TANITIM BELGESİ

Yüksek gerilimli ekipmanlarda kısmi deşarjın akustik görüntülenmesiyle ilgili ilk deneyimler

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

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

Christoph Wendel
Verkehrsbetriebe Zurich
Zürih, İsviçre
christoph.wendel@vbz.ch

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

Anahtar kelimeler

Korona
Kısmi deşarj
Akustik görüntüleme

Özet

Yönlü ultrasonik mikrofonlar, yüksek gerilimli ekipmanlardaki kısmi yüzey deşarjı ve korona alanlarını bulmak için onlarca yıldır kullanılmaktadır. Ancak yansımalar ve detektörün görüş alanı nedeniyle deşarj alanlarının tam olarak nerede olduğu konusunda her zaman biraz belirsizlik vardı. Üstelik tam bir sargıyı taramak zaman alırdı. Yakın zamanda, test nesnesinin normal görünür ışık görüntüsüne göre sesin nerede olduğunu gösterebilen bir akustik "kameranın" ticari olarak geliştirilmesiyle bu teknolojide önemli bir ilerleme sağlandı. Cihaz, UV kameranın test nesnesinin görüntüsünde kısmi deşarjın ultraviyole ışığının yerini bulması gibi, test nesnesinde kısmi deşarjın ses görüntüsünü üretir. Akustik kamera, çok sayıda geniş bantlı mikrofondan yararlanır ve akustik sinyali, sonik ve ultrasonik aralıklardaki seçilebilir frekans aralıklarında görüntüleyebilir. Bu yeni aracın etkililiği, bir noktadan düzleme korona test nesnesinin yanı sıra, kısmi deşarjı bilinen statör bobinleri ve statörler üzerinde değerlendirildi. Optimum yüzey deşarjı algılama bandı 30 - 50 kHz gibi görünmektedir. İç boşluklardaki yoğun kısmi deşarjlar da, kısmi yüzey deşarjından daha düşük frekansta da olsa, algılanabilir. Farklı test nesnelerinde birden fazla deşarj alanının kesin noktaları, hızlı bir şekilde tanımlanmıştır.

Giriş

Yüksek gerilimli kapasitörler veya yüksek frekanslı akım transformatörleri kullanarak kısmi deşarjın (PD) ve koronanın doğrudan elektriksel algılanması, yeni ekipmanlardaki yalıtım kusurlarını bulmak ve çalışan yüksek gerilimli ekipmanların yalıtım durumunu değerlendirmek için 1940'lardan beri kullanılan bir yöntemdir. Bu tür testler, PD'nin yüksek gerilimli ekipmanlardaki tam konumunu algılayamaz. Geçmişte PD konumunu bulmak için RF, optik ve akustik problar [1, 2] kullanılmıştır.

Bazen TVA veya korona probu olarak da adlandırılan RF probu, PD ve korona sinyalleri tarafından yayılan telsiz sinyallerini algılar. Yüzey PD'si ve koronanın yanı sıra test nesnesi yalıtım sistemindeki PD'yi de algılayabilir. Yüzey PD'si ve koronanın optik algılanması, başlangıçta deşarjdan gelen ışığı gözle algılayarak yapılıyordu. Daha fazla PD hassasiyeti, ışıkları kapatarak ("karartma" veya "kapalı ışık" testi) veya açık havada testi gece yaparak elde edilebilir. Karanlık odalarda daha da fazla hassasiyete ulaşmak için fotomultiplikatör kullanılabilir. 1970'lerde, görünür aralıkta çalışan görüntü yoğunlaştırıcılar bazen karanlık odalarda ve gece açık havada kullanılıyordu. 1990'ların sonunda, yüzey PD'sinin ultraviyole aralıkta anlık görüntüsünü veya video görüntüsünü oluşturabilen yeni bir cihaz icat edildi [3]. Bu, yüzey PD'si optik sinyalinin aydınlık bir odada veya gündüz açık havada, test nesnesinin bağlam sunan normal görünür ışık görüntüsüyle görülmesine olanak sağladığı için önemli bir gelişmeydi. Bu da PD ve koronayı test nesnelerinde güvenli bir şekilde bulma ve kalıcı kayıt oluşturma yeteneğini büyük ölçüde artırdı. 2000'lerde teknik iyileştirmelerin hızla gerçekleşmesiyle birlikte bu tür UV kameralar, artık iletim hattı ve trafo korona algılaması için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Benzer şekilde, PD ve koronanın akustik konumlandırması ilk olarak insan kulağı ve kulağın yapabildiği sınırlı tahminle meydana geldi. Daha sonra, PD noktalarını daha iyi konumlandırmak için duyulabilir aralıkta yönlü mikrofonlar uygulandı. 1960'larda yönlü ultrasonik mikrofonların geliştirilmesiyle PD sinyal – gürültü oranı iyileştirildi. PD ve korona ultrasonik frekanslarda, özellikle 35 – 50 kHz'lik bölgede daha büyük bir çıkış üretir (Şekil 1) [4]. Ancak, görüş alanının mesafeyle genişlemesi ve sert, düz yüzeylerden yansımalar nedeniyle her zaman hassas konumlandırmada sorunlar yaşandı.

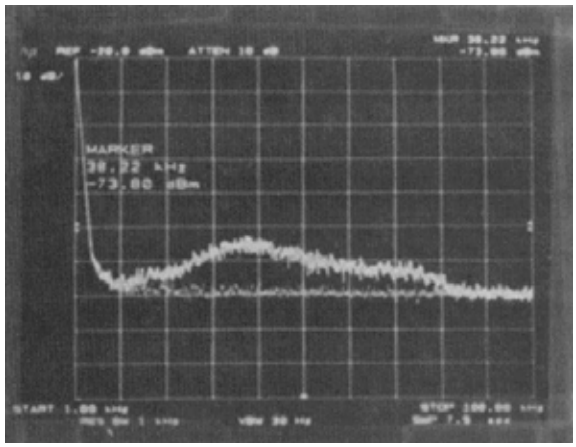
Geçtiğimiz yıl yeni bir akustik teknoloji kullanıma sunuldu. Bu teknoloji, test nesnesinin geleneksel görünür ışık görüntüsünün üzerine eklenmiş ses kaynaklarının görüntülerini oluşturmak için bir araya getirilmiş düzinelerce küçük mikrofon içeren bir akustik kameradır [5]. Kamera aslen gaz kaçaklarının algılanması için geliştirilmiş olsa da, yüzey deşarjlarını bulmak için de kullanılabilir. Değerlendirilen akustik kamera Fluke ii910, 2 – 50 kHz veya 2 – 100 kHz aralığında çalışan 64 mikrofona sahiptir. Operatör, dokunmatik ekran aracılığıyla 5 – 20 kHz arasında bir bant genişliği ve bu aralık içinde herhangi bir merkez frekansı seçebilir. Nominal olarak 0,5 – 100 m uzaktaki nesnelerden gelen ses görüntüsünü algılayabilir. Bu, yüksek gerilimlerin mevcut olduğu yerlerde PD ve korona algılamada güvenli bir şekilde kullanılabileceği anlamına gelir. Ses seviyesi dB cinsinden ölçülür ve ses seviyesi için renk kodlu bir ölçek vardır. Bu cihaz, ses seviyesinin belirlenmiş 50/60 Hz AC döngüsüne göre ölçülebildiği ve akustik PRPD modeli üreten bir moda sahiptir. Hem anlık görüntüler hem de videolar standart sektör formatlarında kaydedilebilir.

Bu makalede, akustik kameranın yüzey PD'si ve koronayı konumlandırma etkililiği, bir nokta–düzlem korona test nesnesi ve çeşitli statör bobini ve statör sargısı test nesneleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Özel olarak aşağıdakiler belirlenmiştir:

- Optimum algılama frekansı
- Test nesnesine mesafenin etkisi
- Akustik ve UV kameralarla ölçülen PDIV'nin karşılaştırması.

Test nesneleri ve ekipman

Korona test nesnesinin (T1) nokta–düzlem geometrisi vardı. Nokta yarıçapı yaklaşık 250 µm ve nokta ile yer düzlemi arasındaki boşluk 25 mm idi. Yaklaşık PDIV 6 kV rms ac idi. Bu, IEEE 1799'da [6] tarif edilen korona test nesnesine benzerlik gösterir.



Şekil 1. Yüzey PD'sinin akustik yanıtının frekans ile karşılaştırması (daha soluk çizgi, gerilim kapalıyken oluşan arka plan gürültüsüdür). Dikey ölçek 10 dBm/bölümdür ve yatay ölçek 1 kHz –100 kHz'dir. 100 kHz'ye kadar düz tepki veren bir B&K 4135 mikrofon kullanıldı. [4].

Ayrıca çeşitli statör bobini test nesneleri de kullanıldı. T2, gerilim dayanıklılığı testinden geçmiş bir 13,8 kV bobindi. PD yuvası yarı iletken (OCP) kaplaması, ciddi bir bozulma yaşamıştı ve birkaç noktada yüzey PD'si nedeniyle yarı iletkenlik kaybolmuştu. Bobin aynı zamanda silikon karbür kaplama/yarı iletken kaplama arabiriminde bozulma yaşamıştı. Bobin topraklanmış bir sahte yuvaya monte edildi.

Test nesnesi T3, fazdan faza 2,4 kV'ye derecelendirilmiş üç bobinden oluşan bir setti ve topraklanmış veya dalgalı olabilecek yuvadaki bir bobin bacağına özel olarak yarı iletken kaplamalar uygulanmıştı. Üç bobin üç fazlı bir AC kaynağına bağlandı. Bobinlerin yuva alanında doğal iç boşluk PD'si vardı. Bobinleri birbirlerine göre hareket ettirerek son sargı alanlarında fazdan faza PD de oluşturulabilirdi.

Test nesnesi T4, bakır iletkenlerin toprak duvarı yalıtımından ayrıldığı termal döngü testine tabi tutulan bir bobinden alındı. Bu, iç tabakalara ayrılma PD'si oluşturur. Çubukta ayrıca küçük miktarda PD bastırma kaplama bozulması vardı. Çubuk 11 kV olarak derecelendirildi.

Test nesnesi T5, 6 kV dereceli bir motor statörü sargısıydı. Yuva çıkışında bulunan PD kaynağı testten önce bilinmiyordu ve akustik kamerayla konumlandırılabildi.

Elektriksel PD, düşük frekans (IEC 60270) aralığında çalışan PDTech DeltaMaxx ile ölçüldü. Akustik kameraya ek olarak, kaynaklardan gelen ultraviyole görüntü bir OFIL DayCor Superb kamerayla ölçüldü.

Algılama frekansı

Hem T1 hem de T2 test nesnesi, akustik gürültünün ortasında PD'yi algılamak için en iyi frekansı bulmak amacıyla kullanıldı. T1 için test nesnesiyle kamera arasındaki mesafeler 1 – 8 m arasında değişiyordu. T2 için test nesnesi 2–4 m idi. Şekil 2'de T2 bobin test nesnesiyle kullanılan kamera gösterilmektedir. Her durumda, stabil bir PD/korona kaynağı sağlamak amacıyla test nesnesi, görüntülemeden önce 5 dakika boyunca sabit bir gerilimde çalıştırıldı. Merkez frekansları 10 kHz – 90 kHz aralığında, 10 kHz'lik kademelerde, +/– 5 kHz bant genişliğiyle seçildi.

Şekil 3, nokta–düzlem test nesnesinden 2 m ve 8 m mesafede, PDIV'nin çok üzerinde olan 10 kV rms gerilimde kaydedilmiş akustik görüntüleri göstermektedir. Gökkuşağı renkli daire, koronaya ortalanmıştır. Görüntü, dB cinsinden maksimum ses seviyesini görüntünün sağ üst köşesinde göstermektedir. Maksimum ses seviyesi, 35 – 45 kHz'den ölçülen aynı uygulanmış gerilim için 2 m'de 24 dB ve 8 m'de 12 dB oldu. Akustik kamerada, seçilen frekans aralığındaki sesin kaynağını otomatik olarak bulma ve PD kaynağından kameraya olan uzaklığı belirleme özelliği bulunur. Ancak Şekil 3b, bu özel kurulumda korona kaynağının 8 m'de otomatik olarak bulunamadığını göstermektedir (kaynak otomatik olarak 6 m'ye kadar mesafelerde konumlandırılmıştır).

Tablo 1'de 10 kV rms'de nokta–düzlem test nesnesi (T1) için üç mesafede frekans bandı ile dB cinsinden PD ses seviyesinin karşılaştırması gösterilmektedir. Geleneksel PD detektörü ile kaydedilen PD büyüklüğü 10 nC oldu. İkinci sütun, nokta düzlemine güç verilmemişken ve dolayısıyla korona yokken kaydedilen ses seviyesini gösterir. Bu "gürültü tabanı" gürültü ortamına bağlıdır ve test nesnesinin uzaklığından bağımsızdır.

Şekil 2. Bobin T2'de PD'yi algılamak için kullanılmakta olan akustik kameranın fotoğrafı.

(3a)

(3b)

Şekil 3. 35 – 45 kHz'de T1 test nesnesinden 2 m (a) ve 8 m (b) uzakta kaydedilen nokta–düzlem korona akustik görüntüsü

Merkez frekansı* (kHz)	Gürültü tabanı** (dB)	Test nesnesine uzaklık (m)					
		2 m		4 m		8 m	
		dB	Net	dB	Net	dB	Net
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	–

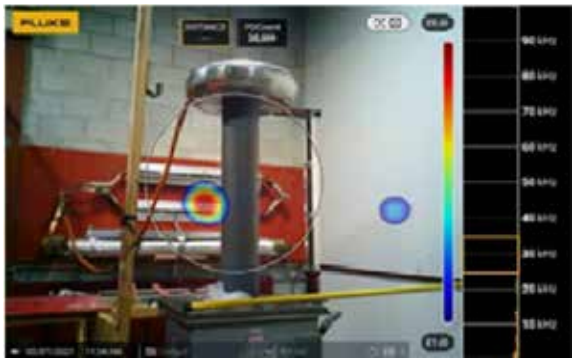
*Bant Genişliği +/– 5 kHz

**Uygulanmış gerilim olmadığında

Tablo 1. Akustik kamera ses seviyelerinin nokta–düzlem test nesnesi frekansı ve mesafesiyle karşılaştırması

75 kHz'nin üzerinde, gerilim açık veya kapalı da olsa ses seviyesi aynıydı. 5 – 15 kHz aralığında, akustik görüntü üzerinde muhtemelen arka plan gürültüsü yüzünden çok sayıda "leke" vardı ve bu nedenle korona kaynağı tanımlanamadı. Tablo 1'deki "Net" sütunları, gerilim açık ve kapalıyken ses seviyesi arasındaki farkı göstermektedir. Genellikle, algılama frekansı aralığı azaldıkça, daha yüksek net ses seviyeleri ölçüldü. Ancak korona ile ilişkilendirilmemiş daha fazla "leke" olduğu fark edildi. [4]'te de görüldüğü gibi, korona algılaması için optimum frekanslar 30 – 50 kHz'dir. Mesafe arttıkça işlenmemiş ve net ses seviyesi azalır. Yüksek frekanslar genellikle düşük frekanslara göre daha güçlü bir şekilde zayıfladığından bu beklenen bir durumdur. Ayrıca, sabit bir mesafe için frekans azaldıkça akustik görüntünün alanı muhtemelen daha düşük frekanslardaki daha uzun akustik dalga boyları nedeniyle artar.

Tablo 2'de, akustik kamera ile bobin arasında 2 m ve 4 m mesafe varken statör bobini (T2) için PD ses seviyesi ile frekans karşılaştırması gösterilmektedir. Bobinde ciddi hasar görmüş yarı iletken kaplamalar vardı ve hattan toprağa 8 kV rms güç verildiğinde PD bu hasarlı konumlarda belirgin oluyordu. Aynı şekilde, PD'yi algılamak için en iyi frekanslar 30 – 50 kHz aralığında görünmektedir. Üst frekans aralıkları, gürültü tabanının üzerinde az miktarda ultrasonik sinyal üretirken düşük frekanslarda ortam gürültüsü PD kaynağını engelledi. Şekil 4a, yüzey PD'li bobinin akustik görüntüsünü göstermektedir. Ayrıca bu fotoğrafta, orijinal bobin PD kaynağının duvardan yansıması görülmektedir. Bu yansıma, gerilim azaldıkça tıpkı PD kaynağı gibi kayboldu. Geçmişte bu tür yansımalar yönlü ultrasonik mikrofonların kullanımıyla ilgili birçok soruna neden oluyordu. Şekil 4b, aynı kaynağın UV görüntüsünü göstermektedir.



(4a)

(4b)

Şekil 4. Kameradan 4 m uzakta simüle edilen bir yuvada, 8 kV rms'de çalışan bobinin ciddi yarı iletkenlik hasarından kaynaklanan PD. (a), 25 – 35 kHz'de akustik görüntüyü göstermektedir. Gökkuşağı renkli çember gerçek PD kaynağıdır. Duvardan gelen mavi (düşük ses seviyesi) yansımaya dikkat edin. (b), UV kameradan kaydedilen ve küçük beyaz noktaların deşarjı gösterdiği görüntüyü gösterir.

Merkez frekansı (kHz)	Gürültü tabanı (dB)	Test nesnesine uzaklık (m)			
		2 m		4 m	
		dB	Net	dB	Net
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	–

Tablo 2. PD ses seviyesinin T2 bobin test nesnesi frekansı ve mesafesiyle karşılaştırması

PDIV ölçümünde UV ve akustik kameraların karşılaştırılması

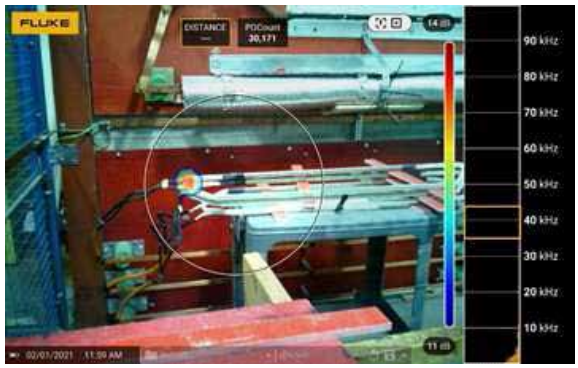
Geleneksel PD detektörüyle birlikte hem akustik kamera hem de ultraviyole (UV) kamera kullanarak PD başlangıç gerilimi (PDIV) ve PD sönüm gerilimini (PDEV) karşılaştırmak için T1 korona ve T2 bobin PD test nesneleri kullanıldı. Akustik kamera, önceki testlerde optimum aralık olduğu bulunan 35 – 45 kHz bandında PDEV ve PDIV'yi ölçmek üzere ayarlandı. Neredeyse tüm durumlarda, başlangıç ve sönüm gerilimleri birbirinin 100 V yakınındaydı. Bobinde, 2,5 m ve 4 m mesafelerde başlangıç ile sönüm gerilimleri arasında fark yoktu (Tablo 3).

T1'deki geleneksel PD testi, PRPD'nin nokta düzlem koronada pozitif PD (negatif yarım döngüde) ve keskin, yüksek negatif PD (pozitif AC döngüsü) için farklı modelleri olduğunu gösterdi. Negatif PD yaklaşık 10 nC iken pozitif PD yaklaşık 2 nC idi. Başlangıç gerilimine yakınken negatif keskin korona aralıklı, pozitif korona ise daha stabildi.

UV kameranın bir avantajı, deşarj konumuna yakınlaştırma yapabilmesidir; buna karşılık akustik kameranın sabit bir görüş alanı vardır (Şekil 4a – 4b).

Test nesnesi/ mesafe (m)	Geleneksel		UV kamera		Akustik kamera	
	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV
2 m'de T1	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2
2,5 m'de T2	–	–	3,5	3,2	3,5	3,2
4 m'de T2	–	–	3,5	3,5	3,5	3,5

Tablo 3. Farklı detektörler için PDIV ve PDEV (kV) karşılaştırması



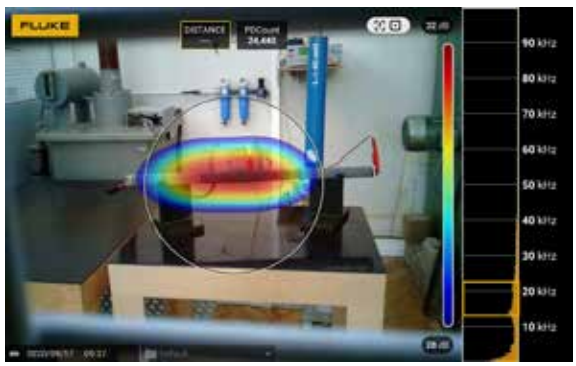
Şekil 5. A ve C faz bobinlerinin neredeyse temas ettiği uç sargısındaki fazdan faza PD'den PD. B fazı 3 bobinin altındadır

Farklı test nesnelerinin anlık görüntüleri

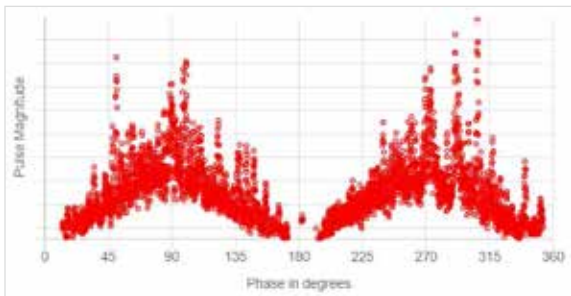
Akustik kamera, PD aktivitesinin hem anlık görüntülerini kaydedebilir hem de 5 dakikaya kadar video kaydedebilir. Bu, araştırma yapmak ve PDIV/PDEV'yi ölçmek için faydalıdır. Video görüntüsü örnekleri [7]'de görülebilir. Bu bölümde, farklı test nesnelerinden akustik görüntülerin anlık çekim örnekleri gösterilmektedir.

Şekil 5, fazdan faza gerilim 6,9 kV veya 4,1 kV hattan toprağa olduğu zaman uç sargısında A ile C bobinleri arasındaki test nesnesi T3'ün fazdan faza PD'sini göstermektedir. A fazı bobin konumu, A ve C fazları bağlantı uçlarının yakınında neredeyse temas edecek şekilde ayarlandı. Bobinlerin yuva kısımları, fazdan toprağa PD'yi önlemek için topraklanmadı.

T4, bakır iletkenler ile toprak duvarı arasında tabakalarına ayrılan bir statör çubuğudur. Akustik kamera 13 – 23 kHz aralığına ayarlandığında, çubuğun tamamında elektriksel stres olan noktalarda akustik aktivite görüldü (Şekil 6a). Kameranın zamana göre ses seviyesini indirme özelliği kullanılarak ses seviyesi–AC faz açısı tablosu üretildi (Şekil 6b). Polarite hakimiyeti olmadan tipik PD fazı çözümlenmiş yanıtı gösteren bu durum, kameranın düşük bir frekansta (gürültüye karşı daha hassas olacaktır) ve düşük ses seviyesinde tabakalara ayrılma PD'sine karşı hassas olduğunu gösterir.



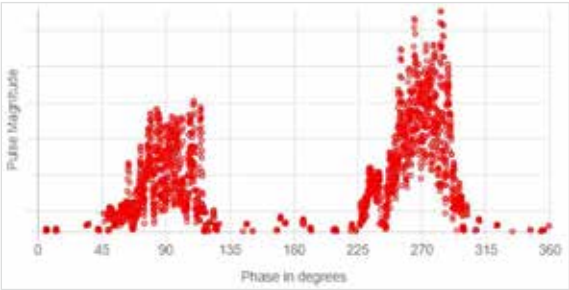
(6a)



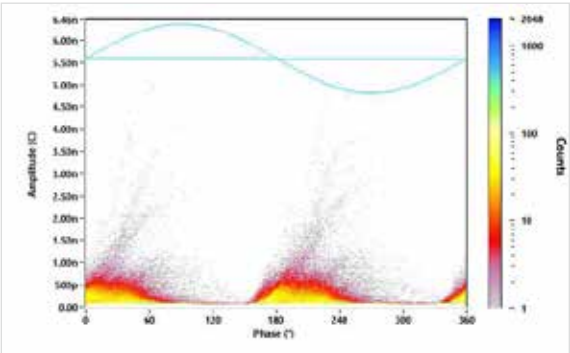
(6b)

Şekil 6. Termal döngüye girmiş bir çubuktan olası iç tabakalara ayrılma PD'si (a). (a) öğesinde kullanılan alt frekans aralığına ve çok daha düşük ses seviyesine dikkat edin. (b), 50 Hz AC döngüsü varsayılarak akustik kamera tarafından üretilen "PRPD" grafiğini gösterir

(7a)



(7b)



(7c)

Şekil 7. Tek fazda çevrimdışı PD testinde PD'nin akustik kamera ve geleneksel PD ölçümü. Bir bobinin yuva çıkışındaki PD, (a) öğesinde açıkça gösterilirken (b), pozitif hakimiyetli akustik PRPD'yi göstermektedir. Gerçek faz açısı (b) öğesinde doğru olmayabilir. (c), geleneksel çevrimdışı PD testi PRPD'dir.

Şekil 7a, bir fazı 3 kV'ye güç verilen 6 kV statör sargısının (T5) 35 – 45 kHz'de akustik görüntüsünü göstermektedir. Yüzey PD'si, bir bobinin yuva çıkışında belirgindir. Bu, yuvanın gözle kontrol edilmesiyle doğrulandı.

Sonuçlar

Akustik PD kamera, güç verilmiş test nesnelerinden güvenli bir mesafede yüzey PD'sinin konumunu bulma özelliğini iyileştirmesi açısından çok faydalı bir araç gibi görünmektedir. Kamera, çoğu pratik yüksek gerilimli ekipmanda gerçek PD alanlarını belirlemek için yeterli uzamsal çözünürlüğe sahiptir. PD büyüklüğü (ses seviyesiyle ilişkili olduğu varsayılır)-AC döngüsünü kaydetme özelliği, PD ve koronanın algılandığı konusunda güven verir. Geleneksel PD detektörleri, akustik kamera ve UV kamera için PD başlangıç ve sönüm gerilimleri, korona ve yüzey PD'si için hemen hemen aynı görünmektedir. Eski ultrasonik mikrofona kıyasla akustik kameranın önemli bir avantajı, gerçek PD alanlarını yansımalardan kolayca ayırt edilebilmesidir. Yüzey PD'si ve korona için en iyi sinyal-gürültü oranı 30 – 50 kHz aralığı gibi gözükmektedir. Ancak, UV kameralarının aksine, küçük bir büyüklükte de olsa önemli iç boşluk PD'sinin algılanabileceğine dair bazı kanıtlar vardır.

Teşekkür bölümü

Yazarlar, ii910 akustik kamerayı ödünç veren Fluke Corporation'a teşekkür ediyor. Ayrıca, İsviçre'deki Von Roll Enstitüsü'nden Bay Christoph Herold'a da yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

Referanslar

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

[2] G.C. Stone ve ark., "Electrical Insulation for Rotating Machines", 2. baskı, Wiley-IEEE Press, 2014.

[3] K.W. Forsyth, "Electro-optical, non-contact measurement of electrical discharges", ABD Patenti 6476396B1, Kasım 2002.

[4] R. Van Haeren ve ark., "Preventing failure in outdoor distribution class metalclad switchgear", IEEE Trans PAS, Ekim 1985, s. 2701-2712.

[5] C.P. Suurmeijer ve ark., "Handheld Acoutic Imager", ABD Patenti D907,097, Ocak 2021.

[6] IEEE 1799:2012, Statör Bobinleri, Çubuklar ve Sargılarda Harici Deşarjların Kalite Kontrol Testi İçin IEEE Tarafından Önerilen Uygulama.

[7] https://irispower.com/learning-centre/acoustic-camera-video-files/

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

Fluke TURKIYE
P.O. Box 1186
5602 BD Eindhoven
The Netherlands
www.fluke.com.tr

For more information call:
In the U.S.A. (800) 443-5853
In TR +31 (0)40 267 5100
In Canada (905) 890-7600
From other countries +1 (425) 446-5500

©2021 Fluke Corporation. All rights reserved.
Data subject to alteration without notice.
04/2021 210349-tr

Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.