

Eerste ervaring met akoestische beeldvorming van deelontladingen bij hoogspanningsapparatuur

Greg C. Stone

Iris Power Qualitrol
Mississauga, Canada
gstone@qualitrolcorp.com

Mladen Sasic

Iris Power Qualitrol
Mississauga, Canada
msasic@qualitrolcorp.com

Christoph Wendel

Verkehrsbetriebe Zürich
Zürich, Zwitserland
christoph.wendel@vzbz.ch

A. Shaikh

Kinectrics
Toronto, Canada
ashfak.shaikh@kinectrics.com

Trefwoorden

Corona
Deelontlading
Akoestische beeldvorming

Beknopt overzicht

Ultrasonen richtmicrofoons worden al tientallen jaren gebruikt om deelontlading van het oppervlak en corona-locaties in hoogspanningsapparatuur te lokaliseren. Er was echter altijd enige onzekerheid over de exacte locatie van de ontledingen door reflecties en het beeldoppervlak van de detector. Bovendien duurde het scannen van een volledige wikkeling enige tijd. Onlangs is een aanzienlijke vooruitgang in deze technologie geboekt door de commerciële ontwikkeling van een akoestische "camera" die kan laten zien waar het geluid optreedt in vergelijking met een normale afbeelding met zichtbaar licht van het testobject. Dat wil zeggen dat het apparaat een geluidsbeeld van de deelontlading op het testobject produceert, ongeveer net zoals een UV-camera het ultraviolette licht van een deelontlading op een afbeelding van het testobject lokaliseert. De akoestische camera maakt gebruik van een groot aantal breedbandmicrofoons en kan het akoestische signaal weergeven in selecteerbare frequentiebereiken in het sonische en ultrasone bereik. De effectiviteit van dit nieuwe apparaat werd geanalyseerd op een punt-naar-vlak corona-testobject, en ook op statorspoelen en statoren met bekende deelontlading. De optimale detectieband voor oppervlakteontlading lijkt te liggen tussen 30-50 kHz. Intense deelontlading in interne holle ruimtes kan ook worden gedetecteerd, zij het met een lagere frequentie dan voor oppervlakte-deelontlading. Exacte locaties van meerdere ontledingslocaties worden snel geïdentificeerd in verschillende testobjecten.

Inleiding

Sinds de jaren '40 van de vorige eeuw wordt rechtstreekse elektrische detectie van deelontladingen (PD) en corona met hoogspanningscondensatoren of hoogfrequente stroomtransformatoren gebruikt om isolatielacunes in nieuwe apparatuur op te sporen en om de isolatietoestand van hoogspanningsapparatuur die in bedrijf is geweest te beoordelen. Bij dergelijke tests kan de exacte locatie van de deelontladingen in de hoogspanningsapparatuur niet worden gedetecteerd. Lokalisatie van deelontladingen werd in het verleden uitgevoerd met RF-, optische en akoestische sondes [1, 2].

De RF-sonde, ook wel TVA- of coronasonde genoemd, detecteert de radiosignalen die worden uitgezonden door de deelontladings- en coronasignalen. Het instrument kan zowel oppervlakte-deelontladingen als corona detecteren, alsook deelontladingen in het isolatiesysteem van het testobject. De optische detectie van oppervlakte-deelontlading en corona werd oorspronkelijk met het menselijk oog uitgevoerd door het licht waar te nemen dat afkomstig is van een ontleding. Een hogere gevoeligheid voor deelontladingen wordt bereikt door de lampen uit te doen (een "verduisterings"- of "licht uit"-test) of door buitenshuis de test 's nachts uit te voeren. In een donkere kamer kan een fotomultiplicator worden gebruikt om een nog hogere gevoeligheid te bereiken. In de jaren '70 werden soms beeldversterkers gebruikt die in het zichtbare bereik werken, in donkere kamers en 's nachts buitenshuis. Eind jaren '90 werd een nieuw apparaat uitgevonden dat een momentopname of een videobeeld kon maken van oppervlakte-deelontlading in het ultraviolette bereik [3]. Dit was een aanzienlijke vooruitgang, omdat het optische signaal van de oppervlakte-deelontlading zichtbaar was in een verlichte ruimte of buitenshuis bij daglicht, met een normale afbeelding met zichtbaar licht van het testobject voor de context. Dit heeft de mogelijkheid om deelontladingen en corona op testobjecten op een veilige manier te lokaliseren en voor een permanente registratie te zorgen aanzienlijk vergroot. Dergelijke UV-camera's worden tegenwoordig veel gebruikt voor coronadetectie in transmissielijnen en substations, waarbij de technische verbeteringen in deze eeuw snel opeenvolgen.

Op vergelijkbare wijze vond de akoestische lokalisatie van deelontlading en corona eerst plaats met behulp van het menselijk gehoor en de beperkte driehoeksmeting die mensen kunnen doen. Vervolgens werden richtmicrofoons in het hoorbare bereik toegepast om deelontladingsplaatsen beter te kunnen lokaliseren. De signaal-ruisverhouding van deelontlading werd verbeterd door de ontwikkeling van ultrasone richtmicrofoons in de jaren '60. Deelontlading en corona produceren een groter uitgangssignaal in de ultrasone frequenties, met name in het gebied van 35–50 kHz (fig. 1) [4]. Er waren echter altijd problemen met de exacte locatie vanwege het met de afstand toenemende beeldoppervlak en de reflecties van harde, vlakke oppervlakken.

Afgelopen jaar is er een nieuwe akoestische technologie beschikbaar gekomen. Het is een akoestische camera met tientallen microfoontjes die worden gecombineerd om geluidsbeelden van de geluidsbronnen te produceren. Deze worden over een conventionele afbeelding met zichtbaar licht van het testobject gelegd [5]. De camera is oorspronkelijk ontwikkeld voor gaslekdetectie, maar kan ook worden gebruikt om oppervlakteontladingen te lokaliseren. De beoordeelde akoestische camera, de Fluke ii910, heeft 64 microfoons die werken in het bereik van 2 – 50 kHz of 2 – 100 kHz. De bediener kan via het touchscreen een handbreedte van 5 tot 20 kHz en een willekeurige centrumfrequentie binnen dit bereik selecteren. Nominaal kan de camera het geluidsbeeld van objecten op een afstand van 0,5 tot 100 m detecteren, wat inhoudt dat hij veilig kan worden gebruikt voor deelontladings- en coronadetectie bij hoogspanningen. Het geluidsniveau wordt gemeten in dB en er is een kleurgecodeerde schaal voor het geluidsniveau. Dit specifieke apparaat heeft een modus waarin het geluidsniveau versus een afgeleide 50/60 Hz AC-cyclus kan worden gemeten. Dit levert een akoestisch PRPD-patroon op. Zowel momentopnamen als video's kunnen worden opgenomen in standaard industrie-indelingen.

In dit artikel wordt de effectiviteit van de akoestische camera voor de lokalisatie van oppervlakte-deelontlading en corona beoordeeld met behulp van een corona-testobject met puntvlak en verschillende testobjecten met statorspoelen en statorwikkelingen. Met name de volgende zaken werden vastgesteld:

- Optimale detectiefrequentie
- Effect van afstand tot het testobject
- Vergelijking van PDIV gemeten met de akoestische camera en UV-camera's.

Testobjecten en testapparatuur

Het coronatestobject (T1) had een puntvlakgeometrie. De puntradius was ongeveer 250 μm en de ruimte tussen het punt en het grondvlak was 25 mm. De PDIV was ongeveer 6 kV rms, ac. Dit is vergelijkbaar met het coronatestobject dat wordt beschreven in IEEE 1799 [6].

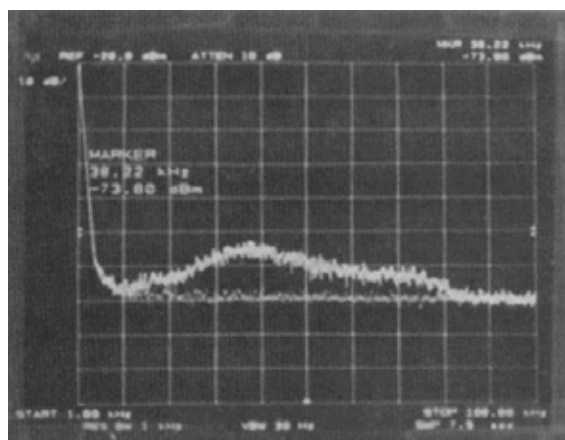


Fig. 1. Akoestische respons van oppervlakte-deelontlading versus frequentie (de dünnere lijn is de achtergrondruis met uitgeschakelde spanning). De verticale schaal is 10 dBm/div en de horizontale schaal loopt van 1 kHz tot 100 kHz. Er werd een B&K 4135-microfoon gebruikt met een FLAT-aanspreekwaarde tot 100 kHz. [4].

Er werden ook verschillende testobjecten met statorspoelen gebruikt. T2 was een spoel van 13,8 kV die een spanningsduurtest had ondergaan. De sleuf-semiconcoating (OCP) had een ernstige verslechtering ondergaan, met een aantal locaties waar de semicon was verdwenen als gevolg van oppervlakte-deelontlading. De spoel vertoonde ook verslechtering van de siliciumcarbidecoating-/semiconcoating-interface. De spoel was bevestigd in een geaarde dummy-sleuf.

Testobject T3 was een set van drie spoelen met een nominale spanning van 2,4 kV van fase tot fase en had speciaal aangebrachte semiconcoatings op één spoelpoot in de sleuf, die geaard of zwevend kon zijn. De drie spoelen werden aangesloten op een driefasige AC-voeding. De spoelen hadden een natuurlijke inwendige holle ruimte voor deelontlading in de sleufzone. Door de spoelen ten opzichte van elkaar te verplaatsen, kon ook fase-naar-fase-deelontlading worden gecreëerd in de eindwikkelingszones.

Testobject T4 was van een spoel die was onderworpen aan een thermische cyclustest, waarbij de koperen geleiders van de isolatie van de aardwand waren gescheiden. Hierdoor ontstaat interne delaminatie-deelontlading. De staaf vertoonde ook een lichte verslechtering van de deelontlading-onderdrukkingscoating. De staaf werd geclassificeerd als 11 kV.

Testobject T5 was een motorstatorwikkeling met een nominale spanning van 6 kV. De deelontladingsbron bij de uitgang van de sleuf was vóór de test niet bekend en kon worden gelokaliseerd met de akoestische camera.

De elektrische deelontlading werd gemeten met een PDTech DeltaMaxx in het laagfrequente bereik (IEC 60270). Naast de akoestische camera werd het ultraviolette beeld van de bronnen gemeten met een OFIL DayCor Superb-camera.

Detectiefrequentie

Beide testobjecten T1 en T2 werden gebruikt om de beste frequentie te vinden voor detectie van deelontlading vanuit het middelpunt van akoestische ruis. Voor T1 lagen de afstanden tussen het testobject en de camera tussen 1-8 m. Voor testobject T2 was dat 2-4 m. Fig. 2 toont de camera die werd gebruikt bij het testobject T2 met spoel. In alle gevallen werd het testobject gedurende 5 minuten vóór de beeldvorming bij een stabiele spanning gebruikt om zeker te zijn van een stabiele deelontladings-/coronabron. Er werden middenfrequenties van 10 kHz tot 90 kHz in stappen van 10 kHz met een bandbreedte van +/- 5 kHz geselecteerd.

Fig. 3 toont de akoestische beelden die werden vastgelegd op 2 m en 8 m van het puntvlak-testobject, bij een spanning van 10 kV rms, hetgeen ver boven de PDIV is. De regenboogkleurige cirkel bevindt zich midden op de corona. De afbeelding toont het maximale geluidsniveau in dB rechtsboven in het beeld. Het maximale geluidsniveau was 24 dB op 2 m en 12 dB op 8 m, voor dezelfde aangelegde spanning, gemeten vanaf 35-45 kHz. De akoestische camera heeft een functie om automatisch de geluidsbron in het geselecteerde frequentiebereik te lokaliseren en de afstand tussen de deelontladingsbron en de camera vast te stellen. Fig. 3b laat echter zien dat bij deze specifieke opstelling de coronabron niet automatisch werd gedetecteerd op 8 m (de bron werd wel automatisch gelokaliseerd bij afstanden tot 6 m).

Tabel 1 toont de frequentieband versus het deelontlading-geluidsniveau in dB op drie afstanden voor het puntvlak-testobject (T1), bij 10 kV rms. De deelontladingsmagnitudo die werd geregistreerd met een conventionele deelontladingsdetector, was 10 nC. In de tweede kolom staat het geluidsniveau dat werd geregistreerd toen op het puntvlak geen spanning stond en er dus geen corona was. Dit "onderniveau van de ruis" hangt af van de



Fig. 2.
Foto van de akoestische camera die werd gebruikt om deelontlading op spoel T2 te detecteren.



(3a)



(3b)

Fig. 3.
Akoestisch beeld van puntvlak corona, opgenomen op 2 m (a) en 8 m (b) van het T1-testobject bij 35-45 kHz

Middenfreq.* (kHz)	Onderniveau van de ruis** (dB)	Afstand tot testobject (m)					
		2 m		4 m		8 m	
		dB	Netto	dB	Netto	dB	Netto
90	40	40	0	40	0	40	0
80	39	40	1	40	1	40	1
70	33	37	4	34	1	34	1
60	27	35	8	27	0	27	0
50	20	32	12	24	4	20	0
40	10	30	10	20	10	12	2
30	9	26	17	19	10	12	3
20	7	25	18	18	11	11	4
10	3-11	20	-	15	-	7	-

*Bandbreedte +/- 5 kHz

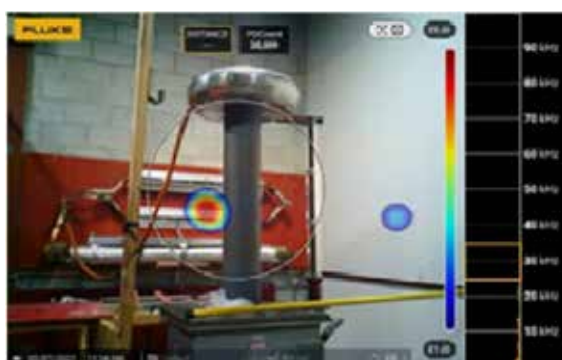
**Zonder aangelegde spanning

Tabel 1. Geluidsniveaus van de akoestische camera versus frequentie en afstand voor het puntvlak-testobject

3 Fluke Corporation Eerste ervaring met akoestische beeldvorming van deelontladingen bij hoogspanningsapparatuur

ruisomgeving en was onafhankelijk van de afstand tot het testobject. Boven 75 kHz was het geluidsniveau hetzelfde, ongeacht of de spanning aan of uit was. In het bereik van 5–15 kHz had het akoestische beeld veel grote "blobs" in het hele beeld, vermoedelijk door achtergrondruis, waardoor de coronabron niet kon worden geïdentificeerd. De kolommen "Net" in tabel 1 tonen het verschil in geluidsniveau met de spanning aan en uit. In het algemeen werden, naarmate het detectiefrequentiebereik kleiner werd, hogere netto geluidsniveaus gemeten. Er werden echter meer "blobs" waargenomen die geen verband hielden met de corona. Zoals te zien is in [4], lijkt het erop dat de frequenties van 30–50 kHz optimaal zijn voor coronadetectie. Naarmate de afstand groter wordt, neemt het ruwe geluidsniveau en het netto geluidsniveau af. Dit valt te verwachten, omdat hoge frequenties over het algemeen sterker worden verzwakt dan lagere frequenties. Bij een vaste afstand neemt ook het oppervlak van het akoestische beeld toe naarmate de frequentie afneemt, waarschijnlijk door de langere akoestische golflengten bij lagere frequenties.

Tabel 2 toont het deelontlading-geluidsniveau versus de frequentie voor een statorspoel (T2) met 2 m en 4 m afstand tussen de akoestische camera en de spoel. De spoel had ernstig beschadigde semiconcoatings, en er was deelontlading zichtbaar op deze defecte locaties toen er een spanning van 8 kV rms op werd gezet, lijn-naar-aarde. Ook hier lijken de beste frequenties voor detectie van de deelontlading binnen het bereik van 30–50 kHz te liggen. De bovenste frequentiebereiken produceren weinig ultrasoon signaal boven het onderniveau voor ruis, terwijl bij lagere frequenties de omgevingsruis de deelontladingsbron verborg. Fig. 4a toont één akoestisch beeld van de spoel met oppervlakte-deelontlading. Op deze foto is ook een reflectie zichtbaar van de wand van de oorspronkelijke deelontladingsbron van de spoel. Deze reflectie verdween toen de spanning werd verlaagd, net als de deelontladingsbron. In het verleden veroorzaakten dergelijke reflecties veel problemen bij het gebruik van ultrasone richtmicrofoons. Fig. 4b toont het UV-beeld van dezelfde bron.



(4a)



(4b)

Fig. 4. Deelontlading die optreedt door ernstige semiconschade op een spoel werkend op 8 kV rms, in een gesimuleerde sleuf op 4 m van de camera. (a) toont het akoestische beeld bij 25–35 kHz. De regenboogcirkel is de werkelijke deelontladingsbron. Let op de blauwe reflectie (lager geluidsniveau) van de muur. (b) toont het beeld dat is vastgelegd met de UV-camera, waarbij de kleine witte stipjes wijzen op ontleding.

Middenfreq (kHz)	Onderniveau van de ruis (dB)	Afstand tot testobject (m)			
		2 m		4 m	
		dB	Netto	dB	Netto
90	40	43	3	41	1
80	39	42	3	40	1
70	33	41	8	34	1
60	27	39	12	32	5
50	22	37	15	30	16
40	11	32	21	27	16
30	7	29	22	25	18
20	7	27	20	24	14
10	-	26	-	26	-

Tabel 2. Deelontlading-geluidsniveau versus frequentie en afstand voor het testobject T2 met spoel

Vergelijking van UV-camera's en akoestische camera's voor meting van PDIV

De testobjecten T1 voor corona en T2 (spoel) voor deelontlading werden gebruikt om aanloopspanning (PDIV) en deelontlading-doofspanningen (PDEV) van de deelontladingen te vergelijken met behulp van zowel de akoestische camera als een ultravioletcamera (UV-camera), evenals met de conventionele deelontladingsdetector. De akoestische camera was ingesteld op de meting van de PDEV en PDIV in de 35-45 kHz-band, omdat dit in de voorgaande tests het optimale bereik bleek te zijn. In bijna alle gevallen lagen de aanloop- en doofspanningen binnen 100 V van elkaar. Voor de spoel was er geen verschil in aanloop- en doofspanningen bij afstanden van 2,5 m en 4 m (tabel 3).

De conventionele PD-test op T1 toonde aan dat de PRPD verschillende patronen had voor positieve deelontlading (in de negatieve halve cyclus) en piekvormige, hoge negatieve deelontlading (positieve AC-cyclus) voor de puntvlak-corona. De negatieve deelontlading bedroeg ongeveer 10 nC, de positieve deelontlading ongeveer 2 nC. In de buurt van de aanloopspanning was de negatieve piekvormige corona intermitterend, terwijl de positieve corona stabiel was.

Een voordeel van de UV-camera is dat deze kan inzoomen op de ontladingslocatie, terwijl de akoestische camera een vast beeldoppervlak heeft (fig. 4a vs. 4b).

Momentopnamen van verschillende testobjecten

De akoestische camera kan zowel momentopnamen van de deelontladingsactiviteit maken als maximaal 5 minuten video opnemen. Dit komt van pas voor de uitvoering van onderzoeken en het meten van de PDIV/PDEV. Voorbeelden van videobeelden vindt u bij [7]. In dit gedeelte staan voorbeelden van momentopnamen van de akoestische beelden van verschillende testobjecten.

Fig. 5 toont fase-naar-fase-deelontlading van testobject T3 tussen spoel A en C in de eindwikkeling, waarbij de fase-naar-fasespanning 6,9 kV of 4,1 kV lijn-naar-aarde was. De positie van de A-fasespoel werd zodanig aangepast dat de A- en C-fasen bijna in contact kwamen in de buurt van de verbindingssnoeren. De sleufsecties van de spoelen waren niet geaard, waardoor deelontladingen van fase naar aarde werden voorkomen.

T4 is een statorstaaf die delaminatie vertoont tussen de koperen geleiders en de aardwand. Toen de akoestische camera was ingesteld op het bereik van 13-23 kHz, was de akoestische activiteit zichtbaar langs de gehele staaf waar elektrische spanning was (fig. 6a). Op basis van het vermogen van de camera om het geluidsniveau versus de tijd te downloaden, werd de plot van het geluidsniveau versus de AC-fasehoek geproduceerd (fig. 6b). Dit toont de kenmerkende fase-opgeloste respons van de deelontlading zonder polariteitsoverwicht, wat erop wijst dat de camera gevoelig is voor de delaminatie-deelontlading, zij het op een lagere frequentie (die gevoeliger is voor ruis) en een lager geluidsniveau.

Testobject/ afstand (m)	Conventionele		UV-camera		Akoestische camera	
	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV
T1 op 2 m	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2
T2 op 2,5 m	-	-	3,5	3,2	3,5	3,2
T2 op 4 m	-	-	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabel 3. Vergelijking van PDIV en PDEV (kV) voor verschillende detectoren

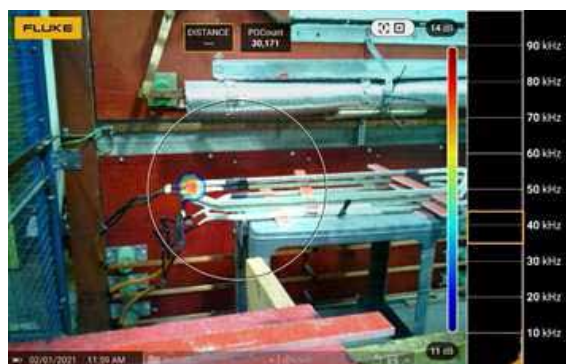
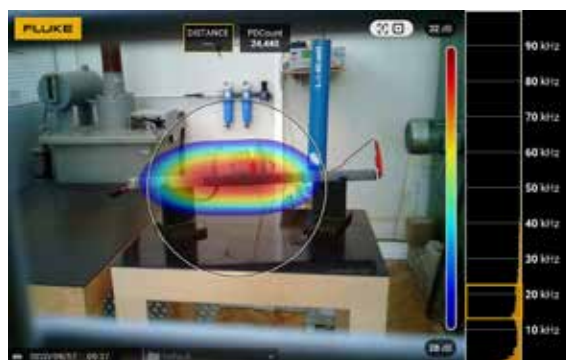
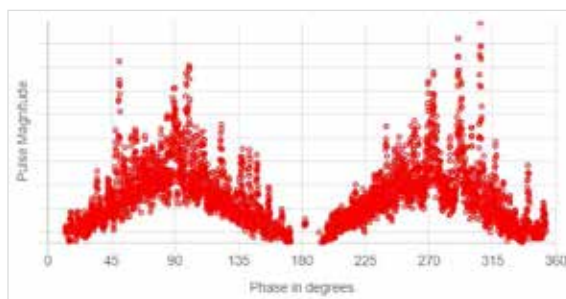


Fig. 5. Deelontlading van fase-naar-fase deelontlading in de eindwikkeling, waarbij de fasespoelen A en C elkaar bijna raken. B-fase bevindt zich onder aan de stack van 3 co



(6a)



(6b)

Fig. 6. Mogelijke inwendige delaminatie-deelontlading (a) van een staaf die een thermische cyclus heeft ondergaan. Let op het lagere frequentiebereik dat is gebruikt in (a) en het veel lagere geluidsniveau. (b) toont de "PRPD"-plot, geproduceerd door de akoestische camera, uitgaande van een AC-cyclus van 50 Hz

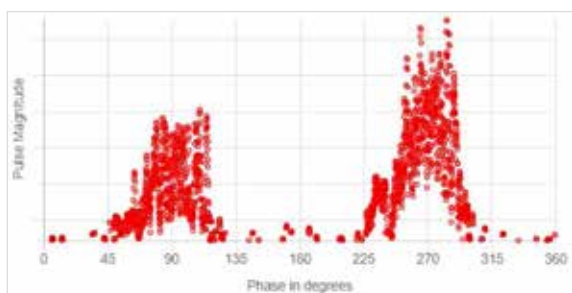
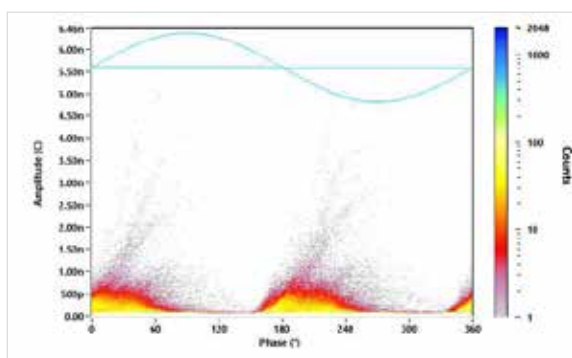

(7a)

(7b)

(7c)

Fig. 7. Akoestische camera en conventionele deelontladingsmeting van deelontlading van een offline deelontladingstest op één fase. Deelontlading bij de sleufuitgang van één spoel is duidelijk zichtbaar in (a), terwijl (b) de akoestische PRPD met positief overwicht laat zien. De werkelijke fasehoek is mogelijk niet correct in (b). (c) is de conventionele offline deelontladingstest PRPD.

Referenties

- [1] IEEE 1434:2014, "Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery"
- [2] G.C. Stone et al, "Electrical Insulation for Rotating Machines", 2nd edition, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [3] K.W. Forsyth, "Electro-optical, non-contact measurement of electrical discharges", US Patent 6476396B1, nov 2002.
- [4] R. Van Haeren et al, "Preventing failure in outdoor distribution class metalclad switchgear", IEEE Trans PAS, okt 1985, pp 2701-2712.
- [5] C.P. Suurmeijer et al, "Handheld Acoustic Imager", US Patent D907,097, jan 2021.
- [6] IEEE 1799:2012, IEEE Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings.
- [7] <https://irispower.com/learning-centre/acoustic-camera-video-files/>

Fig. 7a toont het akoestische beeld bij 35-45 kHz van een 6 kV statorwikkelling (T5) met één fase bekrachtigd tot 3 kV. Oppervlakte-deelontlading is zichtbaar bij de sleufuitgang van één spoel. Dit werd geverifieerd door een visuele inspectie van de sleuf.

Conclusies

De akoestische deelontlading-camera lijkt een zeer nuttig instrument ter verbetering van de mogelijkheid om deelontladingslocaties op een veilige afstand van spanningvoerende testobjecten te lokaliseren. De camera heeft duidelijk voldoende ruimtelijke resolutie om feitelijke deelontladingslocaties op de meeste praktische hoogspanningsapparatuur te identificeren. De mogelijkheid om de deelontladingsmagnitude (waarvan wordt aangenomen dat deze correleert met het geluidsniveau) vast te leggen ten opzichte van de AC-cyclus, geeft het vertrouwen dat deelontlading en corona daadwerkelijk worden gedetecteerd. De aanloop- en doofspanningen van deelontlading voor conventionele deelontladingsdetectoren, de akoestische camera en de UV-camera lijken ongeveer hetzelfde te zijn voor corona en oppervlakte-deelontlading. Een belangrijk voordeel van de akoestische camera ten opzichte van de oudere ultrasone microfoon is dat de eerste de werkelijke deelontladingslocaties gemakkelijk kan onderscheiden van reflecties. Voor oppervlakte-deelontlading en corona lijkt de beste signaal-ruisverhouding binnen het bereik van 30-50 kHz te liggen. Anders dan bij UV-camera's is er echter enig bewijs dat er significante deelontladingslocaties in interne holle ruimtes kunnen worden gedetecteerd, zij het met een kleinere magnitude.

Woord van dank

De auteurs willen Fluke Corporation bedanken voor het uitlenen van de ii910 akoestische camera. We bedanken ook de heer Christoph Herold van het Von Roll Institute in Zwitserland voor zijn hulp.

Fluke. *Keeping your world up and running.®*

Fluke Nederland B.V.
Postbus 1337
5602 BH Eindhoven
Tel: +31 40 267 5100
E-mail: cs.nl@fluke.com
www.fluke.nl

Fluke Belgium N.V.
Kortrijksesteenweg 1095
B9051 Gent
Belgium
Tel: +32 2402 2100
E-mail: cs.be@fluke.com
www.fluke.be

©2021 Fluke Corporation. Alle rechten voorbehouden.
Wijzigingen zonder voorafgaande kennisgeving voorbehouden.
04/2021 210349-nl

Wijziging van dit document is niet toegestaan zonder schriftelijke toestemming van Fluke Corporation.