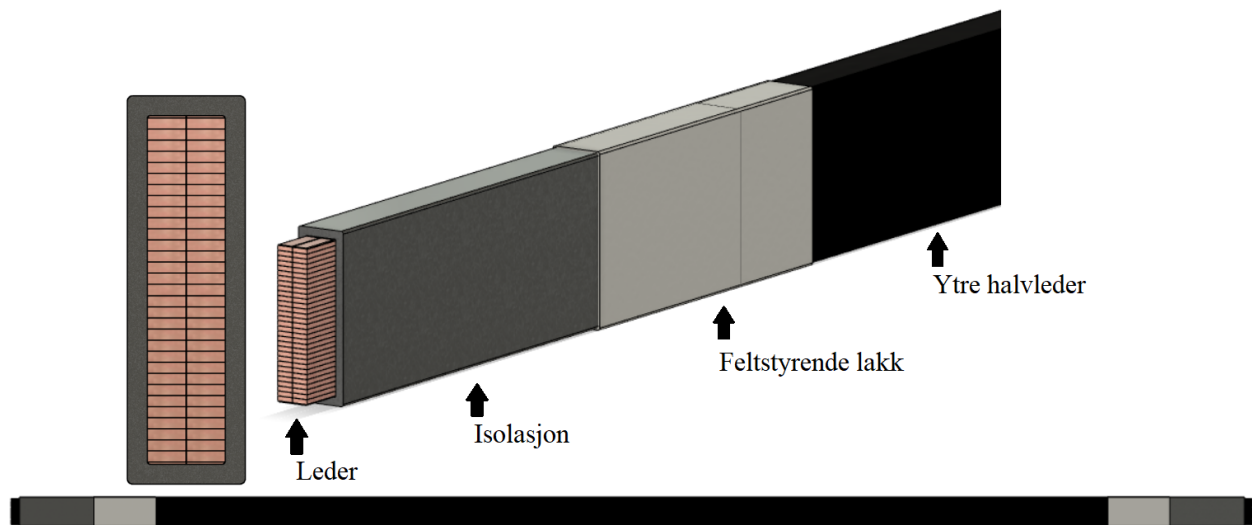
Måleobjektene er fra generator G2 fra Suldal I. Kraftverket drives med francisturbiner og har en fallhøyde på 305m. [25] Generatoren er en internrotor synkrongenerator som ble driftsatt i 1965 og tatt ut av drift i 2017 etter 52 år med strømproduksjon, grunnet bytte til generator med høyere effekt.

Installert effekt	S	95MVA
Antall faser		3
Antall spor	n	192
Nominell driftspenning	U_n	13kV
Fasespenning	U_0	7,5kV
Nominell frekvens	f	50Hz

Tabell 3.1: Spesifikasjoner generator G2 fra Suldal I

3.1 Generatorstav

Generatorstaven består av leder i senter, omringet av en indre halvleder, deretter isolasjon og ytterst en ytre halvleder. Ytre halvleder er terminert med coronabeskyttende lakk.



Figur 3.1: Tverrsnittsutsknitt av generatorstaven som er benyttet i denne studien

3.2 Isolasjon

Isolasjonen består av micadur, en glassfiberarmert micapapirteip infusert med epoksy. [26]

3.2.1 Mica

Mica, på norsk kalt glimmer (også kjent som kråkesølv), er en gruppe silikatmineraler. Glimmer karakteriseres ved at det lett kan spaltes i flere lag [27].

3.2.2 Epoksy

Epoksy er et amorft termoherdende polymer som inneholder epoksid. Epoksidet brukes til å fremkalle syntetiske harpikser, som oftest to-komponent. [28]

3.2.3 Leder

Lederen består av 64 isolerte kobberkordeler.

3.2.4 Feltstyrende lakk

Den feltstyrende lakken er en SiC-basert lakk (CoronaShield® P 8001)

3.3 Dimensjoner

Isolasjonsarealet blir:

$$A = \frac{O_{\text{isolasjon}} + O_{\text{leder}}}{2} \cdot l$$
$$A = \frac{(0,07m \cdot 2 + 0,021m \cdot 2) + (0,063m \cdot 2 + 0,014m \cdot 2)}{2} \cdot 1,5m = 0,252m^2$$

3.4 Generatorstaver fra generator G2 fra Suldal 1

Måleobjektene er kodet med hvor i generatoren de har ligget. Første bokstav er betegnelsen på om det er en over- eller undervikling. Tallet er hvilket spor de har ligget i. Siste bokstaven er hvilken fase den har vært tilkoblet. Eksempelvis er O84R, en overstav som har ligget i spor 84 tilkoblet rød(L3) fase. [24] PDIV (partiell utladning start spenning) er funnet til omtrent $0,8U_0 = 6kV_{RMS}$ ved 50Hz i tidligere forsøk, på generatorstaver fra samme generator. [29]

3.4.1 O84R

2,733nF ved 1kHz i måleobjekt O84R.

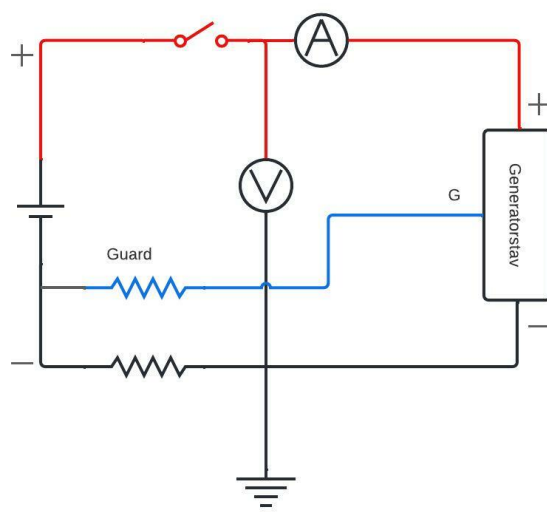
$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$
$$\epsilon_r = \frac{C_0 \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} = \frac{2,733nF \cdot 3,5mm}{8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 0,252m^2} = 4,29$$

4 Metode

Metoden brukt i denne studien er utarbeidet i forprosjektet [7], og tatt med videre under utførelse av masteroppgaven. For nøyere beskrivelse av oppkobling og bruk av utstyr benyttet i denne oppgaven se vedlegg A

4.1 Oppkobling

I Megger S1-1568 tilsvarende 1 positiv kobling, 2 negativ kobling og 3 Guard kobling. [5] I forprosjektet til denne studien ble det etablert at positiv måleledning må forlegges slik at isolasjonen ikke har kontakt med jord.[7] Det må også sørges for at hver individuelle kordell i lederen har kontakt med positiv måleledning, dette verifiseres med et multimeter. Enlinjeskjema for oppkobling er vist i figur 4.1



Figur 4.1: Målekrets for isolasjonstesting av generatorstaver

4.2 Depolariseringstid

Tidligere studier har vist at det krever 10 ganger polariseringstid i depolarisering for å få repeterbare målinger. Målingene skal utføres fra laveste spenning til høyeste med mindre måleobjektet har hatt minimum 12 timer depolariseringstid. [7]

4.3 Omgivelsestemperaturendring

Temperaturen på måleobjektet skal justeres. Dette gjøres med et varmeskap tidligere konstruert for Sintef på NTNU til et tidligere prosjekt. Varmeskapet kan gi temperaturer opp til 230°C . Varmeskapet har automatisk styring av varme, samt en variac som justerer spenningen over varmeelementet.

4.3.1 Ventetid

For å forsikre seg om at måleobjektet har uniform temperatur, ventes det minimum 3 timer fra ønsket temperatur er oppnådd, til måleobjektet blir spenningsatt.

4.3.2 Temperaturmåling

Temperaturen blir verifisert med et termoelement. Det er av typen Amprobe TMD-50 Thermocouple Thermometer K Type. Termoelementet er montert så nært generatorstaven som praktisk lar seg gjøre.

4.4 Kapasitansmåling

Kapasitansen i måleobjektene blir målt med en kapasitansmåler. Måleren er av typen Keysight U1733C. Kapasitansmåling blir utført med en frekvens på 1kHz. Det ble målt frekvens ved 20°C og ved 130°C

4.5 Spenningsnivå

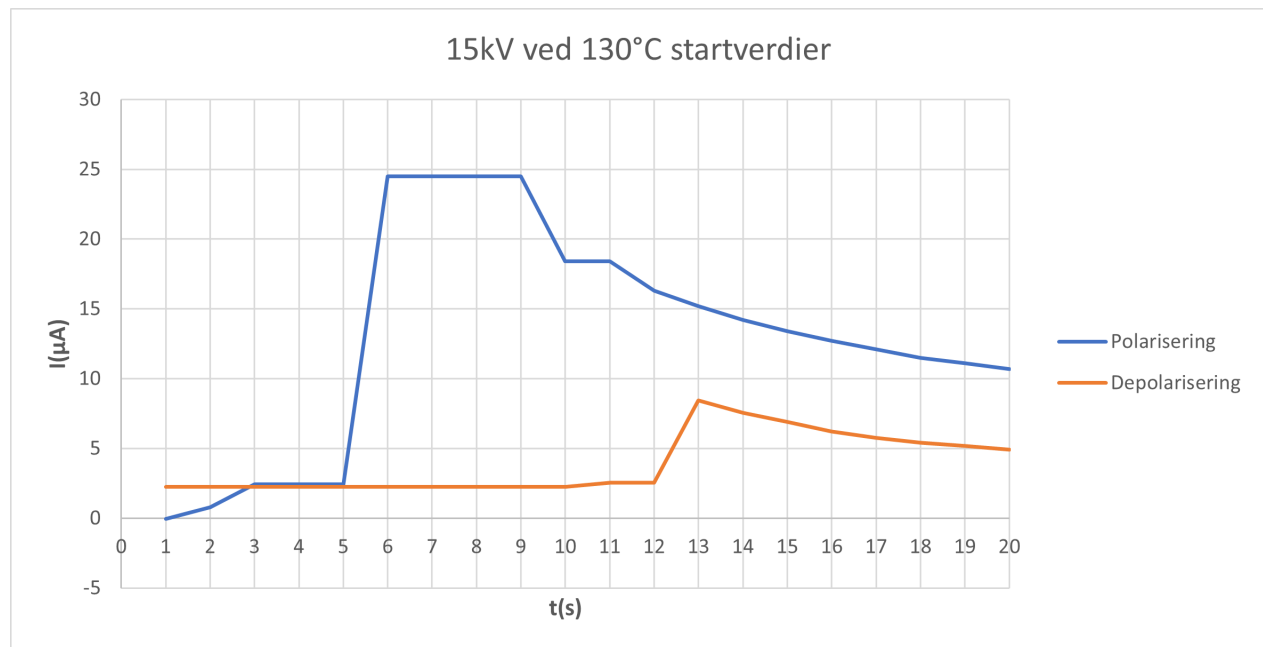
Maksimal testspenning med likespenning ihht. Megger-manualen er definert i tabell 4.1. Vekselspenningstesten er tiltenkt som en fabrikktest, før generatoren settes i drift. [5].

AC	$2 \cdot U_n + 1kV$	27kV
DC	$0,6 \cdot AC \cdot 1,6$	25,92 kV

Tabell 4.1: Maksspenning for tester

4.6 Tiltak som må gjennomføres ved anvendelse av Megger S1-1568 til dielektrisk respons måling

Resultatene fra de første 5 målte sekundene har ustabil spenning, og kan derfor ikke benyttes. Den ustabile spenningen skaper muligens feil, dette vil for resultatene i denne studien være neglisjérbart. [7] I denne studien har det også kommet frem et problem ved bruk av Megger S1-1568. Ved høy temperatur overstiger polariseringsstrømmen målbart område og må derfor enkelte sees bort fra. Dette fremkommer som flate vannrette strømverdier ihht. tidsplanet og er vist i figur 4.2 mellom $t=6$ og $t=9$, samt mellom $t=10$ og $t=11$. Depolariseringsstrømmen er heller ikke som forventet før etter $t=13$.



Figur 4.2: De første 20 sekundene polarisering og depolarisering

Det må tas forbehold om at måleobjektet har god nok ledningsevne til å lede tilstrekkelig strøm til å få pålitelige målinger. I forprosjektet ble det etablert at Megger S1-1568 gir pålitelige målinger ned til 1nA.

4.7 Termisk analyse

Det er utført en termisk analyse av isolasjonsmaterialet ved å benytte DSC(Differensialskanningskalorimetri) [30] hos Sintef Energy lab. Prøvematerialet ble hentet fra generatorstav O162B, som har blitt utsatt for gjennomslagstest tidligere [31]. Prøvematerialet besto av to sirkulære flak av isolasjonen med en diameter på 6mm og en samlet vekt på 4mg, hentet fra enden lengst mulig unna gjennomslagspunktet. Prøveobjektet ble deretter analysert fra $30^{\circ}C$ til $200^{\circ}C$ med en temperaturøkning på $10^{\circ}C$ per minutt

4.8 Databehandling

Fra PowerDB eksporteres lagrede resultater i .csv-format. Resultatene databehandles deretter i Microsoft Excel 2016. Resultatene fra Megger S1-1568 er i tidsplanet og for å konvertere resultatene til frekvensplanet blir det benyttet Hamon approksimasjon. Bruk av CVS eller Cole-Cole-plot vil gi et mer nøyaktig resultat, enn Hamon approksimasjon, men for anvendelsen i studien er forskjellene neglisjerbare.

4.9 Plan for målinger

Det måles kun på en generatorstav for å få analysen av denne så grundig så mulig. Det skal måles ved 20°C , 40°C , 60°C , 90°C og 130°C . Dette er temperaturer som tidligere har blitt undersøkt på generatorstaver fra samme generator [32]. Der det er testet med påtrykt HVAC. Det skal måles ved $0,1\hat{U}_0 = 1,06\text{kV}$, $0,2\hat{U}_0 = 2,12\text{kV}$, $0,4\hat{U}_0 = 4,25\text{kV}$, $0,8\hat{U}_0 = 8,5\text{kV}$, $\hat{U}_0 = 10,6\text{kV}$ og $1,41\hat{U}_0 = 15\text{kV}$ ved hver temperatur. Det blir testet 17 minutter polarisering og målt 17 minutter depolarisering. Dette gir en frekvens på 10^{-4}Hz . Megger S1-1586 har ikke mulighet til å måle til 10^{-5}Hz . Temperaturavvik fra tiltenkt temperatur $< 2^{\circ}\text{C}$, og avvik mellom målinger ved lik temperatur $< 0,5^{\circ}\text{C}$. Målet for målingene er å finne tapsfaktor $\tan \delta$ ved forskjellig spenning og temperatur, samt undersøke om det finnes ikkelineariteter.

4.9.1 Målinger utover planen

Etter de initielle målingene ble gjennomført, ble det oppdaget resultater som tilsynelatende kunne tolkes som spennings- og temperaturavhengige ikkelineariteter.

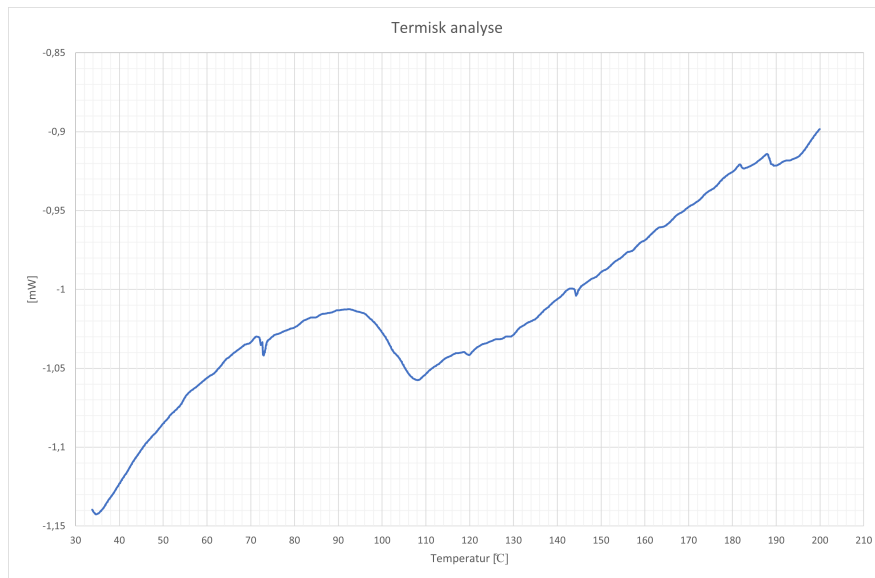
For å undersøke nøyere temperaturavhengighet ble det målt fra 20°C til 100°C med 10°C intervaller ved $\hat{U}_0 = 10,6\text{kV}$, utført til 10^{-4}Hz .

For å undersøke nøyere spenningsavhengighet ble det utført målinger ved 40°C fra 5kV til 14kV med 1kV intervaller. Disse målingene ble utført til 10^{-3}Hz . Samt en temperaturvariasjon $< 0,1^{\circ}\text{C}$.

5 Resultater og diskusjon

5.1 Termisk analyse

Resultatene fra DSC termisk analyse er vist i figur 5.1.

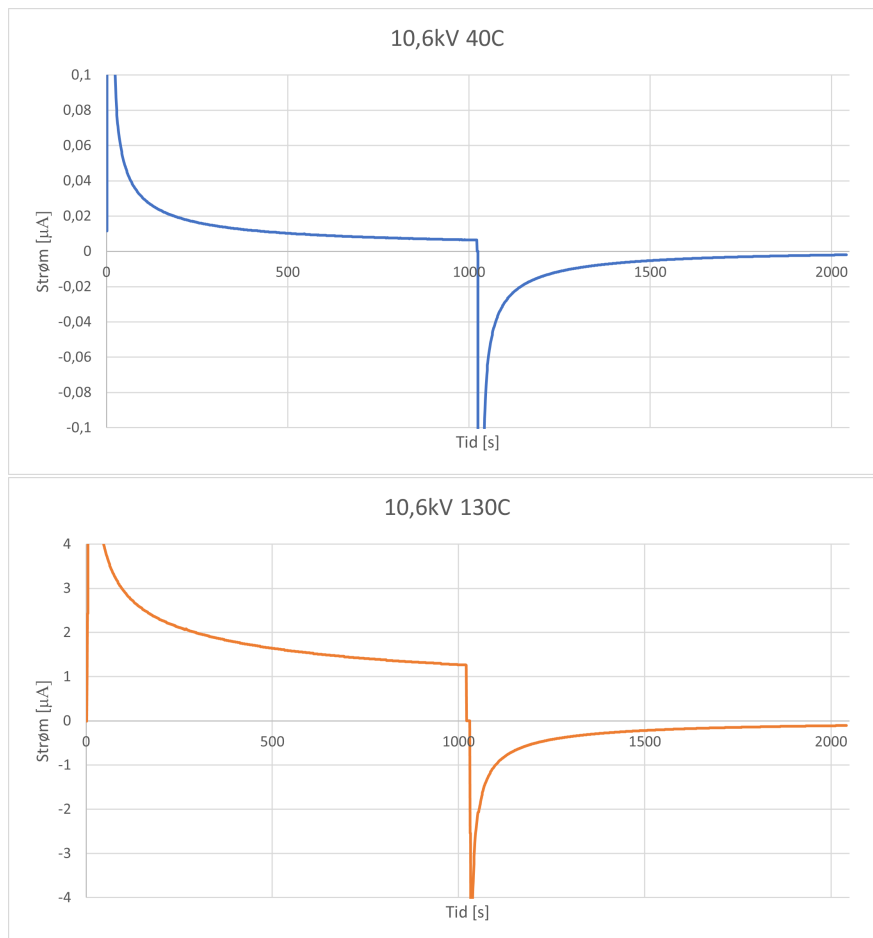


Figur 5.1: Resultater fra termisk analyse DSC(Differensialskanningskalorimetri)

Resultatene indikerer at glasstemperatur T_g inntreffer mellom $92,3^{\circ}\text{C}$ og $108,1^{\circ}\text{C}$. Endringen som inntreffer mellom 71°C og 72°C kan skyldes økt ionisk konduktivitet, men det kan ikke med stor grad av sikkerhet utelukke ukjente faktorer.

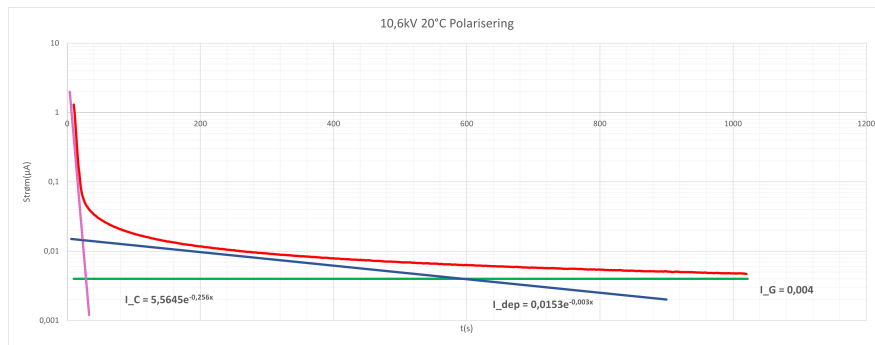
5.2 Polariseringsstrøm

Polariseringsstrømmen er det ubehandlede resultatet testen gir.



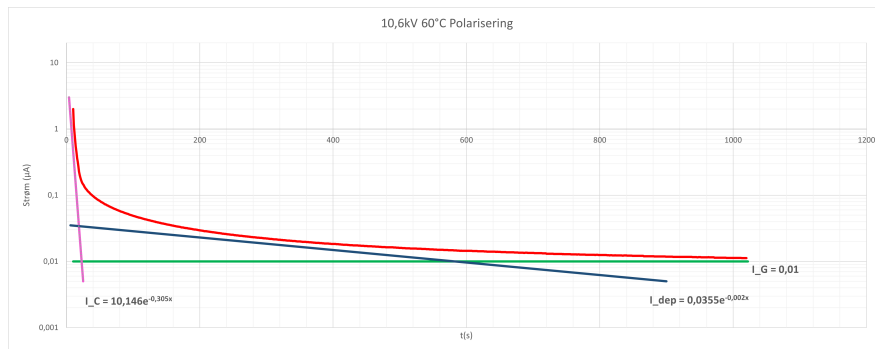
Figur 5.2: Polariseringsstrømmen ved 130°C sammenlignet med 40°C er formen lik, men størrelsesordenen svært forskjellig. Megger S1-1568 tar ikke høyde for polaritet av strømmen, så for visuell fremstilling er depolariseringsstrømmen gjort negativ.

Figur 5.2 viser polariseringsstrømmen der to polariseringsmekanismer og konduktivitet er illustrert som tre forskjellige komponenter, som vist i figur 1.3.



Figur 5.3: Polariseringsstrøm 10,6kV ved 20°C

Det er forventet at formen på denne kurven også gjelder ved 60°C

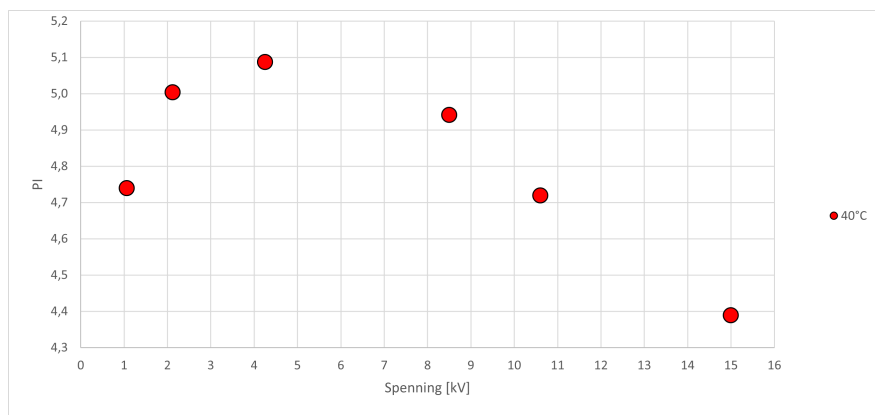


Figur 5.4: Polariseringsstrøm 10,6kV ved 60°C

Kurvetilpasningen antyder at måleobjektet blir fullstendig polarisert ved høyere frekvens ved økt temperatur.

5.3 Polarisasjonsindeks

Polarisasjonsindeks er en indeks som benytter dielektrisk respons til å determinere aldring av isolasjon. Grenseverdiene for diagnostisering er satt i tabell 1.1.

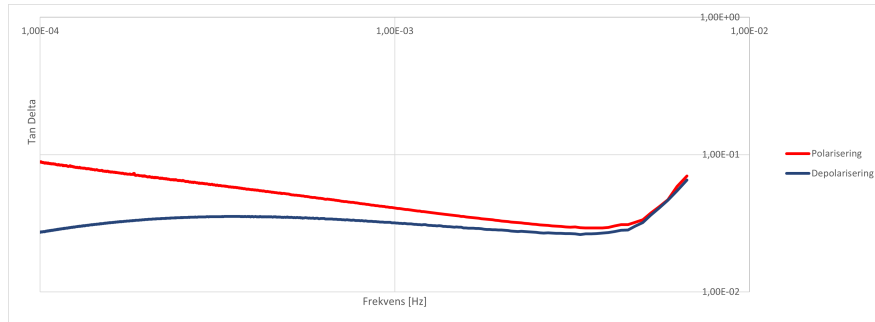


Figur 5.5: Polarisasjonsindeks ved 40°C utført med forskjellige spenninger

PI-testen vist i figur 5.5, indikerer at isolasjonen er i utmerket stand.

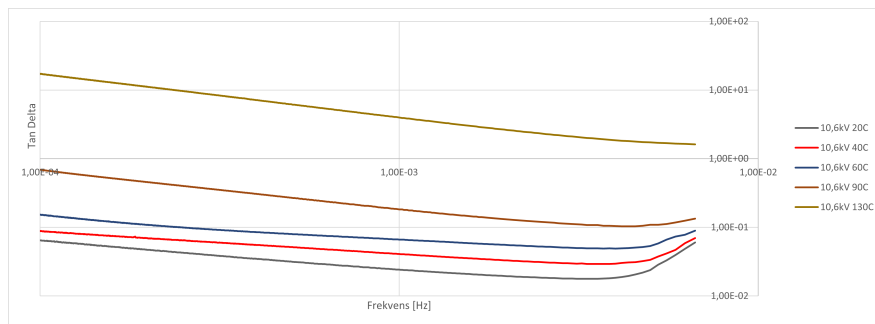
5.4 Tapsfaktor $\tan \delta$

Tan δ blir estimert ved å benytte Hamon approksimasjon. Det kan benyttes både polariserings- og depolariseringsstrøm til estimeringen. Vist i figur 5.6 er det en tydelig frekvensavhengighet til tan δ verdien. Det skal óg nevnes at det er et signifikant avvik ved lave frekvenser om tan δ estimeres med polariserings- eller depolariseringsstrømmen.



Figur 5.6: $\tan \delta$ mot frekvens, målt med $U_0 = 10,6kV$ ved $40^\circ C$

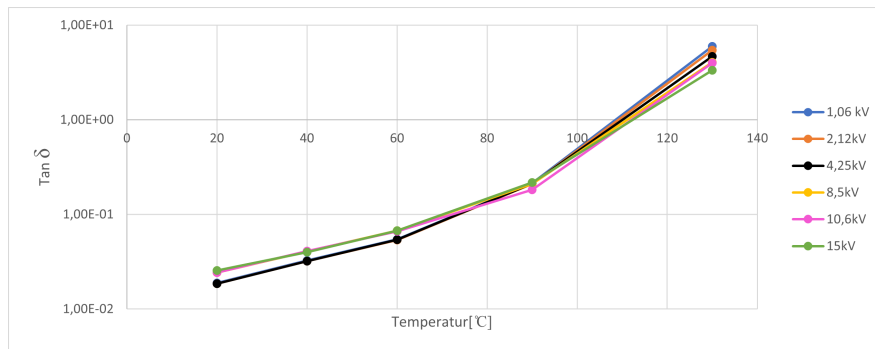
Grunnet dette avviket, samt at tidligere studier anbefaler å benytte polariseringsstrømmen til estimering. Blir kun polariseringsstrømmen benyttet heretter til estimering av tan δ .



Figur 5.7: $\tan \delta$ mot frekvens

Figur 5.7 viser at formen til tan δ formen til kurven beholdes, og forskyves ved økt temperatur, som vist i figur 1.7.

Som forventet er det økning i tan δ ved økt temperatur vist i figur 5.8

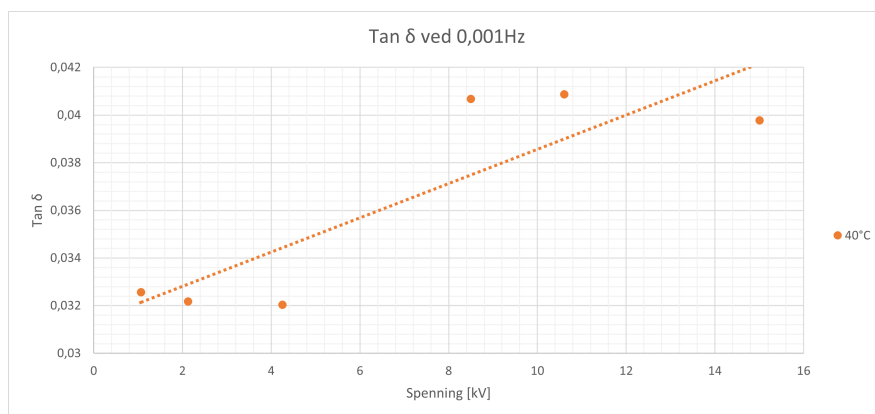


Figur 5.8: *Tan δ mot temperatur*

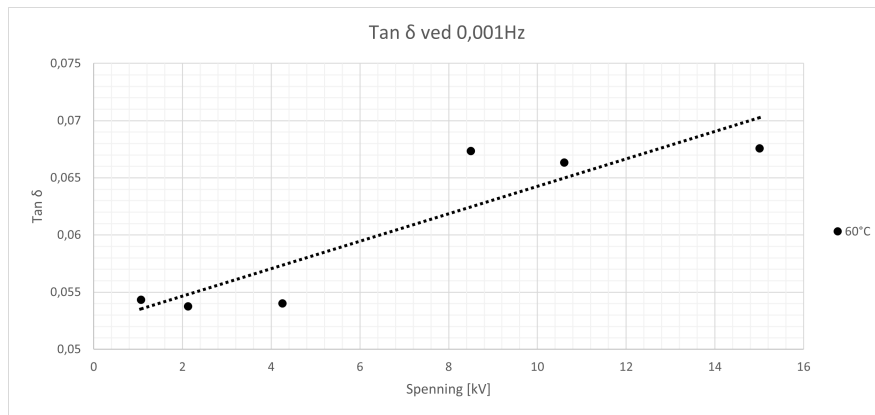
Som presentert i kapittel 1.6 forventes noe spenningsavhengighet av tan δ verdien, og det er forventet at det fremstår som en svak lineær økning av tan δ ved økning av påtrykt spenning.



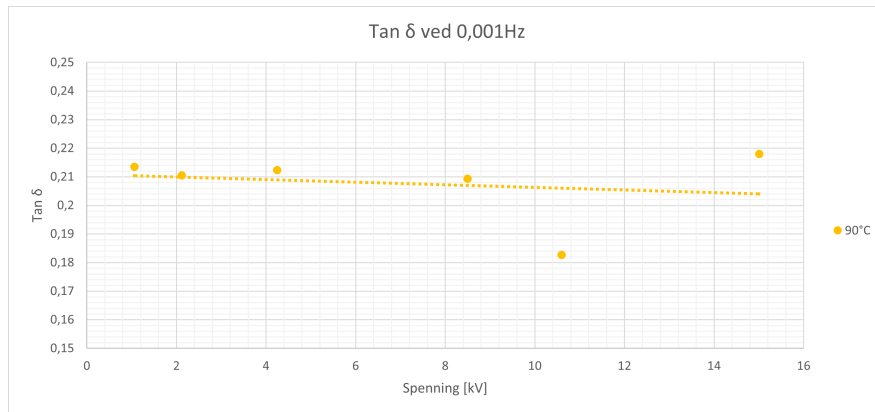
Figur 5.9: *Tan δ mot spenning ved 20°C*



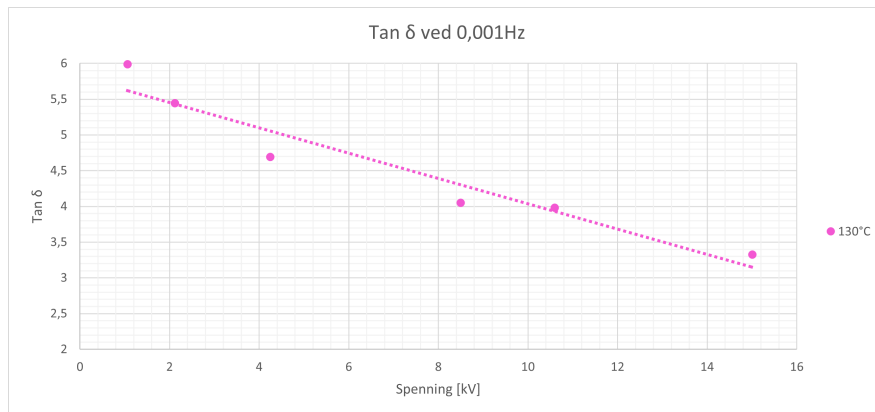
Figur 5.10: *Tan δ mot spenning ved 40°C*



Figur 5.11: $\tan \delta$ mot spenning ved 60°C



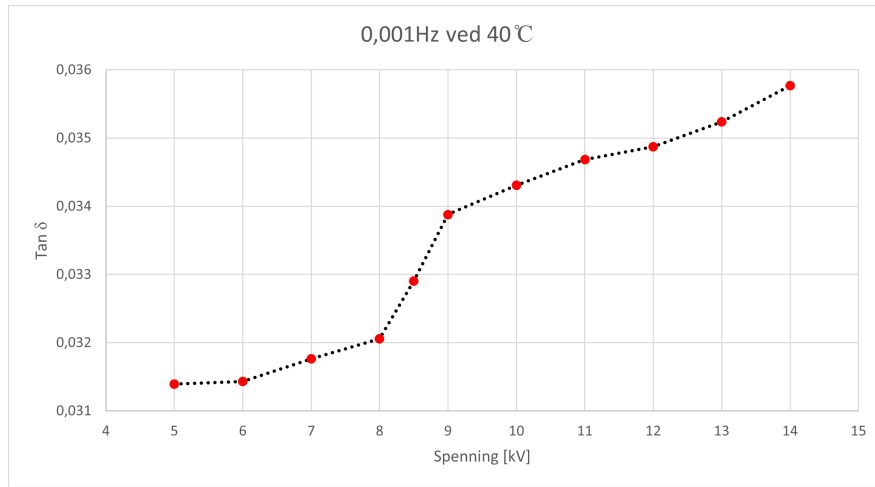
Figur 5.12: $\tan \delta$ mot spenning ved 90°C



Figur 5.13: $\tan \delta$ mot spenning ved 130°C

Når man ser på én temperatur av gangen, kommer det frem en markant økning ved 4,25kV og 8,5kV som vist i figur 5.10. Denne effekten avtar tilsynelatende på et punkt mellom 60°C og 90°C.

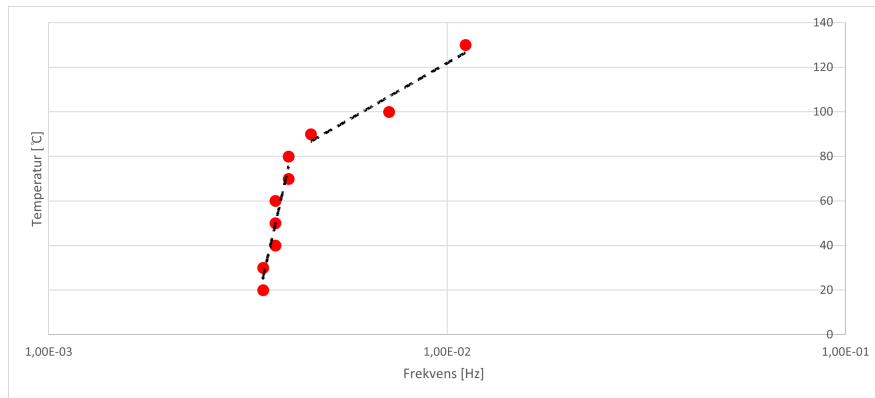
Spenningsavhengigheten har en økning mellom 4,25 og 8,5kV, hvorvidt dette skyldes en temperaturøkning eller en faktisk spenningsavhengighet undersøkes ved målinger til $10^{-3}Hz$ og $40^{\circ}C$, fra 5kV til 14kV med 1kV økning. En markant økning i $\tan \delta$ verdi som avtar vil indikere en ikke-lineær spenningsavhengighet.



Figur 5.14: Spenningsavhengighet

Endringen i dielektrisk respons mellom $0,75\hat{U}_0 = 8kV$ og $0,85\hat{U}_0 = 9kV$ ved $40^{\circ}C$, kan muligens ha sammenheng med PDIV funnet i tidligere studier på generatorstaver fra samme generator [32]. Der PDIV ble funnet på $0,8U_0 = 6kV$.

Figur 5.15 viser at minimumsverdien til $\tan \delta$ forflytter seg mot høyere frekvens ved økt temperatur.

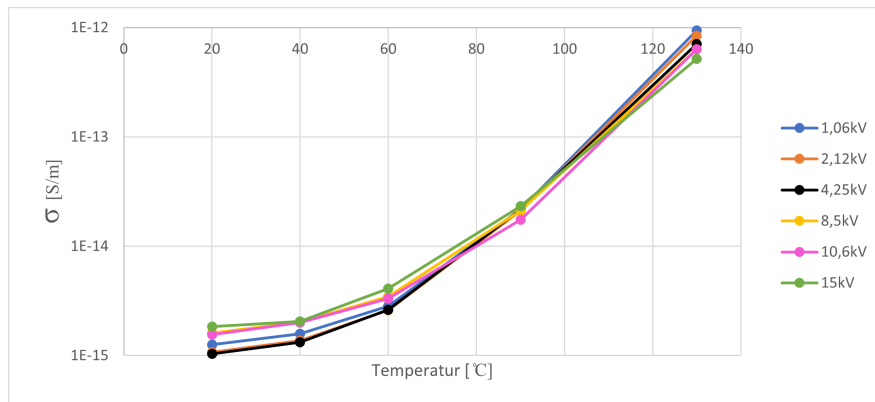


Figur 5.15: Frekvens for $\tan \delta$ minimumsverdi ved temperaturer fra $20^{\circ}C$ til $130^{\circ}C$

Minimumsverdien til $\tan \delta$ er interessant fordi den sier noe om materialets evne til å orientere dipolene med det påtrykte elektriske feltet.

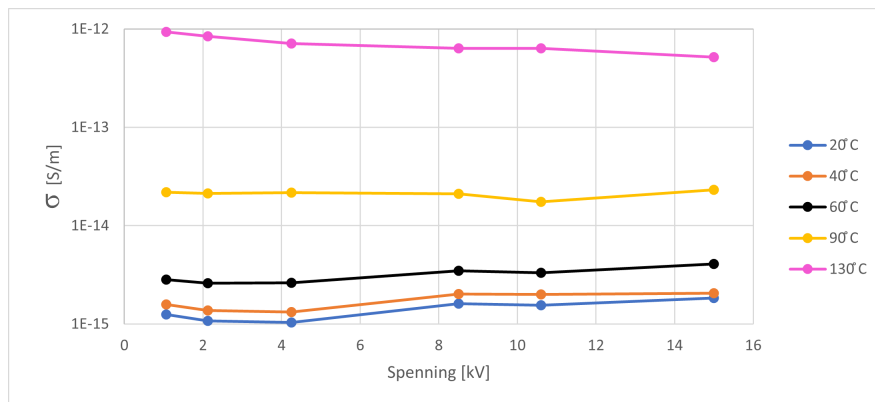
5.5 Ledningsevne σ

Ledningsevnen relaterer direkte til hvor isolerende en isolasjon er; jo lavere ledningsevne, jo bedre isoleringsegenskaper. Fra målinger utført ved 0,01Hz er det tydelig at σ er temperaturavhengig, som vist i figur 5.16



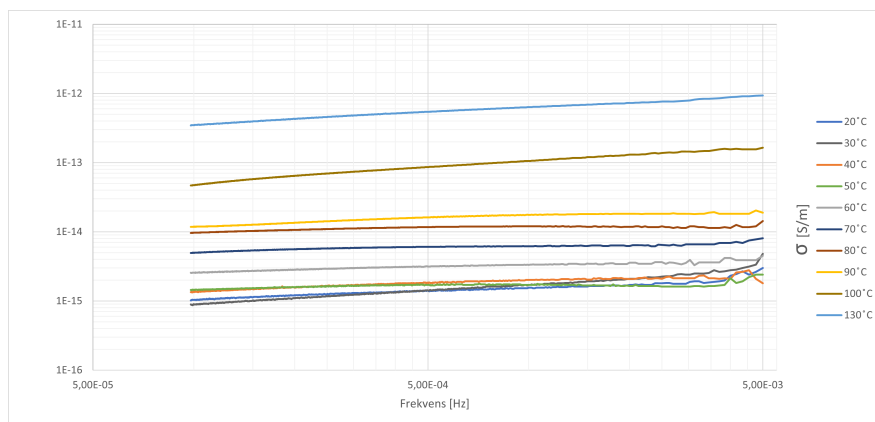
Figur 5.16: Ledningsevne σ mot temperatur

Spenningsavhengigheten til σ viser samme tendenser som $\tan \delta$



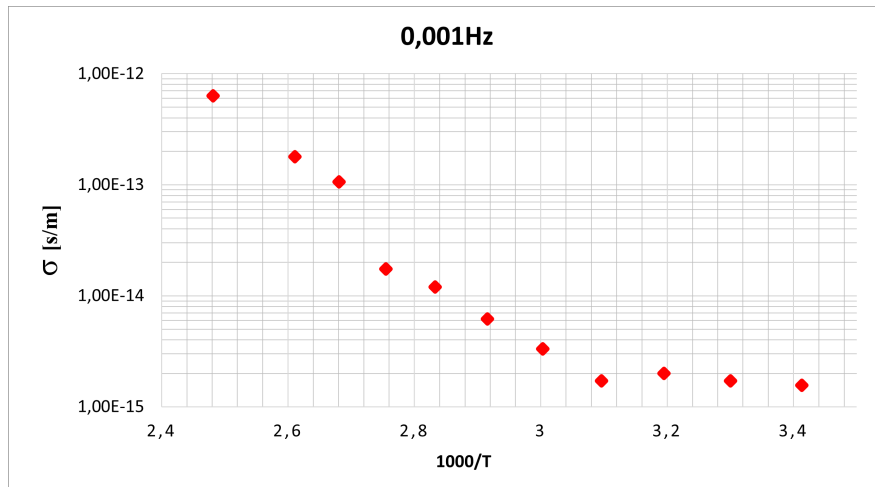
Figur 5.17: Spenning mot σ ved forskjellige temperaturer

σ målt mellom $5 \cdot 10^{-3} Hz$ og $1 \cdot 10^{-4} Hz$, ved 10,6kV og forskjellige temperaturer vist i figur 5.18. Tyder på lav grad av frekvensavhengighet, ved samtlige temperaturer.



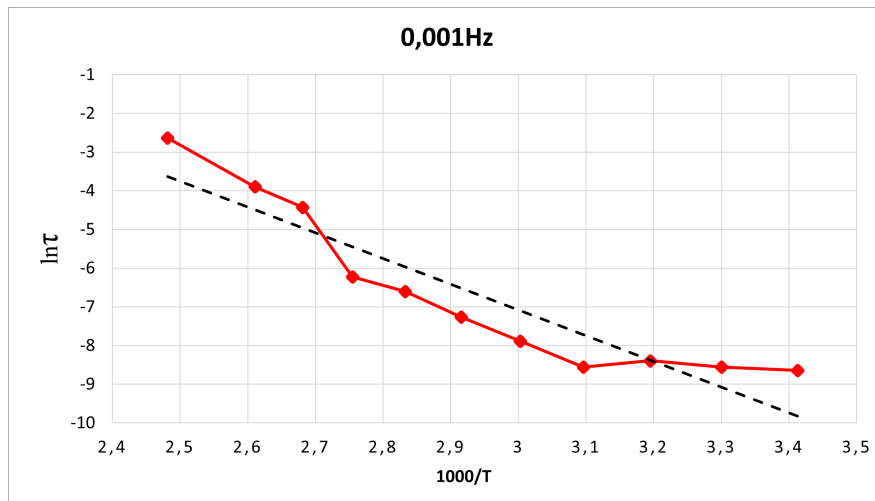
Figur 5.18: Ledningsevne σ mot frekvens, ved forskjellig temperatur, samtlige målinger utført med 10,6kV

Et Arrhenius-plott blir benyttet for å undersøke om det finnes en ikkelineær endring i ledningsevne (t_G). Målingene er utført ved å påtrykke 10,6kV i 10°C intervaller



Figur 5.19: Arrhenius-plott ledningsevne σ mot $1000/T$

Arrhenius-plottet gir indikasjoner på at noe skjer med ledningsevnen til isolasjonen ved omtrent 70°C. For å undersøke om Arrhenius' ligning er lineær, plottes $\ln\tau$ mot $1000/T$, en endring i stigning vil indikere at materialet endrer tilstand fra glass til gummi.



Figur 5.20: Linearitet Arrhenius lov

Konklusjon

Megger S1-1568 er egnet til å utføre målinger av $\tan \delta$, med visse forbehold. I praksis vil det være krevende å benytte seg av metoden brukt i denne studien, men gjennomførbart. Ettersom resultatene er svært temperaturavhengige, vil det kreves uniform temperatur i måleobjektet, samt at måleobjektet har stått frakoblet lenge nok til å være helt depolarisert. Det krever óg tiltak ved forlegning av måleledninger, som er relativt simpelt i et laboratorie. Hadde Megger S1-1568 hatt skjermede måleledninger og temperaturmåling, hadde den vært mer egnet til å utføre pålitelige dielektrisk respons måling.

Det oppstår frekvensavhengige ikkelineariteter ved omtrent 90°C , dette baseres på frekvens for minimumsverdien i $\tan \delta$ kurven. Dette fenomenet skyldes at isolasjonsmaterialet endrer seg fra glass- til gummitilstand, noe som blir bekreftet av den termiske analysen.

Arrhenius-plottet $\ln \tau$ og $\log \sigma$ mot $1000/T$ viser en tydelig endring i ledningsevne og dielektrisk tidskonstant ved omtrent 70°C og 100°C .

Det er en ikkelineær spenningsavhengighet mellom $0,75\hat{U}_0 = 8\text{Kv}$ og $0,85\hat{U}_0 = 9\text{Kv}$ ved 40°C . Basert på de utførte målingene er det rimelig å anta at denne ikkelineariteten gjelder fra 20°C til 60°C og avtar et sted mellom 60°C og 90°C .

Polarisasjonsindeksen tilsier at isolasjonen er i utmerket stand.

Tan δ verdi som diagnostiseringsparameter er ikke spesielt egnet uten å ha et velegnet sammenligningsgrunnlag. Dersom $\tan \delta$ benyttes som diagnostisering av aldring må verdien sammenlignes med verdien da isolasjonen var ny, og dersom verdien benyttes til sammenligning er det kritisk at temperatur og målefrekvens ved måling er identisk. Tan δ verdien har såpass mange variabler at klare grenseverdier ikke lar seg etablere. Dersom spenningsavhengigheten til $\tan \delta$ kan benyttes for å finne PDIV vil dielektrisk respons analyse være meget aktuelt, det kan ikke fastslås med stor grad av sikkerhet at ukjente faktorer ikke er skyld i fenomenet.

Referanser

- [1] C. Drefvelin, *Gamle generatorer gir gygne tider for leverandørene*, May 26. [Online]. Available: <https://www.tu.no/artikler/gamle-generatorer-gir-gygne-tider-for-leverandorene/235500>.
- [2] CIGRÉ WG A1.10, *Survey of hydrogenerator failures*, No. 392, 2009.
- [3] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. McGraw-Hill, 2012.
- [4] D. Hummes, A. Hussain, B. Fruth, and C. Caironi, “Advanced condition based diagnostics of high voltage generators and motors,” in *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2018, pp. 333–337. DOI: 10.1109/PECON.2018.8684168.
- [5] Megger, *S1-568, s1-1068, s1-1568 insulation resistance testers*, 2012.
- [6] “Ieee recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery,” *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, pp. 1–37, 2014. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6754111.
- [7] N. Brodin, “Måling av dissipasjonsfaktor $\tan \delta$ med megger s1-1568 til diagnostikk av generatorstaver,” Dec. 2021.
- [8] P. Morshuis, “Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: Some thoughts on progress made and where to go now,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, pp. 905–913, 2005. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522185.
- [9] T. Saha, P. Purkait, and F. Muller, “Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, Feb. 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835436.
- [10] N. Pattanadech, P. Nimsanong, and T. Worthong, “Application of polarization and depolarization current measurement for rotating machine insulation analysis,” in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2021, pp. 034–038. DOI: 10.1109/ICHV EPS53178.2021.9601087.
- [11] Q. Xu, F. Lin, H. Li, X. Tao, and C. Jin, “Acquiring polarization and depolarization current with less interference by translating dielectric response from frequency to time domain,” in *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2018, pp. 326–329. DOI: 10.1109/CEIDP.2018.8544873.
- [12] A. K. Jonscher, *Dielectric relaxation in solids*, eng, London, 1983.
- [13] A. R. Blythe, T. Blythe, D. Bloor, *et al.*, *Electrical properties of polymers*. Cambridge university press, 2005.
- [14] P. J. W. Debye, *The collected papers of Peter J. W. Debye*. New York, Interscience Publishers, 1954.
- [15] F. Petzold *et al.*, “Suitability of hamon approximation for dielectric condition assessment on electric power assets with high capacitance,” *44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems 2012*, Jan. 2012.
- [16] Y. Kita and N. Koizumi, “Remarks on the hamon approximation,” *Advances in Molecular Relaxation Processes*, vol. 7, no. 1, pp. 13–20, 1975, ISSN: 0001-8716. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-8716\(75\)80011-3](https://doi.org/10.1016/0001-8716(75)80011-3). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001871675800113>.
- [17] J.-F. Drapeau and J. Hernandez, “Measurement of cable system losses using time domain and vlf techniques,” Oct. 2008.
- [18] T. Aakre, E. Ildstad, and S. Hvidsten, “Condition assessment of hydrogenerator stator bar insulation using partial discharge measurements,” Jun. 2018, pp. 357–360. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481078.
- [19] T. G. Aakre, “Partial discharges in voids at variable voltage frequency and temperature diagnostic testing of stator mainwall insulation,” Ph.D. dissertation, May 2020.
- [20] A. Geoffery and J. C. Bevington, *Comprehensive Polymer Science and Supplements*. Pergamon; 2nd edition, 1996.
- [21] R. J. Crawford and J. L. Throne, *ROTATIONAL MOLDING POLYMERS*. William Andrew, 2002.
- [22] S. J. Dodd, N. M. Chalashkanov, J. C. Fothergill, and L. A. Dissado, “Influence of the temperature on the dielectric properties of epoxy resins,” in *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICSD.2010.5567945.

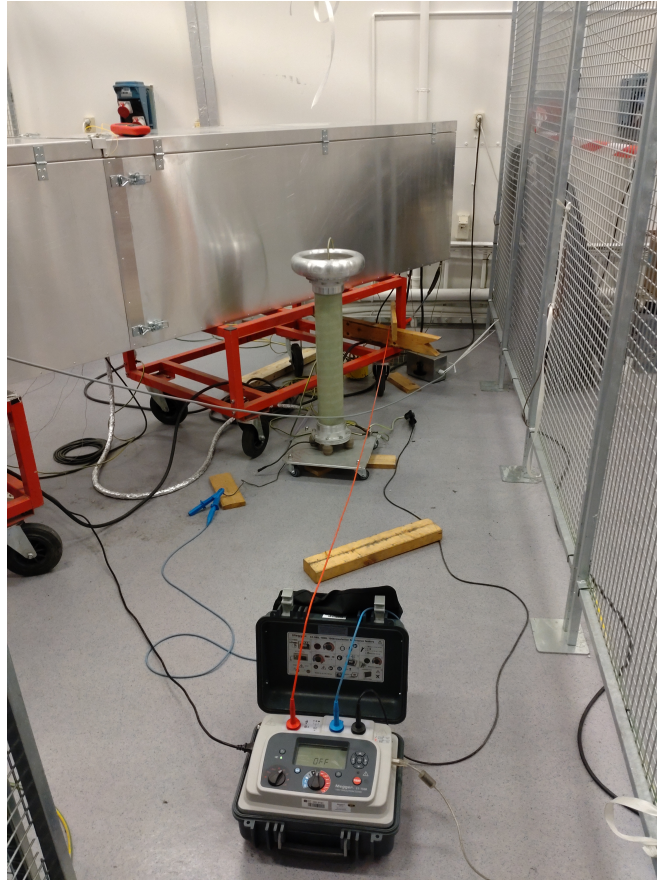
- [23] J. Cheng, P. Werelius, and T. Nathaniel, “Temperature influence on dielectric response of rotating machine insulation and its correction,” Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5324/nordis.v0i26.3295>.
- [24] G. Berg-Karlsen, E. Eberg, T. G. Aakre, E. Ildstad, E. Kantar, and A. Nyseveen, “Hydrostator hovedfunn og resultater i kpn hydrostator,” Sintef, Mar. 2022.
- [25] K. A. Rosvold, *Suldal i kraftverk i store norske leksikon på snl.no*, Mar. 24. [Online]. Available: https://snl.no/Suldal_I_kraftverk.
- [26] R. H. Schuler, “Experience with micadur® synthetic-resin insulation for stator windings of high voltage rotating machines,” in *1967 Seventh Electrical Insulation Conference*, 1967, pp. 61–64. DOI: 10.1109/EIC.1967.7468758.
- [27] G. Raade and R. S. Selbekk, *Glimmer i store norske leksikon på snl.no*, Apr. 7. [Online]. Available: <https://snl.no/glimmer>.
- [28] N. Nesse, *Epoksyharpikser i store norske leksikon på snl.no*, Apr. 8. [Online]. Available: <https://snl.no/epoksyharpikser>.
- [29] T. G. Aakre, E. Ildstad, and S. Hvidsten, “Partial discharge inception voltage of voids enclosed in epoxy/mica versus voltage frequency and temperature,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 214–221, 2020. DOI: 10.1109/TDEI.2019.008394.
- [30] Wikipedia contributors, *Differential scanning calorimetry — Wikipedia, the free encyclopedia*, [Online; accessed 16-May-2022], 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Differential_scanning_calorimetry&oldid=1086548937.
- [31] T. Aakre and E. Ildstad, “Ac breakdown voltage of 50-year-old service aged hydro power generator stator bars,” 2022.
- [32] E. Eberg, T. G. Aakre, G. Berg, and S. Hvidsten, “Comparison of offline vlf pd measurements and online pd measurements on a 50-year-old hydrogenerator stator in norway,” 2018. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481080.

Vedlegg

A Oppkobling

Dette vedlegget inneholder bilder med forklaring av oppkobling og utstyr brukt til laboratorieforsøk.

Varmeskap



Figur .21: *Testcelle oppkoblet*



Figur .22: Styring av varmeskap

Varmeskapet har automatisk styring av varme, og utkobling ved overtemperatur. Det er forskjellig temperatursensor for overtemperatur og temperatursensor for varmestyring.



Figur .23: Innsiden av varmeskapet, generatorstav oppkoblet

Kobling

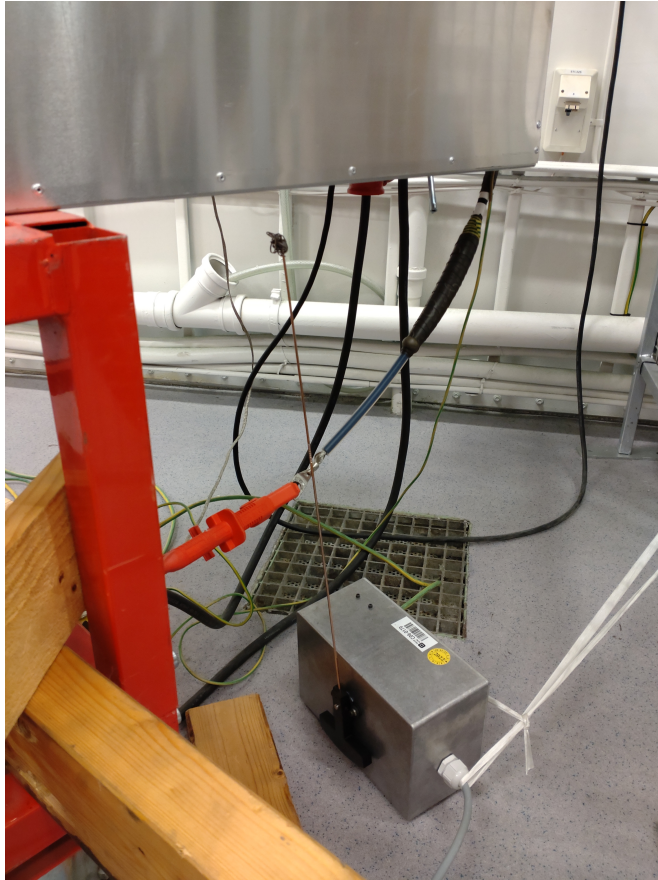


Figur .24: Koblinger inne i varmeskapet. F.V. Positiv kobling mot leder, negativ kobling mot ytrehalvleder, guard tilkobling



Figur .25: Gjennomføring positiv leder

Skapet er konstruert med egen gjennomføring, denne tåler varmen tiltenkt for studien.



Figur .26: Positivkobling på utsiden av varmeskap, og automatisk jordkniv

Automatisk jordkniv ble benyttet for økt sikkerhet ved forsøk. Koblingen er forlagt slik at isolasjonen på positiv leder ikke har forbindelse med jord.

Termoelement



Figur .27: Termoelement med tilhørende multimeter

Termoelementet blir brukt for å verifisere temperatur, i denne studien har det vært noe avvik mellom temperaturverdi på styreskapet og temperaturverdi fra termoelementet, størst avvik på høye temperaturer.

