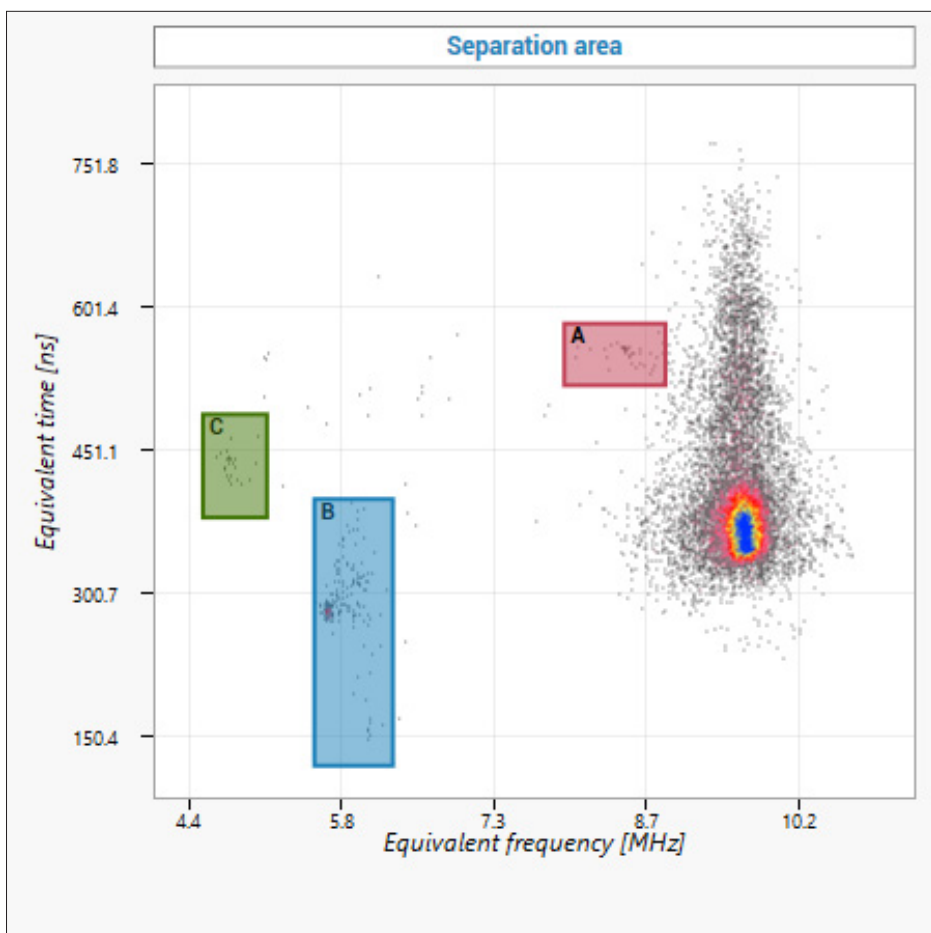


# FÖRBÄTTRAD PD-MÄTMETOD PÅ KABELTILLBEHÖR

RAPPORT 2020:671



UNDERHÅLL AV ELNÄT





# Förbättrad PD-mätmetod på kabeltillbehör

JOHAN LUNDENGÅRD

ISBN 978-91-7673-671-5 | © Energiforsk maj 2020

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



## Förord

**Kabelfel som orsakas av partiella urladdningar är kostsamt för elnätets ägare och det är därför av stor vikt att kunna mäta och detektera partiella urladdningar i ett tidigt skede. Det finns flera metoder för detta, men en utmaning är att detekteringen av partiella urladdningar ofta försvåras av brus i mätningarna.**

Målet med detta projekt har varit att ta fram en ny och förbättrad metod för att filtrera signalerna, vilket gör det möjligt att effektivt sortera bort bakgrundsbrus i ett tidigt skede. Under vissa givna förutsättningar går metoden även att introducera och använda på kablar under drift.

Projektet har genomförts inom ramen för Energiforsks industriforskningsprogram Underhåll av elnät, och referenspersoner från programmets styrgrupp har varit

- Hans-Erik Carlsson, E.ON Energidistribution AB

Programmet Underhåll av elnät finansieras av ABB, Bodens Energi Nät, Borås Energi Nät, C4 Elnät, Ellevio, Eskilstuna Energi & Miljö, Falu Energi & Vatten, Göteborg Energi, Elinorr Ekonomisk förening som består av 16 elnätföretag, E.ON Energidistribution, Jämtkraft Elnät, Jönköping Energi Nät, Karlstads El- och Stadsnät, Krafringen Elnät, Luleå Energi, Skellefteå Kraft Elnät, Kungälv Energi, Mälarenergi Elnät, Nacka Energi, Svenska kraftnät, Tekniska verken i Linköping, Pite Energi, Umeå Energi Elnät, Vattenfall Eldistribution och Öresundskraft.

Lennart Kjellman,  
Programansvarig Underhåll av elnät  
Stockholm 18 maj 2020

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

**Det finns ett växande behov av mätningar för att tillståndskontrollera kablar och kabeltillbehör i syfte att minimera antalet kabelfel i nätet. Här redogörs för en specifik metod för mätning av partiella urladdningar. Metoden inkluderar en lösning för separation av signaler med olika egenskaper, vilken underlättar detektering av signaler av intresse. Detta är av stort intresse för mätningar i driftsatta anläggningar där nivåerna av bakgrundsbrus ofta är höga.**

Kabelfel, t.ex. på grund av isolationsfel, leder ofta till stora konsekvenser i form av långa avbrott. Isolationsfel föregås i många fall av partiella urladdningar (eng. partial discharges, PD). Genom att detektera och mäta PD är det därför möjligt att identifiera objekt som riskerar att med tiden drabbas av isolationsfel. Baserat på denna information kan man sedan planera in och vidta lämpliga åtgärder för att undvika haveri samt efterföljande avbrott och akuta reparationsinsatser.

Partiella urladdningar ger upphov till snabba elektriska strömpulser med relativt låga amplituder vilka kan detekteras och mätas med hjälp olika typer av mätutrustning. Svårigheten vid denna typ av mätningar är att det i stort sett alltid förekommer störningar i elektriska anläggningar, vilka också registreras vid mätningarna tillsammans med eventuella signaler av intresse. Dessa störningar kan härröra från exempelvis omriktare, koronauraddningar i luft, etc.

Vid mätning av partiella urladdningar i fält är det som regel nödvändigt att kunna sortera bort störningar och bakgrundsbrus. Konventionellt görs detta genom tillämpning av tröskelvärden med avseende på amplitud, med följden att man riskerar att filtrera bort relevant data.

I det aktuella projektet har en metod för filtrering av PD-mätsignaler baserad på pulsernas varaktighet och frekvensinnehåll utvärderats. Filtreringen, som är mjukvarubaserad, åstadkoms genom att välja ut pulser representerade i ett så kallat tid-frekvens (T-F) diagram.

Störningar och bakgrundsbrus kan med hjälp av T-F-filtrering sorteras bort redan i mätstadiet. Detta gör att rimliga och hanterbara mängder data, i form av potentiellt intressanta pulser kan samlas in. Vid efterföljande analys kan sedan ytterligare filtrering tillämpas för att försöka särskilja olika typer av pulser, med syfte att identifiera olika källor.

Erfarenheterna från mätningar utförda med det aktuella PD-mätsystemet indikerar att filtreringen möjliggör detektering av urladdningar i driftsatta kabelsystem, även i miljöer med relativt hög grad av bakgrundsstörning. Den separering av PD-pulser och förtydligade av deras karaktär och mönster som filtreras fram i dessa mätningar hade sannolikt inte varit möjligt med konventionella PD-mätmetoder, där bakgrundsbruset rimligen dolt information av intresse.

I anläggningar där det går att applicera givarna på ett säkert sätt i drift så finns även potential att utföra mätningar utan att ta anläggningen ur drift.

## Summary

**There is a rising demand for diagnostics of cables and their accessories in order to minimize the number of cable faults in the power network. A specific method for measurements of partial discharges is presented here. The method includes a solution for separation of signals with different properties, which makes it easier to detect signals of interest. This is of great interest when measurements are made, where level of background noise often is high.**

Cable faults, e.g. caused by insulation fault, can often have severe consequences and lead to long outage periods. Insulation faults are in many cases preceded by partial discharges, PD. By detection of PD it is therefore possible to identify equipment which over time is facing insulation fault. Based on this information is it possible to plan for and make appropriate actions to avoid failure, resulting in outage and emergency repair work.

Partial discharges produce fast electrical pulses with relatively low amplitudes, which can be detected and measured by different types of equipment. The challenge when performing these measurements is the presence of noise in electrical installations. These disturbances will also be included in the measurements together with the signals of potential interest. Such disturbances may originate from e.g. converters or corona discharges.

When performing PD measurements in the field, sorting out disturbance and background noise it is generally required. Conventionally this is done by applying a threshold level to the amplitude, which gives the risk to filter out relevant data.

In this project has a method for filtering of PD measurement signals based on the duration and frequency content of the pulses been evaluated. The software-based filtering is achieved by selecting pulses presented in a so-called T-F map.

Disturbance and background noise can be rejected T-F map filtering already in the measuring phase. This allows for collection of reasonable amounts of data, in the form of potentially interesting pulses. In post analysis of the data further filtering can be applied to possibly separate the types of pulses, in order to identify different sources.

The experiences from measurements made by use of the rented PD measuring system indicates that the filtering allows for detection of discharges in cable systems in service, even in environments with a high level of background noise. The separation of PD pulses and highlighting the characteristics and pattern made by filtering in these measurements would likely not been possible by use of conventional methods, where much is expected to be hidden by the background noise.

In installations where the sensors can be applied in a safe manner on energized equipment, the method can potentially be used also for on-line measurements without scheduled outages.

## Innehåll

|                  |                                           |           |
|------------------|-------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>         | <b>Inledning</b>                          | <b>7</b>  |
| <b>2</b>         | <b>Partiella urladdningar</b>             | <b>8</b>  |
| <b>3</b>         | <b>Beskrivning av använt PD-mätsystem</b> | <b>10</b> |
| <b>4</b>         | <b>Mätningar</b>                          | <b>13</b> |
| 4.1              | Ställverk med statiska omriktare          | 13        |
| 4.1.1            | Fack 1 - från omriktare                   | 13        |
| 4.1.2            | Fack 2 - från omriktare                   | 20        |
| 4.1.3            | Fack 3 - banmatning                       | 22        |
| 4.2              | 10 kV kablar i ställverksfack             | 23        |
| <b>5</b>         | <b>Praktiska erfarenheter</b>             | <b>29</b> |
| <b>6</b>         | <b>Diskussion och slutsatser</b>          | <b>31</b> |
| <b>Bilaga A:</b> | <b>Teknisk specifikation Aquila</b>       | <b>32</b> |



# 1 Inledning

**Det finns ett växande behov av mätningar för att tillståndskontrollera kablar och kabeltillbehör i syfte att minimera antalet kabelfel i nätet. Här redogörs för en specifik metod för mätning av partiella urladdningar. Metoden inkluderar en lösning för separation av signaler med olika egenskaper, vilken underlättar detektering av signaler av intresse. Detta är av stort intresse för mätningar i driftsatta anläggningar där nivåerna av bakgrundsbrus ofta är höga.**

Kabelfel, t.ex. på grund av isolationsfel, leder ofta till stora konsekvenser i form av långa avbrott. Isolationsfel föregås i många fall av partiella urladdningar (eng. partial discharges, PD). Genom att detektera och mäta PD är det därför möjligt att identifiera objekt som riskerar att med tiden drabbas av isolationsfel. Baserat på denna information kan man sedan planera in och vidta lämpliga åtgärder för att undvika haveri samt efterföljande avbrott och akuta reparationsinsatser.

Partiella urladdningar ger upphov till snabba elektriska strömpulser med relativt låga amplituder vilka kan detekteras och mätas med hjälp olika typer av mätutrustning. Svårigheten vid denna typ av mätningar är att det i stort sett alltid förekommer störningar i elektriska anläggningar, vilka också registreras vid mätningarna tillsammans med eventuella signaler av intresse. Dessa störningar kan härröra från exempelvis omriktare, koronauraddningar i luft, etc.

Vid mätning av partiella urladdningar i fält är det som regel nödvändigt att kunna sortera bort störningar och bakgrundsbrus. Konventionellt görs detta genom tillämpning av tröskelvärden med avseende på amplitud, med följden att man riskerar att filtrera bort relevant data.

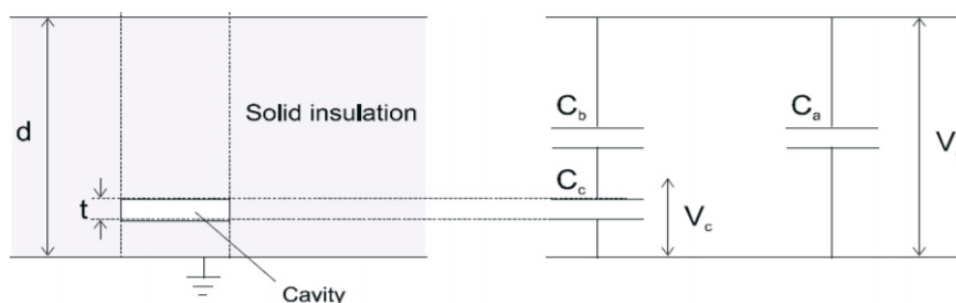
Den aktuella studien har utvärderat en metod som använder sig av en mjukvarubaserad lösning vilken kategoriserar PD-pulserna utifrån varaktighet och frekvensinnehåll. Metoden har tidigare undersökts i laboratoriemiljö där den visat sig fungera bra. Den potentiella nyttan av metoden för filtrering är dock störst vid mätningar i fält, varför projektet ämnat verifiera metoden under verkliga förhållanden.

## 2 Partiella urladdningar

Partiella urladdningar (PD) uppstår typiskt när den elektriska fältstyrkan i eller vid ett spänningssatt objekt blir tillräckligt hög för att det skall leda till lokala isolationssammanbrott. Urladdningarna överbryggar endast en del av isolationen; det uppstår således inte fullständigt isolationssammanbrott och isolationsfel.

PD i luft kallas korona och detta fenomen brukar normalt sett inte påverka elkraftutrustningar i någon större utsträckning. Urladdningar som uppstår i fasta isolationsmaterial eller i gränssytor mot sådana startar dock ofta en nedbrytningsprocess vilken, om den får pågå för länge, kan leda till fullständigt isolationssammanbrott (isolationsfel i anläggningen).

Partiella urladdningar ger upphov till mycket snabba elektriska strömpulser med stigtider i mikrosekund-området och med relativt låga amplituder, vilka kan detekteras och mätas med hjälp olika typer av mätutrustning. Principen för PD i en kavitet i fast isolationsmaterial illustreras i Figur 2-1.



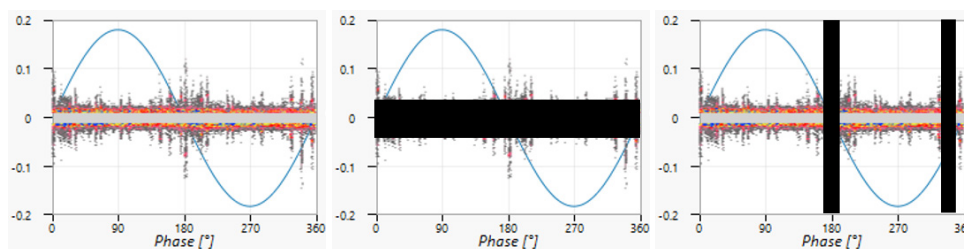
Figur 2-1. Illustration av PD i ett isolationssystem av fast isolationsmaterial. Till vänster visas en hålighets höjd  $t$  innesluten i fast isolation med tjocklek  $d$ . Kretsen till höger representerar detta ur ett elektriskt perspektiv. Håligheten har en kapacitans  $C_c$  som kortsluts då spänningen  $V_c$  överstiger dess hållfasthet. Detta leder till en snabb omfördelning av laddningar vilket resulterar i en strömpuls som kan detekteras med hjälp av ett PD-mätssystem.

Svårigheten vid denna typ av mätningar är att det alltid, förutom eventuella signaler av intresse, även finns olika typer av störningar i elektriska anläggningar vilka också detekteras av mätsystemet. Störningar kan till exempel härröra från omriktare, koronauraddningar eller läckströmmar längs våta isolatorytor. Störningarna kan vara mer eller mindre utpräglade i sin karaktär och de sammanlagda signalerna betraktas ofta som en bakgrundsbrusnivå.

Vid mätning av partiella urladdningar i fält är det därför som regel nödvändigt att kunna sortera bort störningar och bakgrundsbrus. Detta kan göras på olika sätt beroende på hur de mäts och hur resultatet presenteras. Ett vanligt sätt att visualisera detekterade pulser är att presentera uppmätta amplituder i ett diagram tillsammans med läget hos fasspänningen, (engelska Phase-Resolved Partial Discharge, PRPD).

Mätsignalen filtreras alltid genom tillämpning av ett minsta tröskelvärde, vilket innebär att pulser med en amplitud under en viss nivå negligeras. Detta är

nödvändigt för att begränsa den mängd data som skall processas av mätsystemet. Om det finns störningar som är stabila relativt fasspänningens fasläge, t.ex. kommuteringspulser från omriktare, kan man även filtrera mätsignalen genom att blockera mätningen under en del av perioden där störpulserna kommer in, se Figur 2-2. Förutom ovanstående kan man även utnyttja lösningar där man använder analoga eller digitala filter för att blockera vissa frekvensband hos mätsignalen.



**Figur 2-2. Exempel på PRPD diagram. Till vänster: mätning med relativt lågt tröskelvärde. I mitten: illustration av vad man skulle se vid val av ett högre tröskelvärde. Till höger: exempel på hur kortare tidperioder kan blockeras för att sortera bort pulser som ligger stabilt mot fasläget på spänningen.**

PD-mätningar används normalt för att kontrollera isolationssystem hos olika typer av produkter i labbmiljö. För detta tillämpas acceptanskriterier i termer av maximal detekterad laddning (t.ex. 5 pC), uppmätt med en mätkrets med standardiserade egenskaper i termer av bland annat frekvens och bandbredd.

För mätningar vid höga frekvenser (MHz-området) är det dock inte möjligt att förlita sig på samma typ av kalibrering eftersom signalerna från urladdningar förändras när de breder ut sig. Vid mätningar på drifttagna anläggningar är det inte heller alltid möjligt att applicera en känd signal för att kalibrera sitt mätsystem.

### 3 Beskrivning av använt PD-mätsystem

Det Italienbaserade företaget Techimp, som numera ingår i Altanova group, har utvecklat PD-mätsystem och mjukvara med möjlighet att kategorisera detekterade pulser utifrån varaktighet och frekvensinnehåll. I syfte att verifiera de eventuella fördelar denna möjlighet till filtrering ger vid mätningar i fält så hyrdes ett portabelt PD-mätsystem för den aktuella studien.

Mätdatainsamlingen sker genom instrumentet "Aquila" som är inbyggt i en väska, med in- och utgångar för sensorer och spänningsmatning, se bild i Figur 3-1. Instrumentet går även att driva på batteri och kan kopplas till en dator med hjälp av enhetens inbyggda nätverk via Wi-Fi eller optofiber. En teknisk specifikationen för instrumentet finns bifogad i Bilaga A:. Det provade instrumentet hade tre mätkanaler och en särskild ingång för synkronisering mot en extern spänning.

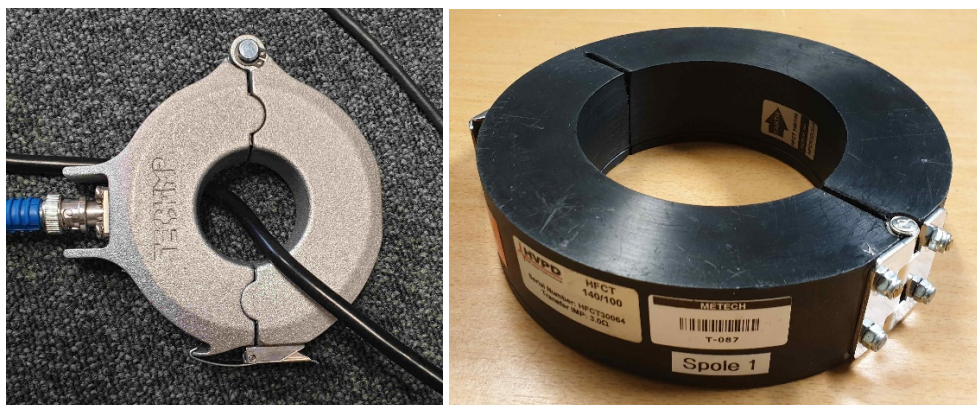


Figur 3-1. Aquila mätsystem



Mätsystemet kan användas med flera olika typer av sensorer. I det aktuella projektet användes två olika typer av delbara högfrekvensspolar (eng. High Frequency Current Transformer, HFCT). Mätningar utfördes dels med Techimp's spolar med inre håldiameter 39 mm samt en lite större spole från HVPD med inre håldiameter på 95 mm, se Figur 3-2.

Som sensor användes även en kapacitiv givare från Techimp som visas i Figur 3-3, vilken anbringades mot kabelmanteln.



Figur 3-2. Till vänster: HFCT från Techimp. Till höger: HFCT från HVPD.



Figur 3-3. Kapacitiv sensor från Techimp monterad på en isolerstång.

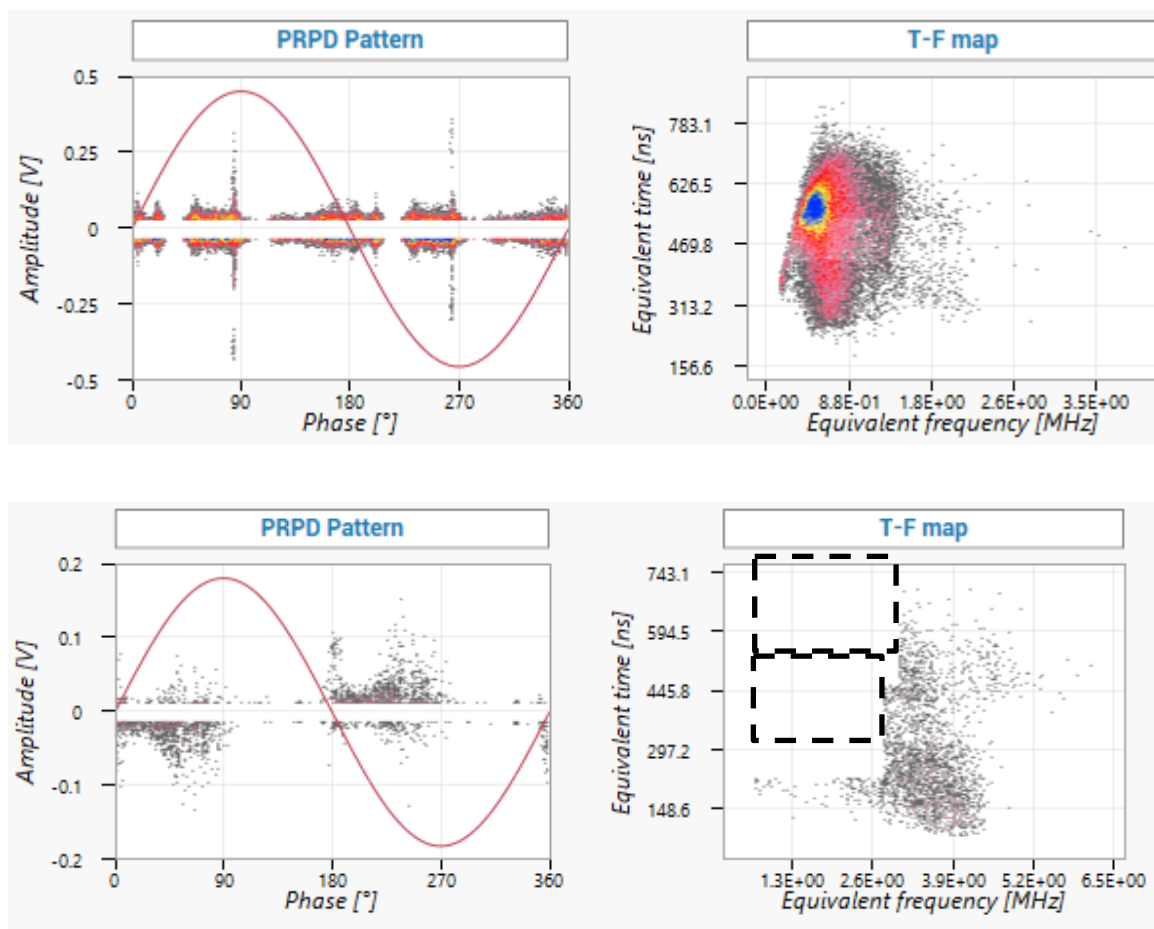
För mätning och analys användes programvaran som Altanova tillhandahöll, PDPro version 1.0.72. Alla inställningar görs i datorn (eller läsplatta) där även mätdata lagras.

Redan under mätstadiet så finns det möjlighet att filtrera bort störningar för att på så sätt öka möjligheten att registrera och spara ett större antal pulser som kan vara av potentiellt intresse i en senare analys. En effektiv filtrering ger möjlighet att sänka tröskelvärdet för hur små pulser som skall inkluderas i mätningen.

Registrerade pulser kategoriseras utifrån varaktighet och frekvensinnehåll och dessa presenteras i ett tids-frekvens (T-F) diagram. Figur 3-4 och Figur 4-2 visar

exempel på presentation av mätsignaler. Mätsignalerna kan filtreras genom att i T-F diagrammet definiera områden där pulser inte skall beaktas (filtreras bort).

Mätmetoden förutsätter att det undersökta objektet är spänningssatt från någon form av yttre spänningskälla. Vid de mätningar som redovisas i denna rapport var kablarna driftsatta. För att montera och avlägsna mätutrustningen togs dock kablarna ur drift. Om givarna kan appliceras på ett säkert sätt med anläggningen i drift så finns potential att göra mätningar utan att avbrott är nödvändigt.



Figur 3-4. Två exempel på PDRP diagram och motsvarande T-F diagram som de kan se ut i vyn för mätningar. Rektanglarna i det nedre T-F diagrammet indikerar områden där pulser filtrerats bort. Dessa pulser filtreras då samtidigt bort från PRPD diagrammet.

## 4 Mätningar

### 4.1 STÄLLVERK MED STATISKA OMRIKTARE

Mätningar utfördes på kablar i tre fack i ett 15 kV ställverk vid en anläggning där flera statiska omriktare är placerade. Omriktarna omvandlar 50 Hz spänning till 16,7 Hz för banmatning. Denna konvertering ger upphov till snabba pulser som kan fortplanta sig i anläggningen såväl via fasledare, som jordsystem eller genom luften.

Mätningar utfördes med anläggningen i drift. För att montera/demontera mätgivarna kring kablarna, vilka var placerade bakom brytarna i ställverksfacken, togs kablarna temporärt ur drift.

För att erhålla en bra synkroniseringssignal för fasspänningen anslöts instrumentets sync-ingång till en lindning på en i anläggningen befintlig spänningstransformator med spänningen 110 V.

#### 4.1.1 Fack 1 - från omriktare

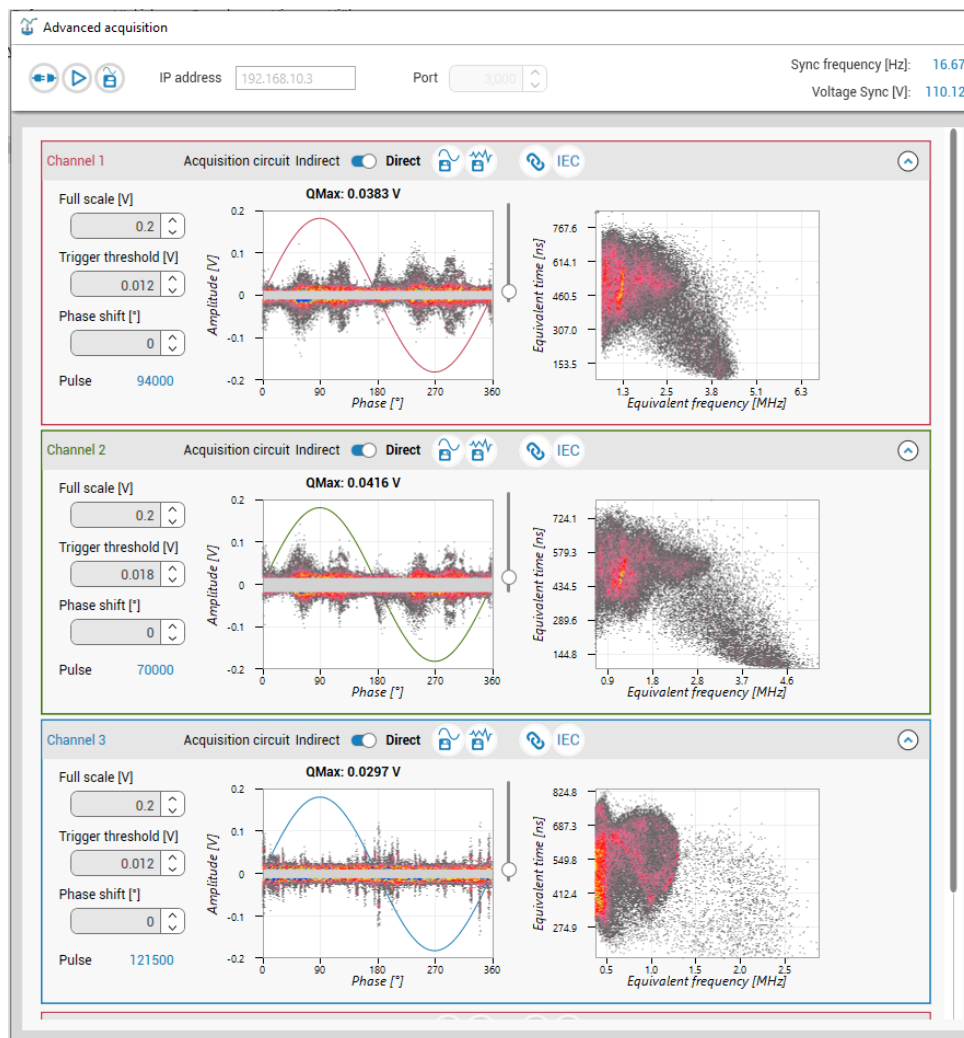
Mätningar utfördes på två parallella kablar med en längd av knappt 400 m, vilka förbinder en statisk omriktare med ett brytarfack i 15 kV-ställverket.

Vid mätning placerades en Techimp HFCT runt vardera jordanslutning av kabelskärmen och en HVPD HFCT runt hela kabel A utanpå manteln inkluderat den tillbakavikta jordanslutningen av kabelskärmen. Den kapacitiva sensorn placerades mot kabel A, utanpå manteln. Givarnas placering visas i Figur 4-1. Samtliga fyra givare kunde dock inte användas för samtidig mätning då instrumentet hade tre mätkanaler.



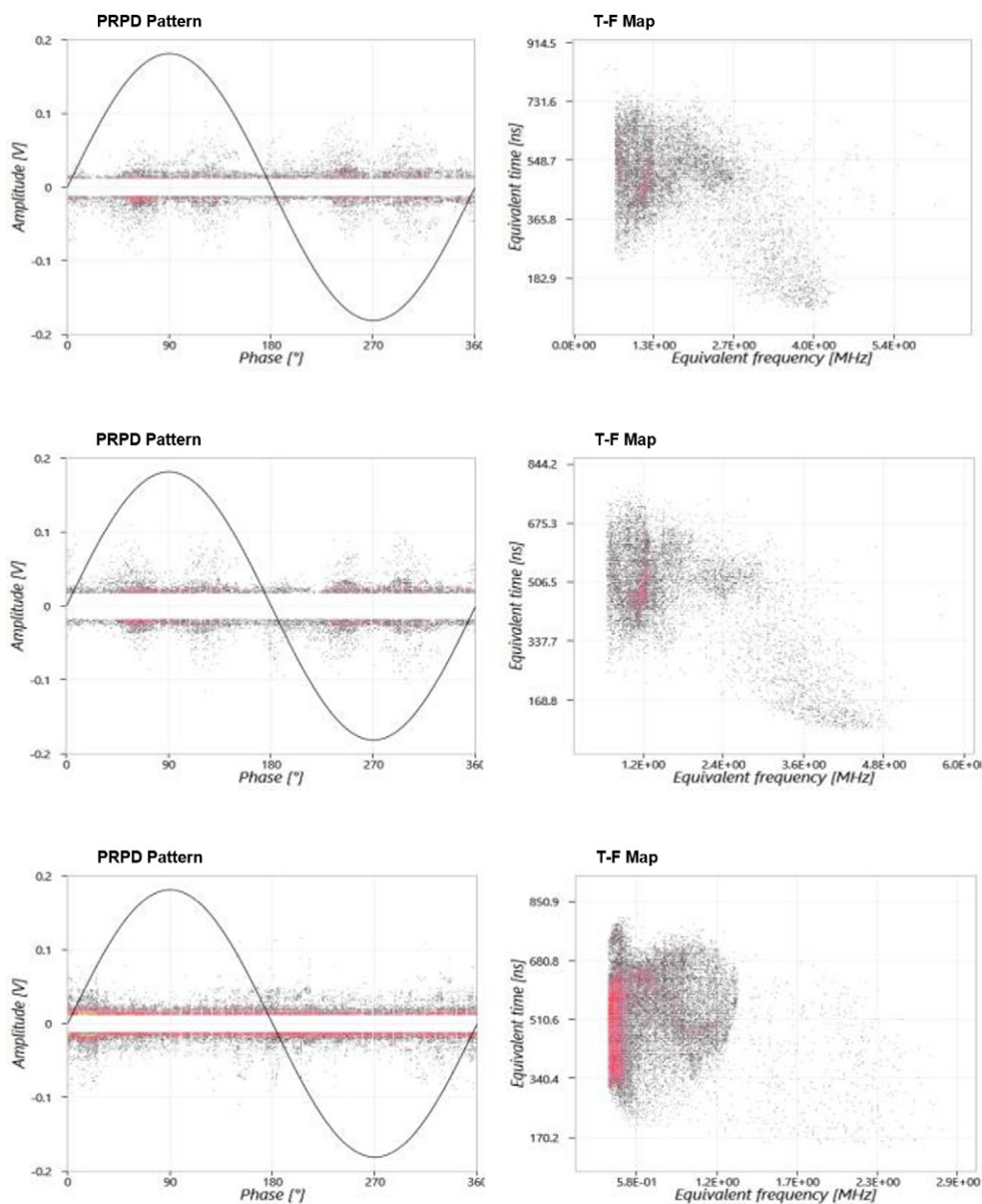
Figur 4-1. Uppkoppling av mätgivare i fack 1.

Först gjordes mätning helt utan filtrering, se exempel i Figur 4-2 och Figur 4-3. I denna mätning ser en stor andel av pulserna ut att vara störningar som sannolikt härrör från omriktaren.



Figur 4-2 Skärmdump från mätprogrammet där pulser enbart presenteras i diagrammen utan att sparas. Ingen filtrering. Överst: HFCT på kabelskärm A. Mitten: HFCT på kabelskärm B. Nederst: HVPD HFCT på kabel A.

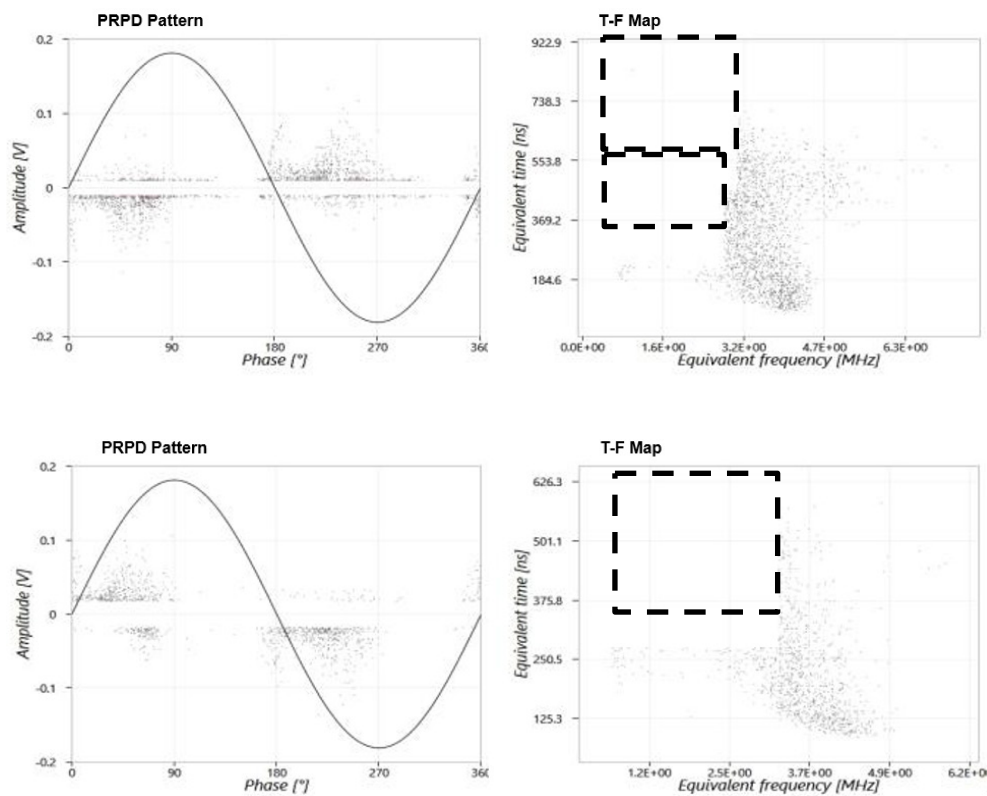




Figur 4-3. Sparad mätning, utan filtrering. Överst: HFCT på kabelskärm A. Mitten: HFCT på kabelskärm B. Nederst: HVPD HFCT på kabel A.

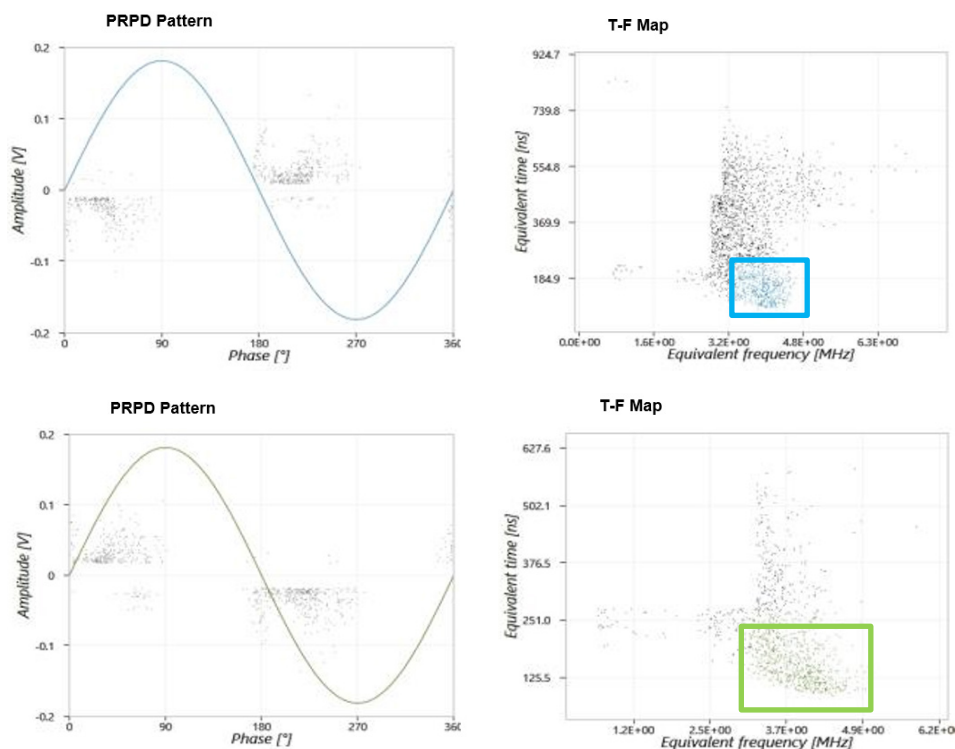
I PRPD diagrammen ovan så är det svårt att urskilja något särskilt ur störningarna från omriktarna. T-F diagrammen indikerar dock att det finns pulser av olika karaktär och att aktiviteten därmed kan härröra från olika källor i systemet. För att undersöka detta gjordes försök med några olika filter (i T-F diagrammet). Figur 4-4 visar ett exempel på resultatet när de mest lågfrekventa pulserna filterades bort.

Ur mätningen med den kapacitiva sensorn kunde inga tydliga PD-pulser eller mönster filtreras fram, varför de fortsatta undersökningarna i facket fokuserades på mätningar med HFCT.



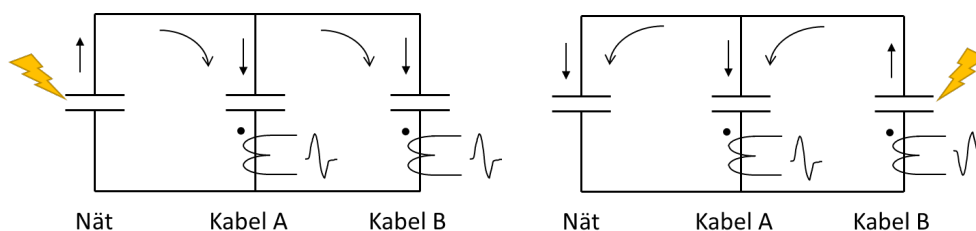
Figur 4-4. Sparad mätning, med filtrering. Övre: HFCT på kabelskärm A. Nedre: HFCT på kabelskärm B. Rektanglarna visar på områden där pulser filtrerats bort.

Med den applicerade filtreringen så framträder ett annat mönster tydligare i PRPD diagrammen. Det intressanta med dessa pulser är att de har olika polaritet i de två kabelskärmarna. För att studera detta närmare så filtrerades mätresultaten ytterligare vilket visas i Figur 4-5.



Figur 4-5. Sparad mätning med ytterligare filtrering där endast pulser som markeras av rektanglarna i T-F diagrammen visas i PRPD diagrammen. Övre: HFCT på kabelskärm A. Nedre: HFCT på kabelskärm B.

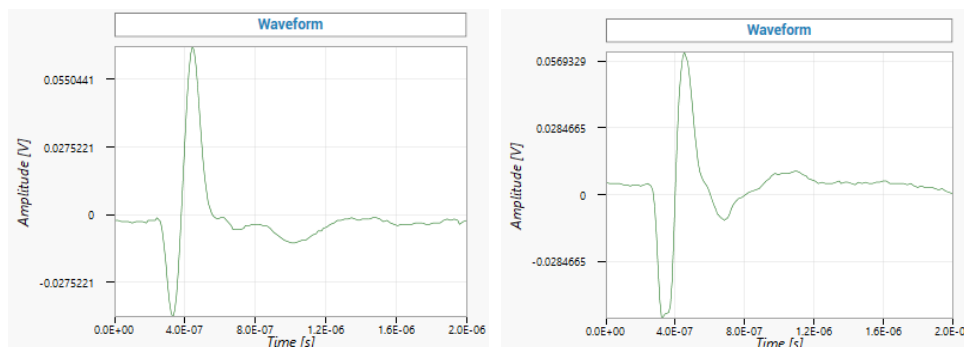
Den motsatta polariteten hos pulserna i de två kabelskärmarna antyder att dessa har olika riktning och att pulser uppkommer internt i kabelförbandet, någonstans mellan anslutningarna till respektive skena. Alla pulser som uppstår utanför dessa punkter, i nätet och omriktarna förväntas fördela sig ungefär lika och även få samma riktning i de båda kablarna. Pulser med samma riktning får därför anses härröra från externa källor, se princip i Figur 4-6.



Figur 4-6. Till vänster: Pulser som uppkommer externt i nätet. Till höger: Pulser som uppkommer internt i någon av kablarna.

Mätsystemet kan även spara kurvformen hos 1000 pulser från en mätkanal i taget. Denna relativt begränsade pulsmängd fordrar en bra filtrering för att man ska fånga och spara ett antal av de pulser man är intresserad av, och inte bara bakgrundsbrus. Analysen av de sparade pulsernas kurvformer kan göras på liknade sätt som ovan, dvs man kan filtrera fram pulser av intresse genom att välja

ut olika områden i T-F diagrammet. Därefter kan man granska formen hos en puls i taget, se exempel i Figur 4-7.



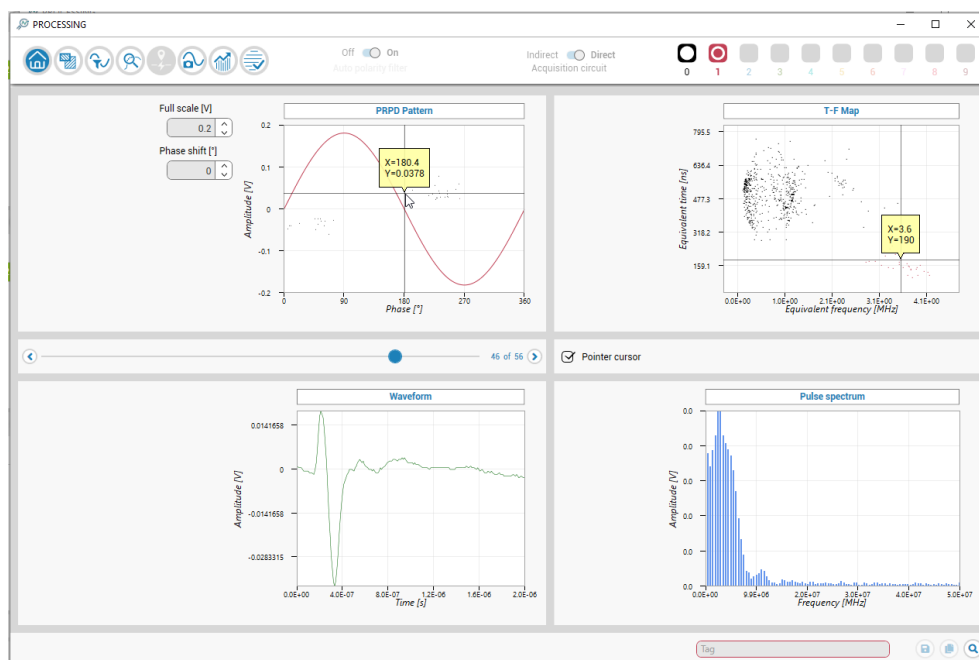
Figur 4-7. Exempel på kurvformer för pulser som filtrerats fram på samma sätt som ovan. Till vänster: HFCT på kabelskärm A. Till höger: HFCT på kabelskärm B. Båda pulserna har samma polaritet.

Standardinställningen för mätsystemet är att samla in och spara kurvformer motsvarande en tidsperiod av 2  $\mu$ s. Valet är sannolikt en avvägning för att fånga en tillräckligt stor andel av förekommande pulser (under insamlingen kan man inte detektera några nya pulser) och att registrera mätvärden under tillräckligt lång tid, med tillräckligt hög upplösning, för att karakterisera pulserna.

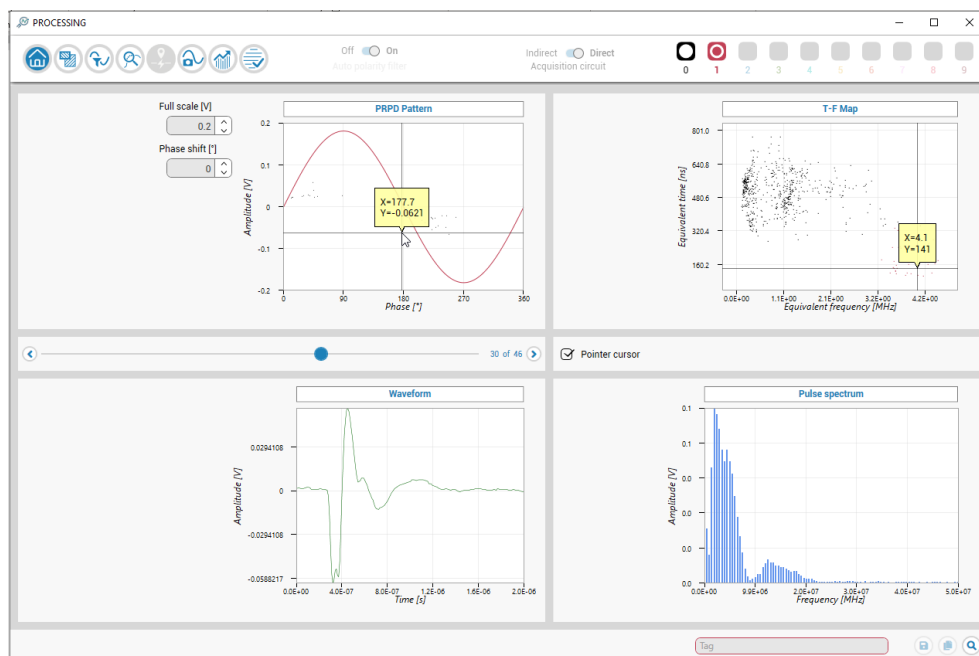
I efterhand noterades att om tidsperioden för registrering av kurvform för var puls hade förlängts så hade möjligen reflektioner av pulserna från andra änden av kablarna kunnat observerats. Tidsdifferenserna skulle då eventuellt ha kunnat nyttjas för att positionera källan till pulserna.

För lokalisering vore i vissa fall önskvärt att kunna betrakta samma specifika puls, med avseende på riktning och form, i de två kabelskärmarna. Detta är dock inte möjligt då systemet endast medger att pulsformer sparas i en mätkanal åt gången. Registrering måste således ske för en kanal i taget med några sekunders mellanrum. Vid återkommande förlopp, som PD-urladdningar ofta är, kan detta tillvägagångssätt ändå tänkas ge värdefull information vilket illustreras nedan.

Vid mätningar i de båda kabelskärmarna observerades pulser med olika polaritet vid ungefär samma fasläge (omkring 180 grader), se Figur 4-8 och Figur 4-9. Pulserna ligger även på ungefär samma plats i T-F diagrammen. Genom att markera enskilda pulser i sparade mätdata kan utseendet hos pulser i de två kablarna jämföras, trots att man inte mäter i båda kabelskärmarna simultant. I det aktuella fallet visar jämförelsen av att pulserna har liknande form men av motsatt polaritet, vilket indikerar att källan finns i någon av kablarna.



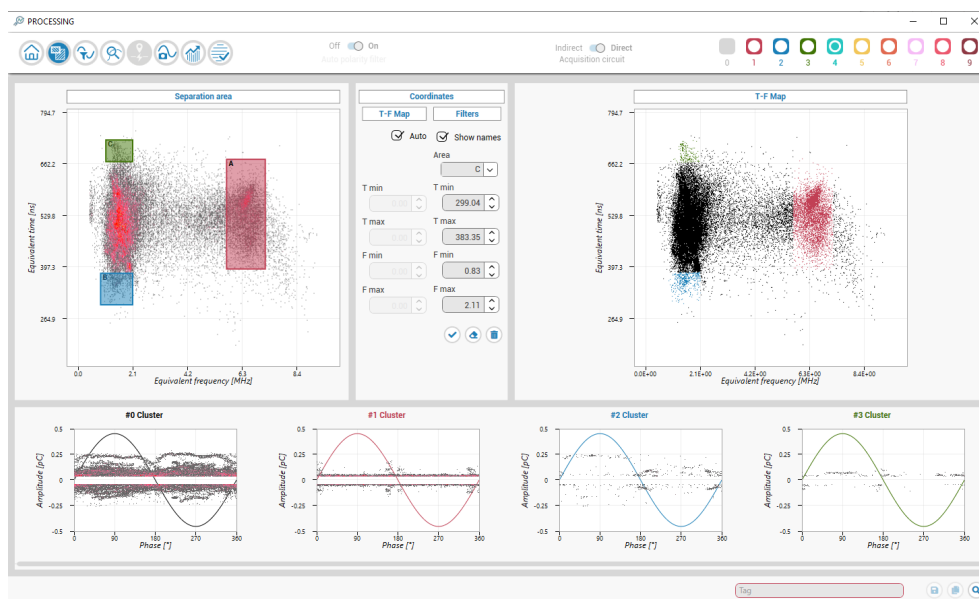
Figur 4-8. Exempel på kurvformer för pulser som filterats fram på samma sätt som tidigare. HFCT på kabelskärm A.



Figur 4-9. Exempel på kurvformer för pulser som filterats fram på samma sätt som tidigare. HFCT på kabelskärm B.

I försök att lokalisera källan till pulserna av intresse så gjordes flera mätningar med den kapacitiva sensorn där denna förflyttades längs kablarna som var förlagda

under ställverksgolvet. Mätningar utfördes med kablarna i drift på en sträcka av cirka 10 meter, från fackets undersida till ytterväggen. Några tydliga tecken på PD har dock inte kunnat identifieras ur insamlade mätdata där huvuddelen av observerade pulser får anses härröra från omriktarna, se exempel i Figur 4-10. De misstänkta PD-pulser som observerades vid mätning med spolrar på kabelskärmarna i facket kunde inte heller identifieras.



Figur 4-10. Mätning med kapacitiv sensor på kabel A ca 10 m från facket nära ytterväggen. Skalan på de nedre filterade PRPD diagrammen ska fortfarande vara spänningssamplituden i volt, inte laddning (pC) som programmet felaktigt angav här.

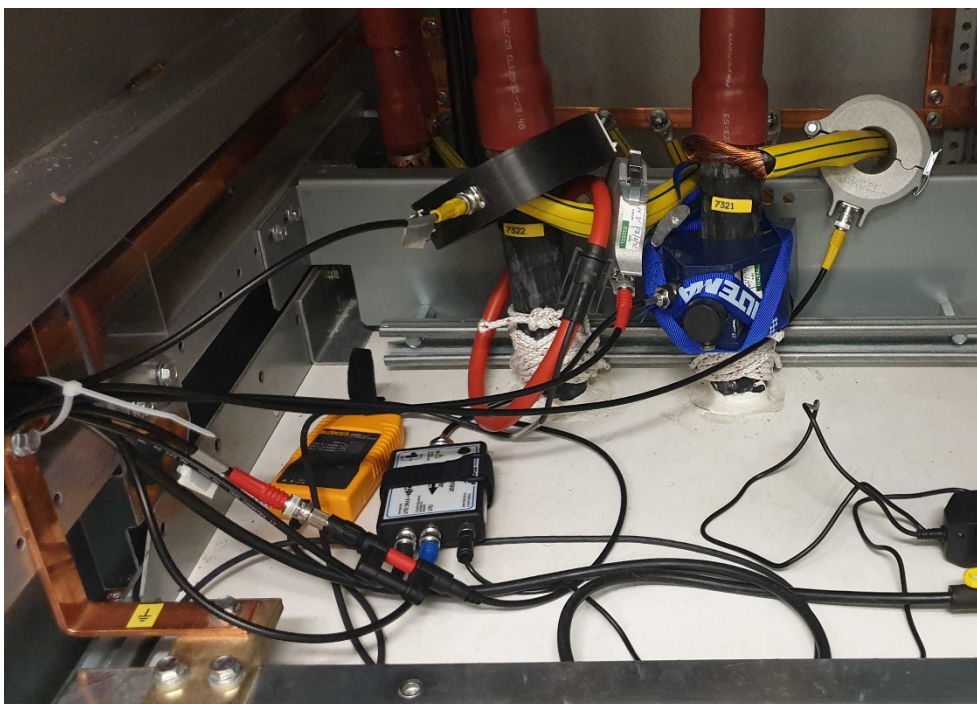
#### 4.1.2 Fack 2 - från omriktare

Mätning utfördes även på ett annat liknande kabelförband, bestående av två parallella ungefär 400 m långa kablar, fast med en annan typ av kabelavslut.

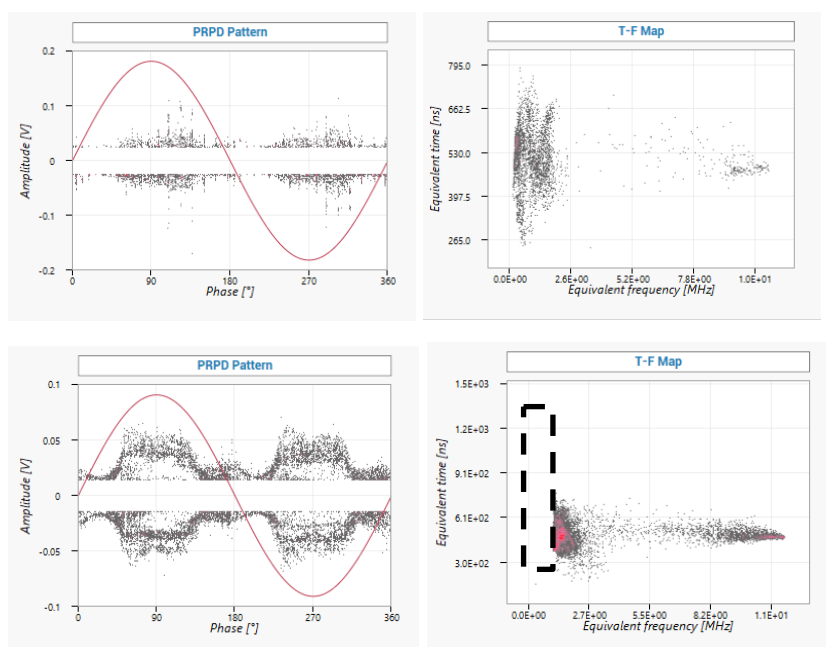
Vid mätning placerades en Techimp HFCT runt vardera jordanslutning av kabelskärmen till kabel A och B, samt en HVPD HFCT runt hela kabel A inklusive den tillbakavikta jordanslutningen av kabelskärmen. Den kapacitiva sensorn sattes mot kabel B, utanpå manteln. Arrangemanget visas i Figur 4-11.

Exempel på observerade PD-mönster visas i Figur 4-12. Mätdata analyserades genom applicering av olika typer av filter på likande sätt som för Fack 1. Mätningarna i detta fack kunde dock inte identifiera några tecken på PD-aktivitet.





Figur 4-11 Uppkoppling av givare i fack 2



Figur 4-12. Övre: mätning med HFCT på kabelskärm från kabel A, utan filtrering. Nedre: upprepad mätning med filtrering av de pulserna med lägst frekvens. Rektangeln visar området där pulser filterats bort.



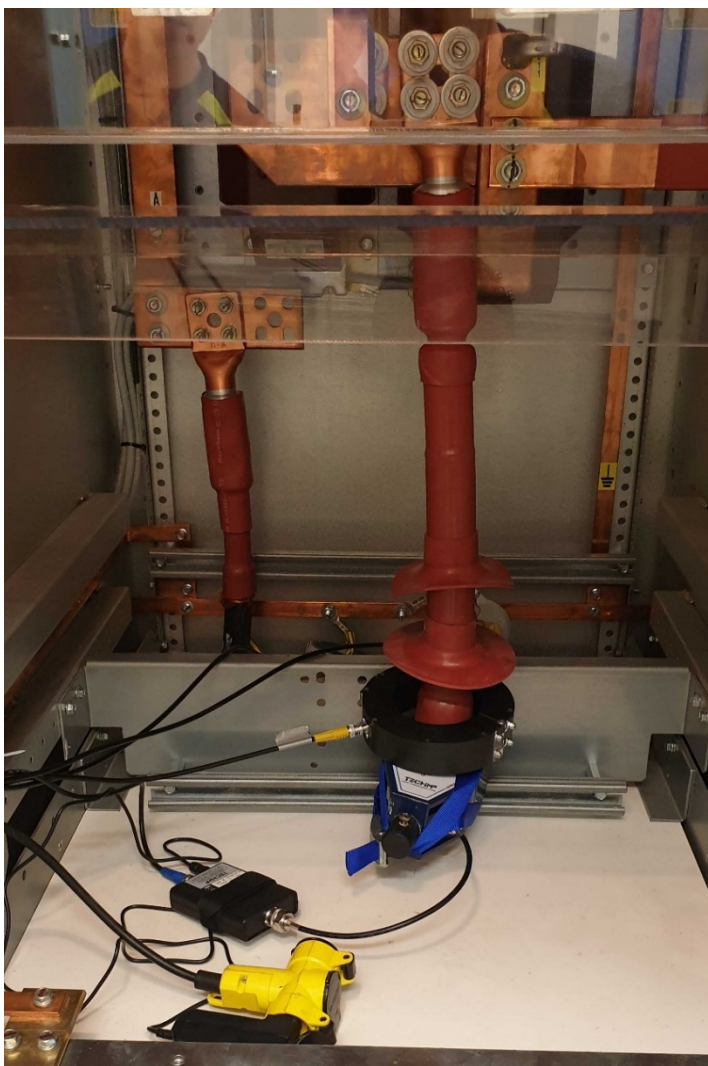
#### 4.1.3 Fack 3 - banmatning

Mätning utfördes även på ett kabelförband i ett fack för banmatning i samma anläggning. Förbandet består av en enfas-kabel med en längd av ca 1 km.

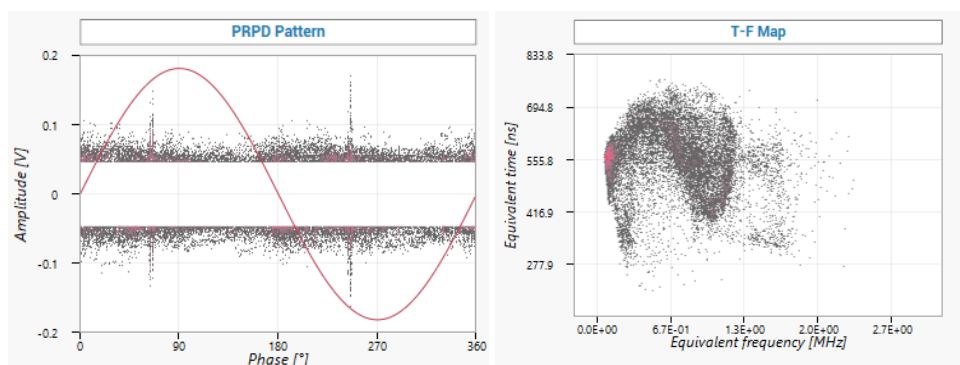
Vid mätning placerades en Techimp HFCT runt jordanslutningen av kabelskärmen och en HVPD HFCT runt hela kabeln utanpå nedre delen av kabelavslutet. Den kapacitiva sensorn placerades mot kabeln nedanför avslutet. Givarnas placering visas i Figur 4-13.

Exempel på observerade mätsignaler visas i Figur 4-14. Mätdata analyserades genom applicering av olika typer av filter på likande sätt som för Fack 1 och 2. Analysen visade att tillämpning av T-F filter kunde användas för att tydliggöra karaktären hos störningar från omriktarna (och därmed sortera bort dessa), se exempel i Figur 4-15.

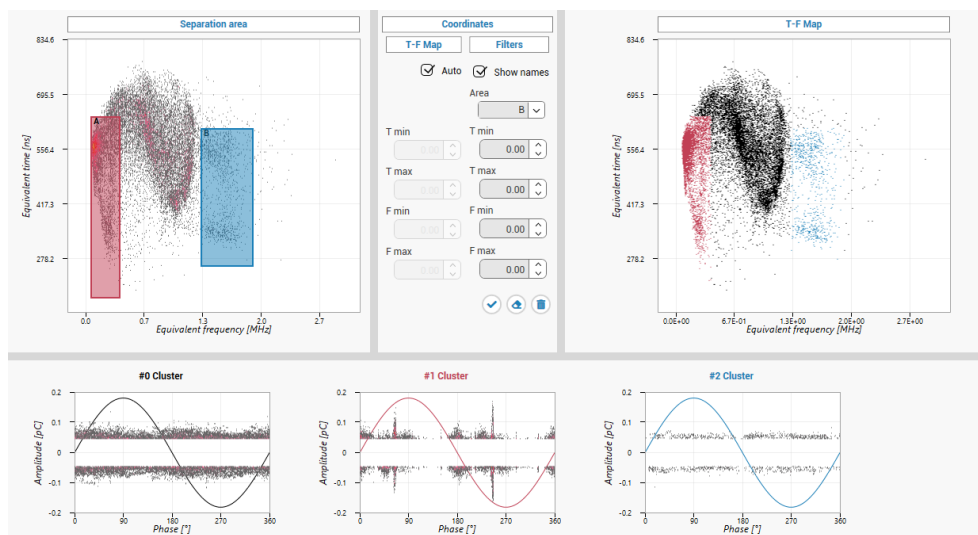
Mätningarna i Fack 3 kunde dock inte identifiera några tecken på PD-aktivitet.



Figur 4-13. Uppkoppling av givare i fack 3.



Figur 4-14. Mätning med HFCT på kabelskärm från kabeln, utan filtrering.



Figur 4-15. Filtrering av mätning ovan. I röd rektangel A finns de pulser som sorteras in i #1 Cluster, vilket sannolikt är pulser från omriktare. I blå rektangel B finns de pulser som sorteras in i #2 Cluster. I #0 Cluster finns alla övriga pulser. Skalan på de nedre filtrerade PRPD diagrammen ska fortfarande vara spänningsamplituden i volt.

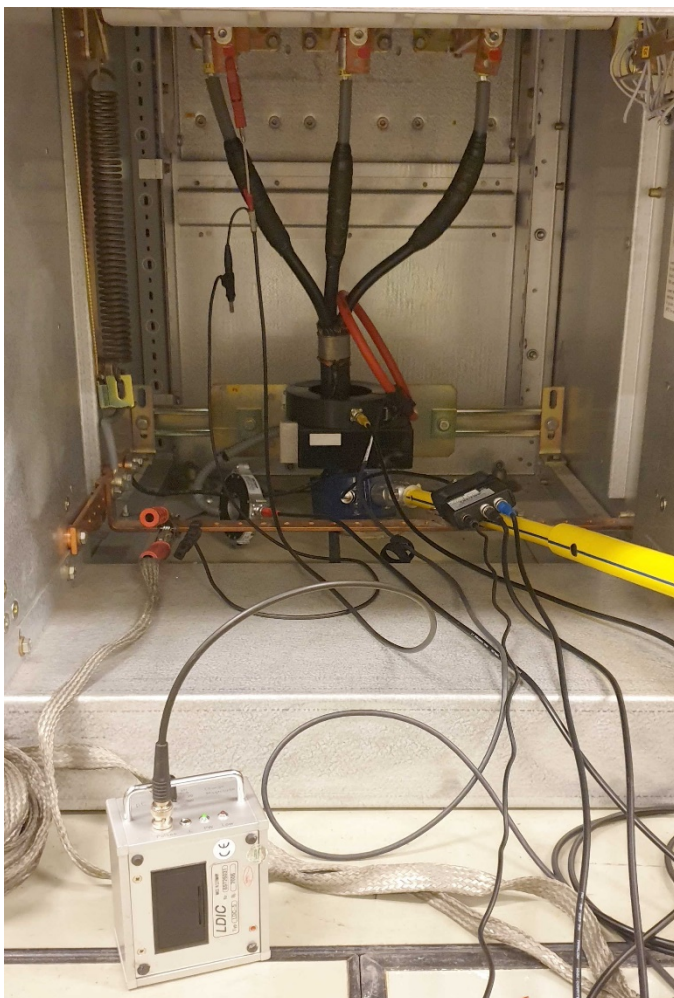
## 4.2 10 KV KABLAR I STÄLLVERKSFAK

Mätningar utfördes på en utgående 3-faskabel med en längd av ca 100 m, som från ett 10 kV ställverk, matar en reglertransformator.

I denna mätning placerades en Techimp HFCT runt jordanslutningen av kabelskärmen och en HVPD HFCT runt hela kabeln inklusive den tillbakavikta jordanslutningen av kabelskärmen. Den kapacitiva sensorn placerades mot kabeln, utanpå manteln.

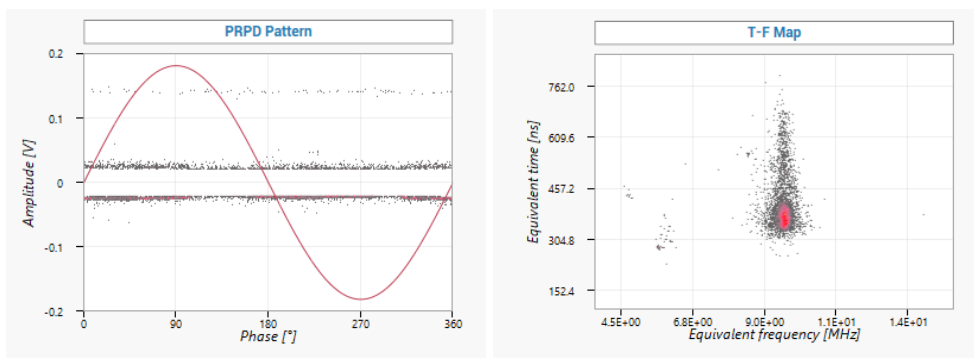
För att få en uppfattning om vilken laddning som de uppmätta signalerna motsvarade så injicerades inledningsvis en känd kalibreringspuls om 500 pC i en

av de spänningslösa fasledarna. Placeringen av givarna och anslutningen av kalibreringsutrustningen visas i Figur 4-16. Givarna monterades/demonterades med kabeln ur drift.

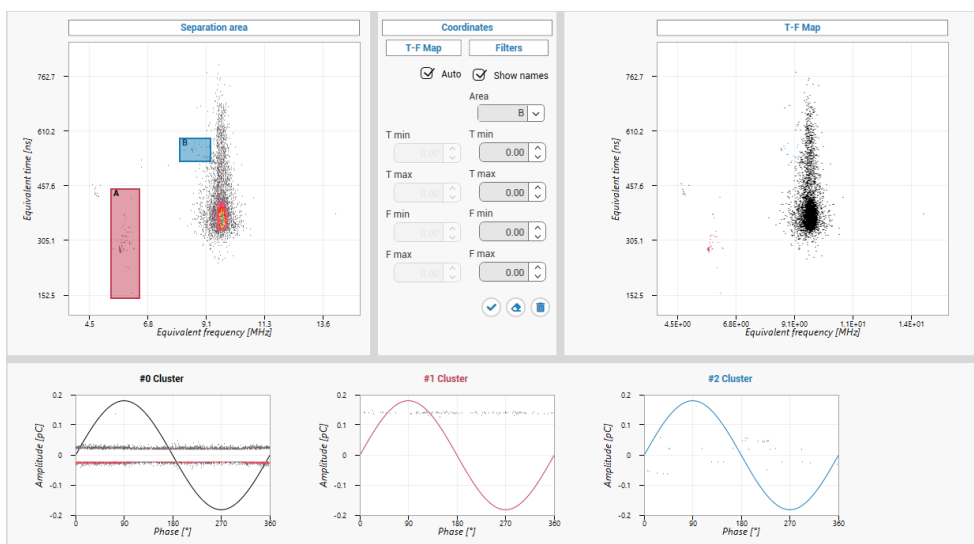


Figur 4-16. Mätuppkoppling med PD-kalibrator.

De injicerade kalibreringspulserna om 500 pC resulterade i en amplitud av omkring 0,15 V mätt med HFCT på kabelskärmens jordanslutning, se Figur 4-17. När denna mätning presenteras i T-F diagrammet kan man tydligt se att det finns flera olika typer av pulser och man kan då separera kalibreringspulserna och vad som förefaller vara ytterligare en källa från det övriga bakgrundsbruset, se Figur 4-18. Kalibreringssignalen motsvaras av pulserna som återfinns i rektangel A (Cluster #1).



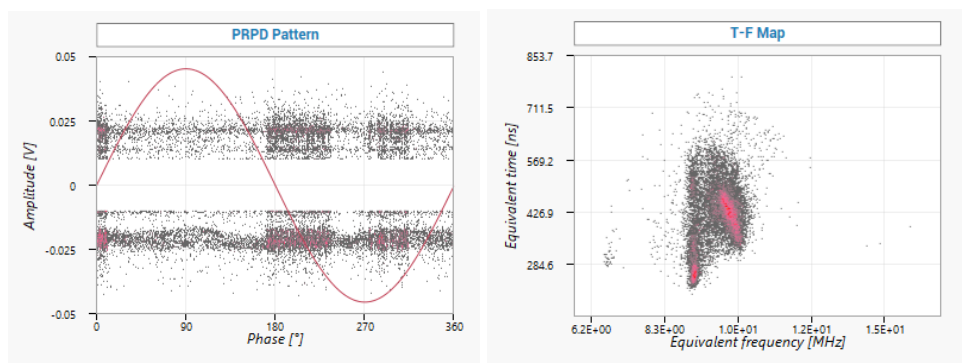
Figur 4-17. Kalibreringspulser om 500 pC injicerade i fas 1 uppmätt med HFCT runt kabelskärmens jordanslutning.



Figur 4-18. Filtrering av mätning ovan med 500 pC på fas 1. I röd rektangel A finns de pulser som sorteras in i #1 Cluster och i blå rektangel B finns de pulser som sorteras in i #2 Cluster. I #0 Cluster finns alla övriga pulser. Skalan på de nedre filtrerade PRPD diagrammen ska fortfarande vara spänningsamplituden i volt.

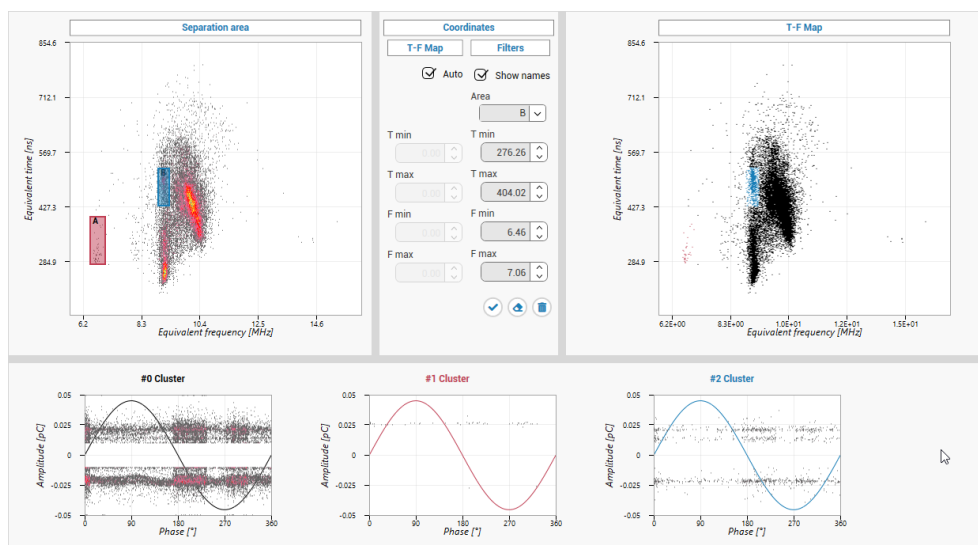
I ovanstående fall så är det relativt enkelt att redan i PRPD diagrammet i Figur 4-17 inse att kalibreringspulserna sannolikt härstammar från en specifik källa.

Om man däremot tittar på kanal 3 i precis samma mätning, vilken kopplats till den kapacitiva sensorn som hölls mot kabelmanteln, så ser signalen ut enligt Figur 4-19.



Figur 4-19. Kalibreringspulser om 500 pC injicerade i fas 1 uppmätt med kapacitiv sensor på kabeln.

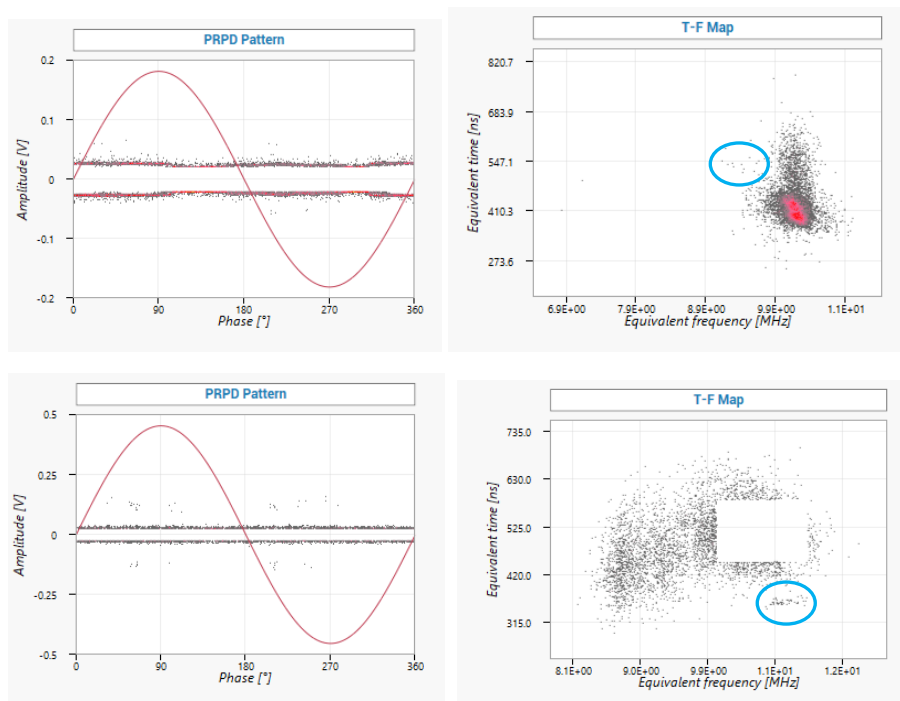
Ur detta PRPD-diagram har man svårt att dra några direkta slutsatser om olika källor, medan grupperingarna i T-F diagrammet antyder att det skulle kunna finnas flera. Om man utför en liknande filtrering på denna mätning så framträder en grupp av pulser (rektangel A) med en stabil amplitud av ca 0,0025 V som rimligen är pulserna från PD-kalibratören. Man kan därmed på detta sätt filtrera fram pulser i PRPD-diagrammet som annars skulle ha försvunnit i mängden av bakgrundsbrus.



Figur 4-20. Filtrering av mätning ovan med 500 pC injicerad i fas 1. I röd rektangel A finns de pulser som sorteras in i #1 Cluster och i blå rektangel B finns de pulser som sorteras in i #2 Cluster. I #0 Cluster finns alla övriga pulser. Skalan på de nedre filtrerade PRPD diagrammen ska fortfarande vara spänningsamplituden i volt.

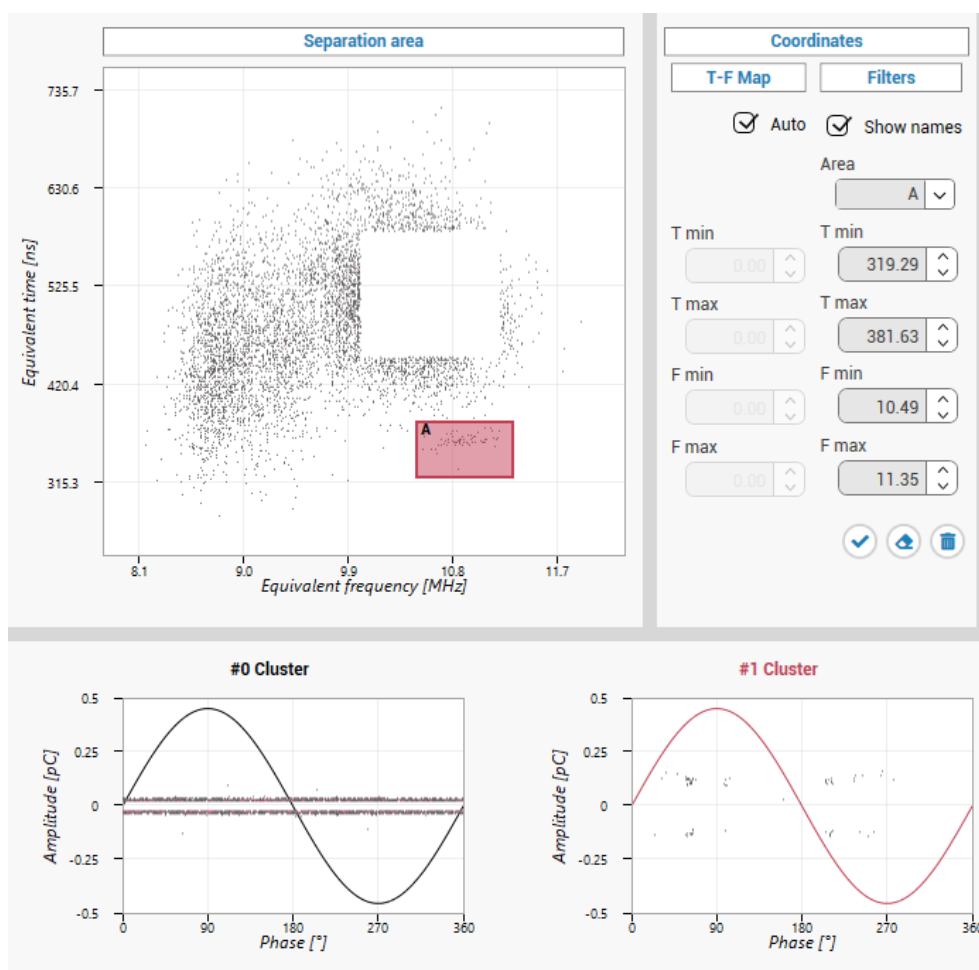
Exempel på resultat av mätningar på den spänningssatta kabeln visas i Figur 4-21 och Figur 4-22. Mätningarna visade att det förekom pulser med amplituder högre än nivån hos bakgrundstörningarna. Dessa pulser kunde också identifieras genom filtrering i T-F diagrammet. Baserat på utseendet drogs slutsatsen att dessa inte uppstått till följd av PD, utan sannolik härrör från en omriktare.

Ytterligare filtrering och analys av mätningar i det aktuella facket kunde inte identifiera några tecken på PD-aktivitet.



Figur 4-21. Övre: Mätning med HFCT på kabelskärm. Nedre: Mätning med kapacitiv sensor på kabeln. De blå elipserna anger områden där pulserna med högst amplitud ligger grupperade.





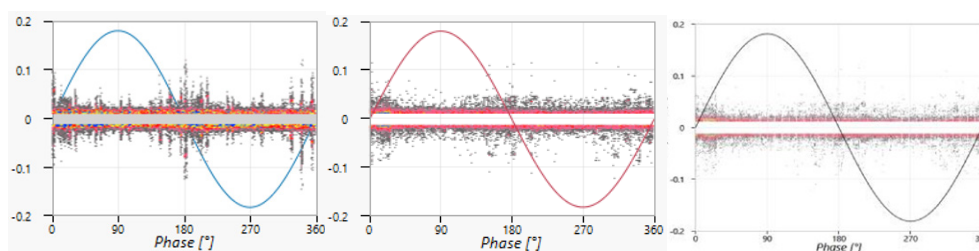
Figur 4-22. Mätning med kapacitiv sensor på kabeln. Skalan på de nedre filtrerade PRPD diagrammen ska fortfarande vara spänningsamplituden i volt.



## 5 Praktiska erfarenheter

Mätprogrammet kan visa upp till 200 000 pulser per kanal när man övervakar och bara tittar på signalerna. I mätningar som sparas så är det maximala antalet pulser begränsat till 50 000 per kanal. Det gör att vissa svaga trender framstår som mindre tydliga i de sparade mätningarna.

Vi upplevde också vid upprepade tillfällen att signalerna som bara övervakades visade mycket tydligare mönster i jämförelse med de sparade signalerna, både före och efter att en mätning sparats. Under sekvenser då pulser sparas ser det ut som om PD-pulserna inte är lika stabila mot spänningens fasläge, vilket skulle kunna bero på att de sparade signalerna av någon orsak har sämre koppling till synkroniseringssignalen. Detta blir tydligt när man t.ex. jämför utseendet på kanal 3 längst ner i Figur 4-2 och Figur 4-3. För att enklare kunna jämföra de olika utseendena har diagrammen klippts in i Figur 5-1. Tillsammans med dessa visas även en bild från den av analysprogrammet autogenerade rapportfilen. Av jämförelsen framgår att bilderna i rapporten komprimeras relativt hårt och därmed blir otydliga.



**Figur 5-1.** Till vänster: Bild från mätprogrammet där ett större antal pulser insamlade strax före den sparade mätningen visas. Mitten: Bild från analysprogrammet där de sparade pulserna visas. Till höger: Bild på diagram i rapport genererad av analysprogrammet där samma sparade pulser har plottats.

Filtreringen i mätprogrammet bygger på att man i T-F diagrammet markerar områden där signaler skall filtreras bort. När man i samband med mätning försöker identifiera pulser i ett PRPD diagram så kan det dock många gånger vara önskvärt med det omvända, dvs att man kan välja områden som inte skall filtreras bort.

Analysprogramvaran har också möjlighet att återge i vilken ordning som de enskilda pulserna registrerades i PRPD diagrammet, samt att analysera trender. Exempelvis skall man kunna presentera hur antal pulser eller laddning varierat över tiden. För att övervaka trender behöver man genomföra mätningar under längre tid, antingen kontinuerligt eller vid upprepade tillfällen. Vid de utförda mätningarna låste sig dock mätprogrammet vid ett flertal tillfällen, vilket bedömdes göra övervakning över längre tid svårt. Funktionerna har därför inte undersökts närmare.

Instrumentet levererades med en öppningsbar flexibel strömomvandlare avsedd att användas för synkronisering mot driftspänningen i den undersökta anläggningen. Trots tillräcklig amplitud hos lastströmmen uppstod vid flera

tillfällen problem med synkroniseringen. Vid mätningarna användes därför en spänning från en spänningstransformator.

Programvaran för mätning och analys, PDPro, är relativt enkelt att använda men förefaller vara nyutvecklad. Detta antagande stöds av hur Altanova presenterar programmet på sin hemsida<sup>1</sup> "*PDPro is a NEW software platform designed for all Techimp's Partial Discharge testing instruments...*". Programvaran upplevs tyvärr som något instabil då den både under mätning och analys plötsligt stannar eller avslutas utan förvarning. Ytterligare en besvärande egenskap hos den använda programvaran är att man inte har möjlighet att i efterhand se vad som noterats i kommentarsfälten efter att man matat in en radbrytning.

---

<sup>1</sup> [www.altanova-group.com/en/products/partial-discharge-tests/acquisition-units/pdpro-software](http://www.altanova-group.com/en/products/partial-discharge-tests/acquisition-units/pdpro-software)

## 6 Diskussion och slutsatser

Metoder för effektiv filtrering av mätsignaler är av stor vikt vid pd-mätningar i fält eftersom störningsnivån i driftsatta anläggningar kan vara hög och därmed riskerar att dölja eventuella urladdningar.

Erfarenheterna från mätningar utförda med det aktuella mätsystemet indikerar att filtrering med hjälp av T-F diagram möjliggör detektering av urladdningar i driftsatta kabelsystem, även i miljöer med relativt hög grad av bakgrundsstörning. Den separering av PD-pulser och förtydligade av deras karaktär och mönster som filterats fram i de utförda mätningarna hade sannolikt inte varit möjligt med konventionella PD-mätmetoder, där mycket sannolikt hade dolts i bakgrundsbruset.

Programmet som används för mätning och analys är relativt enkelt att använda och personer som är vana vid PD-mätningar har sannolikt inga större svårigheter att komma igång. Mjukvaran har dock en del svagheter som bör förbättras.

Mätningarna ställer vissa krav på erfarenhet hos användaren. Bland annat måste man välja lämpliga tröskelnivåer och definiera hur signalerna skall filtreras. Hur dessa skall väljas beror på karaktären och nivån av förekommande störningar. Utgående från erfarenheterna från utförda mätningar är det sannolikt nödvändigt att prova ett antal kombinationer för att hitta lämpliga inställningar. En preliminär analys av mätresultaten är nödvändig under mätdatainsamlingen. Detta för att filtrera bort störningar som annars riskerar bli helt dominerande, vilket leder till att en otillräcklig mängd pulser av intresse sparas.

Vid mätningarna utförda inom ramen för det aktuella projektet monterades givarna i samtliga fall under förhållanden när de studerade kablarna temporärt var tagna ur drift. I anläggningar där det går att applicera givarna på ett säkert sätt så finns även potential att utföra mätningar utan att ta anläggningen ur drift.

## Bilaga A: Teknisk specifikation Aquila

### Specifications

|                                  |                                                                                                                                                    |                                                 |                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Wide Band Acquisition PD channel |                                                                                                                                                    | Display                                         |                                                    |
| PD Technology                    | UWB - PRPD/TF map                                                                                                                                  | Type                                            | 11" tablet Windows 10 (for set-up and acquisition) |
| PD Channels                      | 3 biased UWB Channels for active sensors power supply (expandable To 6)                                                                            | Casing                                          |                                                    |
| Bandwidth                        | 16kHz-30MHz, built in UWB filter                                                                                                                   | Dimensions                                      | 410 x 345 x 205 mm                                 |
| Resolution                       | 10 bit                                                                                                                                             | Weight                                          | < 12 kg                                            |
| Dynamic range                    | 75 dB                                                                                                                                              | IP Degree                                       | IP42 cover Close<br>IP30 cover Open                |
| Maximum sampling frequency       | 100 MS/s                                                                                                                                           | Power Supply                                    |                                                    |
| Input voltage range              | 1-4000 mVpp                                                                                                                                        | Voltage                                         | 100 - 240 VAC<br>50/60 Hz                          |
| Input sensitivity                | < 1.0 mVpp                                                                                                                                         | Outputs for accessories                         | 5V (max 5 W) via USB-A connector<br>12 V (max 5W)  |
| Input Impedance                  | 50 Ohm                                                                                                                                             | Battery                                         | 2 x 10,8V, 8 Ah<br>With smart diagnostic system    |
| Recording time length            | 1 $\mu$ s (min)<br>20 $\mu$ s (max)                                                                                                                | Autonomy                                        | > 8 hours*                                         |
| Connectors type                  | BNC                                                                                                                                                | Operating environmental conditions              |                                                    |
| Synchronization channel          |                                                                                                                                                    | Temperature                                     | 0 to 60 °C <sup>**</sup>                           |
| Input voltage range              | 0.2 - 200 V <sub>RMS</sub>                                                                                                                         | Humidity                                        | 90 %, not condensing                               |
| Frequency range                  | 0.1 ÷ 1000 Hz                                                                                                                                      | General                                         |                                                    |
| Input Impedance                  | 10 MOhm                                                                                                                                            | Firmware                                        | updating via USB                                   |
| Connector type                   | BNC                                                                                                                                                | Certifications                                  | IEC 60270 compliance<br>EN 61326-1<br>EN 61010-1   |
| Connectivity                     |                                                                                                                                                    | (*) Depending on continuous/discontinuous usage |                                                    |
| Type                             | For monitoring: Wi-Fi (IEEE 802.11g) + Ethernet Fiber Optics connection,<br>For instrument setup: Bluetooth<br>For maintenance and FM upgrade: USB | (**) 0 to 45 °C when battery is charging        |                                                    |

### Sökord

Partiella urladdningar, PD-mätning, filtrering



# FÖRBÄTTRAD PD-MÄTMETOD PÅ KABELTILLBEHÖR

Det finns ett växande behov av mätningar för att kontrollera tillståndet för kablar och kabeltillbehör i syfte att minimera antalet kabelfel i nätet. Kabelfel, exempelvis på grund av isolationsfel, innebär stora konsekvenser och leder till långa avbrott.

Isolationsfel föregås i många fall av partiella urladdningar, som på engelska kallas partial discharges, PD. Genom att upptäcka och mäta PD kan man identifiera objekt som riskerar att drabbas av isolationsfel. Vid mätning av PD i fält behöver man kunna sortera bort de störningar som i stort sett alltid förekommer i elektriska anläggningar

Resultat av studien visar att det aktuella mätsystemet för partiell urladdning kan användas i kabelsystem som är i drift, även i miljöer med relativt hög grad av bakgrundsstörning.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



Energiforsk