

Analys av lagerströmmar i industriella maskiner: En fallstudie på en modern kartongmaskin

Anton Fredriksson
Anton Norlinder

Handledare: Arman Mohammadi
Examinator: Christofer Sundström

Upphovsrätt

Detta dokument hålls tillgängligt på Internet - eller dess framtida ersättare - under 25 år från publiceringsdatum under förutsättning att inga extraordinära omständigheter uppstår.

Tillgång till dokumentet innebär tillstånd för var och en att läsa, ladda ner, skriva ut enstaka kopior för enskilt bruk och att använda det oförändrat för ickekommersiell forskning och för undervisning. Överföring av upphovsrätten vid en senare tidpunkt kan inte upphäva detta tillstånd. All annan användning av dokumentet kräver upphovsmannens medgivande. För att garantera äktheten, säkerheten och tillgängligheten finns lösningar av teknisk och administrativ art.

Upphovsmannens ideella rätt innefattar rätt att bli nämnd som upphovsman i den omfattning som god sed kräver vid användning av dokumentet på ovan beskrivna sätt samt skydd mot att dokumentet ändras eller presenteras i sådan form eller i sådant sammanhang som är kränkande för upphovsmannens litterära eller konstnärliga anseende eller egenart.

För ytterligare information om Linköping University Electronic Press se förlagets hemsida <http://www.ep.liu.se/>.

Copyright

The publishers will keep this document online on the Internet - or its possible replacement - for a period of 25 years starting from the date of publication barring exceptional circumstances.

The online availability of the document implies permanent permission for anyone to read, to download, or to print out single copies for his/hers own use and to use it unchanged for non-commercial research and educational purpose. Subsequent transfers of copyright cannot revoke this permission. All other uses of the document are conditional upon the consent of the copyright owner. The publisher has taken technical and administrative measures to assure authenticity, security and accessibility.

According to intellectual property law the author has the right to be mentioned when his/her work is accessed as described above and to be protected against infringement.

For additional information about the Linköping University Electronic Press and its procedures for publication and for assurance of document integrity, please refer to its www home page: <http://www.ep.liu.se/>.

© Anton Fredriksson
Anton Norlinder

Sammanfattning

Detta arbete undersöker och analyserar förekomsten av lagerströmmar i industriella elmaskiner, med fokus på en produktionsanläggning för kartongprodukter. Lagerströmmar är oönskade strömmar som passerar genom kullagren och kan påverka elmaskinens livslängd och dess prestanda negativt. Syftet med arbetet är att ge förståelse för hur lagerströmmar uppstår och att diskutera effektiva åtgärder för att detektera och hantera dem.

Genom att detektera urladdningar från maskinernas roterande axel identifierades vilka maskiner som var drabbade av skadliga lagerströmmar. På grund av begränsningar som otillgänglighet, platsbrist och säkerhetsrisker kunde inte mätningar utföras på alla maskiner i anläggningen. Trots viss osäkerhet i mätresultaten anses den använda metoden tillräckligt pålitlig för att kunna ge indikationer på förekomsten av skadliga lagerströmmar.

Abstract

This work investigates and analyzes the occurrence of bearing currents in industrial electric machines, focusing on a cardboard production facility. Bearing currents are undesired currents that pass through the bearings and can negatively affect the machine's lifespan and performance. The purpose of this work is to understand the origins of bearing currents and to discuss effective measures for detecting and managing them.

By detecting discharges from the machines' rotating shafts, the affected machines with harmful bearing currents were identified. Due to limitations such as inaccessibility, space constraints, and safety risks, measurements could not be conducted on all machines in the facility. Despite some uncertainty in the measurement results, the method used is considered sufficiently reliable to provide indications of the presence of harmful bearing currents.

Författarnas tack

Vi vill tacka Intertechna som möjliggjort detta arbete och för all hjälp med mätutrustningen. Ett stort tack riktas också till personalen på produktionsanläggningen för tillgång till lokaler och hjälp på plats. Vi vill också tacka vår handledare Arman och vår examinator Christofer för deras hjälp under arbetet.

Innehåll

Sammanfattning	iii
Abstract	iv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Problemformulering och frågeställningar	1
1.4 Avgränsningar	1
2 Teori	3
2.1 Maskinerna	3
2.2 Frekvensomriktare	3
2.3 Lagerströmmar	6
2.3.1 Kapacitiva lagerströmmar	7
2.3.2 Elektriska urladdningsströmmar	7
2.3.3 Cirkulerande högfrekventa lagerströmmar	7
2.3.4 Rotor-jordströmmar	7
2.4 Olika sorters lagerskador	8
2.4.1 Pitting	8
2.4.2 Frosting	8
2.4.3 Fluting/Washboarding	9
2.4.4 Skada på kulorna	9
2.5 Lagerströmsmätningar	10
2.5.1 Spänningsmätning	10
2.5.2 Strömmätning	11
2.5.3 Mätinstrumentet Fluke 1775	12
2.5.4 Indirekta metoder för lagerströmsmätningar	13
2.6 Åtgärder lagerströmmar	13
2.6.1 Elektriskt ledande smörjfett	13
2.6.2 dv/dt filter	13
2.6.3 Ferritringar	14
2.6.4 Borste	14
2.6.5 Keramiska kulor	14
3 Metod	15
3.1 Förstudie	15
3.2 Mätningar	16
4 Resultat	20
4.1 Mätningar på maskinerna med skadliga lagerströmmar	21
4.2 Mätningar på maskin utan skadliga lagerströmmar	21
4.3 Mätningar på växellåda	22
4.4 Mätningar på maskiner med installerade ferritringar	22
4.4.1 Maskin 4	23
4.4.2 Maskin 5	23
5 Diskussion	25
5.1 Mätinstrument	25
5.2 Mätresultat	25
6 Slutsats	27
Referenser	28

Figurer

1	Frekvensomriktarens uppbyggnad och spänningens vågform för varje del. . .	4
2	Figur som jämför äldre GTO transistorer med de nya IGBT, där det framgår att IGBT är betydligt snabbare men genererar höga spänningstransienter. Bilden är tagen från SKF.	5
3	Figur som visar de tre faserna från pulsbreddsmodulering, där <i>common-mode</i> spänningen skiljer sig från noll. Bilden är tagen från SKF.	5
4	Ekvivalent krets för maskin i drift.	6
5	Exempel på lagerskada av typen <i>frosting</i> . Bilden är tagen från en av anläggningens maskiner.	8
6	Exempel på lagerskada av typen <i>fluting</i> på den inre banan av ett kullager. Bilden är tagen från SKF.	9
7	Kulor i kullagret har blivit utsatta för så pass stora lagerströmmar att de gått itu. Bilden är tagen på en av anläggningens maskiner.	9
8	Mätuppställning för MDA-550. Spänningsproben med installerad kolborste placeras mot den roterande motoraxeln och en referenspunkt placeras på maskinens jord.	11
9	Mätuppställning med rogowskispole. Den översta rogowskispolen mäter <i>common-mode</i> strömmen, och den nedre mäter axelströmmen.	12
10	Mätinstrumentet Fluke 1775	12
11	Bild på ferritringar som används i anläggningen.	14
12	Kil inringad i rött som sitter på motoraxeln. Bredvid kilen är spänningsproben som används under mätningar.	15
13	Spänningsprob med stativ, magnetbas och kolborste.	16
14	Mätuppställning med MDA-550, där mätning utförs på en växellåda.	17
15	Spänningsprob med borste mot motoraxel på en växellåda.	17
16	En välanvänd borste till vänster och en ny till höger.	17
17	Mätuppsättning Fluke 1775 direkt efter frekvensomriktaren och före filtret.	18
18	Fluke 1775 på maskinen efter filtret. I denna figur har inte maskinen blivit driftsatt än och lamporna lyser gult.	19
19	Graf över axelspänningsurladdningar för alla uppmätta maskiner. Varje punkt representerar en maskin och visar dess största urladdning i volt samt snabbaste uppmätta tid i nanosekunder. Det röda området markerar området där skadliga lagerströmmar uppstår.	20
20	Vågform på detekterad skadlig urladdning på maskin 1.	21
21	Vågform på detekterad skadlig urladdning på maskin 2.	21
22	Vågform på detekterad icke skadlig urladdning på maskin 3.	21
23	Vågform på detekterad icke skadlig urladdning på växellåda 1.	22
24	Vågform på detekterad skadlig urladdning på växellåda 2.	22
25	Vågform på axelspänningen före och efter ombyggnad på maskin 4.	23
26	Vågform på detekterad icke skadlig urladdning för maskin 4 med installerade ferritringar.	23
27	Vågform på urladdningar för maskin 5 med installerade ferritringar.	23
28	Vågform på axelspänningen före och efter ombyggnad på maskin 5.	24
29	<i>Supraharmonics</i> före filter, där den högsta strömmen uppnår 21 ampere. . .	24
30	<i>Supraharmonics</i> efter filter, där den högsta strömmen uppnår 7.5 ampere. .	24

Tabeller

1	Tabell över antalet urladdningar på maskin 1 med skadliga urladdningar från mätningarna.	21
2	Tabell över antalet urladdningar på maskin 2 med skadliga urladdningar från mätningarna.	21
3	Tabell över antalet urladdningar på maskin 3 utan skadliga urladdningar under mätningar under mätningar.	21
4	Tabell över antalet urladdningar på växellåda 1 under mätningar.	22
5	Tabell över antalet urladdningar på växellåda 2 under mätningar.	22
6	Tabell över antalet urladdningar för maskin 4 med installerade ferritringar.	23
7	Tabell över antalet urladdningar för maskin 5 med installerade ferritringar.	23

1 Inledning

I dagens industri är det viktigt att säkerställa att produktionsanläggningar fungerar effektivt och utan onödiga avbrott. En av de viktigaste delarna för att upprätthålla en smidig drift är att hantera och förstå elektriska fenomen som kan påverka maskinernas livslängd och prestanda. I samarbete med företaget Intertechna och en av deras kunder undersöks i det här arbetet problemen med lagerströmmar i elmaskiner hos kundens anläggning.

1.1 Bakgrund

Produktionsanläggningen som arbetet genomförs vid producerar kartongprodukter och innehåller ungefär 170 elmaskiner. På grund av vissa kompromisser vid konstruktionen av anläggningen har det resulterat i att lagerströmmar, vilket är ett fenomen där oönskade strömmar går igenom kullagret, sker på elmaskinerna i anläggningen. Lagerströmmar kan ske vid bland annat användning av frekvensomriktare eller dåligt jordade maskiner. Dessa höga strömmar kan skada kullagren i maskinen när de passerar genom kulorna, vilket leder till att kullagren måste bytas ut. På anläggningen har man tidigare hanterat detta genom att ersätta hela motorn som skickas iväg på en lång och kostsam reparation.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka och analysera förekomsten av lagerströmmar för att ge en djupare förståelse av problemet i industriella maskiner. Utöver detta diskuteras även olika förslag på metoder för att både detektera och hantera dessa lagerströmmar som påverkar maskinerna. För att uppnå detta mål är avsikten att testa så många maskiner som möjligt på anläggningen med hjälp av en vald metod, följt av en utvärdering av den valda metoden för att avgöra om den är tillräckligt bra för att användas till att detektera lagerströmmar på ett tillförlitligt sätt.

1.3 Problemformulering och frågeställningar

Företaget är medvetet om att lagerströmmar passerar genom maskinerna, men inte hur mycket och om alla maskiner i anläggningen är drabbade. Bristen på noggranna mätningar av dessa strömmar gör det svårt att hantera dem.

Följande frågeställning ska besvaras i detta examensarbetet.

- Hur kan lagerströmmar identifieras för att möjliggöra effektiva åtgärder?
- Hur kan man minimera lagerströmmarna för att minska skador på industriella maskiner?

1.4 Avgränsningar

Examensarbetet kommer pågå i ungefär 10 veckor vilket betyder att vi inte kommer kunna implementera en metod för att minimera lagerströmmarna i maskinerna rent praktiskt och ta mätningar efteråt. Som stöd har vi en rapport som sammanställdes under en ombyggnation där man installerade ett filter för att minimera förekomsten av lagerströmmar i maskiner.

På anläggningen används asynkronmotorer vilket är de motorer som kommer studeras. Det

finns även permanentmagnetiserade synkronmotorer som inte kommer studeras. Delvis för att metod och teori skiljer dem från asynkronmotorer och delvis av begränsad tid avsedd för examensarbetet. Mätinstrumenten som vi har tillgång till är även begränsade. Dock kommer andra metoder med andra mätinstrument även diskuteras i arbetet.

2 Teori

I detta kapitel presenteras teorin bakom uppkomsten av lagerströmmar i asynkronmaskiner, olika typer av lagerströmmar och deras påverkan på maskiner. Utöver detta diskuteras olika metoder för att förebygga och mäta lagerströmmar.

2.1 Maskinerna

Mätningar och tester utförs på trefas asynkronmaskiner, även kallade växelströmsmotorer. Den huvudsakliga principen för asynkronmaskinen är att rotern roterar asynkront i jämförelse med det elektromagnetiska flödet. Fördelarna med asynkronmaskinen är dess goda förmåga att överbelastas, driftegenskaper och att den är lätt att hantera. Den kan användas som både motor, vilket är det största användningsområdet, samt generator [1].

Man kan styra en asynkronmotor på tre olika sätt, som alla härstammar från formlerna (1) och (2).

$$n_1 = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

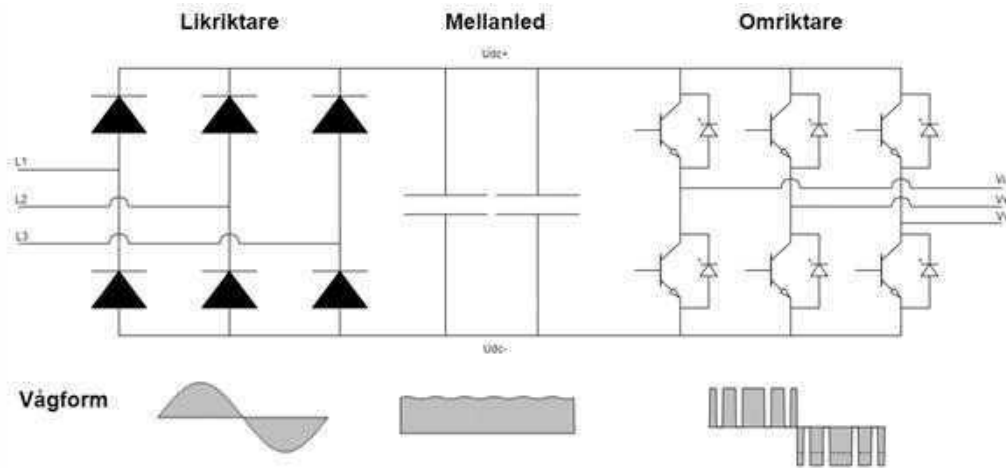
För att styra asynkronmaskinen kan poltalet, p , ändras, eftersläpningen regleras eller nätfrekvensen, f , justeras, vilket görs med hjälp av en frekvensomriktaren. För asynkronmaskinen måste eftersläpningen, S , som används för att styra varvtalet, beräknas. Eftersläpningen representerar skillnaden i det synkrona varvtalet, n_1 , och det asynkrona varvtalet, n_2 [1].

2.2 Frekvensomriktare

För att styra varvtalet på en asynkronmaskin kan man använda frekvensreglering med hjälp av frekvensomriktare, som placeras mellan spänningskällan och maskin. Genom att manipulera matningsspänningen med en frekvensomriktare kan man justera maskinens varvtal [2].

En generell frekvensomriktare är uppbyggd av tre huvudkomponenter: en likriktare, ett mellanled och en omriktare. En standardbild på en frekvensomriktares uppbyggnad visas i Figur 1 [3]. För vissa frekvensomriktare kan det även finnas en återmatningsenhet som används för att skicka tillbaka spänning ut i nätet igen. Detta används om man hastigt behöver stoppa maskinerna, vilket gör att de under en kort period verkar som generatorer.

Likriktarens uppgift är att omvandla den inkommande nätspänningen till likspänning med hjälp av dioder. Efter likriktaren följer mellanledet, vars uppgift är att filtrera likspänningen från likriktaren till en ren likspänning. Den består oftast av kondensatorer och induktanser som minskar störningar från omriktardelen att nå elnätet och filtrerar likspänningen från likriktaren [3].

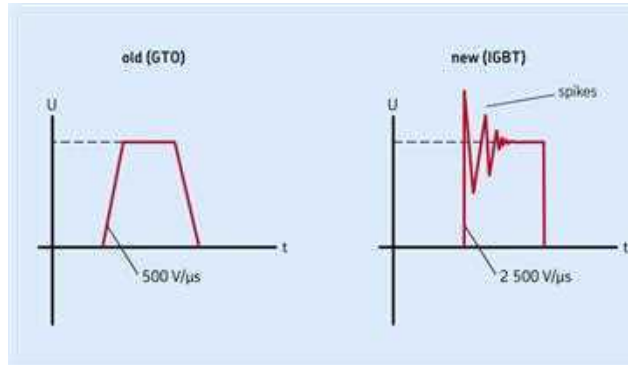


Figur 1: Frekvensomriktarens uppbyggnad och spänningens vågform för varje del.

Efter mellanledet följer omriktaren. Dess funktion är att skapa en ny växelspanning med önskad frekvens utifrån mellanledets likspänning. För att förlusterna inte ska bli orimligt stora används halvledare som fungerar som brytare som antingen är på eller av, vilket skapar en fyrkantsvåg. Det är i övergångarna mellan av och på för dessa switchar som förluster uppstår. De halvledare som tidigare använts i frekvensomriktare har varit dioder, tyristorer eller *gate turn off transistors* (GTO), men idag domineras marknaden av *insulated gate bi-polar transistors* (IGBT) [3], [4].

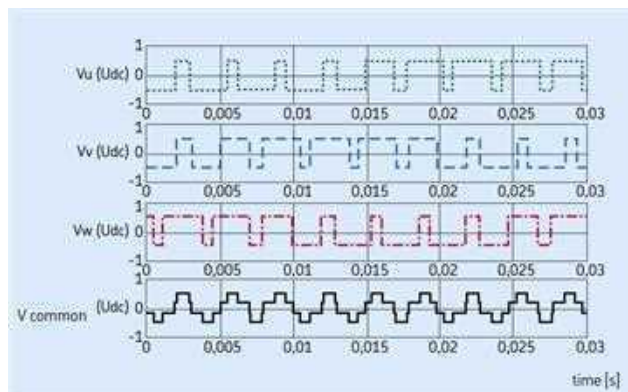
För att få önskat beteende från asynkronmaskinen krävs det att dess ström är sinusformad. Genom att använda pulsbreddsmodulering (PWM) för att variera bredden på fyrkantsvågorna hos frekvensomriktaren erhålls en effektiv spänning som liknar en sinusformad spänning. När den pulsbreddsmodulerade spänningen tillämpas på asynkronmotorns statorlindningar kommer det resulterande magnetfältet och därmed strömmen genom lindningarna att följa samma sinusformade mönster som den effektiva spänningen från frekvensomriktaren [3], [4].

När halvledarna i frekvensomriktaren genererar fyrkantsvågor uppstår höga spänningsderivator på grund av de snabba skiftningarna. Dessa skiftningar skapar branta lutningar i vågformen, vilket visas i Figur 2. Figuren visar att de nya IGBT är betydligt snabbare än de äldre GTO transistorerna, vilket minskar förlusterna från frekvensomriktaren. Men de snabba skiftningarna från IGBT resulterar i höga spänningstransienter, som kan överföras till maskinerna via matningskabeln och därifrån orsaka skador på maskinen [5].



Figur 2: Figur som jämför äldre GTO transistorer med de nya IGBT, där det framgår att IGBT är betydligt snabbare men genererar höga spänningstransienter. Bilden är tagen från SKF.

En vanlig trefas sinusformad strömförsörjning är balanserad och symmetrisk under normala förhållanden, där summan av alla tre faserna är noll. Vid pulsbreddsmodulering från frekvensomriktaren skapas istället en serie med fyrkantsspulser, där summan av de tre faserna inte blir noll på grund av transienterna och tiden det tar för transistorerna att slå på och av. Denna spänning kallas för *common-mode* spänning eller summaspänningen, och visas i Figur 3 [6].



Figur 3: Figur som visar de tre faserna från pulsbreddsmodulering, där *common-mode* spänningen skiljer sig från noll. Bilden är tagen från SKF.

Längden på matningskabeln kan bidra till en förhöjd *common-mode* spänning. Vid en längre kabel ökar risken för att spänningen reflekteras tillbaka. Detta sker när impedanserna mellan motorn och kabeln skiljer sig åt, och den reflekterade spänningen kan leda till en ökad spänning i motoringången och en ökad *common-mode* spänning [7].

2.3 Lagerströmmar

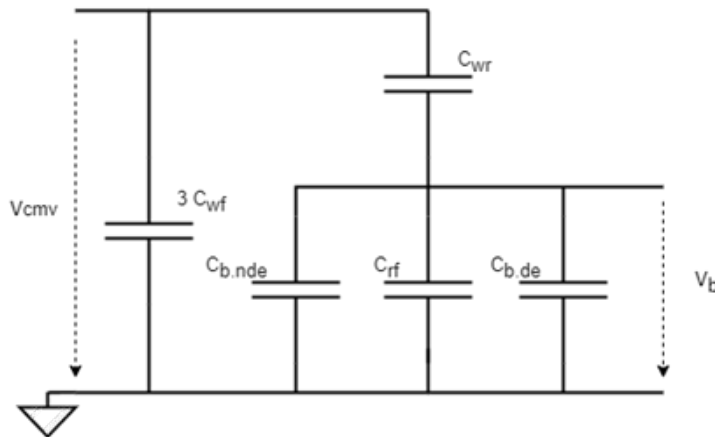
Lagerströmmar uppkommer i maskiner som justeras med frekvensomriktare på grund av höga spänningsderivator som bildas vid utgången. Den höga spänningsderivatan leder till en *common-mode* spänning och/eller en cirkulerande flödesspänning i motorn. Dessa spänningar kan tillslut laddas ur genom kullagret vilket skapar slitage på kullagret [5], [8].

För att beräkna storleken på strömmarna, i_b , som går igenom kullagret kan (3) användas [8].

$$i_b = C_b \frac{dV_b}{dt} \quad (3)$$

Detta kräver att man räknar ut frekvensomriktarens spänningsderivata, $\frac{dV_b}{dt}$, och den totala kapacitansen, C_b , som kullagret har. Enligt (3) påverkar spänningsderivatan $\frac{dV_b}{dt}$ och C_b storleken på lagerströmmarna. C_b är däremot konsekvent liten och konstant vilket tyder på att spänningsderivatan har den största påverkan [8], [9].

Spänningen i kullagren är direkt påverkad av *common-mode* spänning. För att närmare modellera spänningen i kullagren kan en kapacitiv spänningsdelning ställas upp enligt Figur 4. Denna härledning görs utifrån maskinens ekvivalenta krets som bildas vid drift tillsammans med oönskade kapacitanser [5], [10].



Figur 4: Ekvivalent krets för maskin i drift.

Med den ekvivalenta kretsen kan spänningen i kullagret modelleras. BVR (*Bearing voltage ratio*) är förhållandet mellan oönskade kapacitanser mellan rotor, stator och kullager som uppstår inuti motorn vid drift. I Figur 4 visas den ekvivalenta kretsen som bildas när *common-mode* spänning induceras i maskinen. Detta kan ställas upp enligt (4) där förhållandet mellan lagerspänningen och *common-mode* spänning bestäms [8], [10].

$$BVR = \frac{V_{bearing}}{V_{cmv}} = \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{rf} + 2C_b} \quad (4)$$

$V_{bearing}$ är spänningen i kullagret och V_{cmv} är *common-mode* spänningen från frekvensom-

riktaren. C_{wr} är kapacitansen som uppstår mellan motorns lindningar och rotorn. C_{rf} är kapacitansen som uppstår i luftgapet mellan rotorn och motorns ram. C_b är kapacitansen som finns i kullagret och är en förenklad betäckning för den totala kapacitansen i kullagret. Enligt Figur 4 används C_{bDE} och C_{bNDE} som är en mer noggrann betäckning för den totala kapacitansen i kullagret då de skiljer kapacitansen hos de inre och yttre rullbanorna [5], [8].

Det finns fyra olika sorter lagerströmmar, varav alla är direkt påverkade av höga spänningsderivator som frekvensriktaren producerar. Två av dem är direkt beroende av frekvensriktarens *common-mode* spänning och de andra två uppkommer i en kombination av *common-mode* spänningen och jordströmmar [5], [8], [10], [11].

2.3.1 Kapacitiva lagerströmmar

Vid höga dv/dt i kombination med att en spänningsdelning uppstår mellan stator, lindningar, rotor och kullager skapas små kapacitiva vägar för lagerströmmar att flöda igenom. När den isolerande filmen, placerad runt kullagret, försämras kan kulorna i lagret komma i kontakt med lagerbanan. Detta leder till en kortslutning mellan inre och yttre rullbanor. Dessa spänningar skapar strömmar som anses vara ganska ofarliga i jämförelse med andra former av lagerströmmar då amplituden vanligtvis inte överstiger 200 mA [8], [12], [13].

2.3.2 Elektriska urladdningsströmmar

Electric discharge machining (EDM) är en typ av lagerström som finns i majoriteten av elektriska maskiner. För att en EDM-ström ska gå igenom kullagret behöver en spänning induceras i kullagret, V_b . Denna spänning bildas av frekvensriktarens *common-mode* spänning, V_{cmv} , och kan bestämmas med förhållandet i ekvation 4. Urladdningarna genom kullagret sker när den isolerande filmens tröskelspänning överskrids (5-30 V). Detta gör att det elektriskt ledande smörjmedlet som används i kullagren tar upp utsöndrade metallpartiklar från slitaget och försämrar den isolerande förmågan hos filmen.

Amplituden av de lagerströmmar som uppstår i EDM-strömmar ligger inom intervallet 0.5-3 A och betraktas som skadliga, speciellt för mindre motorer [5], [8], [9], [12].

2.3.3 Cirkulerande högfrekventa lagerströmmar

På grund av kapacitansen mellan statorns lindningar och ramen (jord) av motorn uppstår en cirkulerande ström med frekvenser från 10 kHz till flera MHz. Huvudsakliga orsaken är de höga dv/dt i motorns terminaler. Dessa strömmar cirkulerar runt motorns axel, vilket kan överskrida den isolerande filmens tröskelspänning, kan orsaka en cirkulerande högfrekvent lagerström som leds igenom kullagret ut på axeln [8], [12].

Amplituden av strömmarna varierar (0.5-20 A vid motor med märkeffekt 500 kW) på motorers storlek men betraktas som skadliga [8], [12].

2.3.4 Rotor-jordströmmar

Rotor-jordströmmar kan förekomma då impedansen mellan rotorn och jord är lägre än impedansen mellan stator och jord. I dessa fall passerar de högfrekventa strömmarna, genererade av den höga dv/dt , delvis genom rotor till jord genom kullagren. Amplituden av rotor-jordströmmar varierar beroende på maskinens storlek och betraktas som skadliga [8], [12].

2.4 Olika sorters lagerskador

Lagerströmsskador är ett allvarligt problem som påverkar prestandan och livslängden hos elektriska maskiner. Dessa skador kan orsakas av den kapacitiva kopplingen mellan yttre och inre rullbana hos kullagret i frekvensstyrda motorer. Smörjmedlet och den inre och yttre banan i ett lager agerar tillsammans som en kondensator, som laddas upp av spänningen i motoraxeln. När spänningen i motoraxeln överskrider smörjfilmens tröskelspänningen, uppstår en urladdning genom lagret som skadar banorna och kulorna i kullagren [14]. De tre vanligaste lagerskadorna som uppstår vid denna form av urladdning kallas för *Pitting*, *Frosting* och *Fluting* [15].

2.4.1 Pitting

Pitting anses vara ett tidigt tecken på lagerströmmar. När urladdningen sker genom kullagret, smälter metallen i kullagrets banor och små kratrar bildas. Dessa kratrar är så pass små att de endast syns med hjälp av mikroskop och har en genomsnittlig diameter på $0.5\ \mu\text{m}$ [15], [8].

2.4.2 Frosting

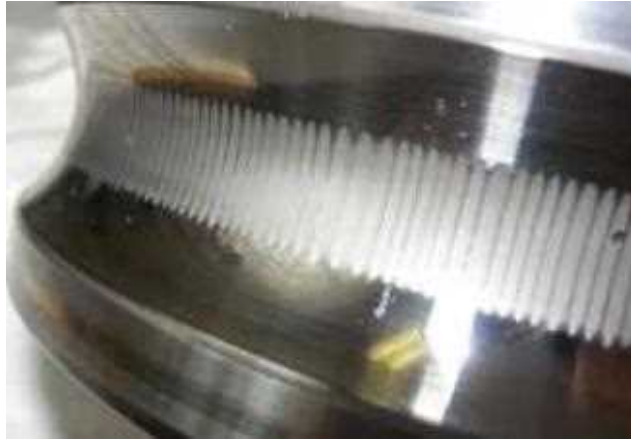
Frosting uppstår oftast hos motorer som har en varierande hastighet. Skadorna från urladdningen blir ofta väldigt fina och jämna på båda banorna, vilket visas i Figur 5. Kulorna från kullagrena och smörjmedlet färgas mörka av den brända metallen [14].



Figur 5: Exempel på lagerskada av typen *frosting*. Bilden är tagen från en av anläggningens maskiner.

2.4.3 Fluting/Washboarding

Fluting uppkommer vid slutet av kullagrets livslängd. Den kännetecknas av ett räfflande mönster på kullagrets banor och skadorna uppträder normalt i de områden där lagret är mest belastat och visas i Figur 6 [14], [15].



Figur 6: Exempel på lagerskada av typen *fluting* på den inre banan av ett kullager. Bilden är tagen från SKF.

Fluting sker oftast på motorer som körs konstant i en eller flera bestämda frekvenser, och slutar med att kullagret blir förstört och behöver bytas ut [14].

2.4.4 Skada på kulorna

Nedan i Figur 7 visas ett extremfall av vad som kan hända med kulorna i ett kullager när de utsätts för lagerströmmar. I detta fall har kulorna utsatts för så pass starka urladdningar att de tillslut gått itu, vilket är långt ifrån idealt för en roterande maskin.



Figur 7: Kulor i kullagret har blivit utsatta för så pass stora lagerströmmar att de gått itu. Bilden är tagen på en av anläggningens maskiner.

2.5 Lagerströmsmätningar

Att mäta lagerströmmar är i praktiken svårt och i många fall omöjligt. Lagerströmmarna är ofta av en så pass hög frekvens, MHz, att de ofta kan förväxlas med den elektromagnetiska interferensen som frekvensomriktarens snabbväxlande halvledare genererar [16].

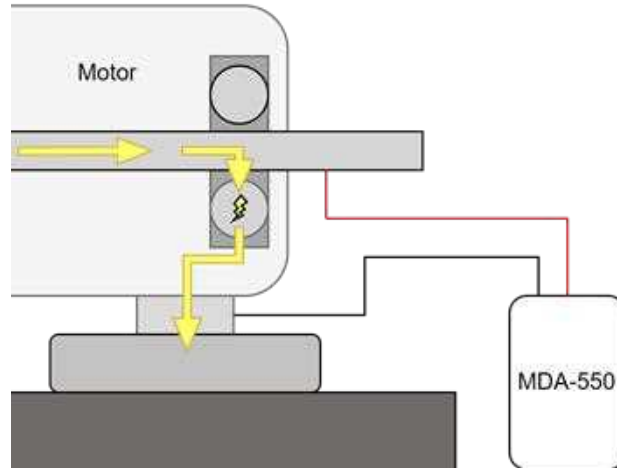
För att kunna mäta strömmen som går genom kullagrena krävs det att strömmen går igenom en förbestämd väg. Detta kräver mycket arbete och man måste isolera alla potentiella vägar som strömmen kan ta vägen, vilket är väldigt svårt att göra på alla maskiner [17].

Istället för att isolera och mäta strömmen som går igenom kullagrena finns det vissa metoder där man använder sig av olika mätinstrument som kan ge en indikation på om det uppstår lagerströmmar genom kullagrena. Dessa metoder och instrument presenteras i kommande delkapitel.

2.5.1 Spänningsmätning

En metod som kan ge en indikation på om lagerströmmar förekommer är att mäta axelspänningen och dess urladdningar. Storleken på skadliga urladdningar varierar från maskin till maskin och beror på när axelspänningen överstiger den isolerande filmens tröskelspänning. Den isolerande filmen bryts ner när motorn blir varm och då sänks även filmens tröskelspänning [18]. Som regel kan man säga att om urladdningarna är större än 15 volt och snabbare än 50 nanosekunder kan det indikera att skadliga strömmar går igenom lagrena, men urladdningar under 15 volt och långsammare än 50 nanosekunder kan vara viktiga att mäta om motorn går varmt [19].

Mätinstrumentet Fluke MDA-550 är ett portabelt oscilloskop som har möjligheten att mäta axelspänningen och detektera om det sker en urladdning. Med mätinstrumentet används en axelspänningsprob, som består av en liten ledande kolborste som placeras mot den roterande motoraxeln. Kolborsten behöver bytas ut med jämna mellanrum efter mätningar då fibrerna i borsten slits ut. Borsten, samt en referenspunkt som placeras på motorns jordade hölje, gör det möjligt att mäta spänningarna i motoraxeln och notera om det sker några spänningsurladdningar, hur ofta det sker, hur starka de är i volt och hur snabba urladdningarna är i nanosekunder [19]. Mätuppställningen visas i Figur 8.



Figur 8: Mätupställning för MDA-550. Spänningsproben med installerad kolborste placeras mot den roterande motoraxeln och en referenspunkt placeras på maskinens jord.

2.5.2 Strömmätning

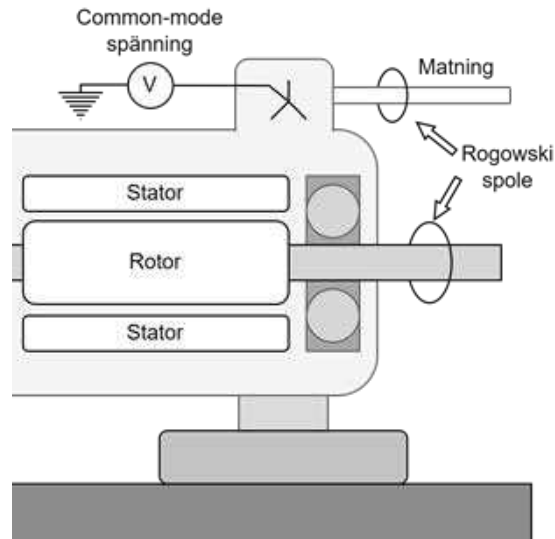
En annan metod går ut på att mäta *common-mode* strömmen. Om *common-mode* strömmen, summan av alla matningsströmmar, avviker från noll kan det indikera att det finns lagerströmmar i maskinen [20].

Ett mätverktyg som kan användas för detta är en Rogowskispole. Den består av en kopparspiral lindad på en plastkärna som är försedd med ett skyddshölje, som reagerar på förändringshastigheten av en lednings magnetfält. Rogowskispolar används i kombination med ett oscilloskop för att logga den mätdata som registreras [21].

En fördel med rogowskispolar är att de saknar järnkärna. Detta gör att spolarna är flexibla och enklare att använda vid trånga utrymmen, och att de inte behöver slutas helt runt ett mätobjekt för att ge en god mätning [22].

Under mätning av strömmen måste spolen placeras runt trefasmatningskabeln till motorn. Om motorn använder flera matningskablar måste spolen placeras runt samtliga matningskablar. I Figur 9 visas mätupställningen [23].

Man kan även använda sig av en rogowskispole för att mäta direkt på den roterande axeln och mäta axelströmmen. Om spolen placeras runt axeln ska inga strömmar mätas för att säkerställa att det inte går några lagerströmmar i maskinen. Detta kan vara svårt att göra i praktiken då maskinen måste vara i drift och det kan vara trångt att komma åt axeln på grund av motorskydd. Mätupställningen visas i Figur 9 [23].



Figur 9: Mätupställning med rogowskispole. Den översta rogowskispolen mäter *common-mode* strömmen, och den nedre mäter axelströmmen.

För att kunna mäta strömmarna behöver mätinstrumentet en bandbredd på flera MHz på grund av de höga spänningsderivator som frekvensomriktaren genererar [20].

2.5.3 Mätinstrumentet Fluke 1775

Mätinstrumentet 1775 är en elkvalitetsanalysator för trefassystem som är konstruerad för enklare elkvalitetsgranskningar. Mätinstrumentet utnyttjar rogowskispolar som placeras runt varje fas vilket gör det möjligt att mäta fasernas strömmar.

Magnetprober används även för att mäta fasernas spänning som placeras direkt på faserna. För olika mätningar är den maximala bandbredden 1 MHz [24]. I Figur 10 visas Fluke 1775.



Figur 10: Mätinstrumentet Fluke 1775

Mätresultat som kan vara intressant från Fluke 1775 är *supraharmonics*, som beskriver störningar i vågformer inom frekvensbandet 2-150 kHz. *Supraharmonics* leder regelbundet till problem med störningar hos elektriska komponenter med hög växel-frekvens [25].

2.5.4 Indirekta metoder för lagerströmsmätningar

Två ytterligare metoder för att detektera lagerströmmar är genom vibrationsanalys och ultraljudsanalys. Dessa metoder klassificeras som indirekta, då de endast kan upptäcka skador som redan har uppstått. Jämfört med de ovanstående metoderna, som i ett tidigt skede kan varna om det går lagerströmmar och därmed gör det möjligt att åtgärda problemet innan det blir allvarliga skador [23].

Vibrationsanalys går ut på att man mäter vibrationerna i motorn. Genom att analysera mönstren på vibrationerna kan en indikation ges om lagren har blivit skadade. Ett problem med vibrationsanalys är att det kan vara svårt att urskilja skador från lagerströmmar och andra mekaniska defekter som kan finnas på kullagren. Denna metod behöver därför oftast kompletteras med en annan metod för att fungera effektivt och bekräfta lagerströmsproblem [23].

Ultraljudsanalys är en annan indirekt metod som kan användas för att indikera lagerströmsproblem. Den använder ultraljudssensorer för att analysera ljudvågor som produceras av maskinen. Ultraljudsanalys används ofta för att bland annat avgöra om lagrena behöver smörjas och hur mycket, upptäcka läckor och övervaka om det sker blixtar [23].

Teoretiskt sett ska ultraljudsanalys kunna detektera de högfrekventa ljudsignaler som uppstår från blixterna som produceras av axelspänningen (EDM). Energin hos dessa blixtar är dock så låg i ultraljudsområdet att det är svårt att använda denna metod i praktiken [23].

2.6 Åtgärder lagerströmmar

I detta delkapitel beskrivs några vanliga åtgärder som kan implementeras för att åtgärda och minska effekterna av lagerströmmar.

2.6.1 Elektriskt ledande smörjfett

Elektriskt ledande fett är en vanlig åtgärd som lindrar problemet genom att bilda en impedans mellan kullagrets rullbanor. Impedansen kopplar samman rotor och stator vilket reducerar de oönskade kapacitanserna. Fettet tappar däremot sin effekt relativt snabbt beroende på mängden lagerströmmar; fettets beblandas med metallpartiklar från slitage av kulor och rullbanor vilket får impedansen att sjunka. I en undersökning har olika smörjmedel använts för att studera effekten av elektriskt ledande fett [26]. Undersökningen visar att det elektriskt ledande fett, jämfört med vanligt smörjmedel, sänker lagerspänning och lagerströmmar med en faktor 5 de första timmarna i drift. Efter 40 timmar drift konstateras de däremot identiska [5], [13].

På liknande sätt används en isolerande film runt kullagrens yttre rullbanor. Filmen består av aluminiumoxid vilket är ett material som introducerar en resistans och en kapacitiv impedans genom kullagret. Då strömmarna går genom ett högre motstånd reduceras mängden lagerströmmar [12].

2.6.2 dv/dt filter

För att reducera de höga spänningsderivator som bildas från frekvensomriktaren implementeras dv/dt filter. Utsignalen från frekvensomriktaren matas igenom en RLC koppling med hög resistans som förhindrar högfrekventa spänningar att passera. Detta ger lägre *slew rate*

och spänningstoppar som minskar *common-mode* spänningen och även jordströmmarna [8], [27], [28].

2.6.3 Ferritringar

Ferritringar används för att reducera de högfrekventa *common-mode* strömmarna som går in i motorn och visas i Figur 11. Genom att leda alla faser från frekvensomriktaren genom dessa ringar bildas en hög induktans för de högfrekventa strömmarna som istället leds ut i kärnan [8].

I ett dokumenterat fall hade 2 av 3 maskiner kommit till ett driftstopp på grund av utslitna kullager. Då konstaterades det att de 2 maskinernas ferritringar var utslitna [29].



Figur 11: Bild på ferritringar som används i anläggningen.

2.6.4 Borste

Ledande borste anses vara den vanligaste åtgärden för lagerströmmar [5]. Borsten är kopplad mellan rotorn och statorn och bildar en impedans som leder bort kullagrets oönskade kapacitanser som då minskar axelspänningen och lagerströmmarna [30].

2.6.5 Keramiska kulor

Genom användning av keramiska kulor i kullagrena kan man förhindra lagerströmmar. De keramiska kulorna är inte ledande vilket reducerar lagerströmmarna. Däremot förhindras inte alla lagerströmmar då till exempel EDM-urladdningar kan gå genom smörjmedlet [31].

3 Metod

I detta kapitel beskrivs metoden som tillämpades under mätningarna, samt vilka mätinstrument som användes. Förstudien presenteras som innehåller initiala tester med MDA-550 samt planering av mätningar följt av mätningarnas metod som utfördes på anläggningen.

3.1 Förstudie

Under förstudien till arbetet fick vi möjlighet att testa mätinstrumentet MDA-550 innan vi hade hunnit läsa på så mycket om dess funktioner, vilket gav oss en praktisk introduktion till mätverktyget. Testet genomfördes hos en lokal elleverantör tillsammans med en ingenjör från Fluke, där inga farliga urladdningar kunde detekteras. Den metod som användes hos elleverantören använde även sedan vid mätningar på kartongmaskinen.

Vid ett driftstopp identifierades vilka maskiner som skulle och kunde mätas på. Den här förberedande genomgången var viktig för att mätningar skulle kunna utföras effektivt och på ett säkert sätt när produktionen var igång.

Majoriteten av maskinerna var otillgängliga på grund av platsbrist, säkerhetsrisker eller att en skyddskåpa var placerad runt motoraxeln. På grund av stort intresse att mäta på en specifik maskin med tidigare bekräftat problem med lagerströmmar klipptes ett hål i skyddskåpan för att möjliggöra mätningar.

Vid samtliga besök togs säkerheten på stort allvar. Riskanalys utfördes tillsammans med handledare och skyddsombud vilket gav oss en grundlig förståelse för olika risker. Under denna analys upptäcktes att vissa maskiner hade kilar som roterar med motoraxeln, vilket krävde extra försiktighet under genomförandet av mätningar under drift. En av dessa kilar visas i Figur 12. Riskanalysen gjorde oss även berättigade till att utföra alla mätningar utan uppsyn av handledare.



Figur 12: Kila inringad i rött som sitter på motoraxeln. Bredvid kilen är spänningsproben som används under mätningar.

3.2 Mätningar

Under mätningarna på anläggningen fanns tillgång till mätinstrumenten MDA-550 och Fluke 1775. MDA-550 användes för att mäta hur ofta spänningsurladdningar sker samt hur starka och snabba urladdningarna är. Fluke 1775 användes för att analysera signalerna före och efter ett filter som monterades efter att lagerströmsskador skett i en maskin, för att se om filtret fungerar och hur det påverkar matningen till maskinen. Samtliga mätningar utfördes när maskinerna var i full drift och mätningarna utfördes under ungefär en vecka.

För mätningar med MDA-550 användes en spänningsprob i kombination med en magnetbas och ett förlängningsstativ som underlättade mätningarna. Magnetbasen fästes på en del av motorn eller någon annan magnetisk yta runt maskinen, vilket gjorde det möjligt att enkelt positionera spänningsproben mot den roterande motoraxeln. På spänningsproben monterades även en kolborste för att säkerställa en stabil kontakten mot motoraxeln under mätningarna. I Figur 13 visas spänningsproben med magnetbas, stativ och kolborste.



Figur 13: Spänningsprob med stativ, magnetbas och kolborste.

En separat kabel kopplades till maskinens jord, vilket möjliggör mätning av potentialskillnaden mellan den roterande motoraxeln och jord. I Figur 14 och 15 visas hur en uppkoppling av mätinstrumentet ser ut samt spänningsproben mot motoraxeln. Vissa maskiner i anläggningen är ihopkopplade till växellådor, vilket är fallet i Figur 14. Där det fanns möjlighet utfördes även mätningar på växellådans roterande axel.



Figur 14: Mätupställning med MDA-550, där mätning utförs på en växellåda.



Figur 15: Spänningsprob med borste mot motoraxel på en växellåda.

För varje maskin togs mätvärden i cirka fyra minuter. Inledningsvis sattes gränsvärdena till 15 volt och 50 nanosekunder, vilket justerades om inga urladdningar detekterats på den nivån. Gränserna sänktes gradvis för att registrering av samtliga maskiners urladdningar, inklusive de ofarligt små och långsamma urladdningarna, skulle dokumenteras. Efter att mätningarna utförts sparades datan i form av två olika sorters skärmbilder. Den ena skärmbilden visar en tabell med antalet urladdningar och vilket område de tillhör, medan den andra visar den senaste påträffade urladdningens spänningsvågform.

Efter varje maskin måste mätverktyget startas om för att inte datan ska sparas i samma rapport. Det interna minnet på MDA-550 rymmer endast ett begränsat antal rapporter, vilket innebär att mätdatan regelbundet måste överföras till en dator med ett USB-minne för att frigöra utrymme på mätinstrumentet.

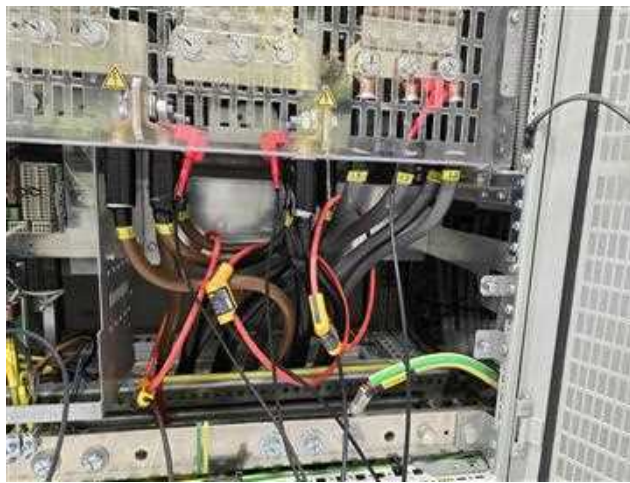
Kolborsten slits ut efter cirka 10 mätningar och måste bytas ut regelbundet. I Figur 16 visas en välanvänd och en ny borste.



Figur 16: En välanvänd borste till vänster och en ny till höger.

Med Fluke 1775 låg fokus på en specifik maskin som tidigare hade drabbats av problem med lagerströmmar. För att åtgärda detta hade ferritringar installerats för att minska lagerströmsproblemet. Syftet med mätningarna var att undersöka matningsströmmen och spänningen före och efter filtret för att bedöma filtrets påverkan. Därför genomfördes två mätserier.

För att kunna utföra mätningar med Fluke 1775 krävdes det att maskinen var avstängd. Då maskinen endast var i drift under vissa intervall, var det möjligt att koppla på Fluke 1775 under dess avstängda perioder. För mätningarna användes rogowskispolar för att mäta strömmen och magnetprober för att mäta spänningen på samtliga faser. Spolarna placerades i riktning med strömmens flöde, men det var även möjligt att justera polariteten digitalt genom mätinstrumentet om de var felplacerade. Dessutom kopplades en jordningskabel från mätinstrumentet till maskinens jord. Mätupptällningen för Fluke 1775 visas i Figur 17.



Figur 17: Mätuppsättning Fluke 1775 direkt efter frekvensomriktaren och före filtret.

Efter att uppkopplingen var klar, bekräftade mätinstrumentet korrekt koppling genom att lamporna på mätinstrumentet började lysa grönt när maskinen driftsattes. Mätningarna pågick i ungefär en timme och utfördes på båda sidorna av filtret. I Figur 18 visas mätinstrumentet på maskinen efter filtret.



Figur 18: Fluke 1775 på maskinen efter filtret. I denna figur har inte maskinen blivit driftsatt än och lamporna lyser gult.

Efter att mätningarna utförts skapades en fil som man kan hantera i en separat mjukvara på en dator. Denna mätning sparar mängder av olika mätvärden men det intressanta för oss är fasspänningarna och fasströmmarna för att undersöka *common-mode* spänningarna och *common-mode* strömmarna.

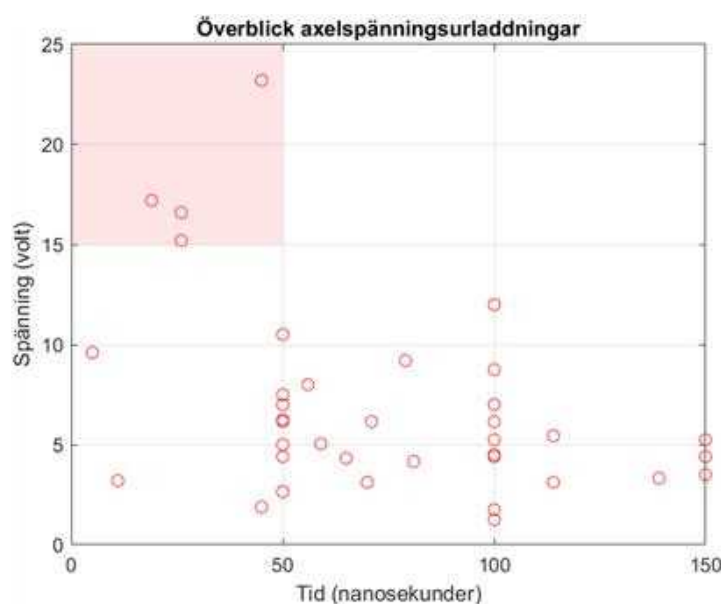
4 Resultat

Av de cirka 170 maskinerna på anläggningen valdes 45 ut för mätningar med MDA-550. På grund av svårtillgängliga maskiner kunde inte fler maskiner mätas under den planerade tiden som vi befann oss på anläggningen. Flera faktorer hindrade vår tillgång till maskinerna, bland annat motorskydd som förhindrade åtkomst till motoraxeln, farliga arbetsområden som vi inte kunde vistas i när maskinerna var igång på grund av säkerhetsskäl samt oåtkomliga placeringar av maskinerna såsom högt placerade motorer eller trånga utrymmen.

Under mätningarna på maskinerna noterades fyra maskiner med begynnande problem som identifierades med hjälp av axelspänningsurladdningar. Spänningsvariationer detekterades vid samtliga mätningar som genomfördes på maskinernas motoraxel. Dock var majoriteten av urladdningarna så pass små och inträffade så sällan att de inte utgjorde någon risk för maskinerna. Mätningarna som utfördes på maskinernas växellådor gav inte heller några markanta utslag, förutom i ett fall.

I vissa av graferna från mätningarna ser det ut som att det sker en spänningsuppladdning istället för en spänningsurladdning. I dessa fall är riktningen inte det intressanta, utan det intressanta är hur snabba och stora spänningsförändringarna är.

Figur 19 visar en graf över alla uppmätta maskiners axelspänningsurladdningar, där varje punkt representerar en enskild maskin. Grafen baseras på mätdata som innehåller varje maskins största urladdning i volt samt urladdningens tid i nanosekunder. Skadliga lagerströmmar visas i det rödmarkerade området.



Figur 19: Graf över axelspänningsurladdningar för alla uppmätta maskiner. Varje punkt representerar en maskin och visar dess största urladdning i volt samt snabbaste uppmätta tid i nanosekunder. Det röda området markerar området där skadliga lagerströmmar uppstår.

4.1 Mätningar på maskinerna med skadliga lagerströmmar

I detta delkapitel visas resultatet från mätningarna på två av maskinerna med axelspänningsurladdningar som uppnår kraven för skadliga lagerströmmar.

Tabell 1 och 2 visar antalet axelspänningsurladdningar som färdas genom kullagrena under 50 nanosekunder och överstiger 15 volt. Detta indikerar att maskinerna har skadliga lagerströmmar som kan förkorta kullagrenas livslängd. I Figur 20 och 21 visas vågformen för en av axelspänningsurladdningarna för respektive maskin.

Tabell 1: Tabell över antalet urladdningar på maskin 1 med skadliga urladdningar från mätningarna.

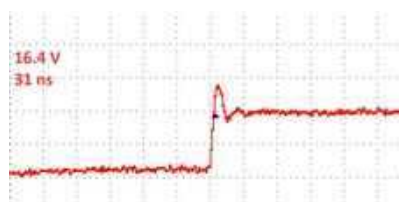
$ dv/dt $	<50ns
>15V	16
11.3 - 15V	36
7.5-11.3	122



Figur 20: Vågform på detekterad skadlig urladdning på maskin 1.

Tabell 2: Tabell över antalet urladdningar på maskin 2 med skadliga urladdningar från mätningarna.

$ dv/dt $	<50ns
>15V	1
11.3 - 15V	7
7.5-11.3	20



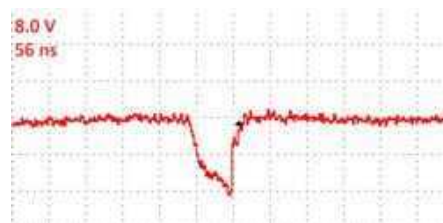
Figur 21: Vågform på detekterad skadlig urladdning på maskin 2.

4.2 Mätningar på maskin utan skadliga lagerströmmar

Här presenteras resultat från mätningar på en maskin där ofarliga spänningsurladdningar detekterades. I Tabell 3 visas antalet urladdningar som sker med en hastighet på mindre än 100 nanosekunder och spänningsurladdningar på mindre än 8 volt. Figur 22 visar vågformen på en axelspänningsurladdning på maskinen.

Tabell 3: Tabell över antalet urladdningar på maskin 3 utan skadliga urladdningar under mätningar under mätningar.

$ dv/dt $	<100ns
>8V	0
6 - 8V	5
4-6	15



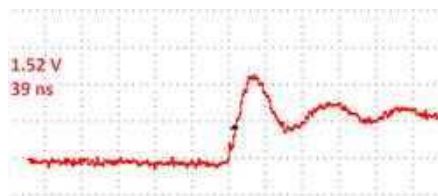
Figur 22: Vågform på detekterad icke skadlig urladdning på maskin 3.

4.3 Mätningar på växellåda

Mätningarna på växellådorna visade ett varierande resultat och skilde sig mellan olika maskiner. Tabell 4 visar antalet urladdningar, och Figur 23 visar vågformen på en urladdning för en växellåda med oskadliga spänningsurladdningar.

Tabell 4: Tabell över antalet urladdningar på växellåda 1 under mätningar.

$ dv/dt $	<100ns
>1V	12
0.8 - 1V	0
0.5 - 0.8V	0



Figur 23: Vågform på detekterad icke skadlig urladdning på växellåda 1.

På en annan växellåda uppmättes mätdata som visas i Tabell 5, som visar antalet urladdningar, och Figur 24, som visar en av spänningsurladdningarna. Tyvärr hade vi inte åtkomst till motorn som drev växellådan, vilket hade varit av intresse då växellådan visade höga värden.

Tabell 5: Tabell över antalet urladdningar på växellåda 2 under mätningar.

$ dv/dt $	<100ns
>12V	5
9 - 12V	68
6 - 9V	184



Figur 24: Vågform på detekterad skadlig urladdning på växellåda 2.

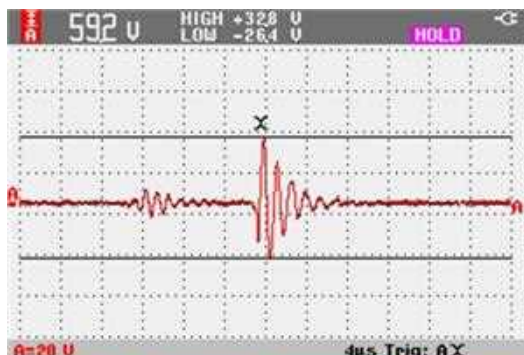
En mätning utfördes även på växellådan till maskin 2, från kapitel 4.1, men inga urladdningar kunde detekteras. På de övriga maskinerna och deras växellådor som mätningar utfördes på, visade det sig att detta var normen.

4.4 Mätningar på maskiner med installerade ferritringar

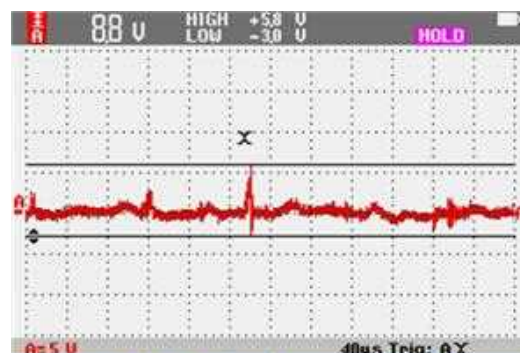
Från mätningar på maskinerna med installerade ferritringar detekterades låga axelspänningsurladdningar med långsam urladdningshastighet. För dessa två maskiner har vi tillgång till en rapport som sammanställdes under ombyggnationen och installationen av ferritringarna som utfördes 2022. Rapporten inkluderar mätdata på axelspänningsurladdningarna både före och efter ombyggnationen, vilket möjliggör en jämförelse av förändringarna i urladdningsbeteendet före och efter ombyggnad, samt med mätdata som samlades under denna studie.

4.4.1 Maskin 4

Figur 25 visar vågformerna på axelspänningen före och efter ombyggnaden för maskin 4. I tabell 6 presenteras antalet urladdningar som uppmättes på maskin 4 under tiden för denna studie och Figur 26 visar en av spänningsurladdningarnas vågform.



(a) Vågform på axelspänningen före ombyggnad.

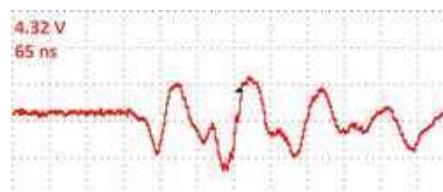


(b) Vågform på axelspänningen efter ombyggnad.

Figur 25: Vågform på axelspänningen före och efter ombyggnad på maskin 4.

Tabell 6: Tabell över antalet urladdningar för maskin 4 med installerade ferritringar.

$ dv/dt $	<100ns
>3V	6
2.3 - 3V	5
1.5 - 2.3V	3



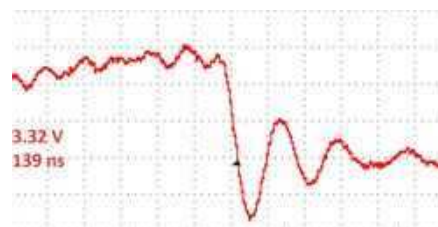
Figur 26: Vågform på detekterad icke skadlig urladdning för maskin 4 med installerade ferritringar.

4.4.2 Maskin 5

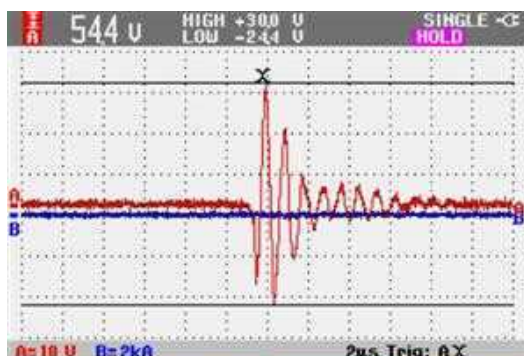
Figur 28 visar vågformerna på axelspänningen före och efter ombyggnaden för maskin 5. I tabell 7 presenteras antalet urladdningar som uppmättes på maskin 5 under tiden för denna studie och Figur 27 visar en av spänningsurladdningarnas vågform.

Tabell 7: Tabell över antalet urladdningar för maskin 5 med installerade ferritringar.

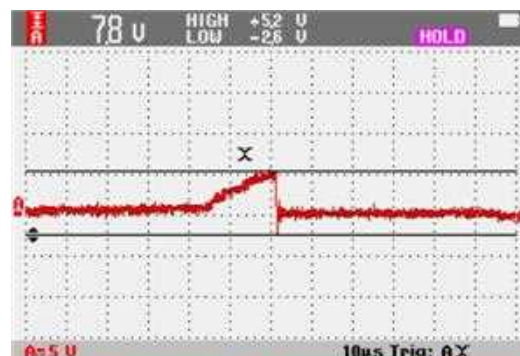
$ dv/dt $	<150ns
>1V	2
2.3 - 3.0V	3
1.5V - 2.3V	1



Figur 27: Vågform på urladdningar för maskin 5 med installerade ferritringar.



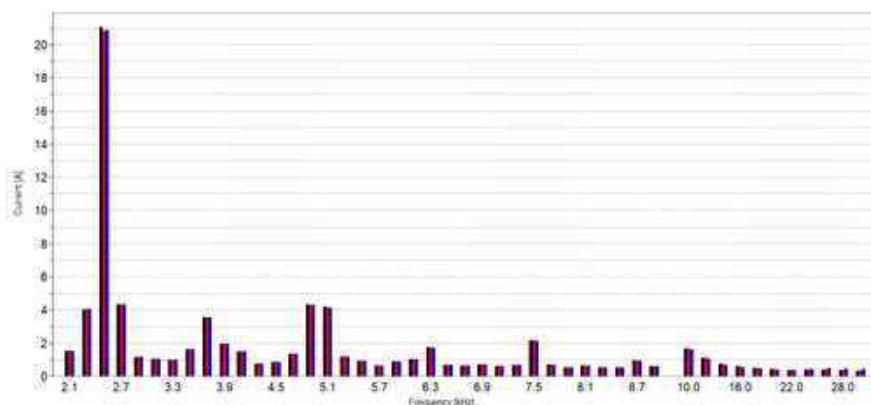
(a) Vågform på axelspänningen före ombyggnad.



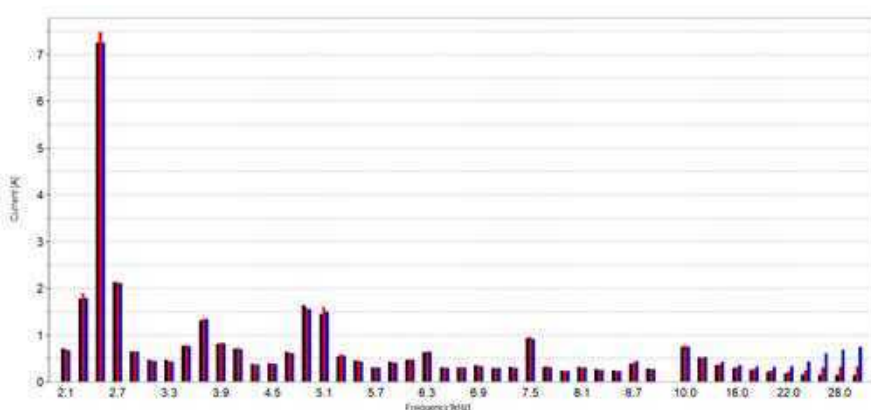
(b) Vågform på axelspänningen efter ombyggnad.

Figur 28: Vågform på axelspänningen före och efter ombyggnad på maskin 5.

På maskin 5 utfördes även två mätningar med Fluke 1775 före och efter ferritringarna. I Figur 29 visas *supraharmonics* direkt efter frekvensomriktaren och Figur 30 visar *supraharmonics* efter installationen på maskinsidan.



Figur 29: *Supraharmonics* före filter, där den högsta strömmen uppnår 21 ampere.



Figur 30: *Supraharmonics* efter filter, där den högsta strömmen uppnår 7.5 ampere.

5 Diskussion

I detta kapitel diskuteras metoderna som tillämpades för att utföra mätningarna, mätinstrumentens trovärdighet, resultat och jämförelser med den tidigare rapporten som utfärdades under ombyggnaden för de två maskiner med installerade ferritringar.

5.1 Mätinstrument

Vid samtliga mätningar användes mätinstrumentet Fluke MDA-550. Under uppkoppling var det stundtals svårt att avgöra trovärdigheten av resultatet, då antalet urladdningar kunde ändras hastigt. Detta kan bero på att maskinerna inte alltid var i drift med samma varvtal eller moment, vilket inte var märkbart i mätmiljön när mätningarna utfördes.

En annan orsak kan vara slitage på kolborstarna som placerades på maskinens axel. Dessa borstar förbrukas efter ungefär tio mätningar på grund av axelns rotation och smörjmedlet som appliceras på axeln. Efter att en mätning utförts täcks borstens strån med smörjmedel, vilket bidrar till en resistans som kan påverka nästkommande mätningar. Försök att rengöra borstarna från smörjmedel gjordes med papper, men på grund av smörjmedlets tjocklek var det svårt att rengöra utan att skada kolborsten. Under mätningarna fanns det tillgång till tre kolborstar för 45 mätningar, vilket kan ha påverkat resultatet. Fler kolborstar hade behövts för att utesluta att borstarnas slitage påverkade resultatet.

En ytterligare utmaning var att spänningsproben på MDA-550 i vissa fall var för breda, vilket gjorde det svårt att få plats och utföra mätningar mellan vissa skyddskåpor. Detta resulterade i en osäkerhet på hur bra kontakt kolborstarna faktiskt hade mot den roterande axeln under vissa mätningar.

Vi gick in i detta arbete med begränsad kunskap av mätinstrumentet Fluke 1775. Tanken var att använda ett mätinstrument med högre bandbredd och samplingsfrekvens för att analysera ferritringar installationens påverkan på *common-mode* spänningar och strömmar. Då vi inte hade tillgång till ett mätinstrument med dessa egenskaper användes istället Fluke 1775, vilket är ett mätinstrument anpassad för elkvalitetsanalys. Efter mätningarna visade det sig att mätinstrumentet inte hade tillräckligt bra bandbredd för att utföra detta. Istället användes mätinstrumentet för att mäta *supraharmonics* på maskin 5.

5.2 Mätresultat

Efter att samtliga mätningar utförts konstaterades det att majoriteten av maskinerna visade urladdningar på en oskadlig nivå, som visas i Figur 19. Endast fyra maskiner visade värden som indikerade skadliga lagerströmmar som skulle behöva åtgärdas och kontrolleras igen med nya borstar.

Resultaten, som visas i tabellerna, visar antalet spänningsurladdningar som inträffat under mätningarnas gång. En tolkning av tabellerna är att spänningsurladdningar som sker sällan kan anses vara ofarliga. Detta baseras på antagandet att om en hög spänningsurladdning sker väldigt sällan eller endast någon enstaka gång under mätningen inte påvisar ett återkommande problem med maskinen, vilket är det som utgör de största skadorna.

Även om dessa enstaka fall av spänningsurladdningar inte visar på ett omedelbart problem som behöver åtgärdas, kan det vara av intresse att återbesöka maskinen för att observera om antalet spänningsurladdningar ökat eller om den tidigare spänningsurladdningen endast

var en tillfällig störning.

Mätningarna på växellådorna visade varierande resultat. Spänningsurladdningarna var normalt sett låga och oskadliga, med undantag på växellåda 2 som uppvisade höga och snabba spänningsurladdningar. Tyvärr hade vi inte åtkomst till maskinen som drev växellådan på grund av en skyddskåpa. Det hade varit intressant att utforska denna maskin vidare, då det finns en risk att denna maskin var drabbad av höga lagerströmmar som vandrade genom motoraxeln till växellådan. Denna maskin skulle behöva kontrolleras ytterligare en gång med en ny borste för att säkerställa att skicket på kolborsten inte påverkat resultatet.

Majoriteten av maskinerna som mätningar utfördes på har inte skadliga lagerströmmar, vilket kan bero på flera faktorer. Alla typer av lagerströmmar orsakas av spänningsderivator från frekvensomriktaren, vilket kan tyda på att transienterna som produceras av frekvensomriktaren inte är tillräckligt höga, eller har blivit tillräckligt reducerade, för att förhindra att skadliga strömmar kan uppstå. Majoriteten av maskinerna i anläggningen är utrustade med dv/dt -filter som kan vara en bidragande faktor till detta.

Ytterligare faktorer som kan bidra till låga lagerströmmar kan vara god jordning, och användning av elektriskt ledande fett, som bildar en resistans på maskinens axel och förhindrar spänningsurladdningar.

De mätningar som utfördes på maskinerna med installerade ferritringar visade inga tecken på farliga lagerströmmar under denna studie. Tidigare mätningar som utfördes 2022, innan ombyggnaden, visade tydliga tecken på farliga spänningsurladdningar på dessa maskiner. Efter installationen av ferritringar reducerades spänningsurladdningarna till ofarliga nivåer, vilket även bekräftades av mätningarna vi utförde. Detta visar ferritringarnas effektivitet och funktionalitet när det gäller att minimera lagerströmmar.

För att ytterligare utvärdera ferritringarnas funktionalitet användes Fluke 1775 för att ta mätningar både före och efter installationen av ferritringar på maskin 5. Mätinstrumentet producerade mätresultat som visade en markant minskning i *supraharmonics*, där alla frekvenser överlag hade sjunkit efter installationen. Mätningarna utfördes dock med några dagars mellanrum istället för samtidigt, vilket hade varit idealt för att utesluta eventuella skillnader i driftförhållanden vid mätningstillfällena. Detta gör resultatet mindre tillförlitligt eftersom det inte går att säkerställa att maskinen kördes under exakt samma förhållanden vid de olika mättillfällena.

6 Slutsats

I detta arbete har vi utfört mätningar för att identifiera lagerströmmar. Detta utfördes med mätinstrumentet Fluke MDA-550 och en axelspänningsprob, vilket gjorde det möjligt att direkt observera vilka maskiner som är drabbade av skadliga lagerströmmar. På grund av olika faktorer kan mätresultaten påverkats, däremot anser vi att metoden är tillräckligt robust och trovärdig för att presentera resultaten som indikerar på maskiner som drabbats av skadliga lagerströmmar.

I arbetet har vi diskuterat teoretiska metoder för att hantera och minska lagerströmmar, och även utfört mätningar på implementerad metod. Utifrån mätningarna gjorda under studien och resultat från tidigare mätningar anses ferritringar vara en effektiv lösning som sänker axelspänningsurladdningarna på maskinen till oskadliga nivåer. Användningen av mätinstrumentet Fluke 1775 gav bristfälliga resultat under studien på grund av tiden mellan mätningar, men kan eventuellt användas för att verifiera funktionaliteten av ferritringarna.

Utifrån mätningarna på de maskiner vi haft tillgång till identifierades fyra potentiella maskiner som behöver kontrolleras och eventuellt åtgärdas. Resultaten överlag visar att inga skadliga lagerströmmar förekom på de flesta maskinerna, med undantag för dessa fyra fall. För att säkerställa att resultaten inte påverkats av slitna kolborstar bör dessa maskiner kontrolleras igen med nya kolborstar.

Referenser

- [1] Thomas Franzén och Sivert Lundgren. *Elkraftteknik*. Studentlitteratur AB, 2002, s. 117–134.
- [2] Reidar Gustavsson. *Praktisk Elkvalitet*. Andra utgåvan. Norbo kraftteknik AB, 2003, s. 129.
- [3] Reidar Gustavsson. *Praktisk Elkvalitet*. Andra utgåvan. Norbo kraftteknik AB, 2003, s. 172–173.
- [4] SKF. *Rolling bearings and seals in electric motors and generators*. 2013. URL: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802b0348/pdf_preview_medium/0901d196802b0348_pdf_preview_medium.pdf#cid-134586.
- [5] Stefan Quabeck, Vivien Grau och Rik W. De Doncker. "Modeling and Mitigation of Bearing Currents in Electrical Traction Drives". I: *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2020, s. 1101–1106. DOI: 10.23919/ICEMS50442.2020.9290879.
- [6] ABB. *Bearing currents in Modern AC Drive Systems*. 2011. URL: https://library.e.abb.com/public/8c253c2417ed0238c125788f003cca8e/ABB_Technical_guide_No5_RevC.pdf.
- [7] P.M Sunitha, Basavaraja Banakara och Sharana Reddy. "Modeling, simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in PWM multilevel inverter fed induction motor with long cable". I: *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. 2017, s. 1161–1167. DOI: 10.1109/RTEICT.2017.8256781.
- [8] Annette Mutze. *Bearing currents in inverter-fed AC-motors*. en. Berichte aus der Elektrotechnik. Aachen, Germany, mars 2004.
- [9] Yves Gemeinder m. fl. "Calculation and validation of a bearing impedance model for ball bearings and the influence on EDM-currents". I: *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2014, s. 1804–1810. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960428.
- [10] Sharana Reddy och B. Basavaraja. "Simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in two-level and three-level PWM inverter fed induction motor drive with long cable". I: *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*. 2015, s. 221–226. DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274947.
- [11] Sharana Reddy, Basavaraja Banakara och A Abdul Khadar. "Transient Analysis of Motor Terminal Voltage, Common Mode Voltage and Bearing Voltage in 2-level and Multilevel PWM Inverter Fed Induction Motor with Long Cable". I: *2023 International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*. 2023, s. 1–8. DOI: 10.1109/ICDCECE57866.2023.10151023.
- [12] A. Muetze och A. Binder. "Experimental evaluation of mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive-systems - investigations on induction motors up to 500 kW". I: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03*. Vol. 3. 2003, 1859–1865 vol.3. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210706.
- [13] Thibaud Plazenet m. fl. "An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines". I: *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2016, s. 1–8. DOI: 10.1109/IAS.2016.7731884.

- [14] H.E. Boyanton och G. Hodges. "Bearing fluting [motors]". I: *IEEE Industry Applications Magazine* 8.5 (2002), s. 53–57. DOI: 10.1109/MIA.2002.1028391.
- [15] Jiaojiao Ma m. fl. "Motor Bearing Damage Induced by Bearing Current: A Review". I: *Machines* 10.12 (2022). ISSN: 2075-1702. DOI: 10.3390/machines10121167. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/12/1167>.
- [16] D. Raúl Quintero, W. Mejia och J. A. Rosero. "Good practice for Electric Discharge Machining (EDM) bearing currents measurement in the induction motor and drives system". I: 2013, s. 1384–1390. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556317.
- [17] Benjamin Knebusch m. fl. "Measurement Principle for Measuring High Frequency Bearing Currents in Electric Machines and Drive Systems". I: *2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*. 2022, s. 1–9.
- [18] D. Busse m. fl. "Bearing currents and their relationship to PWM drives". I: *Proceedings of IECON '95 - 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Vol. 1. 1995, 698–705 vol.1. DOI: 10.1109/IECON.1995.483493.
- [19] Fluke. *Measuring motor shaft voltage discharges with fluke MDA-550 Motor Drive Analyzer*. 2022. URL: <https://www.fluke.com/en/learn/blog/motors-drives-pumps-compressors/motor-shaft-voltage-measurement>.
- [20] Annette Muetze och Andreas Binder. "Techniques for Measurement of Parameters Related to Inverter-Induced Bearing Currents". I: *IEEE Transactions on Industry Applications* 43.5 (2007), s. 1274–1283. DOI: 10.1109/TIA.2007.904413.
- [21] Fluke. *Inside flexible coil clamp meters*. 2021. URL: <https://www.fluke.com/en/learn/blog/clamps/inside-flexible-coil-clamp-meters>.
- [22] Reidar Gustavsson. *Praktisk Elkvalitet*. Andra utgåvan. Norbo kraftteknik AB, 2003, s. 317.
- [23] Karolina Kudelina m. fl. "Diagnostic Possibilities of Induction Motor Bearing Currents". I: *2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021, s. 1–5. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462298.
- [24] Fluke. *Fluke 1770 Series Three-Phase Power Quality Analyzers*. URL: <https://www.fluke.com/en/product/electrical-testing/power-quality/1773-1775-1777>.
- [25] Math Bollen m. fl. "Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz)". I: *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 3.1 (2014), s. 114–119. DOI: 10.1109/MEMC.2014.6798813.
- [26] H. Tischmacher och S. Gattermann. "Investigations on bearing currents in converter-fed electrical motors". I: *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*. 2012, s. 1764–1770. DOI: 10.1109/ICE1Mach.2012.6350120.
- [27] Seongmi Park m. fl. "Efficiency and Leakage Current Evaluation of GaN Inverter Fed PMSM Drive with Sine Wave Filter". I: *2023 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*. 2023, s. 48–51. DOI: 10.1109/IFEEC58486.2023.10458519.
- [28] Heonyoung Kim m. fl. "Analytical Study of SiC MOSFET Based Inverter Output dv/dt Mitigation and Loss Comparison With a Passive dv/dt Filter for High Frequency Motor Drive Applications". I: *IEEE Access* 9 (2021), s. 15228–15238. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053198.

- [29] Content Avenue AB Follow this publisher. *Electronic environment 2017-02*. 2017. URL: https://issuu.com/rivista_ab/docs/ee2_2017.
- [30] John Houdek, Nitin Kulkarni och Randy Herche. "Comprehensive Protection Of Windings And Bearings For Asd Fed Motors". I: *2022 IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. 2022, s. 271–282.
- [31] Peng Han m. fl. "Combined Numerical and Experimental Determination of Ball Bearing Capacitances for Bearing Current Prediction". I: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020, s. 5590–5594.