

Konvertering av arbetsmaskin från dieseldrivet system till elbatteridrivet system

Dissekering av en ny elektrisk arbetsmaskin

Lennart Selén

Examensarbete för ingenjör-(YH) examen

El- och automationsteknik

Vasa 2023

EXAMENSARBETE

Författare: Lennart Selén

Utbildning och ort: El- och automationsteknik Vasa

Inriktning: Elkraft

Handledare: Henrik Järveläinen

Titel: Konvertering av arbetsmaskin från dieseldrivet system till elbatteridrivet system.

Datum: 18.5.2023 Sidantal: 25

Abstrakt

Detta examensarbete är utfört för företaget Geoelectric OY som vanligtvis producerar arbetsmaskiner som går med dieseldriv, men på grund av marknadens efterfrågan har det börjat byggas en eldriven version.

Examensarbetet innehåller en genomgång av teorin bakom högspänningskomponenterna i företagets nya eldrivna arbetsmaskin. Syftet är att koncentrera informationen till en mer bearbetbar form som kan användas vid byggande och försäljning av maskinen.

I teorin behandlas de centrala komponenterna i ett elbatteridrivsystem som elmotorn, strömriktaren och batterierna. De viktigaste faktorerna som skiljer åt dieseldrivsystem och elbatteridrivsystem tas upp och förklaras. Arbetsmaskinen byggs parallellt med examensarbetet.

Efteråt dimensioneras och jämförs de teoretiska värdena med de fysiska komponenterna som installerats på arbetsmaskinen. Resultatet är elscheman och tekniska dokument samt en eldriven arbetsmaskin som matas via batterier.

Språk: svenska

Nyckelord: elmotor, elbatteridrivsystem, batterier, strömriktare

BACHELOR'S THESIS

Author: Lennart Selén

Degree Programme: Electrical engineering

Specialisation: Power electricity

Supervisor(s): Henrik Järveläinen

Title: Conversion from a diesel drivetrain to an electric drivetrain in a work machine.

Date 18.05 Number of pages 25

Abstract

This thesis report was done on behalf of Geoelectric OY, a company from southern Finland that produces work machines normally powered by a diesel drivetrain. But because of market demands a new electrically powered machine is being built.

The thesis consists of a theoretical review of the electric drivetrains power components. The purpose is to concentrate some of the information into a more compact and more usable form factor which can then be used in the machine's production and marketing.

The theoretical review includes the most important components like the AC motor, the converter, and the lithium-ion batteries. The biggest differences between a diesel drivetrain and an electrical drivetrain are explained. The new electrical work machine is also built parallel to the execution of the thesis.

Afterwards, the theoretical values are compared to the real machine and its installed components. The result is electrical schematics and technical documentation, together with an electric-powered work machine.

Language: Swedish

Key words: electric motor, electric drivetrain, lithium-ion batteries, power converter

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Lennart Selén

Koulutus ja paikkakunta: Sähkö ja automaatiotekniikka, Vaasa

Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoima

Ohjaaja(t): Henrik Järveläinen

Nimike: Työkoneen konvertointi dieselvetoisesta järjestelmästä sähkövetoiseen järjestelmään.

Päivämäärä 18.05 Sivumäärä 25

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on tehty yritykselle Geoelectric OY, joka yleensä valmistaa dieselvetoisia työkoneita. Markkinoilla olevan kysynnän ansiosta on ryhdytty kehittämään sähkövetoinen versio.

Opinnäytetyön teoriassa käydään läpi yrityksen uudessa sähkövetoisessa työkoneessa olevat korkeajännitekomponentit. Tarkoitus on keskittyä tietojen toimivampaan muotoon, josta voidaan hyötyä koneen rakentamisessa ja myynnissä.

Teoriassa sähkövetoisien järjestelmien keskeiset komponentit ovat sähkömoottori, tehomuuntaja ja akusto. Opinnäytetyössä käydään läpi tärkeimmät tekijät, jotka erottavat dieselvetoiset järjestelmät sähkövetoisesta. Työkone rakennetaan rinnakkain opinnäytetyön kanssa.

Jälkeenpäin mitoitetaan ja verrataan teoreettisia lukuja fyysisiin komponentteihin, jotka on asennettu työkoneeseen. Lopputulos on sähköpiirustuskaavio ja tekninen dokumentointi, sekä sähkövetoinen työkone, joka toimii akuilla.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: sähkömoottori, sähkövetoinen järjestelmä, akusto, tehomuuntaja

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Företaget.....	1
1.2	Strängare förordningar på diesel maskiner	1
1.3	Grundundersökningsmaskiner	2
2	Elbatteri drivsystem.....	3
2.1	Säkerhet och skydd	4
2.2	Vridmoment.....	5
3	Motor	5
3.1	Roterande magnetfält.....	6
3.2	Asynkronmaskiner	8
3.3	Synkronmaskiner	10
4	Strömriktare.....	11
4.1	Växelriktning.....	12
5	Batterier	15
5.1	Kemiska egenskaper	16
5.2	Tekniska egenskaper.....	16
5.2.1	Ekvivalent schema	17
5.3	Säkerhet.....	18
5.4	Laddning	18
6	Grundundersökningsmaskinen MTG-E	19
6.1	Permanent magnetiserad reluktanssynkronmotor	19
6.2	Strömriktaren	21
6.3	Batteripaketet.....	22
6.4	Laddning	23
6.5	Säkerhet.....	24
7	Diskussion	24
8	Källförteckning.....	26

1 Inledning

Detta är ett examensarbete inom el-och automationsteknik vid Yrkeshögskolan Novia i Vasa och omfattar 15 studiepoäng. Uppdragsgivare för examensarbetet är Geoelectric och består av en dissekering av företagets nya elbatteriarbetsmaskin. Resultatet är koncentrerad relevant information om maskinens högspänningssystem, komponenter och funktioner samt uppritade scheman om komponenternas sammanhållning och kommunikation. Informationen och scheman kan sedan användas till prospekt som företaget ger med till kunden när maskinen är klar.

1.1 Företaget

Arbetet utförs för Geoelectric Oy, ett inhemskt företag som bygger grundundersökningsmaskiner. Företaget grundades 2008 och är specialiserade på tillverkning, underhåll och uppgraderingar av grundundersökningsmaskiner. Geoelectric har för tillfället 11 anställda och producerar mellan 10–15 maskiner per år. Företaget har sin verksamhet i Sibbo, södra Finland, och exporterar maskiner till hela Norden. Tidigare har jag utfört min praktik på företaget och nu var det var ett ypperligt tillfälle att hjälpa till med den nya eldrivna modellen.

Grundundersökningsbranschen är kraftigt växande. Allt strängare grundundersökningsförordningar vid nybyggen ökar behovet av borrhål. Nu på senare tid har det också blivit alltmer lukrativt att undersöka jordmånen före byggen för att kunna kalkylera byggnadsgrundens hållfasthetsberäkning. En föråldrad maskinpool och maskinernas snabba utveckling bidrar också till att efterfrågan på arbetsmaskiner i Norden är stor.

1.2 Strängare förordningar på dieselmaskiner

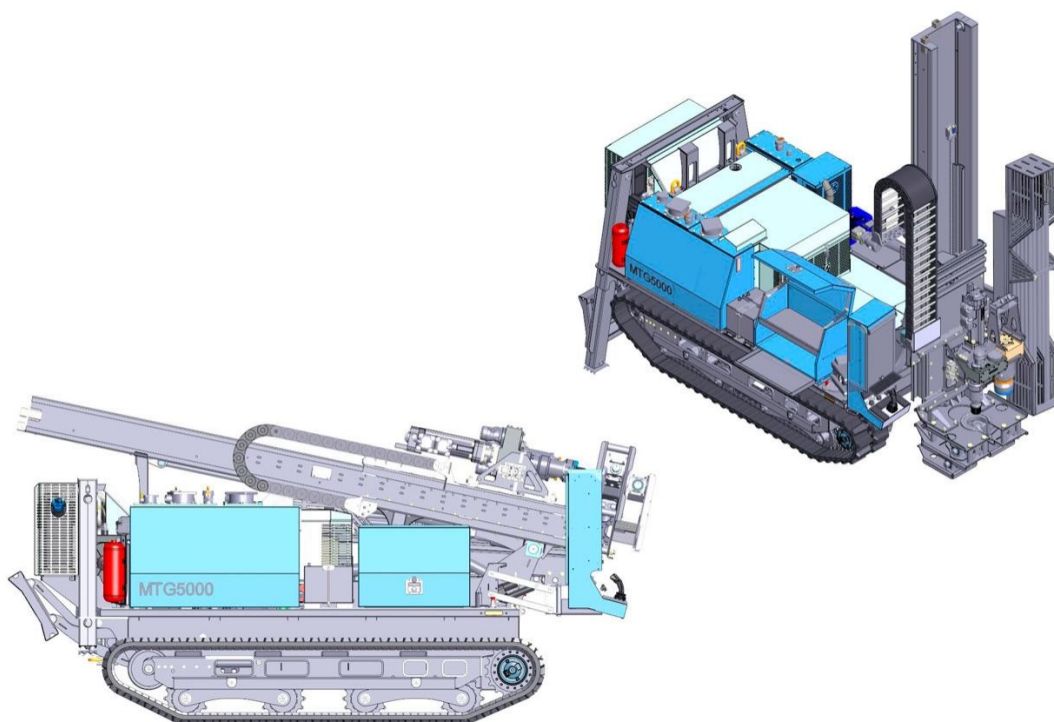
Då världen går mot en grönare framtid stramas utsläppsreglerna åt. År 2016 godkände Europaparlamentet nya strängare utsläppskrav på alla dieselmotorer som används av mobila maskiner som inte är avsedda att transporteras på väg. Lagen kom i kraft år 2017 och har med åren kompletterats efter hand som marknaden anpassat sig (European

comission, 2017). Exempel på maskiner som tillhör kategorin mobila maskiner som inte rör sig på väg är: truckar, grävmaskiner och grundundersökningsmaskiner.

För att uppfylla dessa krav och förbereda sig inför framtiden finns det en stor efterfrågan på arbetsmaskiner som fungerar med något annat drivsystem än diesel. De två realistiska alternativen som är ekonomiskt och praktiskt möjliga att tillämpa i dagsläget är ett elbatteridrivsystem eller ett bränslecellsdrivsystem (Cunanan, Tran, Lee, Kwok, & Fowler, 2021). Geoelectric bygger nu den första elbatteridrivna grundundersökningsmaskinen som svar på marknadens efterfrågan.

1.3 Grundundersökningsmaskiner

Grundundersökningsmaskiner är stora arbetsmaskiner med en bormast längst fram. Användningsområdena är många men de vanligaste är borring av borrhål för endera vatten, jordvärme eller tagning av jordprover. Maskinerna drivs med ett hydraul tryck som traditionellt har skapats med en dieselmotor. Den nya modellen byter ut dieselmotorn mot en elmotor och batterier.



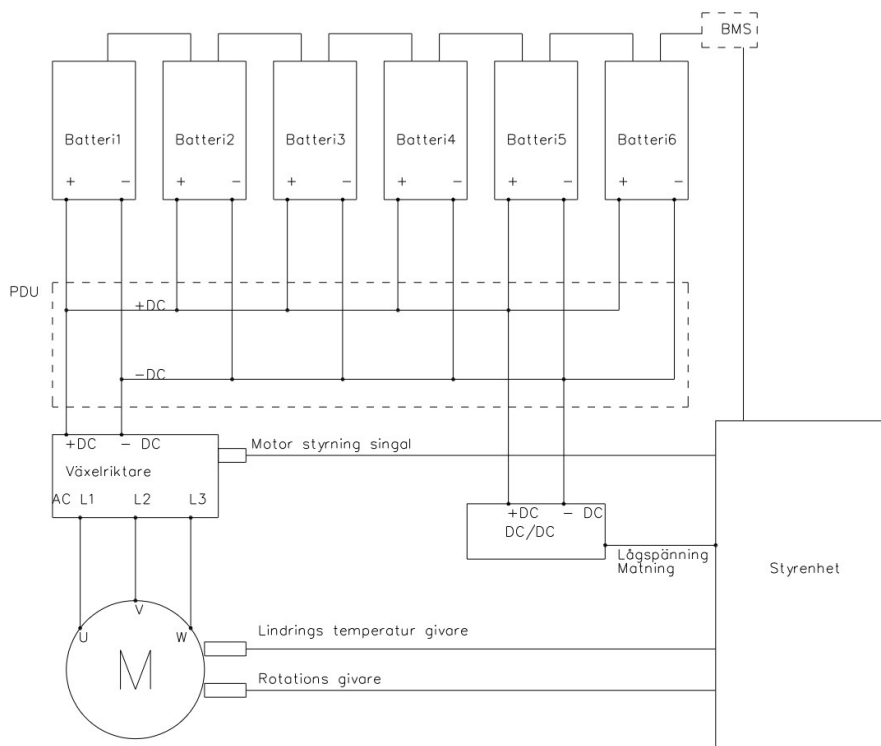
Figur 1. Bild på en grundundersökningsmaskin. (Geoelectric, 2023).

Arbetsmaskinernas kaross byggs på ställe för maskinen. I karossen ligger dieselmotorn, hydraulikpumpen och ventilerna. Komponenter som behövs vid normal funktion är placerade ovanpå karossen. Längst fram finns bormasten som består av en mast och ett borbord. Borrbordet roterar och matar ner borrhaget i marken. Stagen är 2,5 meter långa och skarvas med gängor. Under karossen finns det två larvband som maskinen förflyttar sig med.

Vid normal funktion måste ett antal hydrauliska ställdon gå. Det finns olika tekniker till borrhning men gemensamt för alla är att borrhaget måste rotera. En hammare slår även på staget ovan från vilket transporterar slagkraften ner till borrhspetsen. För att hålet inte ska stockas måste det också konstant pumpas luft eller vatten in i hålet via ett axialt rör i staget (Shah, 2018). Största belastningen kommer därmed när maskinen borrar. Maskinen kan också köra och förflytta sig på egen kraft, dock kan man inte borra och köra samtidigt så effektbehovet adderas inte.

2 Elbatteridrivsystem

Elbatteridrivsystemet består i sin simplaste form av en elmotor, ett batteripaket och en strömriktare. Det lilla antalet komponenter är en fördel jämt mot ett traditionellt dieseldrivsystem. Färre komponenter innebär förmånligare inköpspris och underhållet kan bli uppemot 30% billigare (Carlo, o.a., 2021).



Figur 2. Schema på systemets komponenter och styrning. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

Motorn är huvudkomponenten i systemet och förvandlar den elektriska energin som är förvarad i batterierna till mekanisk energi som används av arbetsmaskinen. Matningen går via en strömriktare som förvandlar likspänningen till växelspänning och reglerar frekvensen. Högspänningskomponenterna styrs med en styrenhet och ett parallellt lågspänningsstyrsystem. Styrenheten avläser värden från givare och styr komponenterna i enlighet. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

2.1 Säkerhet och skydd

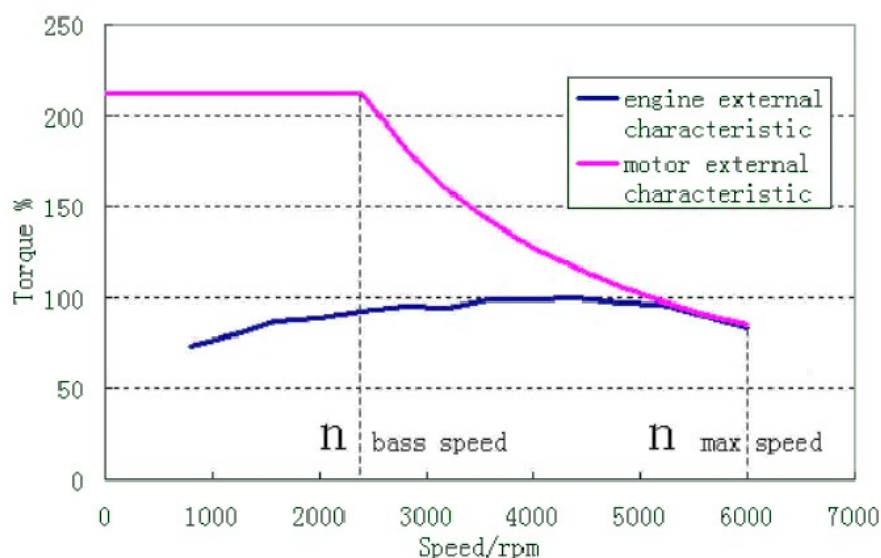
Alla systemets komponenter måste skyddas mot överströmmar och fel som kan skada komponenten eller gör systemet farligt att användas för människor. Matningen måste gå via ett kortslutningskydd och ett jordfelskydd.

Strömriktaren fungerar som motorkontroll och kan stänga av matningen till motorn vid för höga lindrings temperaturer. Batterierna övervakas av ett batterihanteringssystem (BMS) som övervakar varje enskilda cells hälsa och vid normaltillstånd tillåter laddning och urladdning.

2.2 Vridmoment

Vid dimensioneringen och planeringen av ett elbatteridrivsystemet måste man veta lastens art, storlek och hur den kommer att ändras i förhållande till varvtalet.

Vridmoment är måttet på motorns förmåga att rotera en last kring en axel. Det finns en stor skillnad i vridmomentet vid olika varvtal mellan en dieselmotor och elmotor. Fastän båda kan ha samma max vridmoment har ändå elmotorn ett betydligt högre vridmoment vid låga varvtal. Detta är en fördel för arbetsmaskiner som utför ett arbete och kräver ett högt vridmoment vid lågt varvtal. Elmotorn kan också överbelastas momentärt vilket kan utnyttjas. (Liljeström, 2014)



Figur 3. Jämförelse i vridmoment mellan en elmotor och dieselmotor vid olika varvtal. (Liljeström, 2014).

3 Motor

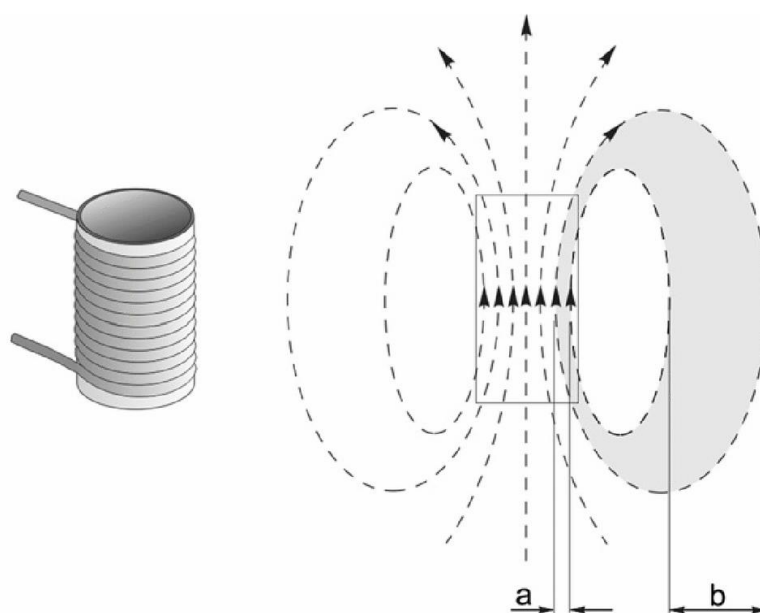
Den elektriska motorns uppgift är att förvandla den elektriska energi som är förvarad i batterierna till den mekaniska energi som driver hydraul pumpen i arbetsmaskinen. För användningsområdet kommer det att behövas en motor med högt vridmoment, och eftersom matningen sker via batterier är en hög verkningsgrad förhållande till motorns densitet också viktig. Bland motoralternativen finns det likströmsmotorer, enfasväxelströmsmotorer och trefasväxelströmsmotorer. Dock är de effektivaste,

hållbaraste och kostnadseffektivaste alternativen alla av trefasväxelsströms typ, alltså är de det skäligena alternativet (Hughes & Drury, 2013).

3.1 Roterande magnetfält

En växelsströmsmotor har två huvudkomponenter, en stator som är stationär och en rotor som roterar. I statorn uppstår det ett roterande magnetfält vilket är funktions principen bakom motorn.

Vid strömtillförsel börjar kopparledare alstra ett magnetiskt fält. I Figur 4 kan man se en strömtillförd kopparspiral vars ström flyter från nedersta lindringen till översta. Från varje lindring alstras det ett magnetfält vilka förstärker varandra och det totala magnetfältets amplitud blir en summa av de enskilda lindringarnas magnetfält. Magnetfältets riktning beror på strömmens riktning.



Figur 4. Magnetfältet alstrat i en kopparspiral. Till höger är spiralens konturer utritade. (Hughes & Drury, 2013).

Förutom antalet lindringar är också magnetfältets amplitud beroende på strömmen som går i lindringarna och reluktansen i kärnan. Sambandet mellan strömmen (I) och lindringsantalet (N) är magnetomotorisk kraft (mmk) och fås ur formel 1:

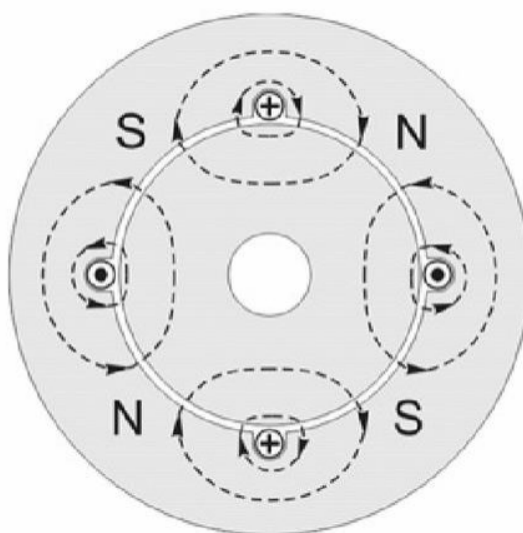
$$mmk = \frac{N}{I} \quad (1)$$

Reluktans (\mathcal{R}) är det magnetiska motståndet som magnetfältet kommer stöta på vid slutföring av kretsen. Luft är en dålig magnetisk ledare och därför använder man sig oftast av en metall kärna i lindringarna. Amplituden av magnetiska flödet (Φ) blir då:

$$\Phi = \frac{mmk}{\mathcal{R}} \quad (2)$$

Statorns ytterhölje är av gjutjärn och på insidan finner man ett laminerat plåtpaket med spår för lindringshärvor. Lindringshärvorna består av identiska lindringar noga placerade i formation. Beroende på lindringarnas placering kan man uppnå olika antal *poler*. Polerna bemärks med S och N och är punkterna var magnetfältet lämnar, respektive returnerar, till statorn. Det finns teoretiskt ingen gräns för antalet poler i en trefasmotor dock måste de alltid finnas samma antal N-poler som S-poler, så kallade *polpar*.

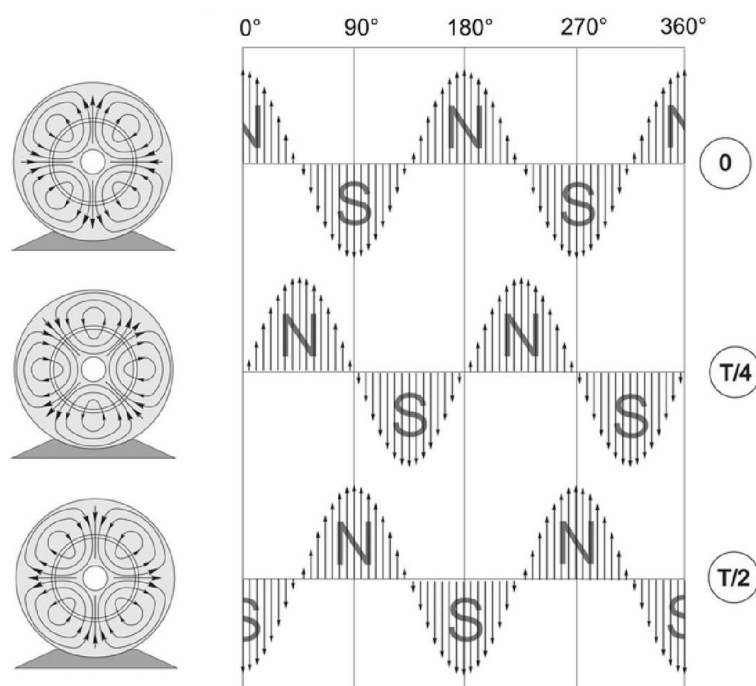
I Figur 5 nedan kan man se ett tvärsnitt av en elmotor. I figuren är lindringshärvorna utmärkta som enskilda punkter, men det kan erinras att de egentligen består av ett stort antal enskilda ledare. Lindringshärvorna är två till antal och strömmen flyter från + symbolen till \bullet symbolen, förskjutna med 90° . Denna placering ger upphov till fyra poler. Ett luftgap separerar statorn och rotorn.



Figur 5. Ledare placerade att skapa 4 poler. (Hughes & Drury, 2013).

Motorn matas sedan med en sinusformad trefasspänning var varje fas delar på en tredjedel av lindringarna och är förskjutna med 120° . Det alstras alltså tre magnetiska flöden som vid varje tidpunkt kommer att ha en konstant amplitud större än noll och rotera med en

konstant hastighet. I Figur 6 kan man se hur det alstrade magnetfältet förflyttar sig till förhållande av tiden. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).



Figur 6 Magnetfältet roterar till förhållande av tiden. (Hughes & Drury, 2013).

Ur formel 3 ser man att den konstanta hastigheten på magnetfältet N_s är beroende av frekvensen dividerat med antal pol par:

$$N_s = \frac{f}{\frac{P}{2}} \quad (3)$$

För att sedan förvandla det roterande magnetfältet till mekanisk energi behövs det också en rotor. Rotorns uppbyggnad varierar på motortyp men gemensamt med alla är att det finns en roterande motsatsmagnetpol som är ansluten till en axel. Rotorn måste också ha samma antal poler som statorn. Specifika rotor detaljer kommer att ges i avsnitten om de specifika motortyperna. (Hughes & Drury, 2013).

3.2 Asynkronmaskiner

Asynkronmaskinerna är den överlägset mest använda typen av elmotor inom industritillämpningar. Motorn är populär på grund av att den är enkel, borstlös, förmånlig och hållbar (Patel, 2012). Rotorn i en asynkronmaskin består av kortslutna lindringar

placerade i en laminerad plåtcylinder, vilken har fått smeknamnet *ekorrhjulet* på grund av sin vaga likhet till ett ekorrhjul.



Figur 7. Tvärsnitt av en asynkronmotor var rotorn syns. (Waard, 2011).

Rotorn roterar med hjälp av elektromagnetisk induktion. När magnetfältet i statorn uppstår induceras det en spänning i rotorn, och eftersom rotorlindringarna är kortslutna börjar en ström att flyta i den slutna kretsen. Det leder till ett alstrat inducerat magnetiskt fält som följer efter det roterande magnetfältet. På grund av friktion kommer rotorn alltid släpa efter och rotera med ett asynkront varvtal. Eftersläpningen benämns med bokstaven *s*, härstammad från engelskans *slip*. Det synkrona varvtalet fastställs enligt formel 4:

$$n = \frac{f}{p} * (1 - s) \quad (4)$$

Var

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5)$$

Vid höga belastningar induceras en högre ström och delta vinkeln mellan stator och rotor ökar. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

En av asynkronmaskinens stora fördelar är att den kan köras direkt från nätet, utan separat matning till rotorn eller via en borste. Dock är detta inte någon fördel som kan appliceras till arbetsmaskiner eftersom de matas från batterier och inte från nätet. Därmed kan man välja bland motorer som kanske inte skulle vara fördelaktiga i industritillämpningar.

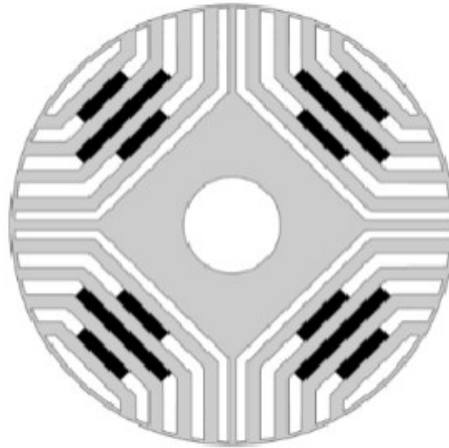
3.3 Synkronmaskiner

En annan typ av trefasmotor är synkronmotorn. Statorns uppbyggnad är oförändrad gentemot asynkronmotorn och trefasströmmarna producerar ett lika roterande magnetfält. Skillnaden ligger i rotorn som fungerar som en permanent magnet och roterar med ett synkront varvtal. Rotorn kan ha ett antal olika funktionsprinciper.

Variabel magnetisering innebär att rotorn har lindringar, som kallas för magnetiseringslindringar. Dessa matas över släpningar eller borstar från en extern likströmskälla. Vid matning alstras det ett magnetiskt flöde i magnetiseringslindringarna. Rotorn roterar sedan med en direkt magnetisk attraktion till statorns magnetfält, och är alltså synkron med statorn. Denna typ av synkronmaskin är inte optimal eftersom den externa likströmskällan innebär fler antal komponenter och därmed dyrare inköpskostnader och underhåll.

I den **permanent magnetiserade motorn** byts magnetiseringslindringarna ut mot någon typ av permanent magnet som ligger i rotorn. Permanenta magneter består nuförtiden av utvecklade legeringar av så kallade sällsynta jordartsmetaller. Den vanligaste är neodymmagneten som består av neodym, järn och bor. Denna typ av motor har en hög kraft- och vridmomentdensitet men de sällsynta magneterna gör att inköpspriset på motorn är högt.

Den **magnetisk reluktans motorn (MRM)** fungerar helt utan en motmagnetpol utan utnyttjar i stället magnetisk reluktans för att producera ett vridmoment. Magnetisk reluktans är det magnetiska motståndet som, likt det elektriska motståndet, söker sig via den väg med minst resistans. Detta utnyttjas av reluktans motorn vars rotor består av lager av extruderade skivor med gångar som släpper igenom magnetfältet. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).



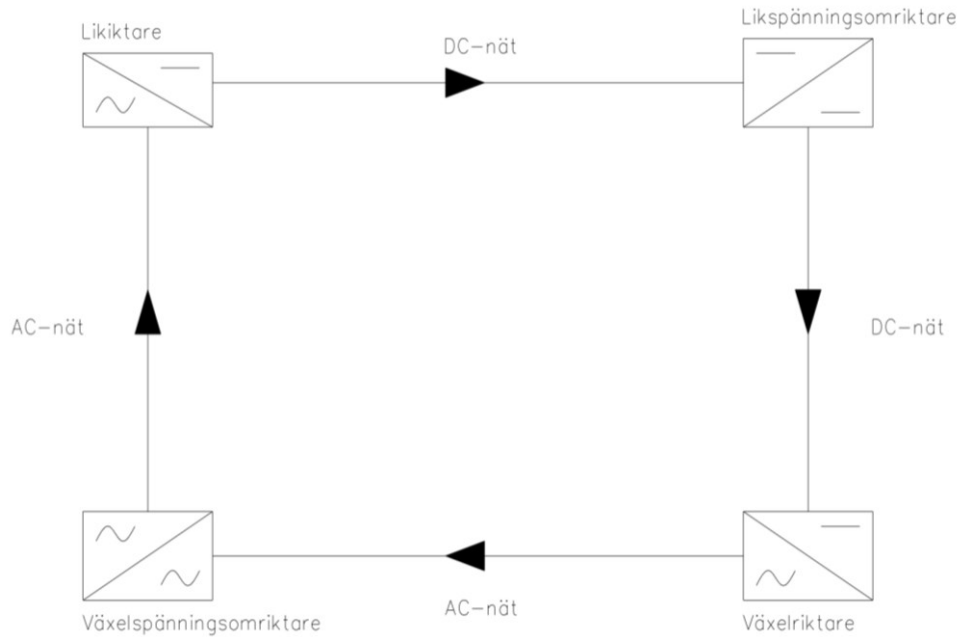
Figur 8. Tvärsnitt av en reluktansrotor. (Lamminen, 2018).

I Figur 8 syns ett tvärsnitt av en reluktansrotor. Luften i rotorns extruderade springor har en högre reluktans så magnetfältet koncentreras till metallbryggorna. Fördelen med reluktans motorn är att den extruderade kärnan inte är dyr att tillverka, som motsats till permanenta magneterna.

En kombination mellan den permanent magnetiserade motorn och reluktans motorn är också möjlig. Då läggs det till permanenta magneter i de extruderade springorna på rotorn vilket tillåter motorn en större effektfaktor för ett betydligt förmånligare pris. De tillagade extra magneterna syns med svart i Figur 8. (Lamminen, 2018).

4 Strömriktare

Strömriktarens huvudsakliga uppgift är att förvandla likströmmen från batterierna till en anpassbar växelström för motorn. Ordet strömriktare är ett sammanfattningsnamn för komponenter som kan förvandla spänning och frekvens. I Figur 9 klagörs alla enskilda komponenternas benämning. I det elbatteridrivna systemet kommer en växelriktare att användas.



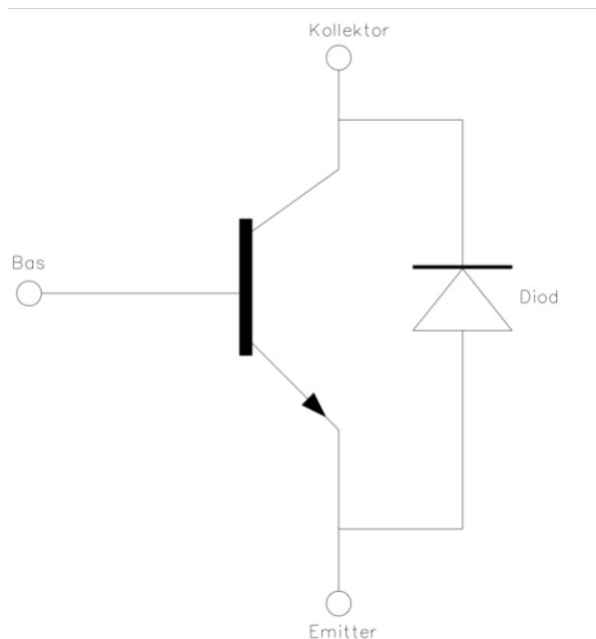
Figur 9. Strömriktare och benämningar. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

Strömriktaren fungerar också som motorkontroll. Det är viktigt att kunna styra motorn och högspänningskomponenterna. Styrningen är vital för normal motorfunktion men också en central del i säkerheten av högspänningssystemet. För motorstyrning måste strömriktaren kunna starta eller stänga motorn och reglera spänning och frekvens beroende på last.

4.1 Växelriktning

Växelriktning innebär förvandling mellan växelström och likström. Vid motormatning måste växelriktaren vara extensiv och kunna producera en sinusformad spänning med reglerbar frekvens. För att förstå växelriktarens funktion måste man känna till hur halvledarkomponenterna transistor och dioden fungerar.

Transistorer fungerar som en varierbar ventil som styr en utgående spänning beroende på ingående spänning. Dock används transistor i krafttekniken nästan enbart som brytare, alltså endera i strypläge eller bottnat läge. Transistorns uppbyggnad syns i Figur 10. När basen blir strömtillförd öppnar transistor matningen från kollektorn till emittern.

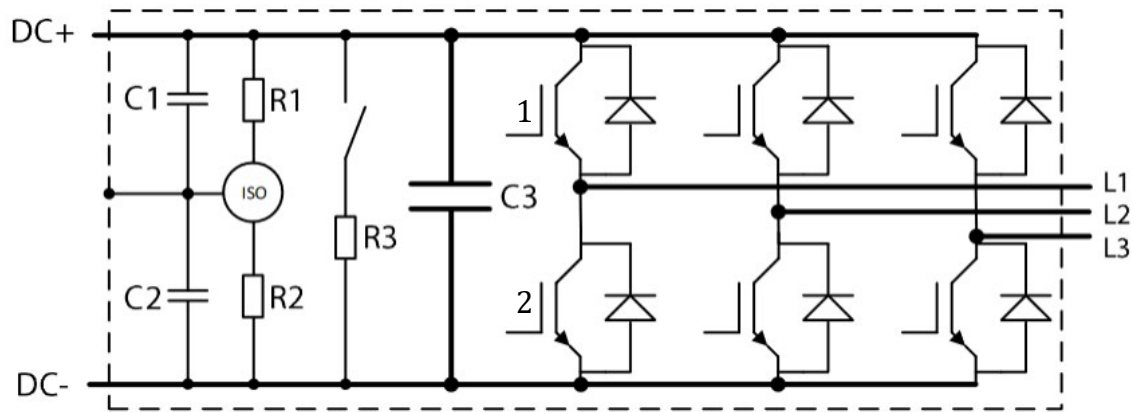


Figur 10. Transistorns uppbyggnad. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

Transistorn är känslig för backspänning och en antiparallell kopplad diod är ett vanligt skydd. Transistorns förmåga att snabbt kunna öppna och stänga matningen gör den möjlig att användas i strömriktare var brytningshastigheten uppgår till 25 000 Hz.

Dioden består av två hopfogade kiselkristaller var ena har polariteten n och andra har polariteten p . Dioden fungerar som en backventil och släpper bara igenom ström från en riktning. Tillsammans med transistorn är dioden en av huvudkomponenterna i växelriktaren.

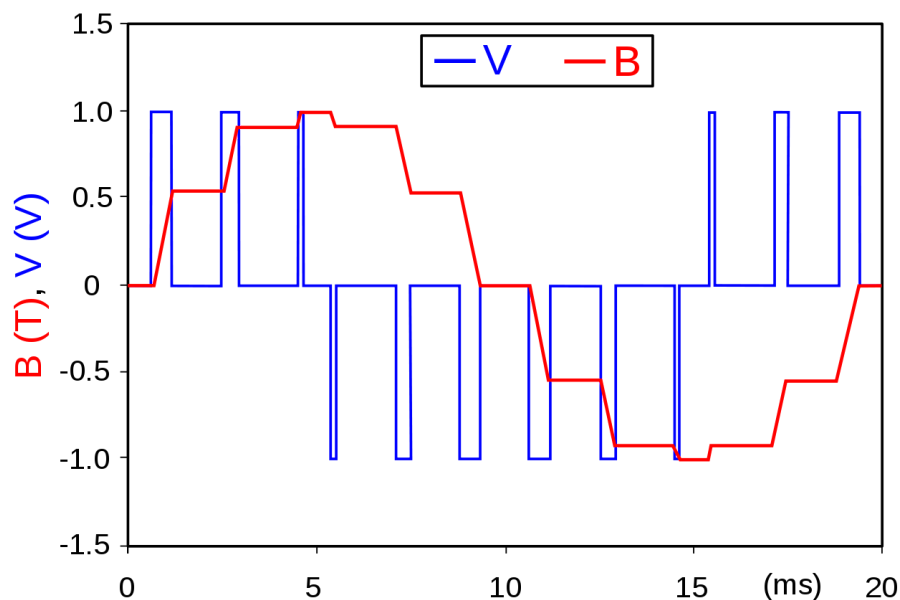
Principen bakom växelriktning är styrd snabbbrytning av likströms matningen, kallad för *switching*. I Figur 11 kan man se ett funktionsschema på växelriktaren. Transistorerna fungerar som ventiler och dioderna som backventiler. När ventil 1 öppnas går matningen i riktning till L1. När ventil 2 öppnas stängs ventil 1 och spänningen går åt motsatta riktning. Lindring L2 är förskjuten med 120° och L3 förskjuten med 240° . Brytningen sker via mjukvara som räknar ut vilka ventiler som måste öppnas och stängas för att producera en sinusformad växelspänning. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).



Figur 11. Schema på växelriktaren. (Danfoss, 2021).

För att reglera frekvensen förändras ventilernas brytningshastighet. Desto snabbare brytning desto snabbare matningsfrekvens. En brytning på 4 000 Hz är nödvändigt för normalfunktion, men de flesta växelriktare har en nominellbrytningsfrekvens på 8 000 Hz (Danfoss, 2021).

Vid motorstyrning måste man också kunna reglera spänningens amplitud. För att reglera amplituden är den vanligaste metoden att dela upp tiden som ventilerna avger en utspänning i oregelbundna perioder. Denna metod kallas för pulsbreddmodulering.



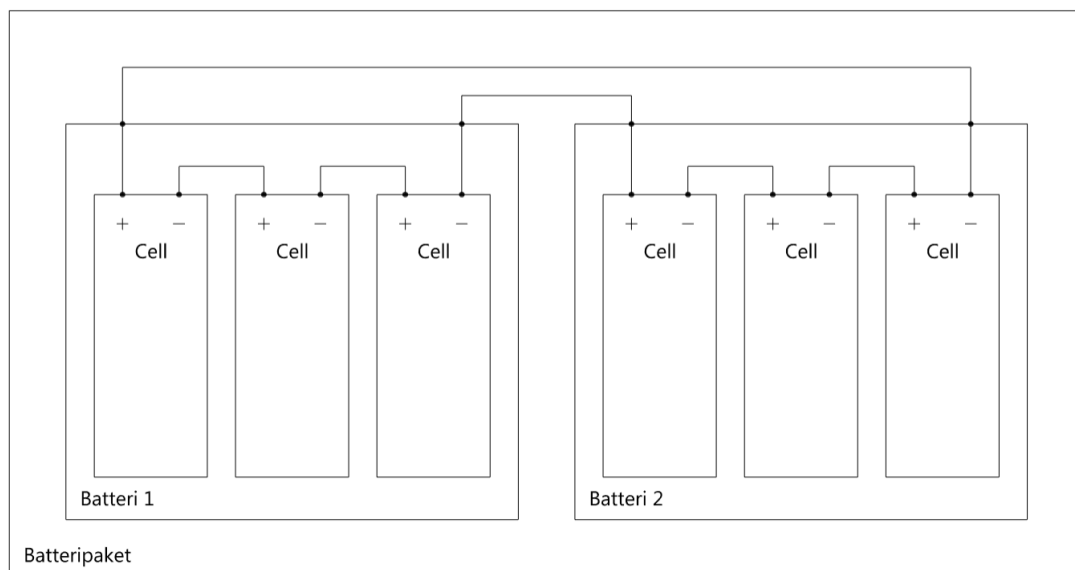
Figur 12. Exempel på pulsbreddmodulering. (Zureks, 2007).

I Figur 12 syns ett utförande av pulsbreddmodulering. Den blåa kurvan är matningen ut från strömriktaren, och den röda är statorns magnetfält. På grund av off-perioderna i

matningen sjunker magnetfältets amplitud. Dock kommer vågformen att vara kantig. Ett sätt att motverka kantigheten är att ha kortare impulsperioder vid noll och längre vid sinusvågstopp. Kantigheten lättar men försvinner inte totalt, dock är växelströmsmotorerna robusta och kan köras med en sinusvåg som inte är perfekt. (Alfredsson & Jacobsson, 2016).

5 Batterier

Elbatteridrivsystemet använder sig av elektrisk energi lagrad i batterierna för att driva motorerna för funktion. Det finns många alternativ när det gäller valet av batteri typ, men litiumjonbatterierna har snabbt utvecklats de senaste decennierna och är nu det enda skäligena alternativet på marknaden. Litiumjonbatteriets fördelar är dess höga energi- och effekt densitet, de är förmånliga och har lång livslängd (Patel, 2012).

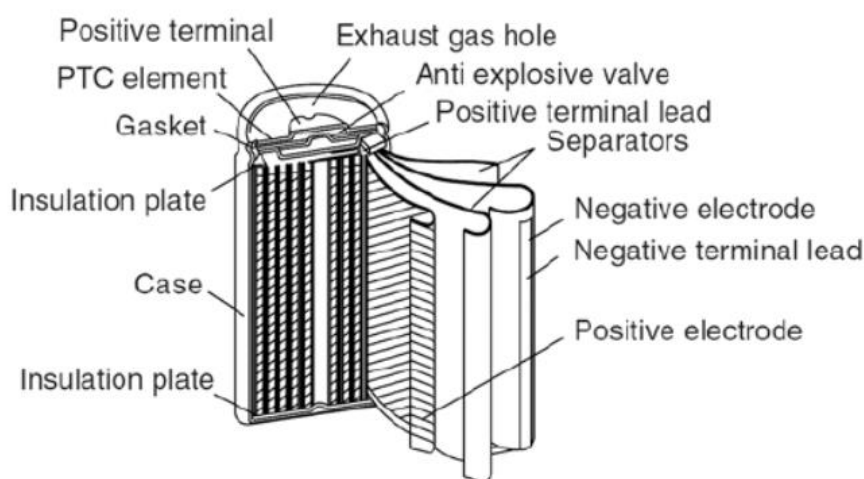


Figur 13. Cellens, batteriets och batteripaketets förhållande. (Kiehne, 2000).

Ett litiumjonbatteri består av ett antal enskilda celler. Genom att serie- samt parallell koppla cellerna uppnår man den önskade spänningen på batteriet. Batteriets emballage är designat att emotstå mekaniska och termologiska påfrestningar och skydda cellerna. Flertal parallellt anslutna batterier utgör ett batteripaket (Cunanan, Tran, Lee, Kwok, & Fowler, 2021).

5.1 Kemiska egenskaper

En litiumjoncell består av flera komponenter som arbetar tillsammans för att lagra och frigöra energi genom kemiska reaktioner. Cellens huvudkomponenter är två elektrodplattor med isolerande separatorer och elektrolyten. Elektrodena är anoden, som är negativ vid urladdning och är gjord av grafit, och katoden som är positiv vid urladdning och innehåller lithierad metalloxid bestående av kobolt, nickel och mangan (Pesaran, 2016). Elektrolyten är en gelé som innehåller litiumjoner. Vid användning frigörs elektroner från den negativa anoden och rör sig genom den externa kretsen för att leverera ström till apparaten som batteriet driver. Samtidigt rör sig litiumjoner från den positiva katoden genom elektrolyten till anoden. Litiumjonerna binder till grafitelektroden och bildar kristaller, vilket leder till att batteriets spänning minskar.



Figur 14. Tvärsnitt av en litiumjoncell. (Barsukov & Qian, 2013).

Batteriets kemiska egenskaper uppger den nominella spänningen i batteriet. I litiumjonbatteriet har cellerna en relativt hög nominell spänning på 3,7 V. En hög nominell spänning är att föredra för då behövs färre celler för att uppnå den avsedda batterispänningen vilket sparar på tillverkningskostnaderna och betyder färre delar som kan vara defekta (Patel, 2012).

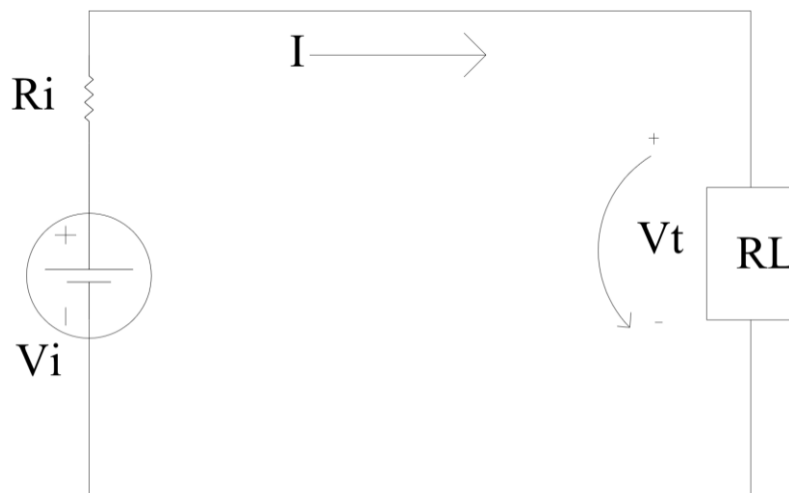
5.2 Tekniska egenskaper

När batteriet urladdas sjunker spänningen kontinuerligt. Batteriets laddningskapacitet mäts i ampere timmar (Ah) och antyder storleken på laddningen som batteriet kan leverera

innan spänningen sjunker under 80% av den nominella spänningen. Enheten C används för att beteckna cellens förmåga att laddas/urladdas. En cell med kapacitet C Ah kan urladdas med C ampere i en timme.

5.2.1 Ekvivalent schema

Ur batteriets ekvivalenta schema nedan kan man se att en cell har en intern spänning V_i och resistans R_i (Patel, 2012).



Figur 15. Batteriets ekvivalenta schema. (Patel, 2012).

R_i och V_i är beroende på urladdningsnivån i batteriet enligt funktion 6 och 7 nedan. V_0 och R_0 är värden vid full laddning och K_x står för en konstant som uppmäts i batteriet vid tillverkning. Spänningen i batteriet sjunker linjärt med urladdningsnivån medan resistansen ökar.

$$V_i = V_0 - K_1 * DoD \quad (6) \quad \text{och} \quad R_i = R_0 + K_2 * DoD \quad (7)$$

var

$$\text{Urladdningsnivå} = \frac{\text{Ah urladdat ur batteriet}}{\text{batteriets klasifiserade Ah nivå}} \quad (8)$$

Effekten som matas till lasten är:

$$P_L = I^2 * R_L \quad (9)$$

Och förlusterna är:

$$P_i = I^2 * R_i \quad (10)$$

Förlusterna i batteriet är i form av värme. När laddningen sjunker och den interna resistansen ökar stiger temperaturen i batteriet. Detta försämrar batteriets livslängd och medför en säkerhetsrisk. Litium är ett väldigt aktivt material och reagerar tillsammans med kol och vatten för att producera vätgas, som kan antändas enbart av reaktionens värme och leder till en brand eller explosion (Barsukov & Qian, 2013).

5.3 Säkerhet

De stora batteripaketerna medför en säkerhetsrisk och det är därför mycket viktigt att installera förebyggande komponenter. Felen som kan uppkomma i batteriet kan endera vara externa eller interna. Externa fel innebär fel som uppstår utanför batteriet och påverkar batteriets energi, till exempel för hög laddningsspänning från en defekt laddare eller kortslutning mellan batteriets terminaler. Positivt med externa fel är att de är lätta att skydda emot med överströms säkringar och jordfelsbrytare. Batteriets emballage byggs stadigt för att skydda batterierna från yttre smällar och påfrestningar.

Interna fel uppstår inuti batteriet och är svårare att skydda emot. Det farligaste felet som kan uppstå i ett batteri är en kortslutning vid cellens terminaler. Att bygga batteriet stadiga med välisolerade celler förebygger interna kortslutningar vid användning av batteriet och förlänger batteriets livslängd. Enligt IEC standard 62133 får batterierna avge rök och gaser men inte börja brinna eller explodera. Därmed byggs det in i cellen tryckavlastningsventiler som förhindrar cellen att antändas. Avlastningsventilerna är utmärkta i fFigur 14.

Ett batterihanteringssystem, förkortat BMS och härlett från engelskans *battery management system*, har som uppgift att kontrollera batteriets hälsa och skydda det från ett antal interna fel som kan uppstå. Om en cell får något fel måste spänningen till cellen brytas, speciellt vid laddning. Detta är obligatoriskt i alla batteripaket. (Barsukov & Qian, 2013).

5.4 Laddning

Det enda sättet att tillföra energi till ett elbatteridrivet system är via en laddare. För att kunna ladda batteriet med största möjliga effekt utan att skada batteriet eller förorsaka fel

sker laddningen via ett samarbete mellan batteriets BMS och kraftelektronik i laddaren. Tre faktorer är begränsande vid laddning och övervakas av BMSen: ström, spänning och temperatur.

Batteriet laddas med en konstant spänning, så storleken på energin som går till batteriet är beroende på strömmen. En högre ström innebär snabbare laddning, men vid för hög laddningsström förvandlas överloppsenergin till värme som förstör batteriet och kan leda till farosituationer. Laddningsspänningen i cellerna är max 4,3 V och vid urladdning är minimum spänning i cellen 2,8 V.

Temperaturen i batteriet måste också konstant monitoreras. Som redan nämnt, vid för höga temperaturer måste matningen till batteriet kapas. Men också vid för låga temperaturer sjunker batteriets aktivitet och den interna resistansen sjunker. En värmare måste vara installerad som värmer upp batterierna före användning. (Barsukov & Qian, 2013).

6 Grundundersökningsmaskinen MTG-E

Komponenterna i elbatteri arbetsmaskinen är utvalda och dimensionerade enligt teorin som presenterats ovan. I detta kapitel kommer jag gå igenom de valda komponenterna och jämföra deras funktion och egenskaper med dieseldrivsystemets motsvarighet.

6.1 Permanent magnetiserad reluktanssynkronmotor

Motorn är av permanent magnetiserad reluktans-synkron motortyp. Matningen sker via en strömriktare som anpassar frekvens och amplitud beroende på lasten och varvtal. Nominella spänningen är 500 V, nominella strömmen är 169 A och nominella frekvensen är 230 Hz. Motorn har sex polpar. Det höga antalet polpar betyder ett högre vridmoment för motorn, dock på bekostnad av maximal hastighet.



Figur 16. Motorn installerad i arbetsmaskinen.

I den elbatteridrivna grundundersökningsmaskinen måste motorn ha en relativt låg massa och volym i förhållande till effekten. Vikten och volymen har jag mätt och är 172 kg respektive 58,5 liter.

Effekten i motorn kan räknas ut via formel 11:

$$P = U_h * \sqrt{3} * I_n * \cos\phi \quad (11)$$

Var vinkeln ϕ är förhållandet mellan reaktiv effekt jämt mot skenbar effekt och kan ses från motorns märkskylt.

$$P = 500V * \sqrt{3} * 169A * 0.93 = 136\,113W$$

Vi kan sedan beräkna effekten till förhållandet av vikt enligt:

$$\frac{P}{m} = \frac{136\,113W}{172Kg} = 791 \frac{W}{Kg}$$

Jämfört med dieselmotorn som har en volym på 132 liter och väger 650 Kg:

$$\frac{P}{m} = \frac{110\,000W}{650Kg} = 169 \frac{W}{Kg}$$

Alltså har motorn en betydligt högre effekt till förhållande av vikten. Volymen är också märkbart mindre för elmotorn, nästan en fjärdedel jämt mot dieselmotorn.

Vid funktion kommer motorn gå från stilla till nominellt varvtal så måste motorn ha ett högt vridmoment. Vridmoment är måttet på en krafts förmåga att rotera ett objekt kring en axel. Vridmomentet kan räknas ut via formel 12:

$$M = \frac{P}{\omega_s} = \frac{136\,000\text{W}}{241\text{Hz}} = 540\text{Nm} \quad (12)$$

var:

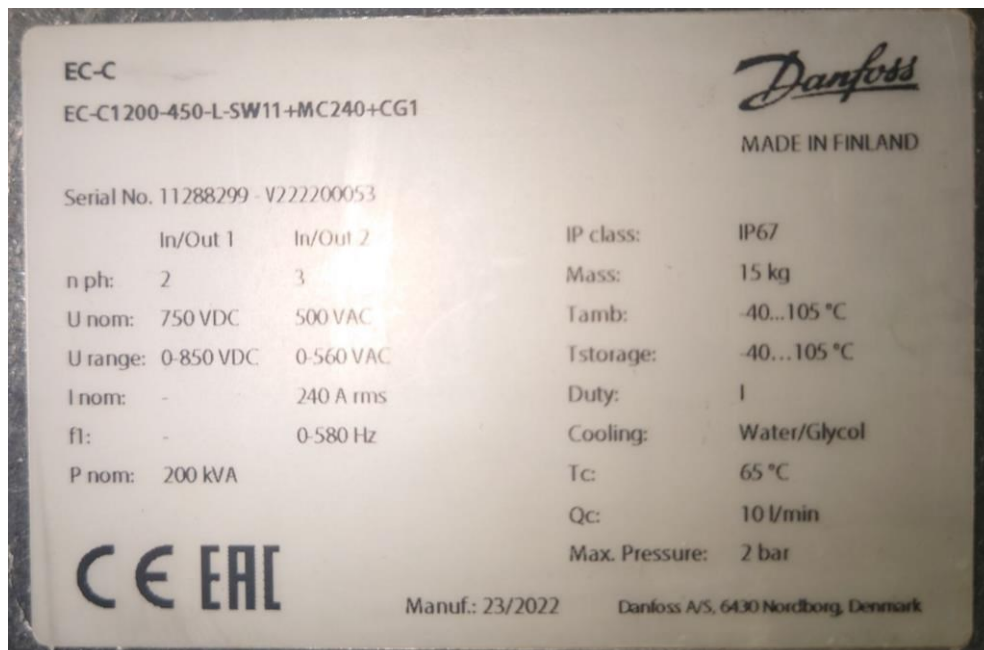
$$\omega_s = 2 * \pi * n_s = 2 * \pi * \frac{f}{p} = 2 * \pi * \frac{230\text{Hz}}{\frac{12}{2}} = 241\text{Hz} \quad (13)$$

Max vridmomentet för dieselmotorn är 560 Nm, alltså är de av samma storlek.

Motorn har tre revoltorer som beräknar hastighet och skickar information vidare till motorkontrollen. Som skydd finns det en temperaturgivare vid varje lindring som övervakar mot överhettning. Motorn i ett elbatterisystem är dock inte ett stort hinder för normal funktion, utan batterierna och energikapaciteten utger ett större hinder.

6.2 Strömriktaren

Strömriktaren i MTG-E maskinen är en Danfoss högspänningsväxelriktare och motorkontroll.



Figur 17. Strömriktarens märkskylt.

Strömriktaren kan avge en matning på 300 000 W. Den är större dimensionerad än motorn på grund av att motorn skall kunna överbelastas under korta perioder och det kommer att utnyttjas i arbetsmaskinen. Switching-frekvensen är 8 000 Hz var motorn kräver ett minimum på 4 000 Hz.

6.3 Batteripaketet

Två viktiga faktorer att ta i beaktande för arbetsmaskinens batteripaket är energi- och effektdensiteten. Batteriernas energidensitet innebär storleken på den lagrade energin till förhållande av batteriets massa och volym. I arbetsmaskinen är utrymmet begränsat och därför är en hög energidensitet viktigt. Energidensiteten i litiumjonbatterier är i särklass på grund av litiumets låga atomvikt på 6,9, vilket kan jämföras med blyets 207 (Kiehne, 2000).

Effektdensiteten innebär hur mycket effekt kan tas ut ur batteriet vid urladdning och laddning. Vid hög effektdensitet kan man snabbt urladda/ladda batterierna.



Figur 18. Batteripaketet installerat i arbetsmaskinen.

Batteripaketet i arbetsmaskinen är av litiumjon typen. Batterierna är sex till antal och har en nominell spänning på 655 V var. Kapaciteten är 50 Ah och totala energin lagrad är 200 000 Wh.

6.4 Laddning

Laddningen sker via en installerad laddare på maskinen som förvandlar en trefasmatning på max 32 A till en likspänning på 100 V-840 V som laddar batterierna. Fördelen med att ha en inbyggd laddare på maskinen är att man endast behöver matning från nätet för att ladda batteripaketet. Maskinen kan laddas från en generator utan extra komponenter, vilket fungerar som en reserv utfall batterierna blir tomma någonstans var det inte finns åtkomst till elnätet.

I batteripaketet laddas alla parallellkopplade batterier samtidigt med en effekt på 22 000 W. Tiden att ladda batteripaketet kan beräknas enligt formel 14:

$$P_{tot} = \frac{33kWh*6}{22kW} = 9h \quad (14)$$

Vid dimensionering av maskinens komponenter hade vi originellt planerat en max laddningstid på 8h. Men på grund av tillgängligheten av komponenter blev laddningstiden 9h. Max laddningseffekt till batterierna är 45 000 W så i framtida versioner kan vi installera en större laddare om det uppkommer problem.



Figur 19. Laddarens märkskylt.

6.5 Säkerhet

Skyddet på elarbetsmaskinen sker i enighet med IEC 61557, standarden för installationer under 1500 Vdc. På arbetsmaskinen måste det finnas kortslutningsskydd i form av säkringar på både matning och jord samt en jordfelsbrytare i form av en IMD.

Tabell 1. Säkringarnas storlekar.

Komponent	Säkring +	Säkring -
Batteri	125 A	125 A
Strömriktaren	500 A	500 A
Laddaren	60 A	60 A
Batterivärmare	20 A	20 A
DC/DC likriktare	15 A	15 A
IMD	1 A	1 A

Jordfelsbrytaren är ansluten mellan matning och jord och mäter resistansen, som sedan jämförs sedan med ett färdigt inprogrammerat värde. Om skillnader uppstår vid fel bryts matningen i hela systemet.

7 Diskussion

Grundundersökningsbranschen är i en väldigt intressant och växande position för tillfället och jag ser det som en fördel att ha fått vara med i ett projekt som detta. Arbetsmaskinen kommer att kunna utföra arbete som tidigare utan förhinder, vilket var utgångsläget från början.

Resultatet av mitt examensarbete blev dokument och elschema som överläts till företaget. I framtiden kommer flera elbatteridrivna maskiner tillverkas och marknadsföras efter hand som kunskapen växer och eventuella problem korrigeras.

Jag borde ha satt mera tanke på laddningen av batterierna, något jag inte satt mycket tid på och något alla intresserade av maskinen frågar om. Det är en svag punkt när maskinen ska säljas och ett mera utvecklat laddnings system är en prioritet i framtida maskiner.

Maskinens alla högspänningskomponenter är beställda och installerade. Styrsystemet måste ännu installeras innan arbetsmaskinen kan provköras.

8 Källförteckning

- Alfredsson, A., & Jacobsson, K. A. (2016). *Elmaskiner och elektriska drivsystem*. Stockholm: Liber Ab.
- Barsukov, Y., & Qian, J. (2013). *Battery Power Management for Portable Devices*. Canada: Artech House. Hämtat från <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.novia.fi/lib/novia-ebooks/detail.action?docID=1455534>
- Carlo, C., Manh-Kien, T., Youngwoo, L., Shinghei, K., Vincent, L., & Michael, F. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean technologies*, 479. Hämtat från <https://www.mdpi.com/2571-8797/3/2/28>
- Cunanan, C., Tran, M.-K., Lee, Y., Kwok, S., & Fowler, V. L. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*.
- Danfoss. (2021). Data Sheet EC-C1200-450.
- European comission. (den 1 Januari 2017). *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. Hämtat från [Single market economy.europa.eu](https://single-market-economy.europa.eu): https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/non-road-mobile-machinery_en
- Geoelectric. (2023). *Geoelectric.fi*. Hämtat från Hemsida: [Geoelectric.fi](https://www.geoelectric.fi)
- Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric Motors and Drives : Fundamentals, Types and Applications*. Amsterdam: Elsevier. Hämtat från <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.novia.fi/lib/novia-ebooks/reader.action?docID=1157393>
- Kiehne, H. A. (2000). *Battery Technology handbook*. Renningen-Malsheim: Expert Verlag.
- Lamminen, O. (2018). *DEVELOPMENT OF A PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS*. Vaasa: University of Vaasa, Master of Science in Technilogy.
- Liljeström, J. (2014). *Electromechanical transmission challenges in non-road mobile machinery drivetrains*. Esbo: Allto university, Masters in Science (Technology).
- Patel, M. R. (2012). *Shipboard electrical power systems*. New York: CRC publishing.
- Pesaran, A. (2016). *Lithium Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. SAE International.
- Shah, K. H. (2018). Electrically controlled hydraulic rock drill. *Faculty of Engineering and Natural Sciences*, 4-7. Hämtat från <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27145/Shah.pdf;jsessionid=C09840DF8E68B94C3B5618A7CAE81E81?sequence=4>

Waard, S. d. (den 11 November 2011). *Wikimedia*. Hämtat från
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_\(14\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_(14).JPG)

Zureks. (den 24 Mars 2007). *Wikimedia*. Hämtat från
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PWM,_3-level.svg