RAPPORT

Initial erfarenhet av akustisk avbildning av PD på högspänningsutrustning

Greg C. Stone
Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Kanada
gstone@qualitrolcorp.com

Mladen Sasic
Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Kanada
msasic@qualitrolcorp.com

Christoph Wendel
Verkehrsbetriebe Zürich
Zürich, Schweiz
christoph.wendel@vbz.ch

A. Shaikh
Kinectrics
Toronto, Kanada
ashfak.shaikh@kinectrics.com

Nyckelord

Korona
Partiell urladdning
Akustisk bildbehandling

Sammandrag

Riktade ultraljudsmikrofoner har använts i decennier för att lokalisera platser med partiell yturladdning och korona i högspänningsutrustning. Det fanns dock alltid en viss osäkerhet om exakt var urladdningsplatserna fanns på grund av detektorns reflektioner och synfält. Dessutom tog det en stund att skanna en fullständig lindning. Nyligen gjordes ett betydande framsteg inom den här tekniken i samband med kommersiell utveckling av en akustisk ”kamera” som kan visa var ljudet uppstår i förhållande till en normal synligt ljus-bild av testobjektet. Det innebär att enheten skapar en ljudbild av PD på testobjektet, ungefär som när en UV-kamera lokaliserar ultraviolett ljus från PD på en bild av testobjektet. Den akustiska kameran drar nytta av ett stort antal bredbandsmikrofoner och kan visa den akustiska signalen i valbara frekvensområden inom ljud- och ultraljudsintervallen. Det här nya verktygets effektivitet utvärderades på ett punkt-till-plan-koronatestobjekt, liksom på statorspolar och statorer med känd PD. Det optimala detekteringsbandet för yturladdning verkar vara 30–50 kHz. Intensiv PD i inre tomrum kan också identifieras, om än vid en lägre frekvens än för yt-PD. Exakta placeringar av flera urladdningsplatser identifieras snabbt i olika testobjekt.

Introduktion

Direkt elektrisk identifiering av partiell urladdning (eng. partial discharge, PD) och korona med högspänningskondensatorer eller högfrekvensströmtransformatorer har använts sedan 1940-talet för att hitta isoleringsdefekter i ny utrustning och för bedömning av isolationsförhållanden hos högspänningsutrustning som har varit i drift. Sådana tester kan inte identifiera den exakta platsen för PD i högspänningsutrustningen. PD-lokalisering har tidigare utförts med RF-prober, optiska och akustiska prober [1, 2].

RF-proben, som ibland kallas TVA- eller koronaprob, identifierar de radiosignaler som sänds ut av PD- och koronasignalerna. Den kan identifiera både yt-PD och korona, liksom PD inne i testobjektets isoleringssystem. Den optiska identifieringen av yt-PD och korona gjordes ursprungligen med det mänskliga ögat som kände av ljuset från en urladdning. Mer känslighet för PD uppnås genom att släcka lamporna (ett mörkläggningstest) eller genom att göra testet på natten utomhus. I mörkrum kan en fotomultiplikator användas för att uppnå ännu högre känslighet. På 1970-talet användes ibland bildförstärkare som arbetar inom det synliga området i mörkrum och utomhus på natten. I slutet av 1990-talet uppfann man en ny apparat som kunde skapa en ögonblicksbild eller videobild av yt-PD i det ultravioletta området [3]. Det här var ett viktigt framsteg eftersom den optiska signalen från yt-PD kunde ses i ett upplyst rum eller utomhus i dagsljus med en normal synligt ljus-bild av testobjektet. Detta ökade avsevärt möjligheten att på ett säkert sätt hitta PD och korona på testobjekt och skapa en permanent dokumentation. Sådana UV-kameror används nu ofta för koronaidentifiering på kraftledningar och transformatorstationer, och tekniska förbättringar skedde snabbt under 2000-talet.

På samma sätt utfördes akustisk lokalisering av PD och korona först med hjälp av mänskliga öron och den begränsade triangulering de kan utföra. Sedan tillämpades riktade mikrofoner i ljudområdet för att bättre lokalisera PD-platser. Signal/brus-förhållandet för PD förbättrades genom utveckling av riktade ultraljudsmikrofoner på 1960-talet. PD och korona ger en högre uteffekt i ultraljudsfrekvenserna, särskilt i området 35–50 kHz (bild 1) [4]. Det fanns dock alltid problem med exakt lokalisering på grund av att synfältet växer med avståndet och att hårda, plana ytor ger reflektioner.

Under det senaste året har ny akustisk teknik blivit tillgänglig. Det är en akustisk kamera som innehåller dussintals små mikrofoner som kombineras för att skapa bilder av ljudkällorna, överlagrade på en vanlig synligt ljus-bild av testobjektet [5]. Kameran utvecklades ursprungligen för detektering av gasläckor, men kan även användas för att lokalisera yturladdningar. Utvärdering av den akustiska kameran: Fluke ii910 har 64 mikrofoner som arbetar i områdena 2–50 kHz- och 2–100 kHz. Operatören kan välja en bandbredd från 5 till 20 kHz och valfri mittfrekvens inom det här intervallet via pekskärmen. Nominellt kan den identifiera ljudbilden från objekt på 0,5 till 100 m avstånd, vilket innebär att den kan användas säkert för PD- och koronaidentifiering där det förekommer höga spänningar. Ljudnivån mäts i dB och det finns en färgkodad skala för ljudnivån. Den här enheten har ett läge där ljudnivån kan mätas som funktion av en antydd 50/60 Hz AC-period, vilket ger ett akustiskt PRPD-mönster. Både ögonblicksbilder och videor kan spelas in i standardbranschformat.

I den här rapporten utvärderas hur effektiv den akustiska kameran är i att lokalisera yt-PD och korona med hjälp av ett punkt-plan-koronatestobjekt och olika testobjekt i form av statorspolar och statorlindningar. I synnerhet fastställdes följande:

- Optimal identifieringsfrekvens
- Effekten av avstånd till testobjektet
- Jämförelse av PDIV uppmätt med de akustiska kamerorna och UV-kamerorna.

Testobjekt och utrustning

Koronatestobjektet (T1) hade en punkt-plan-geometri. Punktradien var cirka 250 µm och avståndet mellan punkten och jordplanet var 25 mm. Ungefärlig PDIV var 6 kV rms, ac. Detta liknar koronatestobjektet som beskrivs i IEEE 1799 [6].

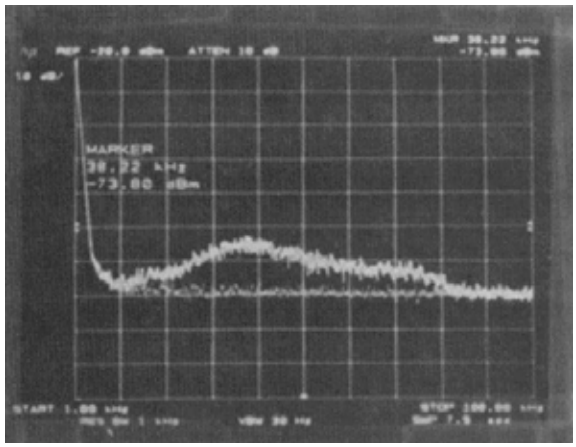


Bild 1. Akustiskt gensvar på yt-PD som funktion av frekvens (den svagare kurvan är bakgrundsbruset när spänningen var avstängd). Den vertikala skalan är 10 dBm/div och den horisontella skalan går från 1 kHz till 100 kHz. En B&K 4135-mikrofon användes med en plan respons upp till 100 kHz. [4].

Olika testobjekt i form av statorspolar användes också. T2 var en spole på 13,8 kV som hade genomgått testning för spänningstålighet. Semicon-beläggningen (OCP) på PD-spåret hade försämrats allvarligt, med ett antal platser där semicon har försvunnit på grund av yt-PD. Spolen hade också genomgått försämring av gränssnittet mellan kiselkarbidbeläggningen och semicon-beläggningen. Spolen monterades i ett jordat blindspår.

Testobjekt T3 var en uppsättning med tre spolar med 2,4 kV märkspänning fas till fas och som hade specialapplicerade semicon-beläggningar på ett spolben i spåret, som kunde vara jordat eller flytande. De tre spolarna var anslutna till en trefas-AC-försörjning. Spolarna hade naturliga inre tomrums-PD i spårområdet. Genom att flytta spolarna i förhållande till varandra kunde fas-till-fas-PD också skapas i ändlindningsområdena.

Testobjektet T4 kommer från en spole som har utsatts för ett värmecyklingstest, där kopparledarna har separerats från jordväggsisoleringen. Detta skapar intern delaminerings-PD. Stången hade också viss smärre försämring av beläggningen från PD-undertryckande. Stången var klassad 11 kV.

Testobjektet T5 var en motorstatorlindning med märkspänningen 6 kV. PD-källan vid spårutgången var okänd före testet och kunde lokaliseras med den akustiska kameran.

Den elektriska partiella urladdningen mättes med en PDTech DeltaMaxx som arbetar inom lågfrekvensområdet (IEC 60270). Förutom den akustiska kameran mättes den ultravioletta bilden från källorna med en OFIL DayCor Superb-kamera.

Identifieringsfrekvens

Både testobjekten T1 och T2 användes för att hitta den bästa frekvensen för att identifiera PD mitt i det akustiska bruset. För T1 varierade avstånden mellan testobjektet och kameran 1–8 m. Testobjektet T2 var 2–4 m. Bild 2 visar den kamera som användes med spolen som var testobjekt T2. Testobjektet har i samtliga fall använts med jämn spänning i 5 minuter före bildtagning för att säkerställa en stabil källa till PD/korona. Mittfrekvenser från 10 kHz till 90 kHz i steg om 10 kHz med en bandbredd på +/- 5 kHz valdes.

Bild 3 visar de akustiska bilderna som registrerats 2 m respektive 8 m från punkt-plan-testobjektet vid en spänning på 10 kV rms, vilket ligger väl över PDIV. Den regnbågsfärgade cirkeln är centrerad på koronan. Bilden visar den maximala ljudnivån i dB längst upp till höger i bilden. Den maximala ljudnivån var 24 dB vid 2 m och 12 dB vid 8 m för samma pålagda spänning, uppmätt från 35–45 kHz. Den akustiska kameran har en funktion som automatiskt lokaliserar källan till ljudet i det valda frekvensområdet och fastställer avståndet från PD-källan till kameran. Bild 3b visar dock att för den här installationen lokaliserades inte koronakällan automatiskt vid 8 m (källan lokaliserades automatiskt på avstånd upp till 6 m).

Tabell 1 visar frekvensbandet i förhållande till PD-ljudnivån i dB vid tre avstånd för punkt-plan-testobjektet (T1) vid 10 kV rms. PD-magnituden som registrerades med en konventionell PD-detektor var 10 nC. Den andra kolumnen visar ljudnivån som registrerades när punkt-planet inte var spänningssatt och därför inte hade någon korona. Detta ”brusgolv” beror på brusmiljön och var oberoende av avståndet till testobjektet. Över 75 kHz var ljudnivån densamma oavsett om spänningen var på eller av. I området 5–15 kHz hade den akustiska bilden många stora ”plumpar” över bilden, sannolikt från bakgrundsbrus

Bild 2. Foto av den akustiska kameran när den används för att identifiera PD på spole T2.

(3a)

(3b)

Bild 3. Akustisk bild av punkt-plan-koronan registrerad vid 2 m (a) och 8 m (b) från testobjektet T1 vid 35–45 kHz

Mittfrekvens* (kHz)	Brusgolv** (dB)	Avstånd från testobjekt (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	-

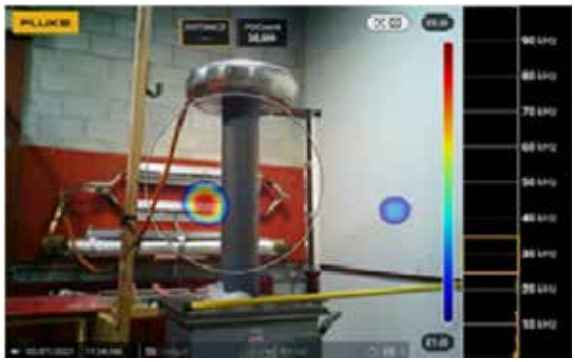
* Bandbredd +/- 5 kHz

** När ingen spänning var pålagd

Tabell 1. Ljudnivåerna i den akustiska kameran som funktion av frekvens och avstånd för punkt-plan-testobjektet

och därför kunde inte koronakällan identifieras. ”Netto”-kolumnerna i tabell 1 visar skillnaden mellan ljudnivån med spänningen på och av. I allmänhet uppmättes högre nettoljudnivåer när identifieringsfrekvensområdet minskade, men fler ”plumpar” som inte var associerade med korona noterades. Som kan noteras i [4] verkar det som om frekvenserna från 30–50 kHz är optimala för koronadetektering. När avståndet ökar minskar rå- och nettoljudnivån. Det här är förväntat eftersom höga frekvenser i allmänhet dämpas starkare än lägre frekvenser. För ett fast avstånd gäller dessutom att när frekvensen minskar så ökar den akustiska bildens område, sannolikt på grund av de längre akustiska våglängderna vid lägre frekvenser.

Tabell 2 visar PD-ljudnivån i förhållande till frekvensen för en statorspole (T2) med 2 m respektive 4 m mellan den akustiska kameran och spolen. Spolen hade svårt skadade semicon-beläggningar, och PD var uppenbar på dessa defekta platser när den var spänningssatt till 8 kV rms, ledning till jord. Återigen verkar de bästa frekvenserna för att identifiera PD vara i området 30–50 kHz. De övre frekvensområdena skapar en svag ultraljudssignal ovanför brusgolvet, medan det omgivande bruset skymmer PD-källan vid lägre frekvenser. Bild 4a visar en akustisk bild av spolen med yt-PD. I det här fotot ses även en reflektion från väggen från den ursprungliga PD-källan i spolen. Den här reflektionen försvann när spänningen sänktes, precis som PD-källan gjorde. Tidigare orsakade sådana reflektioner många problem med användning av riktade ultraljudsmikrofoner. Bild 4b visar UV-bilden från samma källa.



(4a)

(4b)

Bild 4. PD uppstår från allvarlig semicon-skada på en spole som används med 8 kV rms, i ett simulerat spår 4 m från kameran. (A) visar den akustiska bilden 25 35 kHz. Regnbågscirkeln är den verkliga PD-källan. Observera den blå (lägre ljudnivå) reflektionen från väggen. (b) visar den bild som registrerats från UV-kameran, där de små vita punkterna indikerar urladdning.

Mittfrekvens (kHz)	Brusgolv (dB)	Avstånd från testobjekt (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	-

Tabell 2. PD-ljudnivå som funktion av frekvens och avstånd för testobjekt T2 (spole)

Jämförelse av UV-kameror och akustiska kameror för att mäta PDIV

PD-testobjekten T1 (korona) och T2 (spole) användes för att jämföra PD-startspänningen (PDIV) och PD-utsläckningsspänningen (PDEV) med hjälp av både den akustiska kameran och en UV-kamera (ultraviolett), samt den konventionella PD-detektorn. Den akustiska kameran var inställd på att mäta PDEV och PDIV i bandet 35–45 kHz, eftersom det visade sig vara det optimala intervallet i tidigare tester. I nästan alla fall var start- och utsläckningsspänningen inom 100 V från varandra. För spolen var det ingen skillnad i start- och utsläckningsspänning på avstånden 2,5 m och 4 m (Tabell 3).

Det konventionella PD-testet på T1 visade att PRPD hade olika mönster för positiv PD (under den negativa halvperioden) och spetsig, hög negativ PD (positiv AC-period) för punkt-plan-koronan. Den negativa partiella urladdningen var cirka 10 nC medan den positiva partiella urladdningen var cirka 2 nC. Nära startspänningen var den negativa spetsiga koronan intermittent, medan den positiva koronan var mer stabil.

En fördel med UV-kameran är att den kan zooma in på urladdningsplatsen, medan den akustiska kameran har ett fast synfält (bild 4a jämfört med 4b).

Ögonblicksbilder av olika testobjekt

Den akustiska kameran kan både ta ögonblicksbilder av PD-aktiviteten och spela in video i upp till 5 minuter, vilket är praktiskt vid undersökningar och mätning av PDIV/PDEV. Exempel på videobilder kan ses på [7]. I det här avsnittet visas exempel på akustiska bilder från olika testobjekt.

Bild 5 visar PD fas-till-fas från testobjektet T3 mellan spolarna A och C i slutlindningen när fas-till-fas-spänningen var 6,9 kV eller 4,1 kV ledning till jord. Positionen för A-fasspolen justerades så att A- och C-faserna nästan vidrörde varandra nära anslutningsledarna. Spolarnas spårdelar var ojordade, vilket hindrade PD från fas till jord.

T4 är en statorstång som har delaminering mellan kopparledarna och jordväggen. När den akustiska kameran var inställd på området 13–23 kHz syntes den akustiska aktiviteten längs hela stången där det fanns elektrisk påfrestning (bild 6a). Med hjälp av kamerans möjlighet att hämta ljudnivån som funktion av tiden producerades diagrammet över ljudnivån som funktion av AC-fasvinkeln (bild 6b). Det visar det typiska fasupplösta PD-svaret utan någon dominerande polaritet, vilket tyder på att kameran är känslig för delaminerings-PD, om än vid en lägre frekvens (som är mer känslig för brus) och lägre ljudnivå.

Testobjekt/ avstånd (m)	Konventionell		UV-kamera		Akustisk kamera	
	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV
T1 vid 2 m	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2
T2 vid 2,5 m	–	–	3,5	3,2	3,5	3,2
T2 vid 4 m	–	–	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabell 3. Jämförelse av PDIV och PDEV (kV) för olika detektorer

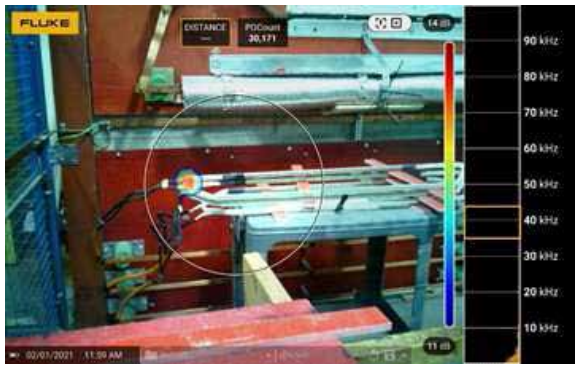
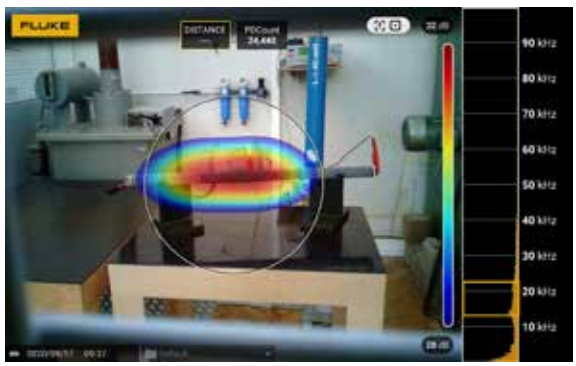
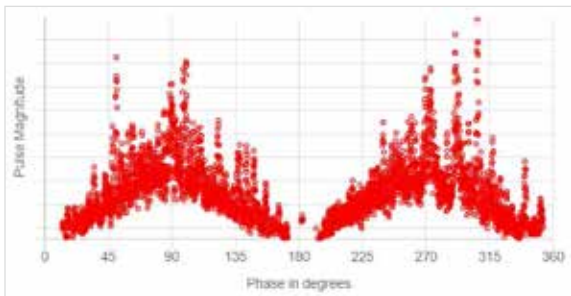


Bild 5. PD från fas till fas PD i ändlindningen där A- och C-fasspolarna nästan vidrör varandra. B-fasen är längst ned i stapeln med 3 spolar



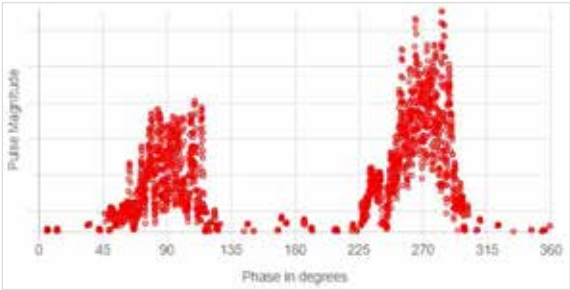
(6a)



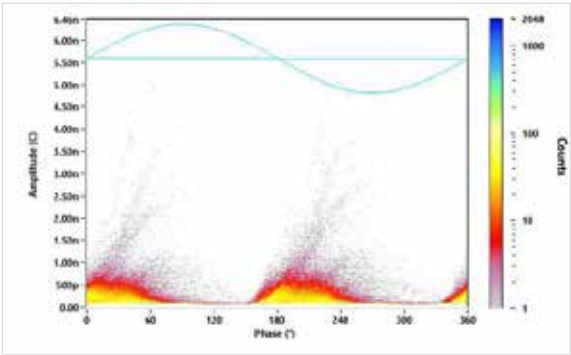
(6b)

Bild 6. Eventuell intern delaminerings-PD (a) från en stång som har genomgått värmecykler. Observera det lägre frekvensområde som används i (a), samt den mycket lägre ljudnivån. (b) visar "PRPD"-diagrammet som produceras av den akustiska kameran under en AC-period på 50 Hz

(7a)



(7b)



(7c)

Bild 7. Akustisk kamera och konventionell mätning av PD från ett PD-test offline på en fas. PD vid en spoles spårutgång visas tydligt i (a), medan (b) visar den akustiska PRPD med positiv övervikt. Den faktiska fasvinkeln kanske inte är korrekt i (b). (c) är det konventionella PD-testet offline PRPD.

Bild 7a visar den akustiska bilden vid 35–45 kHz av en 6 kV statorlindning (T5) med en fas spänningssatt till 3 kV. Yt-PD syns vid en spoles spårutgång. Detta kontrollerades genom en visuell inspektion av spåret.

Slutsatser

Den akustiska PD-kameran verkar vara ett mycket användbart verktyg för att förbättra möjligheten att lokalisera PD på ett säkert avstånd från spänningssatta testobjekt. Det är tydligt att kameran har tillräcklig spatial upplösning för att identifiera faktiska PD-platser på de flesta praktiska högspänningsutrustningar. Möjligheten att spela in PD-magnitud (antas vara korrelerad med ljudnivån) som funktion av AC-perioden ger förtroende för att man faktiskt identifierar PD och korona. PD-start- och PD-utsläckningsspänningarna för konventionella PD-detektorer, den akustiska kameran och UV-kameran verkar vara ungefär desamma för korona och yt-PD. En betydande fördel med den akustiska kameran jämfört med den äldre ultraljudsmikrofonen är att den enkelt skiljer faktiska PD-platser från reflektioner. För yt-PD och korona verkar det bästa signal/brus-förhållandet ligga inom området 30–50 kHz. Men till skillnad från UV-kameror finns det vissa bevis för att betydande intern tomrums-PD kan identifieras, men med en lägre magnitud.

Bekräftelse

Författarna vill tacka Fluke Corporation för att vi fått låna den akustiska kameran ii910. Vi tackar även Christoph Herold vid Von Roll Institute i Schweiz för hans hjälp.

Referenser

[1] IEEE 1434:2014, ”Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery”

[2] G.C. Stone m.fl., ”Electrical Insulation for Rotating Machines”, 2:a upplagan, 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 m.fl., ”Preventing failure in outdoor distribution class metalclad switchgear”, IEEE Trans PAS, okt 1985, s. 2701–2712.

[5] C.P. Suurmeijer m.fl., ”Handheld Acoutic 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/

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

Fluke Sverige AB
c/o Gilbarco Veeder-Root
Johannesfredsvägen 11 A
16869 Bromma
Tel: 08 5663 7400
E-mail: cs.se@fluke.com
www.fluke.se

©2021 Fluke Corporation. Med ensamrätt. Data kan komma att ändras utan föregående meddelande.
04/2021 210349-sv

Ändringar får inte göras i det här dokumentet utan skriftligt medgivande från Fluke Corporation.