

# Elmotorer för industriportar



---

**Almir Saran**  
**Mazen Abed Alhadi**

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation  
Faculty of Engineering, Lund University





IEA  
Examensarbete i Industriell elektroteknik och automation  
VT22

# Electric Motors for Industrial Gates

**Författare:**  
Almir Saran  
Mazen Abed Alhadi

**Handledare:**  
Henriette Weibull

**Examinator:**  
Avo Reinap

© Copyright Almir Saran, Mazen Abed Alhadi  
LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 06 Helsingborg  
LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden  
Tryckt i Sverige  
Lunds universitet  
Lund 2022

## Sammanfattning

Examensarbetets syfte har varit att introducera och fördjupa kunskaperna kring elektriska motorer. Arbetet består av en rapport som innehåller teori om olika elektriska motorer samt ett Excel dokument som kompletterar rapporten. Rapporten innehåller bland annat uppbyggnad, ekvationer och begrepp som ska säkerhetsställa att läsaren förstår grunderna till olika motortyper.

Excel dokumentet består av en databas och ett program som tillåter användaren att snabbt få fram olika parametrar på elektriska motorer. Databasen innehåller flertal viktiga parametrar och information om olika motortyper. Programmet använder sig av en sökfunktion som hämtar upp parametrarna från databasen. Sökfunktionen innehåller intervaller på parametrar som bidrar till att användaren får fram flera resultat på motortyper som passar till kraven.

**Nyckelord:** Elektriska motorer, motor parametrar, motor ekvationer, motor databas i Excel, industriella portar.

## Abstract

The purpose of the degree project has been to introduce and deepen the knowledge about electric motors. The work consists of a report that contains theory about various electric motors and an Excel document that complements the report. The report contains, among other things, structure, equations and concepts that will ensure that the reader understands the basics of different motor types.

The Excel document consists of a database and a program that allows the user to quickly obtain various parameters on electric motors. The database contains several important parameters and information about different motor types. The program uses a search function that retrieves the parameters from the database. The search function contains intervals on parameters that contribute to the user obtaining several results on motor types that suit the requirements

**Keywords:** Electric motors, motor parameters, motor equations, motor database in Excel, industrial gates.

## Förord

Författarna till detta examensarbetet vill tacka ASSA ABLOY Entrance Systems i Landskrona för att vi fick genomföra detta arbete hos er. Ett stort tack till vår handledare Anders Löfgren och till de anställda på företaget som har hjälpt, stöttat samt haft förtroende för oss genom arbetets gång.

Vi vill även tacka vår handledare Henriette Weibull och vår examinator Avo Reinap för vägledningen och hjälpen som vi har fått.

Till sist vill vi tacka våra familjer och vänner för deras stöd under examensarbetet.

1. Inledning	<b>9</b>
1.1. Bakgrund	9
1.2. Syfte	9
1.3. Målformulering	9
1.4. Problemformulering	9
1.5. Motivering för examensarbetet	10
1.6. Avgränsningar	10
2. Teknisk bakgrund och teori	<b>10</b>
2.1. Historia om elektromagnetism och elektriska motorer	10
2.1.1. Elektromagnetism	10
2.1.2. Elektrodynamik	11
2.2. Allmän uppbyggnad av elektriska motorer	12
2.2.1. Effekt	13
2.2.2. Vridmoment	15
2.2.3. Poler	16
2.2.4. Tröghetsmoment	17
2.2.5. Verkningsgrad	18
2.2.6. Förluster	21
Resistiva förluster	21
Hysteresförluster	22
Virvelströmsförluster	23
Järnförluster	23
Mekaniska förluster	23
2.2.7. Varvtal	24
2.2.8. Effektfaktor	25
2.2.9. Fasförskjutning	25
2.2.10. $\Delta$ - och Y-koppling	25
2.2.11. Varvtalsreglering	26
2.2.12. Poltals ändring	27
2.2.13. Eftersläpning ändring	27
2.2.14. Frekvensändring	27
2.2.15. Likströmsmotor reglering	28
2.2.16. Duty cycle	28
2.2.17. ED-tal	29
2.3. Asynkronmotor	30
2.3.1. Uppbyggnad och teori	30
2.3.2. Kortslutningsprov	32
2.3.3. Tomgångsprov	34
2.3.4. Fördelar och nackdelar	34

2.3.5. Enfas asynkronmotor	35
2.4. Synkronmotorer	35
2.4.1. Uppbyggnad och teori	35
2.4.2. Permanentmagneter	36
2.4.3. Fördelar och nackdelar	36
2.5. Likströmsmotor	38
2.5.1. Uppbyggnad och teori	38
2.5.2. Borstar	38
2.5.3. Kommutator	38
2.5.4. Shuntmotorn	39
Uppbyggnad och teori	39
2.5.5. Seriemotorn	41
Uppbyggnad och teori	41
2.5.6. Kompoundmotorn	44
Uppbyggnad och teori	44
2.5.7. Universal motor	44
Uppbyggnad och teori	44
Egenskaper	45
Fördelar och nackdelar	45
2.6. BLDC	46
2.6.1. Uppbyggnad och teori	46
Elektronisk styrning	47
2.6.2. Fördelar och nackdelar	48
2.7. Reluktansmotor	49
2.7.1. Uppbyggnad och teori	49
2.7.2. Rotor	50
2.7.3. Fördelar och nackdelar	51
2.8. Motorer som ASSA ABLOY använder	52
3. Metod	<b>54</b>
3.1. Faser	54
3.1.1 Fas 1	54
3.1.2. Fas 2	54
3.1.3. Fas 3	55
3.1.4. Kommunikation	55
4. Resultat	<b>56</b>
5. Lösningförslag och slutsats	<b>64</b>
6. Källförteckning	<b>65</b>



# 1. Inledning

## 1.1. Bakgrund

ASSA ABLOY bildades 1994 genom att slå ihop den svenska säkerhetskonglomeraten Securitas låsverksamhet ASSA med den finska Metras låsdel ABLOY. ASSA ABLOY specialiserar sig i säkerhet, låslösningar samt dörrlösningar. Företaget är ett multinationellt företag som finns i 70 olika länder som till exempel Sverige, Belgien, Tjeckien och Kina. I Sverige har ASSA ABLOY en av sina organisationer som heter ASSA ABLOY Entrance Systems. IDS har sitt huvudkontor i Landskrona där de designar och utvecklar nya lösningar till industriportar.

ASSA ABLOY vill ha en utförlig rapport på olika elektriska motorer som används för olika typer av industrier. De vill använda rapporten i syfte att snabbt kunna bestämma vilken typ av elmotor de ska använda sig av vid olika situationer. Rapporten ska innehålla fördelar och nackdelar med motorerna samt bland annat effekt, vridmoment och kostnaden att köpa in dem.

## 1.2. Syfte

Syftet med examensarbetet är att fördjupa och dra slutsatser om elektriska motorer så att ASSA ABLOY kan på ett smidigt sätt välja motorer.

## 1.3. Målformulering

Målet med examensarbetet är att skriva en utvecklad rapport om olika varianter på elektriska maskiner. Rapporten ska innehålla detaljerad beskrivning på BLDC, synkron, asynkron, borstad likströmsmotor och reluktansmotor samt deras för- och nackdelar. Genom rapporten och ett Excel dokument ska ASSA ABLOY kunna välja vilken typ av motor de ska använda för olika situationer.

## 1.4. Problemformulering

Problemformulering som används i detta examensarbetet är följande:

- Hur är en elektrisk motor uppbyggd?
- Vad är fördelen/nackdelen med olika varianter av elektriska motorer?
- Vilken motor är mest lämplig för det aktuella användningsfallet?

## 1.5. Motivering för examensarbetet

Examensarbetet med våra frågeställningar valdes för att fördjupa oss i elektroteknik samt problemlösning då vi tycker att dessa kunskaperna kompletterar utbildningen som vi har gått. Examensarbetet kommer ge oss fördjupad kunskap inom elektriska motorer som är en eftersökt kunskap på arbetsmarknaden.

## 1.6. Avgränsningar

Se till att ASSA ABLOY har en avancerad rapport om olika typer av elektriska motorer samt ett Excel dokument för att snabbt få fram information med. Vi ska endast samla ihop information för att hjälpa ASSA ABLOY att välja den lämpligaste motorn i det motorsortiment som ingenjörerna på ASSA ABLOY erbjuds.

# 2. Teknisk bakgrund och teori

## 2.1. Historia om elektromagnetism och elektriska motorer

### 2.1.1. Elektromagnetism

Relationen mellan elektricitet och magnetism hade man lagt märke till redan på 1600-talet. Engelska sjömän rapporterade år 1675 att polerna på deras kompasser blev svaga samt att de till och med reverserade vid oväder. På 1700 talet fortsatte forskandet kring sambandet mellan elektricitet och magnetism där bland annat USA s president Benjamin Franklin rapporterade om hur elektricitet kunde reversera polerna på magnetiska nålar [1].

Genombrottet för sambandet mellan magnetism och elektricitet skedde av en slump av fysikern Hans Christian Ørsted. Under en av hans privata föreläsningar skulle Ørsted visa upp ett experiment till sina studenter. Experimentet använde sig av ett batterikrets där en magnetiserad nål fanns bredvid av en slump. När han sedan slog på strömmen började nålen röra sig från sitt viloläge, vilket han noterade och publicerade år 1820 [1].

Fransmannen Andre Marie Ampere kunde redan två månader efter Ørsteds upptäckt bevisa och förklara en lag angående hur en magnetnål orienterar sig relativt en elektrisk ström. Han kunde även konstatera att elektriska ledare har en magnetisk påverkan på varandra. Rapporten publicerade han år 1820 till vetenskapsakademien. Han skrev även andra vetenskapliga uppsatser kring grundläggande teori för elektromagnetism som han kallade för

elektrodynamik. Han valde namnet för att elektrodynamik skulle skilja sig från elektrostatik (som är studierna av stationära elektriska krafter) [1].

Den tyske kemisten Johann Schweigger publicerade år 1820 sin så kallade multiplikatorprincip. Principen bygger på att om man virar en elektrisk ledare så att den bildar en spole med  $N$  varv, kommer den att producera en magnetisk påverkan som är  $N$  gånger större än en ledare med bara ett varv. Hans upptäckt ledde till att galvanometern uppfanns [1].

Den första riktiga elektromagneten uppfanns av William Sturgeon år 1825. Han använde sig av uppfinnaren Aragos experiment för att konstruera elektromagneten. Arago använde sig av ett glasrör med en synål i. Runt glasröret lindade Arago en koppartråd som han sedan matade med en ström som resulterade i att nålen blev magnetisk. Samma princip används i elektromagneter där man istället för ett glasrör med en nål i, använder sig av en järnkärna som blir magnetisk [1].

Professorn Josephs Henry förbättrade Sturgeons idé genom att han isolerade koppartrådarna i silke och att placerade dem närmare varandra. Detta bidrog till att en större lyftkraft i elektromagneten då han hade fler varv kring järnkärnan. Problemet som uppstod för Henry var att det fanns en praktisk gräns för antalet varv man lindade då lyftkraften inte ökade proportionellt med antal varv. Henry förstod inte varför men man kunde senare förstå genom Ohms lag att Henry upptäckte de praktiska konsekvenserna av Ohms Lag. Georg Simon Ohm hade redan publicerat Ohms lag under tiden som Henry fortsatte med att förbättra sin uppfinning, däremot var spridningen av Ohms lag relativt låg under denna tiden [1].

### 2.1.2. Elektrodynamik

Som nämnt i förra kapitlet så var det en stora genombrott i förståelsen kring elektricitet under 1800- talet. Personen som hade störst betydelse för upptäckten om elektriska motorer var forskaren Michael Faraday. Redan vid 20 års ålder var Faraday fascinerad av sir Humphry Davy där Faraday gick på fyra av hans lektioner för att anteckna. Faraday presenterade 386 sidor anteckningar av föreläsningarna till Davy. Davy blev otroligt imponerad och anlätade Faraday som hans assistent år 1813. Att han blev assistent bidrog till att Faraday fick träffa ledande vetenskapsmän och bli inspirerad till att börja experimentera själv.

Då forskarna Davy och William Hyde Wollaston inte lyckades att uppfinna den första elektriska motorn började Faraday experimentera själv. Faraday blev inspirerad av Örsteds upptäckt om sambandet mellan elektricitet och magnetism. Året 1821 utförde han ett experiment där han använde sig av en fritt hängande tråd som var doppad i en pöl av kvicksilver varvid placerades en magnet. Tråden började rotera kring magneten när den utsattes för ström från ett kemiskt batteri. Genom experimentet lyckades Faraday omvandla elektrisk energi till rörelseenergi, dvs. han konstruerade en homopolär motor. Faraday publicerade sin uppfinning vilket orsakade stor kritik från det kungliga vetenskapsakademien

(Royal Society of London for Improving Natural Knowledge) då han inte erkände Davy eller Wollaston i sitt arbete. Vetenskapsakademien förhindrade Faradays fortsatta engagemang i elektromagnetisk forskning i flera år [2].

Faradays uppfinning bidrog till att den ungerske ingenjören Anyos Jedlik kunde utveckla idén vidare genom att använda sig av en koppartråd spole som fästs runt en rektangulär magnet. Det som skedde var att spolen kunde rotera kring sin egen axel när ström anslöts till spolen. Jedlik använde motorn till att driva en liten modellbil med motorn år 1828 [3].

Det var först när Zenobe Gramme uppfann den första effektiva likströmgeneratorn (Grammes maskin) som den elektriska motorn fick en marknad. Grammes generator använde sig av en ringarmatur med seriearmaturspolar som var lindade runt en roterande ring av järn. Spolarna var seriekopplade och anslutningen mellan varje par var ansluten till en kommutator på vilken två borstar löpte. Permanentmagneter magnetiserade järnringen och producerade således ett magnetfält som roterade runt genom spolarna på ordning när ankaret vrids. Vad som sker är att det induceras en spänning i två av spolarna i motsatta sidor av ankaret, som plockas av borstarna [4].

Detta var revolutionerande jämfört med tidiga elektromagnetiska maskiner då spänningen var i praktiskt taget konstant som en likströmsmaskin. De tidiga maskinerna hade korta pulser av likström vilket resulterade i en låg uteffekt och en låg medeleffekt. Nu kunde man använda elektriska motorer i industrier då likströmgeneratorn bidrog till att ström försörjdes till industrierna.

## 2.2. Allmän uppbyggnad av elektriska motorer

En elektrisk motor är den elektromagnetiska enhet som omvandlar elektrisk energi till mekanisk energi. De flesta motorer arbetar genom förhållandet mellan strömmen och magnetfältet i motorns lindningar för att generera en kraft som kan rotera motoraxeln. Kraften som roterar motoraxeln produceras med hjälp av förhållandet mellan ström och magnetfältet i motor lindningar .

Motorns motsvarande enhet är elektriska generatoren som omvandlar mekanisk energi till elektrisk energi. De flesta elektriska motorer är uppbyggda av en rotor, stator, kullager, luftgap, axel, eventuellt en kommutator och lindningar [5].

### Rotor

Rotorn har vanligen en cylindrisk form och innehåller permanentmagneter, rotor lindningar eller form av rotor som skapar reluktansmoment. Rotorns uppgift är att rotera axeln för att producera en mekanisk rörelse.

### Stator

Statorn är den fasta delen i en elektrisk motor. Den har vanligen en cylindrisk form och innehåller permanentmagneter eller lindningar.

Statorn som innehåller lindningar i sin kropp består av många metallplattor(laminat) istället för solid kropp för att minska energiförlusterna. I denna cylindrisk form finns det ett antal jämna isolerade spår för lindningarna som är positionerade på ett sätt så att lindningarna inte rör varandra när motorn drivs. Antalet lindningar varierar beroende på syfte och typ av elmotor.

### Luftgap

Luftgapet är utrymmet mellan rotorn och statorn. För att minska magnetiseringsströmmen måste luftgapet mellan statorn och rotorn vara litet.

### Axeln

Axeln är en mekanisk del i form av solid cylinder som flyttar motorns mekanisk energi från rotorn till utsidan.

### Kommutator

Kommutatorn är uppbyggd av koppar och består av ring med ett antal snitt på dess kropp för att skifta polariteten kontinuerligt i en likströmsmotor.

### Lindningar

Lindningarna består av ett antal koppartrådar som lindas i de isolerade spår i statorn. Antalet lindningar och placeringen av dem som finns i en motor bestämmer motorns antal poler.

## 2.2.1. Effekt

Effekt är en fysikalisk term som beskriver den mängd energi som omvandlas per tidsenhet. Internationella måttenhetssystemet (SI) för effekt är Watt som motsvarar en joule per sekund. Beteckningen för effekt är bokstaven P som står för Power [6]. Man kan även beteckna effekt i enheten hästkrafter, vilket man oftast gör när man till exempel mäter effekten i en förbränningsmotor. En hästkraft motsvarar 735 watt, vilket innebär att en bilmotor med 190 hästkrafter har effekten 140 kW [7]. Elektrisk effekt kan beskrivas för en enfas växelströmskrets genom formeln.

Man kan beräkna effekten i olika sätt, beroende på vilken typ av ström är det.

I en likströmskrets kan man beräkna effekten enligt ekvationen 1:

$$U = R * I + E \quad (1)$$

Där:

U är spänning i volt [V]

R är resistans i ohm [ $\Omega$ ]

I är ström i ampere [A]

E är inducerad spänning [V]

Utifrån (Ekvation 1) är elektrisk effekt i likströmskrets beräknas som i ekvationen 2:

$$P = U * I \quad (2)$$

Där:

P är elektrisk effekt i Watt [W]

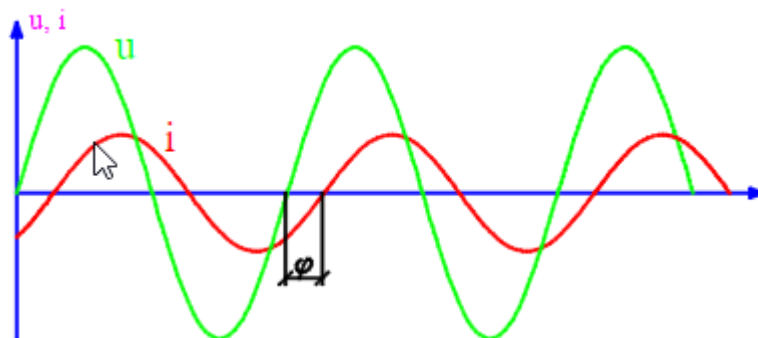
I enfas växelström kan effekten beräknas enligt ekvation 3:

$$P = U * I * \text{Cos}(\varphi) \quad (3)$$

Där

$\text{Cos}(\varphi)$  är effektfaktorn

$\varphi$  är fasvinkeln mellan ström och spänningen i voltampere [VA], som på figur 1:



Figur 1 fasvinkeln mellan ström och spänning [10].

Om det inte finns en fasförskjutning är  $\text{Cos}(\varphi)=1$

I en trefas växelström kan effekten beräknas ur ekvation 4 eller ekvation 5:

$$P_{trefas} = 3 * U_f * I * \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$P_{trefas} = \sqrt{3} * U_h * I * \cos(\varphi) \quad (5)$$

Där:

$U_f$  är fasspänning

$U_h$  är huvudspänning

Sambandet mellan  $U_f$  och  $U_h$  är: 
$$U_f = \frac{U_h}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Effekten i elektriska motorer och komponenter kan även ses som en "förbrukning" istället för hur kraftfull den är. Det är däremot fel att använda ordet förbrukning då energi inte kan försvinna, utan endast omvandlas till roterande mekaniskt rörelse och värme.

### 2.2.2. Vridmoment

Vridmoment är ett fysikalisk mått som beskriver en krafts förmåga att rotera ett föremål kring en viss axel. Kraften på hävarmen och hävarmens längd beskriver vridmomentet.

Vridmomentet kan anges som vektorieell eller som en skalär variabel. Skalär variabel används för motorer vilket är vridmoment proportionell mot hävarmen  $r$  och kraften  $F$ .

$$T = F * r * \sin \theta \quad (7)$$

***T (vridmoment) är lika med kraften (F, mäts i Newton) multiplicerat med längden (r, mäts i meter) på hävarmen,  $\theta$  är vinkeln mellan kraftvektorn och längden r.***

***SI enheten för vridmoment är newtonmeter (Nm).***

Vridmoment utvecklas i en elektrisk motor genom sambandet mellan ström, magnetfält och Lorentzkraft. En vanlig regel för att demonstrera sambandet är att använda högerhandsregeln. Högerhandsregeln säger att om tummen representerar strömmen, pekfingeret magnetfältets riktning som är 90 grader från tummen, kommer det bildas en magnetisk kraft som är 90 grader från magnetfältet.

Högerhandsregeln kan användas för att förstå hur en elektrisk motor fungerar. Ett magnetfält bildas som utbreder sig genom stator, luftgap och rotor. Detta bidrar till i samverkan med strömmen i arbetslindingarna att en kraft bildas i rotorn som gör att den roterar.

vridmomentet är proportionellt mot maskinens storlek och effekten är proportionell mot maskinens hastighet. Effekt [W] = vinkelhastighet [rad/s] \* vridmoment [Nm]

Ett kännetecken för elektriska motorer är att de oftast har högt vridmoment i jämförelse med deras storlek. Vridmomentet i motorer är beroende på varvtal samt effekt. Då elektriska motorer har generellt hög effekt samt vridmoment vilket resulterar i att man får ett högt vridmoment vid låga varvtal [8].

### 2.2.3. Poler

Polaritet är ett tillstånd för en atom eller en molekyl som har en positiv och negativ laddning. Lindningar av koppartrådar i motorns rotor och stator utformas så att man kan skapa elektromagnetiska poler. Ett magnetfält skapas när en elektrisk ström går genom lindningarna, vilket leder till att varje pol blir en elektromagnet. Olika poler attraheras till varandra medan lika poler repellerar från varandra.

Rotorn roterar genom att byta polariteten i rotorns magnetpoler eller statorns poler. Om man antar att statorn har ett antal nordpoler och rotorn har sydpoler så kommer rotorn vridas så att sydpoler närmar sig mot nordpoler i statorn. Om nordpoler i statorn flyttas ett hack så kommer sydpoler i rotorn att följa nordpoler i statorn vilket ger en rotationsrörelse. Repeterar man detta får man en roterande rörelse [9].

I en 2-polig motor har statorn ett magnetfält som har 2 poler, en nordpol och en sydpol.

Jämförelse med en 4 polig motor som har två nordpoler och två sydpoler.

Till exempel i en 2 polig motor vid 50 Hz nätfrekvensen roterar magnetfältet med hastighet 50 varv/s och varvtalet halveras om polerna dubblas.

**Tabell 1 visar relationen mellan synkront varvtal och potal för en växelströmsmaskin [10].**

Potal	Frekvens (f, Hz)	Varvtal( $n_s$ , r/min)
2	50 Hz	3000
4	50 Hz	1500
6	50 Hz	1000
8	50 Hz	750

Det synkrona varvtalet i tabell 1 är teoretiska för att i verkligheten kommer det ske ett mindre varvtal på grund av eftersläpning på 2-6 % av den teoretiska siffran [10].



### 2.2.4. Tröghetsmoment

Tröghetsmomentet är en skalär storhet som mäter en roterande kroppens motstånd mot rotation.

Tröghetsmoment är ett begrepp som beskriver stela kroppars dynamik som kan ej deformeras inom klassisk mekanik. Tröghetsmoment betecknas med  $J$  och är ett mått på hur mycket vridmoment som krävs för att utföra en given ändring av en kropps rotationshastighet kring en given axel [1]. Som exempelvis för ett roterande system med driv ( $T$ ) och belastningsmoment ( $T_{load}$ ) blir enligt ekvationen 8:

$$T = J d\omega/dt - T_{load} \quad (8)$$

Allmänt kan tröghetsmoment beräknas som i ekvation 9:

$$J = \int_v r^2 dM \quad (9)$$

Tröghetsmoment kan beräknas på olika sätt beroende på vilken form en kropp har.

För en homogen cylinder med massan  $M$  och radien  $R$  ges tröghetsmomentet av ekvation 10:

$$J = \frac{M.R^2}{2} \quad [kgm^2] \quad (10)$$

Den i rotationsrörelsen upplagrade mekaniska energin ges av ekvation 11:

$$W = \frac{1}{2} J\omega^2 \quad [J] \quad (11)$$

### 2.2.5. Verkningsgrad

I en elektrisk motor finns det ett samband mellan elektriska effekt som matas in i motorn och effekten som motorns axeln avger. Sambandet kallas för verkningsgrad. I en elektrisk motor finns det två stycken verkningsgrader, en som finns i själva motorn och en som finns i motorns tillbehör. Motorns verkningsgrad betecknas med bokstaven ( $\eta$ ) och kan beräknas med ekvation 12:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = 100 * \frac{\text{Avgiven energi (kWh)}}{\text{Tillförd elektrisk energi (kWh)}} \% \quad (12)$$

Där  $P_{ut}$  är effekten på axeln och  $P_{in}$  som är den inmatade elektriska effekten i motorn. Sambandet beräknas i procent.

En hög verkningsgrad i en elektrisk motor innebär att motorn har mindre förluster. Att välja en motor med hög verkningsgrad brukar vara dyrare vid inköp då man använder sig av dyrare material och design. Däremot blir driftskostnaderna lägre jämfört med en motor med låg verkningsgrad. Att välja en högeffektiv motor ger en vinst i både ekonomi och miljö.

IEC (International Electrotechnical Commission) skapade 2008 en ny standard IE (International Efficiency) för att klassificera enhastighets trefasiga kortslutna asynkronmotorer beroende på hur hög verkningsgrad en motor har. IE har använts i Sverige sedan 2011.

Det finns tre olika klasser i denna standard. De är IE1, IE2 och IE3. De mest effektiva motorer finns i klass IE3. Standarden tar inte hänsyn till motorernas tillbehör, till exempel frekvensomriktare utan tar endast hänsyn till själva motorn [11].

I denna Klassificeringen gäller:

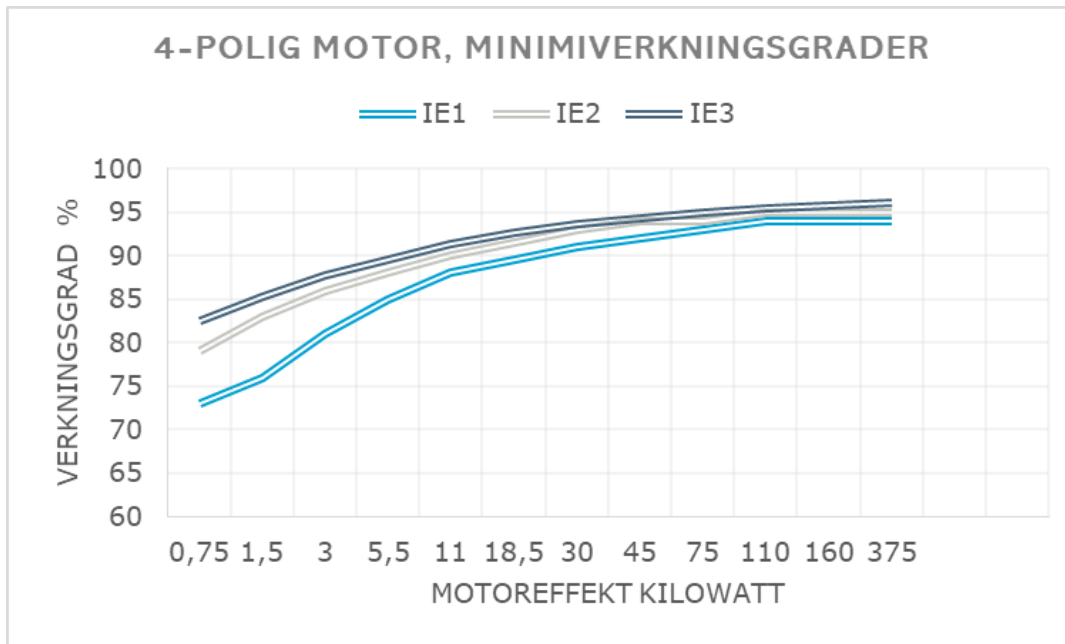
- Märkeffekt mellan 0,75 W och 375 kW
- Märkspänning upp till 1 000 volt
- 2-poliga, 4- poliga och 6- poliga motorer.

**Tabell 2 visar minimiverkningsgrad för klassen IE2 [11].**

Klass IE2	Minimiverkningsgraderna %		
Effekt kW	2-poliga	4-poliga	6-poliga
0,75	77,4	79,6	75,9
1,5	81,3	82,8	79,8
3	84,6	85,5	83,3
5,5	87,0	87,7	86,0
11	89,4	89,8	88,7
18,5	90,9	91,2	90,4
30	92,0	92,3	91,7
45	92,9	93,1	92,7
75	93,8	94,0	93,7
110	94,3	94,5	94,3
160	94,8	94,9	94,8
375	95,0	95,1	95,0

**Tabell 3 visar minimiverkningsgrad för klassen IE3 [11].**

Klass IE3	Minimiverkningsgraderna %		
Effekt kW	2-poliga	4-poliga	6-poliga
0,75	80,7	82,5	78,9
1,1	82,7	84,1	81,0
1,5	84,2	85,3	82,5
2,2	85,9	86,7	84,3
3	87,1	87,7	85,6
4	88,1	88,6	86,8
5,5	89,2	89,6	88,0
7,5	90,1	90,4	89,1
11	91,2	91,4	90,3
15	91,9	92,1	91,2
18,5	92,4	92,6	91,7
22	92,7	93,0	92,2
30	93,3	93,6	92,9
37	93,7	93,9	93,3
45	94,0	94,2	93,7
55	94,3	94,6	94,1
75	94,7	95,0	94,6
90	95,0	95,2	94,9
110	95,2	95,4	95,1
132	95,4	95,6	95,4
160	95,6	95,8	95,6
200	95,8	96,0	95,8
375	95,8	96,0	95,8



**Figur 2 Skillnad mellan olika klasserna IE1, IE2 och IE3 för en 4 - polig motor [11].**

## 2.2.6. Förluster

Att avgöra och beräkna förlusterna i en elektrisk motor är både viktigt för miljön och användaren då man kan spara energi och dra ner på kostnaden. Man utgår från att ha så små förluster som möjligt då det ökar verkningsgraden på motorn. Förlusterna som en motor har delas upp i olika typer:

### Resistiva förluster

Resistiva förluster orsakas av kopparlindningarna i rotorn och stator och står för cirka 50-60% av motorns förluster. Förlusterna beror på vilket material lindningarna är gjorda av samt växelströmmens egenskaper. För att allmänt minska förlusterna i lindningarna behöver de vara korta. Statorlindningarna behöver dock vara långa vilket innebär att man använder sig av koppar då materialet har lägre resistivitet än exempelvis aluminium.

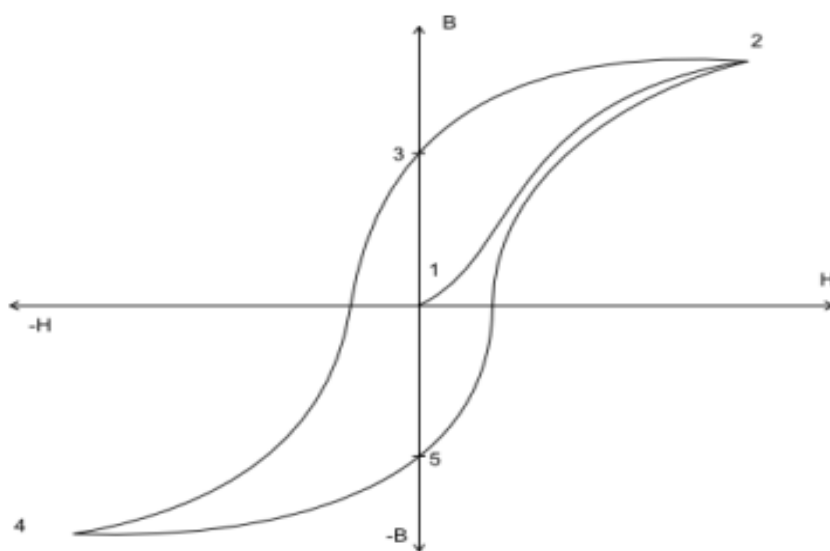
Vid asynkronmotorer, rotors kortsluten lindning eller bur är tillverkad i aluminium för att det är billigare än en bur konstruktion av koppar. Man har konstaterat att aluminiumets effekt i en bur konstruktion inte är mycket sämre, dvs. som resulterar lägre verkningsgrad än om det hade varit gjord av koppar [12].

Växelström orsakar skin effect (strömförträngning) samt proximity effect. Skin effect är resultatet av att växelström i en ledning orsakar ökad resistans som i sin tur gör att strömtätheten i ledaren kommer vara större vid ytan än i mitten av ledaren. Proximity effect

orsakas för att ledningarna sitter nära varandra vid växelström. I en elektrisk motor är det väldigt svårt att eliminera dessa effekterna då de går hand i hand eftersom de uppstår i elektriska ledningar samt att motorns konstruktion kommer alltid att bidra till att effekterna finns [12].

### Hystereseförluster

Hystereseförluster uppstår på grund av magnetiseringen på statorn. Järnet i statorn blir magnetiserat under en fjärdedels sinusformad tidsintervall som motsvarar ändringen i BH karakteristiken från 1 till 2. Under andra fjärdedelen av perioden minskas magnetiseringen samt under tredje fjärdedelen kommer det att finnas en del av magnetiseringen kvar som är visualiserat som remanenspunkterna 3 och 5. Det som uppstår är att i tredje fjärdedelen byter magnetiseringen riktning och en del den motsatta polariteten är kvar. Det energi för att reversera polaritet som är kvar i järnet än om det inte fanns någon polaritet alls. Detta upprepas efter varje period och kallas för hystereseförluster [12].



**Figur 3 visar Hysteresloop. Siffrorna 1 till 5 i figuren visar hur hysteresloop sker. 1 när järnet magnetiseras för första gången, 2 fältet sjunker i andra kvadratsperioden och magnetiseringen sjunker ner till 3, 4 järnet magnetiseras igen med motsatt polaritet och detta sker när fältet reverseras, innan fältet återigen avtar och magnetiseringen går ner till 5 för att sedan börja om i nästa period med 2.  $H$  är magnetisk fältstyrka mäts i  $(A / m)$ .  $B$  är magnetisk flödestäthet, mäts i tesla ( $T = Wb / m^2$ ) [12].**

## Virvelströmsförluster

Vid varierande magnetiska fält uppstår det små cirkulära inducerade strömmar i de material som kan leda elektriskt ström. Dessa små cirkulära strömmar skapar ett motriktade magnetfält gentemot det ursprungliga magnetfältet som uppstår mellan statorn och rotorn. För att minska på virvelströmsförluster använder man sig av en laminerad kärnmaterial (statorkärna). Vad som sker är att beroende på lamineringstjockleken kommer det bildas en resistans som gör att dessa strömmar blir mindre. Fast att man använder sig av en laminerad statorkärna kommer järnförluster stå för cirka 15% till 25 % av motorns förluster vid märkdrift [12].

## Järnförluster

Järnförluster framkallas genom hystereseförluster samt virvelströmmar i stator kärna. Järnförlusterna kan dock försummas i rotorn eftersom frekvensen är låg där. I änddelen av motorn som exempelvis laminering och skyddsplåtar kan virvelströmsförluster uppstå [12].

## Mekaniska förluster

Friktionsförluster i de roterande delarna samt luftmotståndförluster i fläktarna som kyler ner motorn står för cirka 5 till 10 % av motorns förluster vid märkdrift. För att dra ner på de mekaniska förluster måste man ta hänsyn till omgivningen, motorns varvtal och isolationsklass. Om luften i omgivningen runt motorn är varm samt tunn kommer man behöva kyla ner motorn mer med bland annat fläktar som kräver mer energi då tunn luft transporterar värme sämre. Ju högre isolationsklass desto bättre, då isolationsklass beskriver hur hög maxtemperaturen i motorn får vara. Överstiger man den optimala arbetstemperaturen under än längre tid riskerar man att fördärva livslängden på motorn kraftigt. En ökning med 10 grader Celsius resulterar i en 50% minskning i livslängd [12].

### 2.2.7. Varvtal

Varvtal eller vinkelhastighet är ett mått på antalet rotationer kring en fast axel. Vinkelhastighet betecknas med bokstaven  $\omega$  vars enhet är i radianer per sekund. Varvtalet betecknas med bokstaven  $n$  och har enheten revolutions per minute (rpm, varv/ minut). Man kan även använda sig av frekvensen i Hz, dock är detta inte vanligt [13].

$$1 \text{ rad/s} = \frac{1}{2\pi} \text{ Hz} = \frac{60}{2\pi} \text{ rpm} \quad (13)$$

$$2\pi \text{ rad/s} = 1 \text{ Hz} = 60 \text{ rpm} \quad (14)$$

$$\frac{2\pi}{60} \text{ rad/s} = \frac{1}{60} \text{ Hz} = 1 \text{ Hz} \quad (15)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (16)$$

**Ekvationerna 13,14,15,16 visar relationen mellan varvtal, vinkelhastighet och frekvens.**



### 2.2.8. Effektfaktor

Effektfaktorn är ett begrepp som används för att avgöra effektiv energi vid användning. Effektfaktorn är kvoten mellan den skenbara effekt (VoltAmpere, VA) som matas av strömkällan och effekten (W) som används i motorn. Effektfaktorn kan beräknas enligt ekvationen 17:

$$\text{Effektfaktorn} = \frac{\text{Aktiv effekt (W)}}{\text{Skenbar effekt (VA)}} \quad (17)$$

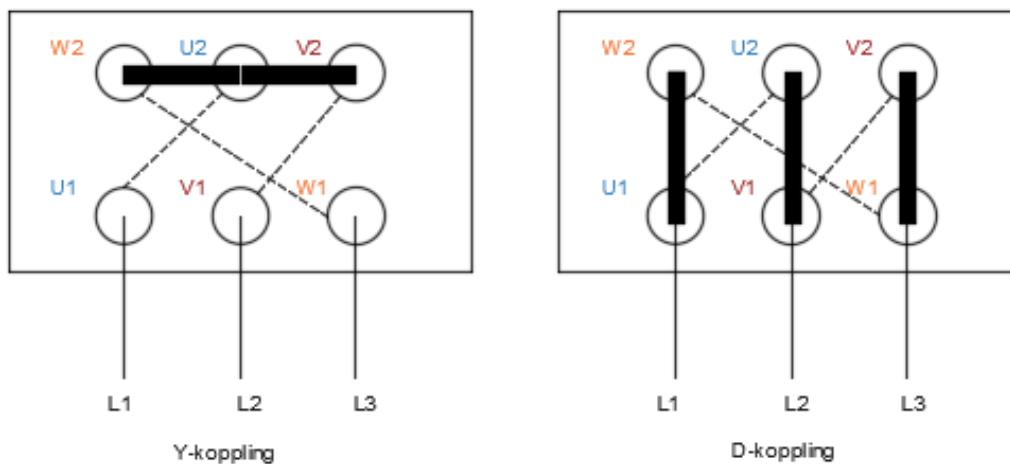
### 2.2.9. Fasförskjutning

En fasförskjutning skapas när strömmen förskjuts i förhållandet till spänningen. Vinkeln som är mellan spänningen och strömmen kallas för fasvinkel och uttrycks med  $\varphi$ . Detta sker vid vissa belastningar som till exempel induktiva belastningar.

Fasvinkel är 0 för helt resistiva belastningar eftersom det är ingen fasförskjutning mellan spänning och ström, medan i induktiva belastningar är fasvinkeln 1 och detta sker om aktiv och skenbar effekt är lika.

### 2.2.10. $\Delta$ - och Y-koppling

Man kan koppla motorn med två olika kopplingar. De kallas för Y-koppling och  $\Delta$ -koppling. Skillnaden mellan kopplingarna är inte bara att ena är parallellkopplad och den andra seriekopplad. Med dessa kopplingar kan man även bestämma matningsspänningen samt matningsströmmen. Använder man sig av en Y-koppling måste man ha en matningsspänning som är högre än med  $\Delta$ -koppling vilket resulterar i att en  $\Delta$ -koppling har  $\sqrt{3}$  gånger större faström än Y-koppling. Den totala inmatade effekten kommer vara lika stor på kopplingar, dvs. motorns spänning är lika med nätets huvudspänning vid Y-koppling och  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  av nätets huvudspänning vid  $\Delta$ -koppling.



Figur 4 skillnad mellan Y - och D- koppling [12].

### 2.2.11. Varvtalsreglering

Varvtalsreglering är viktigt i elektriska motorer för att anpassa varvtalet med den önskade funktion. Vissa tillämpningar av elektriska motorer kräver höga varvtal medan andra kräver låga varvtal. För att säkerställa att en elektrisk motor håller sitt varvtal reglerat så använder man sig av varvtalsreglering.

Regleringen av varvtalet inom elektriska motorer är brett och varierande beroende på vilken typ av motorer som ska regleras [14].

Asynkronmotor varvtalsreglering :

$$n = n_s (1 - s) = \frac{2}{p} f (1 - s). \quad 60 \text{ r/min} \quad (18)$$

Ekvationen (18) visar sambandet mellan frekvens, poltal och det synkrona varvtalet.

Där

f är frekvensen

s är eftersläpning

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (19)$$

$$n_s \text{ är synkrona varvtalet } n_s = 120 \frac{f}{p} \quad (20)$$

p är poltal

Ur ekvationerna 19 och 20 ser man att varvtalet i asynkronmotor kan styras av frekvensen (f), poltal (p) och eftersläpning (s).

### 2.2.12. Poltals ändring

Detta kan göras genom att lägga till mer olika lindningar i statorn, dvs. en för varje poltal. Omkopplingen mellan lindningarna ändrar varvtalet i motorn [14].

### 2.2.13. Eftersläpning ändring

Eftersläpningen ökas vid en sänkt spänning och en konstant moment och detta sker genom att ändra matningsspänningen till motorn [14].

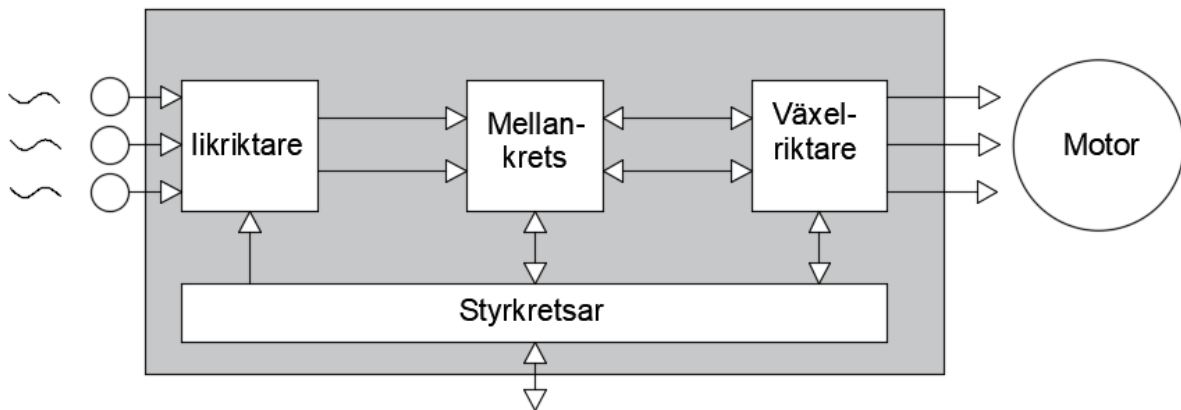
### 2.2.14. Frekvensändring

Det enklaste sättet att styra varvtalet på en asynkronmotor är genom frekvensen. Med kraftelektronik utvecklades process skapades frekvensomriktare. Frekvensomriktare kallas också för frekvensomvandlare, frekvensomformare, växelriktare, drivsystem och strömriktare [15]. Frekvensomvandlare styr en elmotor elektroniskt. Till exempel för trefas växelströmmotorer, frekvensomriktare gör så att omvandla nätfrekvens och nätspänning till små storheter. Detta sker via frekvensomriktarens huvudkomponenter vilka är likriktaren, mellankretsen, växelriktaren och styrkretsens elektronik.

Växelspänning från nätet gå igenom likriktaren först. Likriktaren i sin tur avger pulserande likspänning, denna likspänning gå vidare till mellankretsen vilken i sin tur omformar likspänning till likström eller glattar likspänningen och sänder den vidare till växelriktare eller omformar likspänningen till en variabel spänning.

Växelriktare styr frekvensen i den spänningen som ska driva motorn. Styrkretsen styr signalerna från och till mellankretsen, likriktaren och växelriktaren [16].

Frekvensomriktare har fördelarna att den minskar energiförbrukning samt att optimera produktion genom att anpassa motorns varvtal. Nackdelarna består av störningar och övertoner som frekvensomriktare avger [16].



**Figur 5** visar innehållet i en frekvensomriktare. Likriktare matas med växelspanning från nätet och frigör en pulserande likspänning. Mellankretsen kan ha tre olika uppgifter men den vanligaste är att den omformar likriktarspänning till likström. Växelriktaren styr frekvensen hos spänningen som matas in i motorn. Styrkretsar behandlar signalerna från likriktaren, mellankretsen och växelriktaren [16].

### 2.2.15. Likströmsmotor reglering

I likströmsmotorer är det spänningen som styr varvtalet och strömmen styr vridmomentet eftersom spänningen är proportionell mot varvtalet och vridmoment är proportionellt mot strömmen.

Likströmsmotorer kan styras manuellt eller med hjälp av automatisk styrning beroende på vilken typ av motor man vill styra [14].

### 2.2.16. Duty cycle

Betecknas med bokstaven  $D$  som bestäms av sambandet mellan pulssignalernas period  $T$  och deras varaktighet [17].

$$D = \frac{PW}{T} \quad (21)$$

För att beräkna duty cycle använder man sig av pulsens bredd (enhet sekunder) delat med den totala perioden av signalen (enhet sekunder). För att få fram duty cycle i procent så multiplicerar man kvoten med 100.

## 2.2.17. ED-tal

ED-tal (på tyska, Einschaltdauer) är internationell standard som beskriver hur motorn ska köras. Driftarterna är katalogiserade mellan S1 och S9 där de följer IEC 60034-1.

Bestämmelsen om vilken driftart en motor tillhör till sammanställs genom belastningsprov där faställd temperaturgräns inte överstigs.

Driftarten S2 har alltid en beteckning på tidsintervallet som den körs med. Driftarterna S3 och S6 betecknar man tidsintervallet med intermittensfaktor. Om ingen bestämd tidsintervall anges så är tidsintervallet på 10 minuter. Ett exempel är att om det står på märkplåten S3,40% så innebär det att på en 10 minuters intervall får motorn arbeta i 4 minuter [18].

**Tabell 4 visar katalogiseringen för ED-tal mellan S1 och S9 [18]**

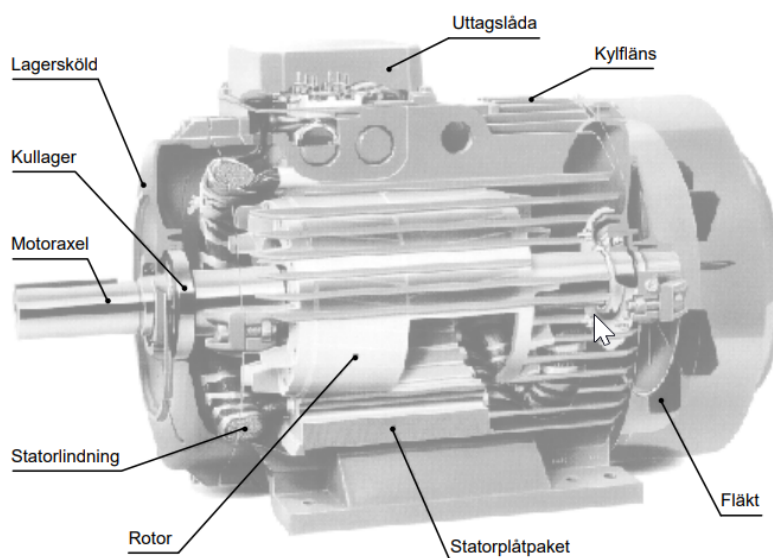
Driftarter	Beskrivning
S1	Kontinuerlig drift
S2	Korttids drift där motorn körs till den uppnår tillåten temperaturstegring. Efteråt måste motorn ha en driftspaus tills den når omgivningens temperatur. Tidsintervallet för drift står på motorn.
S3	Sekvens av arbetsperioder och driftpauser. Om det inte står något tidsintervall så är intervallet 10 minuter.
S4	Arbetsperioder med jämnt växlande starter, belastningar och driftspaus
S5	Arbetsperioder med jämt växlande starter, belastningar, driftpauser, reverseringar och bromsningar.
S6	Kontinuerlig drift med periodiska belastningar.
S7	Arbetsperioder med jämnt växlande starter, belastningar, bromsningar eller reversering utan driftspaus
S8	Kontinuerlig drift med intermittent belastningsvarvtalsändring.
S9	Drift med icke-periodisk belastning och varvtalsvariation ( frekvensomriktardrift)

## 2.3. Asynkronmotor

Asynkronmotor (Induktionsmotor) är en typ av elektrisk motor som är i särklass den vanligaste motorn som används. Man estimerar att cirka 70 procent av alla motorer inom industrin är asynkronmotorer[21]. Det finns två typer av asynkronmotorer: Trefas- och enfas växelström.

### 2.3.1. Uppbyggnad och teori

En asynkronisk motor är uppbyggd av en stator och en rotor. Statorn är cylinderformad och byggd av laminerad elektroplåt. Statorn har ett hål som går tvärs igenom den, där rotorn får plats i. Inuti statorn finns det flera stator spår eller snitt som går runt i cylindern och är vågräta ( se Figur 6). I snitten lägger man sedan in ett antal koppartråd som är isolerade.



**Figur 6 föreställer de olika delarna i en asynkronmotor [1].**

Det finns olika typer av rotor som man kan använda sig av. Typen som används mest kallas för Squirrel cage rotor. Rotorn är en cylinder som består av tunna isolerade plåt av metall som är ifrån varandra. I spåren ligger ledarna som är gjorda av koppar eller aluminium stavar som är kopplade till cylinderns ändar som är kortslutna. Slitsarna i cylindern från ena änden till den andra är inte raka utan snedvridda. Detta gör att man inte kan lägga till ett externt motstånd i kretsen till rotorn, till skillnad av rotor med rotor lindning och slip ring.[19].

Koppartrådarna i statorn matas av faserna från elnätet och deras polaritet till motorn. Varje grupp av "tråd" som formar en spole ( som innehåller flertals koppartrådar, tänk en för enkelhetens skull) innehåller en fas och en av polariteterna. Med andra ord kommer fas 1 ha två grupper av koppartråd, en som är positiv och den andra negativt. Faserna kommer placerat på ett specifikt sätt i statorns snitt som fasförskjutna 120 grader från varandra vilket kommer bilda ett roterande magnetfält. Varannan grupp koppartråd i snitten måste innehålla samma polaritet men olika faser, på ett sätt att ett snitt måste ha positiv polaritet, nästa negativ och så vidare.

Enskilda grupper koppartråd har sitt egna magnetfält, vilket man kan bekräfta med högerhandsregeln. Alla faser tillsammans med deras respektive polaritet kommer att skapa ett roterande magnetfält. Magnetfältets vinkelhastighet är proportionellt med frekvensen i elnätet eller frekvensomriktare. Detta bidrar till en inducerad spänning i rotorn, vilket tilldelade namnet "induktionsmotor". Inducerade spänningen uppstår genom Lenz lag vilket skapar en kraft som gör att rotorn roterar.

Denna typen av motor kallas för bland annat asynkronmotor då rotorns varvtal inte är synkroniserat med magnetfältets rotationshastighet som statorn har. För att rotorn ska kunna få en inducerad spänning och få en roterande kraft måste rotorns varvtal vara lägre än magnetfältets varvtal.

$$n < n_s$$

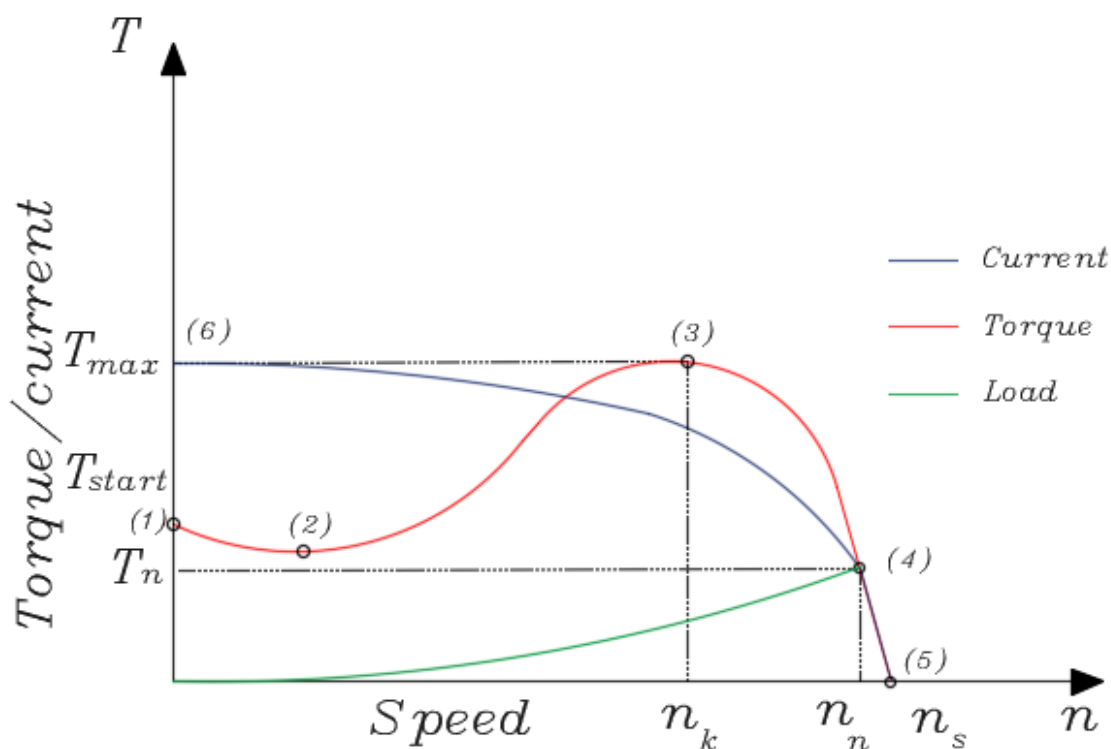
Rotorns varvtal måste vara mindre än magnetfältets varvtal för att rotorns ska kunna få inducerad spänning som i sin tur leder till en kraft som roterar rotorn

Detta fenomenet kallas för eftersläpning. Rotorn strävar efter att ha ett synkroniserat varvtal med magnetfältet, och därför kan man tänka sig att den försöker att komma ikapp magnetfältet.

Teoretiskt kommer rotorns varvtal komma ikapp magnetfältets varvtal. Sker detta kommer ingen induktion att bildas vilket i sin tur stannar rotorns rotation. När rotorn står stilla kommer den att ha ett lägre varvtal än magnetfältet vilket kommer bilda induktion igen. I verkligheten kommer detta inte att ske då rotorn har flertal förluster som exempelvis friktion som hindrar att den har tillräckligt mycket energi att ha samma varvtal som magnetfältet.

En trefas asynkronmotor är självstartande till skillnad från en enfasmotor. De tre olika faserna har en skillnad på 120 grader mellan varandra. Detta leder till att rotorns magnetfält också har 120 graders fas skillnad vilket gör att rotorn roterar. Man kan tänka sig att dela

upp faserna i A, B och C. När fasen A blir magnetiserad kommer rotorn att röra sig mot fasen A, vilket i sin tur magnetiserar fasen B som attraherar rotorn som i sin tur magnetiserar fasen C som attraherar motorn till sin fas. Detta bidrar till att motorn är självstartande [20].



**Figur 7 Asynkronmotorns karaktäristik vid belastning. Röda linjen är vridmoment, den blåa linjen är ström och den gröna linjen är belastning. (1) startmoment  $T_A/T_N$ , (2) minimummoment, (3) Maxmoment  $T_K/T_N$ , (4) nominell moment  $T_N$ , nominellström  $I_N$ , nominellt varvtal  $n_n$ , (5) synkront varvtal, (6) startström  $I_A/I_N$  [38].**

### 2.3.2. Kortslutningsprov

För att kunna beräkna asynkronmotorns parametrar som till exempel resistans och induktans kan man använda sig av kortslutningsprov och tomgångsprov.

Kortslutningsprovet används för att beräkna ledningsresistanser och läckinduktanser. Detta utförts med en fastlåst rotor eller med mycket lågt varvtal i rotor för att jämna ut konstruktionsojämnheter. För att utföra provet måste man ta hänsyn till att man gör provet med en reducerad spänning så att strömmen antar märkvärde. Använder man istället märkspänning skulle strömmen bli lika stor som startströmmen vilket är för högt och kan resultera i att man skadar elmotorn [21].



Olika ekvationer för att beräkna vissa parametrar med ett kortslutningsprov:

Vid varvtal  $n=0$  kommer eftersläpningen  $s$  att vara 1 samt uteffekten  $P_{ut} = 0$ . Inmatade effekten blir förlusten i rotor - och statorresistansen och kan skrivas:

$$P_k = 3(R_s + R_r)I_k^2 = 3R_k I_k^2 \Leftrightarrow R_k = \frac{P_k}{3I_k^2} \quad (22)$$

$P_k$  är beteckningen för tillförd trefaseffekt,  $I_k$  är beteckningen för linjeströmmen

För att bestämma statorlindningens resistans ( $R_s$ ) använder man sig av formeln:

$$R_s = \frac{R_{uppmätt}}{2} \quad (23)$$

Där  $R_{uppmätt}$  mäts mellan två fasanslutningar i en ekvivalent y-fas koppling.

Genom att bestämma både resistansen i statorn och vid kortslutning kan man få fram resistansen i rotorn genom::

$$R_r = R_k - R_s \quad (24)$$

Summan av läckinduktansen tilldelas termen  $L_k$  som kan beräknas genom:

$$L_k = \frac{\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}}{\omega_1} \quad (25)$$

Där  $\omega_1$  är vinkelhastigheten i radianer per sekund

Genom läckinduktansen kan man få fram kortslutningsinduktansen  $Z_k$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + (\omega_1 L_k)^2} \quad (26)$$

### 2.3.3. Tomgångsprov

Tomgångsprov utförs med märkspänning utan belastning på motorn. Provet går ut på att omvandla en asynkronmotor till en synkronmotor för att ta reda på olika förluster i motorn. Teoretiskt kommer eftersläp och rotorströmmen att bli noll om motorn uppnår synkroniserat varvtal. Då en asynkronmotorns rotor aldrig har samma hastighet som magnetfältet på grund av olika förluster får man använda sig av en hjälpmotor som tillför tillräckligt med energi så att rotorn snurrar i samma hastighet som magnetfältet. Nu kan man mäta huvudspänningen, linjeströmmen samt trefaseffekten.

Om man ser till det ekvivalenta schemat skulle alla förluster vid synkront varvtal och vid tomgång vara i statorresistansen. Däremot visar det sig att förlusterna är större på grund av järnförluster (hysteres- och virvelströmsförluster). Järnförlusterna i det ekvivalenta schemat är av en resistans  $R_m$  parallellt med magnetiseringsinduktansen  $L_m$  [21].

### 2.3.4. Fördelar och nackdelar

Trefas asynkronmotor används flitigt i vardagen. Det finns många fördelar till att användningen av denna typ av elektrisk motor är så vanligt.

Asynkronmotor har en bra verkningsgrad då varvtalet till förhållandet mot vridmomentet gör att motorns prestanda kan appliceras lätt i vardagligt bruk utan att dem överhettas, går sönder samt att dem förlorar sin livslängd snabbt. Då motorn innehåller få rörande delar och inga borstar eller kommutatorer så finns det en möjlighet att livslängden är hög fast att man använder de i förhållande som är krävande. Det som påverkar livslängden mest är kullager som slits vid användning, men dessa är lätta att byta ut.

Tystheten och enkelheten som motorn medför lockar även kunder. En asynkronmotor är väldigt lätt att användas för vardagligt bruk då man kan använda den med en av och på knapp. Vill man att motorn roterar andra hållet så är det enkelt att byta plats på kablarna. Motorn kan massproduceras samt produceras i olika former och med olika uteffekter [22].

En nackdel är att om man använder en asynkronmotor med kortsluten rotor får man en hög startström och lågt startmoment. Detta kan delvis elimineras genom att använda sig av en lindning på rotorn som är av samma slag som statorn. Lindningen på rotorn ansluter man till släpningar på motorns axel till ett pådrag. Resultatet blir att man får en begränsad startström och ett högt startmoment, dvs. en gynnsam start. Denna metoden är dock ovanlig då man använder sig av frekvensomvandlare för att styra moment och varvtal [22].

Motorn har alltid en eftersläpande effektfaktor för att strömmen ligger bakom spänningen. Detta bidrar till vid låg last kommer motorn att arbeta som värst och kommer ha en hög eftersläpning mellan rotorns varvtal och magnetfältets varvtal. Resultatet blir att motorn verkningsgrad blir sämre än vanligt. För att komma ifrån detta kan man använda sig av komponenter som korrigerar effektfaktorn som exempelvis statiska kondensatorer [15]. Den främsta nackdelen dock är att det är svårt att kontrollera hastigheten på asynkronmotorer samt att lasten på motorn avgör hastigheten. Om man är ute efter en kontrollerad hastighet brukar man välja likströmsmotorer. Däremot kan man med dagens teknik använda sig av olika frekvensomriktare som kontrollerar en asynkronmotors hastighet. Frekvensomriktare för motorer används flitigt inom industrin [15].

### 2.3.5. Enfas asynkronmotor

Enfas asynkronmotor fungerar på samma sätt som en trefas motor där tre fas lindningar kan kopplas till en fas matning eller lindningar formeras som huvud och hjälp lindning för att skapa roterande magnetfält. Uppbyggnaden av stator och rotorn är samma, dock så använder man bara en grupp fas koppartråd som matning och använder trefas maskinen med växelriktare eller använder driftkondensatorn. I stället för tre spolar med tre olika faser så använder man tre spolar där en är en fas, andra innehåller en kondensator som blir strömförsörjda av första spolens fas och den tredje spolen är neutralen. Spolen placeras i statorn så att genom högerhandsregeln kommer det bildas två stycken roterande magnetfält.

Till skillnad från en trefas induktionsmotor, så är inte enfas induktionsmotor självstartande pga alternerande magnetfält. Det krävs därför att någon utomstående komponent som tex kondensator som skapar fasskillnaden i två fas motorlindningar och möjliggör roterande magnetfält som hjälper motorn med att starta. En av komponenterna som används kallas för mjukstartare som används för både enfas och trefas motorstart. En mjukstartares primära uppgift är att förse motorn med en lägre startström än vid direktstart. Använder man sig av höga startströmmar på framförallt stora asynkronmotorer kan det uppstå nätstörningar som stör annan elektrisk utrustning i nätet. På grund av detta har många nätägare krav på att man måste använda en mjukstartare [21].

## 2.4. Synkronmotorer

### 2.4.1. Uppbyggnad och teori

En synkroniserad motor är uppbyggd av en stator och rotor. Statorn är uppbyggd som en asynkronmotor med flera snitt som innehåller koppartråd som är isolerade. Rotorn har också samma typ av konstruktion som statorn, den innehåller också snitt med koppartråd i. Rotorn drivs med likström vilket innebär att rotorn måste vara ansluten till en kommutator eller en slip ring. Statorn är kopplat till ett trefas växelströmsnät som bidrar till att två magnetfält bildas som snurrar i samma riktning.

För att rotorn ska rotera måste statorn producera ett magnetisk fält som roterar i  $120 \frac{f}{p}$  rpm med en frekvens  $f$  och poltalet  $p$ . Likströmmen i rotorn kommer att bilda elektromagneter, däremot kan man även använda sig av permanenta magneter i rotorn. Magneterna kommer att attraheras och följa efter statorns magnetfält som roterar. Detta innebär att rotorns varvtal är synkroniserad med statorns magnetfält. Använder man sig av elektromagneter kommer elektromagnetiska kraften att variera linjärt med spänningen.

$$n = \frac{120 * f}{p} \quad (27)$$

För att beräkna det synkrona varvtalet används denna formeln, där  $f$  är frekvensen i Hz och  $p$  är poltalet

För att få fram det maximala vridmomenten måste rotorns magnetfält ligga efter statorns magnetfält med 90 grader. Läger man på för mycket mekanisk last utan att återkoppla motorn kommer man att få motorstopp [1].

#### 2.4.2. Permanentmagneter

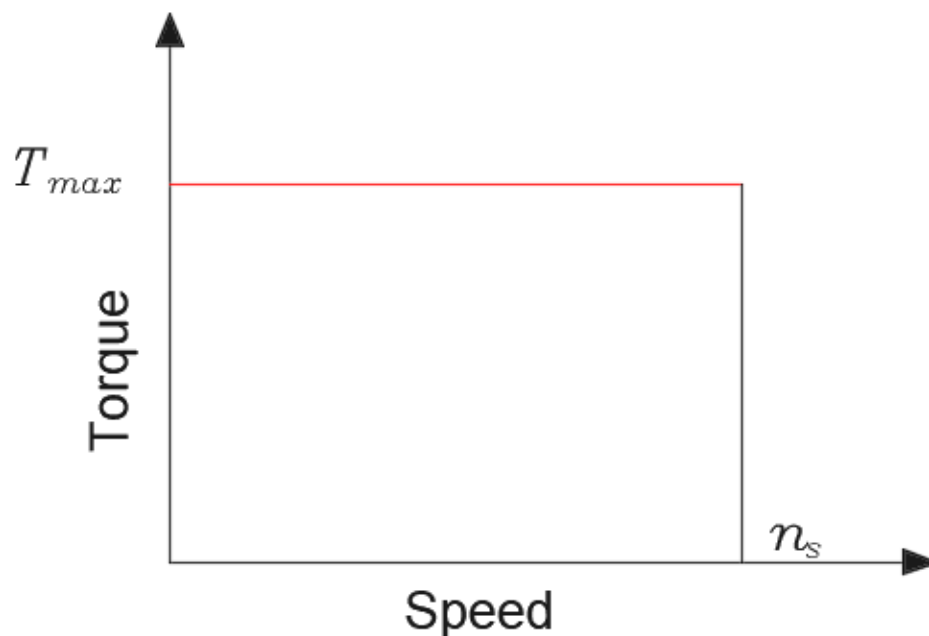
Om motorn använder sig av permanentmagnet i rotor, består de oftast av neodymmagnet, samarium-cobalt magnet eller ferrite på rotorn. Dessa magneter limmas fast på rotorn så att magnetfältet är radiellt riktat över luftgapet. Man kan även sätta permanentmagneter under rotorns yta eller i snitt på rotorn.

Fördelen med att använda sig av permanentmagneter är att man har hög precision med regleringen av varvtalet samt rotorns position. Genom att använda sig av en frekvensomriktare som styr statorn med variabel spänning, variabel frekvens och en elektroniskt styrd källa. Detta bidrar till att motorn är effektiv då förlusterna i rotorn är låga. Man kan även designa en permanent synkronmotor som drivs av en konstant spänning och frekvens. Däremot kan man inte bestämma effektfaktor i dessa motorer [1].

#### 2.4.3. Fördelar och nackdelar

Det som kännetecknar en synkronmotor är att varvtalet är konstant oberoende av den mekaniska lasten. Vid stora synkrona motorer har man en hög effektivitet som brukar vara över 90%. Genom att använda sig av fler lindningar i rotorns samt en fast frekvens matning kan man starta upp en synkronmotor som en asynkronmotor.

Nackdelarna med en synkronmotorer är att den inte är självstartande som asynkronmotorer. Vid asynkonstart får ingen mekanisk last användas då rotorns varvtal kan inte komma upp till synkron hastighet. Vid höga mekaniska laster kan det synkrona magnetfältet bli förlorat vilket bidrar till att rotorn stannar. Priset per kW är högre än en asynkronmotor samt att motorn innehåller borstar och kommutering som slits. En synkronmotor (utan drivenhet) ska därför inte användas i applikationer där man måste starta motorn flera gånger samt där man behöver högt vridmoment vid start [24].



**Figur 8 synkronmotorns karaktäristik vid belastning.  $T$  är vridmoment och  $n_s$  är det synkrona varvtalet [34].**

## 2.5. Likströmsmotor

### 2.5.1. Uppbyggnad och teori

Det finns flera typer av likströmsmotorer. Dessa kan dock delas in i två huvudtyper: BDC (brushed direct current) och BLDC (Brushless direct current).

En borstad likströmsmaskin är uppbyggd av en stator och rotor. Statorn innehåller två stycken konkava permanentmagnet som har två olika polariteter, man kan även använda sig av spolar som blir till elektromagneter. Magneterna sitter tvärt emot från varandra. Rotorn innehåller fyrkantiga kopparslingor som kallas för armatur. Armaturen är i sin tur kopplad till en kommutatorring som är i sin tur är kopplade till två stycken borstar.

### 2.5.2. Borstar

Borstarna är rektangulära och är tillverkade av antingen kol eller grafit men man blandar in lite koppar för att förbättra ledningsförmågan. Borsten innehåller en fjäder som ser till att den alltid har kontakt med kommutator ringen. Den delen som har kontakt med kommutator är mjuk och kommer att gnidas bort på grund av friktionen som uppstår.

Borstarnas uppgift är att se till att kommutatorn tillförs med likström från en strömkälla. När ström tillförs i borstarna kommer borstarna leda elektricitet till kommutatorn som i sin tur leder vidare den till armaturen. Det kommer då att bildas en sluten krets. Armaturen som är gjord av koppar som är isolerad kommer att bli en elektromagnet med en nord- och sydpol. Permanentmagneterna som sitter i statorn kommer antagligen att attrahera eller repellera polariteten i armaturen. Detta bidrar till att armaturen roterar [25].

### 2.5.3. Kommutator

Kommutatorringen innehåller snitt där den kommer byta polaritet när borstarna passerar dem. Problemet som kan uppstå är att borstarna fastnar i dessa snitt då det inte bildas tillräckligt med vridmoment för att rotera kommutatorn så att borstarna får kontakt igen med metallen. För att lösa detta delar man upp kommutatorn i flera snitt där varje del har sin egna armaturring. Detta resulterar i att rotorn får fler elektromagneter som i sin tur gör att motorn har högre vridmoment. För att öka vridmomentet ytterligare behöver man använda flera koppartrådar för att bilda tjockare armaturer. Att öka antalet koppartrådar bygger på att en elektromagnet med fler varv får ett kraftfullare magnetfält. Till sist kan man öka strömmen för att få kraftfullare elektromagneter [26].

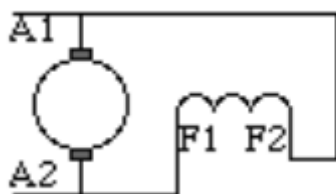
Likströmsmotorer som är i drift skapar en motelektromotorisk kraft. Detta sker då det bildas en spänning som är motriktad till den påtryckta spänningen, vilket är nätets spänning. Vad som sker är att motelektromotriska kraften och nätspänningen bildar en total spänning över rotorlindningen till några få volt vid full varvtal. Ansluts en stor likströmsmotor direkt till nätet kommer startströmmen bli mycket hög då motelektromotriska kraften är noll vid

startögonblicket. För att förhindra en för hög startström behöver man använda sig av en startresistans som är kopplad till rotorkretsen [21].

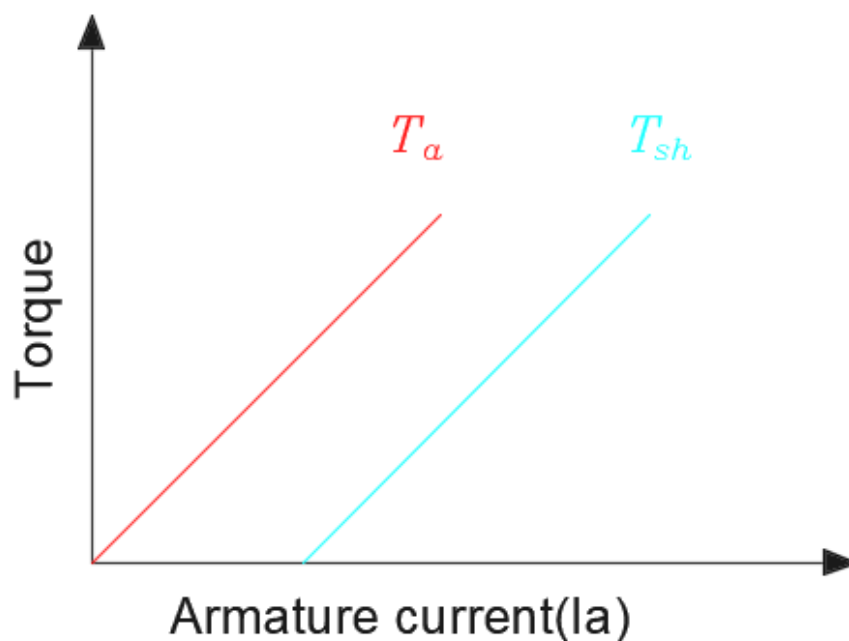
#### 2.5.4. Shuntmotorn

##### Uppbyggnad och teori

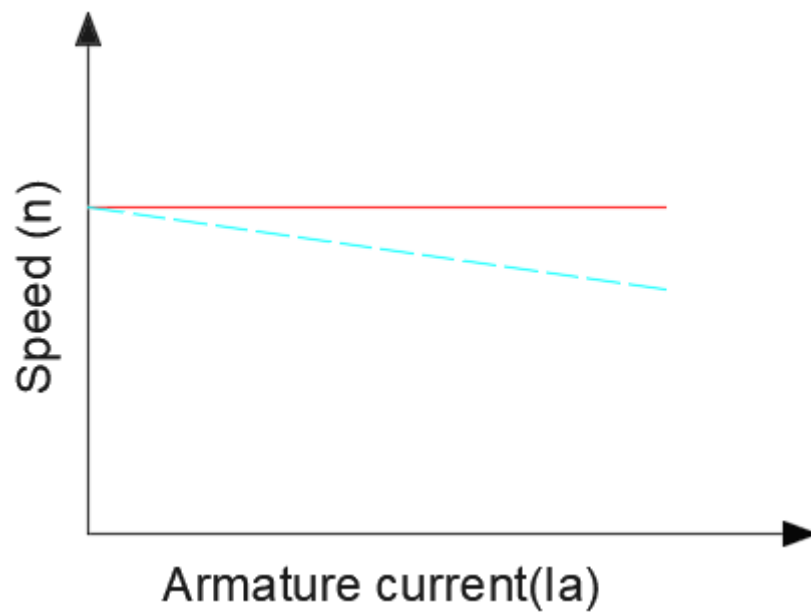
Shuntmotor är en likströmsmotor vars magnetlindning är kopplad parallellt med rotorkretsen. Fördelarna med denna typ av motor är dess förmågan att hålla nästan konstant varvtal från fullast till tomgång.



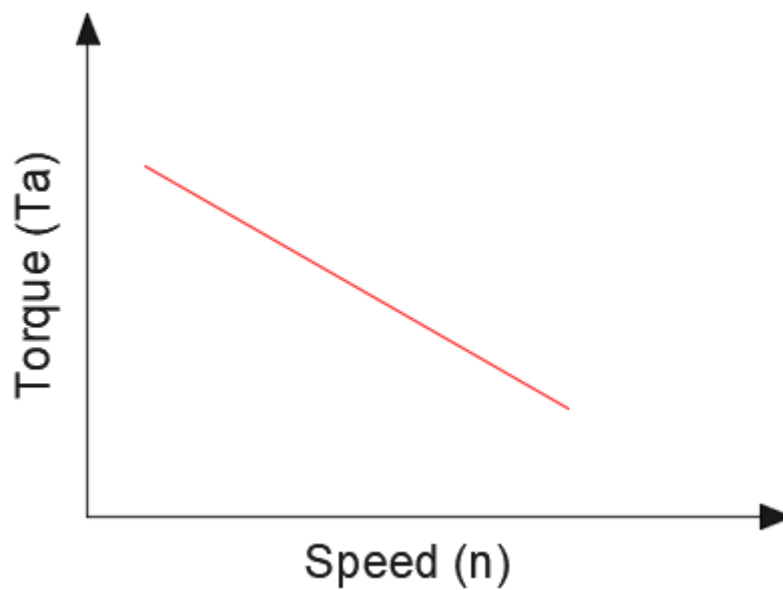
**Figur 9** Kopplingschema för en shuntmotor. A1 och A2 är anslutningar för rotorlindningen där F1 och F2 är respektive fältlindning [33].



**Figur 10** Shuntmotorns karaktäristik.  $T_a$  är armaturens vridmoment och  $T_{sh}$  är vridmomentet i motorns axel [35].



Figur 11 visar shuntmotorns karaktäristik. Den teoretiska armatur strömmen ( $I_a$ ) är konstant (röda linjen), men vid belastning sjunker den (blåa linjen) [35].



Figur 12 visar shuntmotorns karaktäristik.  $T_a$  är armaturens vridmoment som sjunker vid belastning [35].

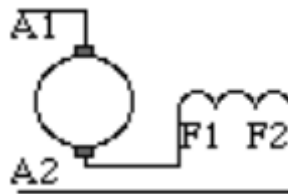


## 2.5.5. Seriemotorn

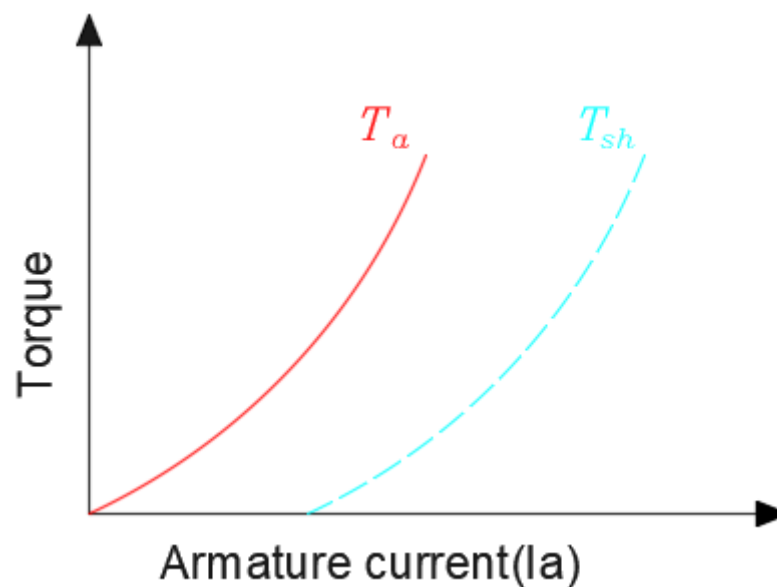
### Uppbyggnad och teori

En seriemotor är en likströmsmotorns vars magnetlindning är kopplad i serie med rotorlindningen. Detta resulterar i att hela belastningströmmen flyter genom serielindningen som i sin tur bidrar till att magnetiseringsströmmen varierar med belastningen. Motorns varvtal kommer att sjunka med ökad belastning. Om belastningen sjunker till noll kommer motorns varvtal öka tills motorn rasar. Det är därför väldigt viktigt att använda sig av någon typ av växel eller kedja då tomgångskörning är mycket riskabelt.

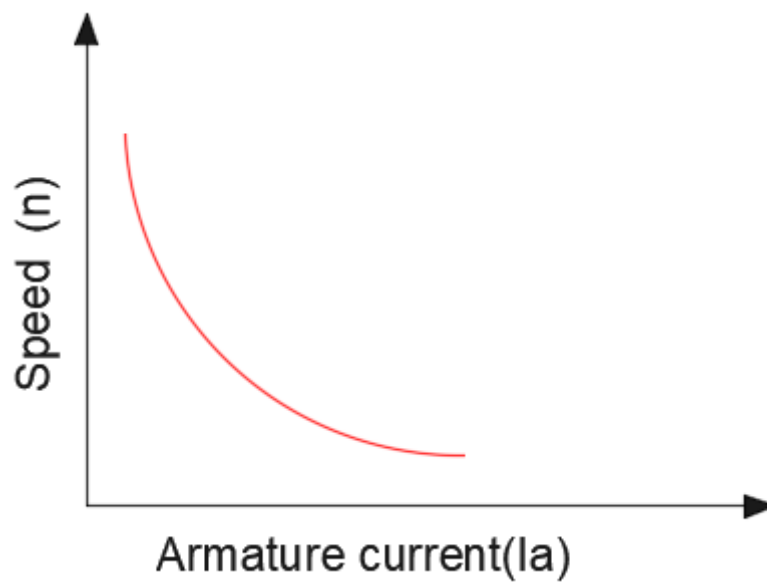
Seriemotorn är konstruerad så att man får ett maximalt flöde vid full startström på motorn. Man får då maximalt startmoment om man kombinerar ihop maximalt flöde och maximal startström. Detta innebär att man inte behöver använda sig av en startresistans [21].



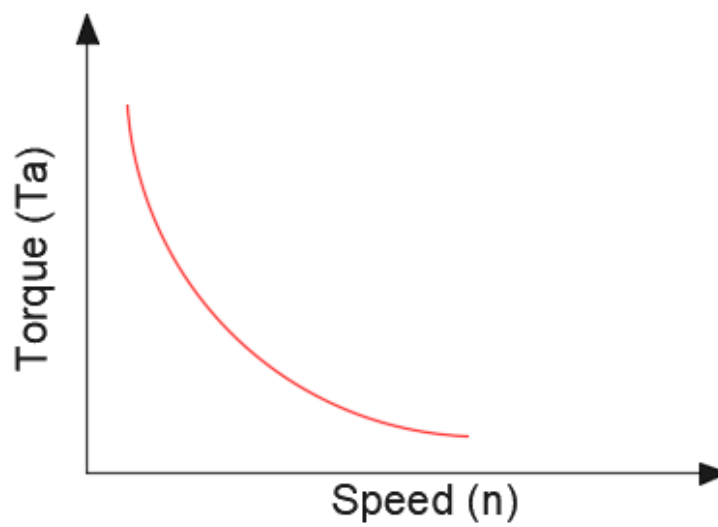
**Figur 13** Kopplingschema för en seriemotor. A1 och A2 är anslutningar för rotorlindningen där F1 och F2 är respektive fältlindning [33].



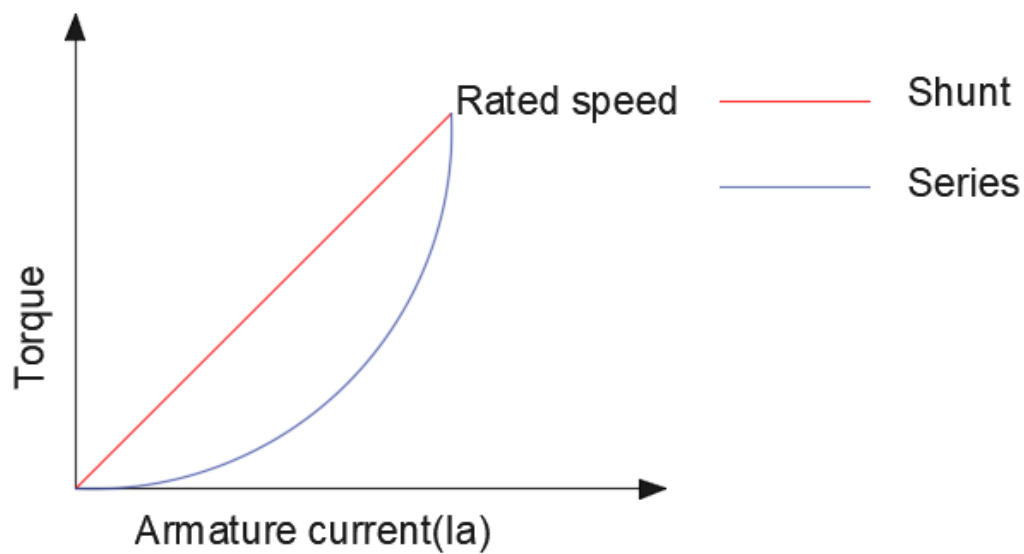
**Figur 14** visar seriemotorns karaktäristik.  $T_a$  är armaturens vridmoment och  $T_{sh}$  är vridmomentet i motorns axel [35].



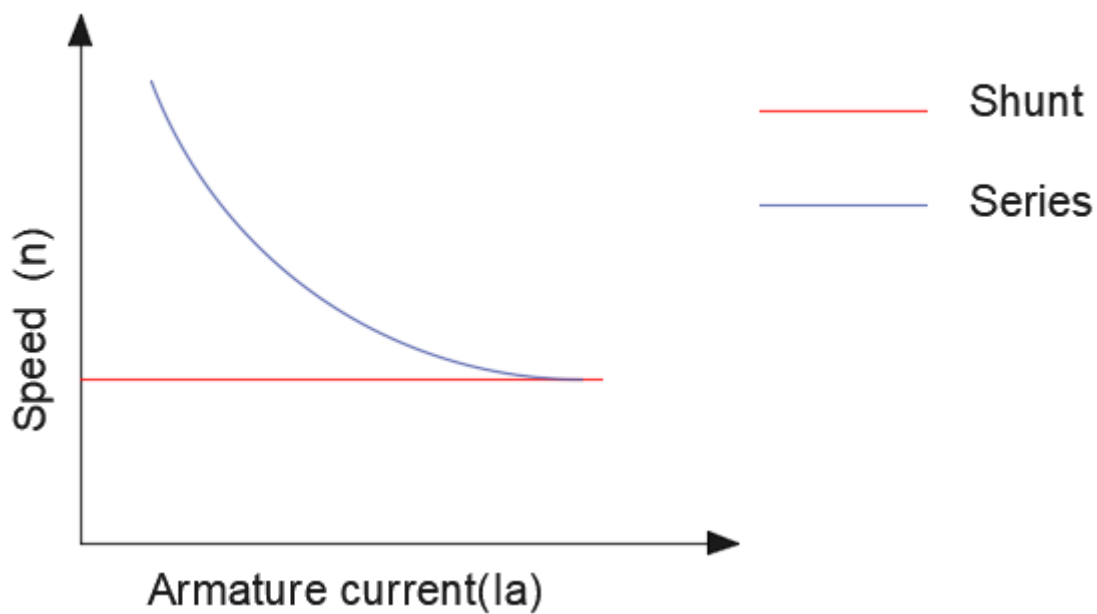
**Figur 15** visar seriemotorns karaktärstik. Armatur strömmen ( $I_a$ ) ökar vid belastning vilket innebär att varvtalet sjunker [35].



**Figur 16** visar seriemotorns karaktärstik.  $T_a$  är armaturens vridmoment som sjunker vid belastning [35].



**Figur 17** Jämför seriemotorns och shuntmotorns karaktäristik [35].



**Figur 18** jämför seriemotorns och shuntmotorns karaktäristik [35].

## 2.5.6. Kompoundmotorn

### Uppbyggnad och teori

Kompoundmotor är en likströmsmotor som är en hybrid mellan Shuntmotorn och Seriemotorn. Motorn kommer då ha båda motorernas fördelar men inte nackdelar då den innehåller serie- och kompoundmotorns fältlindningar. Däremot är denna typen av motor dyrare att tillverka samt att den tyngre för motsvarande effekt [21].

## 2.5.7. Universal motor

### Uppbyggnad och teori

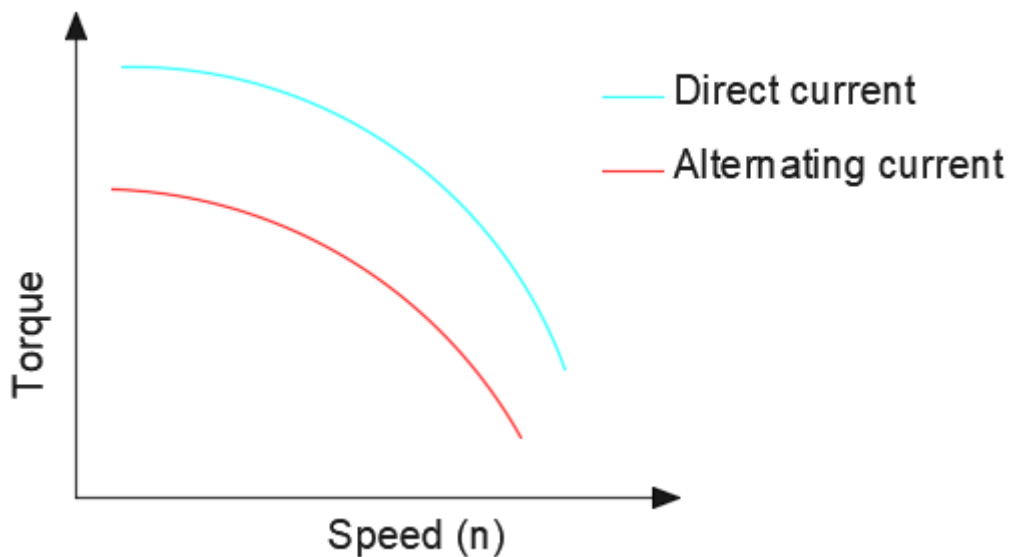
Universal motor är en motor som kan drivas av både lik- och växelström. Motorn är uppbyggd som en likströmsmotor som innehåller lindningar som bildar två stycken elektromagneter i statorn. Rotorns konstruktion är samma som en vanlig likströmsmotor, den innehåller borstar och en kommutator. När motorn drivs med direkt ström så fungerar den precis som en seriemagnetiserad likströmsmotor.

Vid växelström används bara en fas. För att motorn ska fungera med växelström måste statorns och rotorns lindningar att lamineras. De lamineras för att minimera växelströmmar som bildas vid växelström. Fasen kommer att ledas in i både stator- och rotorlindningarna. Motorn kommer att producera ett enkelriktat vridmoment som en DC-motor då lindningarna i armaturen och i statorn är seriekopplade. Polariteten i motorn ändras periodiskt då strömriktningen byter riktning samtidigt i både rotorn och statorn. Magnetfältets riktning och armaturens strömriktning byter riktning på ett sätt som gör att kraften som bildas i armaturens ledare blir detsamma, oavsett vilken riktning strömmen har.

### Egenskaper

Universalmotorn har två stycken egenskaper, beroende på om den drivs av direkt- eller växelström. Med direktström kommer motorn att producera hög vridmoment vid start men den kommer plana ut vid högre varvtal. Vid tomgång kommer motorn ha högt varvtal och vid last lågt. Vid växelström kommer motorn att ha liknande egenskaper som vid drift av direktström. Skillnaden är att vid växelström kommer vridmomentet att planas ut snabbare med högre varvtal.

En universalmotor används mest i hushållsmaskiner. Motorn används i bland annat fläktar då man vill ha högt varvtal som bidrar till att propellern snurrar snabbt. Ett annat exempel är en mixer där man vill uppnå höga varvtal [27].



**Figur 19 visar universalmotorns karaktäristik beroende om den drivs av likström eller växelström [36].**

#### Fördelar och nackdelar

Universalmotorns fördelar är att den är billig och duglig till hushålls- och handhållna maskiner. Motorn kan drivas av både växelström och likström. Motorn är självstartande och har högt vridmoment vid låga varvtal men kan även komma upp i varvtal som varierar mellan 3600 rpm till 25 000 rpm. Man kan producera motorn billigt då den innehåller få delar samt att den inte innehåller några permanentmagneter som driver upp priserna samt att motorn kan konstrueras i många storlekar. Effekten är väldigt varierande, man kan producera motorer som är 5W till 500 W, vilket bidrar till många användningsområden. Varvtalet kan man reglera enkelt med en PWM eller regulator.

Nackdelar som universalmotorn har är att de är väldigt högljudda. Ju högre varvtal desto mer låter den. Till skillnad från en DC-motor så är det svårt att byta riktningen i en universalmotor. Motorns konstruktion är även en nackdel. Om motorn är i obalans kan man riskera att förstöra motorn. Motorn kräver att något externt kyler ner den, då motorn blir väldigt varm snabbt. Då motorn kommer upp i höga varvtal samt att den innehåller borstar och kommutering kommer dem att slitas bort väldigt snabbt. Detta bidrar till att man måste underhålla motorn väldigt ofta. Vid drift kommer borstarna att producera gnistor som kan bidra till radiostörningar [28].

## 2.6. BLDC

### 2.6.1. Uppbyggnad och teori

En BrushLess Direct Current motor består av en stator och en rotor. Det finns tre olika typer av konstruktioner av motorn. Första är att rotorn omringas av stator (inrunners), andra att statorn omringas av rotorn (outrunner) och den tredje där statorn och rotorn är platta och parallella med varandra (axial).

En outrunner motor har en rotor som roterar runt stator, till skillnad från andra typer av motorer där rotorn roterar inuti statorn. Principen för att motorn fungerar är samma som andra motorer. Rotorn kan beskrivas som ett skal där permanentmagneter finns på insidan. Statorn ser ut som ett kugghjul och innehåller ett antal grupper av kopparlindningar. Antalet grupper beror på hur många poler en motor har, till exempel en 4-polig motor har 12 stycken kopparlindningar, varv 4 kopparlindningar är kopplad till en fas. Varje fas kommer att tillföras med likström som är styrda av elektronik. Beroende på rotorns position, kommer lindningarna att aktiveras som får rotorn att snurra. För att hålla reda på rotorns position används hall-element som är monterade på statorn [29].

För enkelhetens skull kan man tänka sig att ena spolen samt motsatta spolen aktiveras och blir magnetiserad med olika polariteter. Detta resulterar i att rotorn kommer bli attraherad i vissa positioner samt repellerade i andra. Under ett viss tidsintervall kommer spolarna att byta polariteter, vilket går att tänka sig gå i en cirkel.

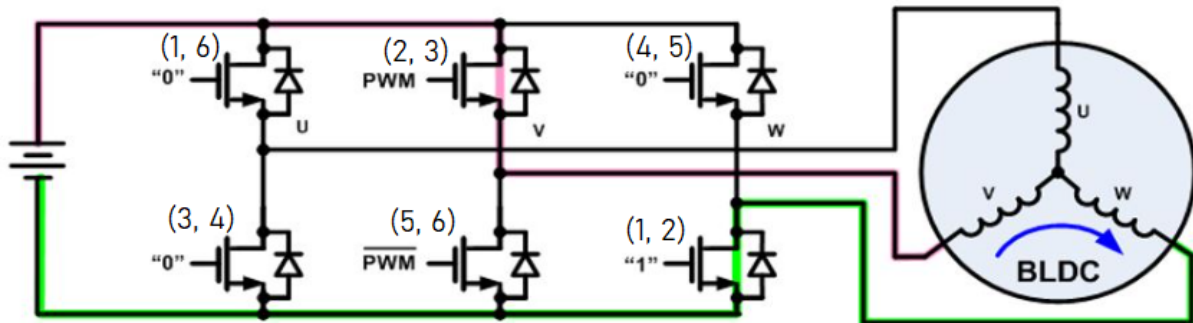
En borstlös motor brukar vara uppbyggd av två stycken magnetiska poler. Eftersöker man högre prestanda behöver man använda fler poler, däremot om man vill uppnå en högre rotationshastighet kommer man använda sig av lägre poler.

#### Elektronisk styrning

För att uppnå elektronisk styrning använder man sig av ett kretskort som en trefas "halvbrygga" med två konstanta switches. Switcharna är antingen IGBT eller MOSFET beroende på vilken spänning och ström man vill uppnå. Den lättaste metoden för att driva motorn är att använda sig av en trapetsformad kommutering som har en 120 graders fasförskjutning. I varje tidsintervall kommer ena fasen vara jordad, den andra vara driven av matningsspänningen och den sista kommer vara öppen. För att reglera varvtal samt vridmoment kommer fasen som är kopplad med matningsspänningen vara reglerad med PWM (Pulsbreddsmodulering) [30].

Tabell 5 visar 6 olika steg på hur transistorerna samarbetar för att polariteten mellan olika faserna. När steg 6 är klar så börjar stegen igen från steg 1 och så vidare.

Steg	1	2	3	4	5	6
+	U	V	V	W	W	U
-	W	W	U	U	V	V



Figur 20 Strömmen levereras till motorn via på/av-switchar ( i flesta fall MOSFET:ar), med exakt timing och pulsbredd. Varje fas (U, V, W) är kopplad till ett par transistorer, en till positiv och en till negativ. Med hjälp av stegen som visas i tabell 5. Siffrorna 1 till 6 visar stegen när transistorerna är på. I detta fall figuren visar steg 2 i tabellen. Lila linjen visar strömmen som går från källan till fas (V) igenom transistor med positiv potential medan gröna linjen visar strömmen som går från källan till fas (W) igenom transistor med negativ potential. Observera att två transistorer är på i varje steg en till positiv och en till negativ, resten av transistorerna är av [30].

### 2.6.3. Fördelar och nackdelar

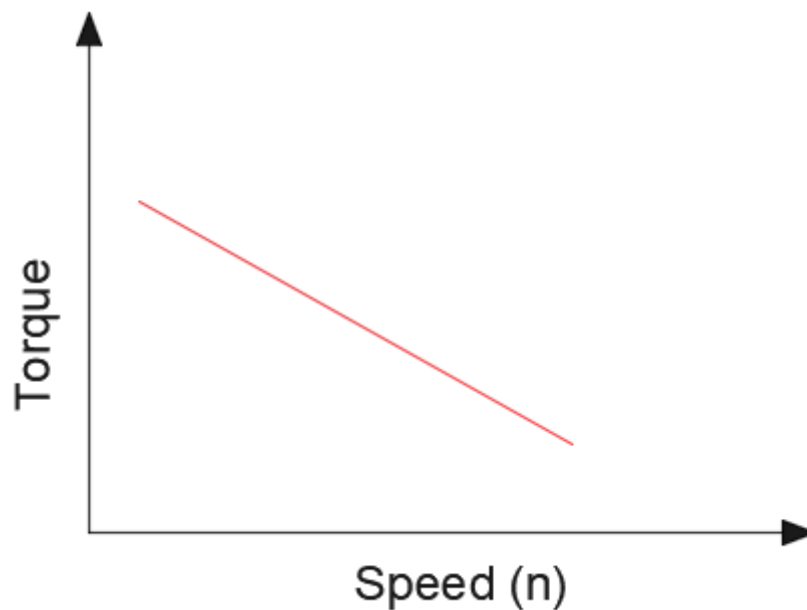
Det finns flera fördelar med att använda sig av en icke borstad motor gentemot en borstad motor. Genom att förstå borstad likströmsmotorns svagheter får man ut icke borstad motorns fördelar.

En borstad motor använder sig av borstar som har mekaniska förluster i form av friktion. Livslängden på borstade motorer är mycket lägre än en icke borstad motor då borstarna slits och måste bytas ut. Borstarna i en borstad likströmsmotor bidrar till ett begränsat varvtal då kontakten mellan rotorn och borstarna blir oregelbundna samt att slitningarna blir större [31].

I en borstlös motor kan man kontrollera när lindningarna är på och av genom elektronik. Detta medför att man får en mindre torque ripple vilket är en mekanisk pulserande energi som går in i rotorn. Torque ripple orsakar mekaniska ljud samt vibrationer, speciellt vid låga varvtal.

Nackdelen som en borstlös likströmsmotor har gentemot en borstad likströmsmotor är kostnaden. Borstlösa likströmsmotor använder sig av mer komplex elektronik vilket gör att kostnaden blir högre. En icke borstad motor är dock lättare att producera då den har färre komponenter än en borstad motor.

Bilindustrin använder flitigt sig av både borstade och borstlös likströmsmotorer. Pumparna och fläktarna idag i bilar är borstlösa då man använder dem konstant, speciellt vid längre perioder. Det hade varit kritiskt om motorerna hade gått sönder. I scenarier där livslängden samt pålitlighet behöver vara hög så används borstlösa motorer. Däremot i exempelvis motorerna för vindrutan samt elstol använder man sig av borstade då de är billiga och borstarna kommer inte att slitas ut under bilens livslängd.



*Figur 21 visar BLDC karaktäristik [37].*



## 2.7. Reluktansmotor

### 2.7.1. Uppbyggnad och teori

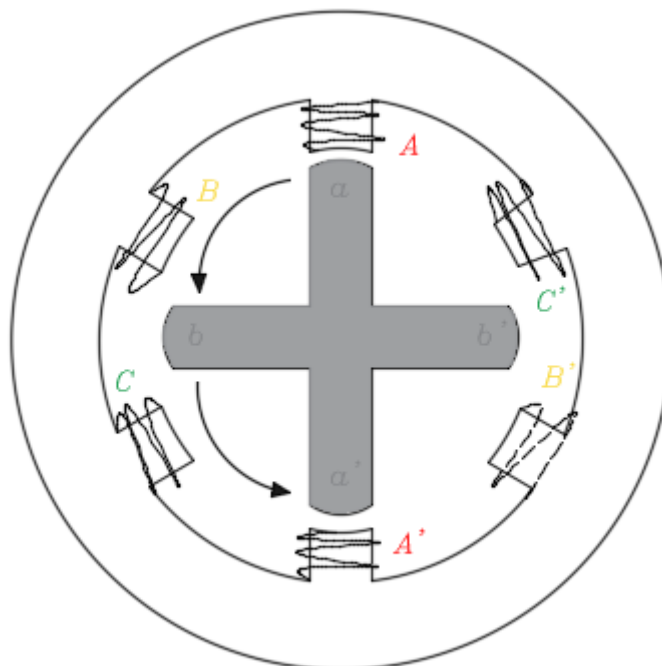
Reluktansmotorn är en enkel konfigurerad motor som består av en magnetisk stator och en rotor som roterar runt axel mellan polerna i statorn. Man kan starta en reluktansmotor med drivenhet som strömsätter motorlindningarna så att det skapas magnetiska attraktionskraften för acceleration. Principen i denna motor är samma som attraktionen mellan en permanentmagnet och järn eller magnetiska kärn. dvs. att järn kommer att röra sig för att slutföra en magnetisk flödesbana med mindre reluktans.

### 2.7.2. Rotor

Rotordelen roterar runt en axel, rotorns kropp är uppbyggd av magnetiskt kärna som har en annan antal av utpräglade poler som stator så att reluktansmoment kan skapas. Mellan rotorns utsprång och statorn finns det ett luftgap.

Luftgapet i detta fall är det magnetiska motståndet och kallas för reluktans. Reluktansen varierar med rotorns position. Reluktansen är hög eftersom luftgapet är stort och är låg eftersom luftgapet är litet.

Till exempel för en trefas reluktansmotor, matas lindningen A med strömmen, vilket i sin tur bildar en magnetiskt fält som attrahera en av rotorns utsprång. Sedan bryts strömmen i lindningen A och matas i lindningen B (nästa lindningen) vilket drar rotorns utsprånget mot lindningen B. Detta resulterar i en roterande rörelse i axeln, på samma vis utförs stegen för resten av lindningarna som leder till att motorn roterar dvs. vid sekventiellt tillslag i statorns faser flyter rotorn från en position till en annan position. Det finns olika typer av reluktansmotorer som synkron reluktansmotor och switchad reluktansmotor [1].



**Figur 22** föreställer en reluktansmotor. Rotorn uppbyggd av järn eller en magnet, den magnetiseras av polerna som finns i statorn när de matas med ström. När Pol A matas med ström så attraherar detta rotornskropp i punkten a mot polen A, i nästa steg strömmen bryts i A och matas B med ström, vilket i sin tur attraherar rotornskropp i punkten a mot B [1].

### 2.7.3. Fördelar och nackdelar

Reluktansmotor har många fördelar som att de är enkelt uppbyggda. Det finns inga permanentmagneter, borstar eller kommutator. Rotordelen innehåller ingen koppar eller aluminium. I jämförelse med AC och DC motorer har reluktansmotorer högre verkningsgrad och högre startmoment.

Nackdelarna i reluktansmotorer är att ström gentemot vridmoment är olinjär. Bytet av fasen måste vara exakta för att minimera vridmomentets rippel. Man måste kontrollera strömmen för att minimera torque ripple, ljud-och elektriska störningar [32].

## 2.8. Motorer som ASSA ABLOY använder

ASSA ABLOY använder sig av olika motortyper till sina portar. Beroende på portens vikt, material samt användningsområden måste de använda sig av lämpliga elektriska motorer. ASSA ABLOY använder sig av många olika sorters motorer.

**Tabell 6 innehåller parametrarna på motorer som ASSA ABLOY använder till sina portar. Tagen internt från ASSA ABLOY.**

Serienummer	CDM9	CDM9HD	CDM9S	BN-AC IE1 3~	BN-AC IE1 3~	BN-AC IE1 3~	AE6435-06A	GR 63x55
Motortyp	Asynkron	Asynkron	Asynkron	Asynkron	Asynkron	Asynkron	BLDC	DC
Porttyp	–	–	–	–	–	–	–	–
Poltal	4	4	2	2	4	4	14 perma magneter	2
Koppling [Δ, Y]	Δ	Δ	Δ	Δ, Y	Δ, Y	Δ, Y	–	–
Spänning [V]	230	230	230	230 Δ, 400 Y	230 Δ, 400 Y	230 Δ, 400 Y	37 V	24
Ström [A]	1,96	3,2	3	1,75	1,85	3,6	24	4,9
Frekvens [Hz]	50	50	50	50	50	50	–	–
Vridmoment [Nm]	2,52	4,2	1,92	2,6	5,1	10,2	1,9	2,57
Effekt [kW]	0,366	0,600	0,550	0,825	0,825	1,650	0,760	0,245
Effektfaktor $\cos\varphi$	0,72	0,76	0,7	0,81	0,78	0,77	1	1
Varvtalet [min <sup>-1</sup> ]	1384	1335	2747	2810	1400	1410	3815	3350 (3650)
Verkningsgrad 100% [%]	64,9	62	65,4	76,2	75,0	78,7	86,55	80 (90)
ED-tal	S3	S3	S3	S3	S3	S3	–	–
Vikt [Kg]	–	–	–	8,6	9,9	13,6	1,160	1,7

ASSA ABLOY utvecklar och producerar olika typer av portar och dörrar för både kommersiellt bruk och industriellt bruk. Inom den industriella delen utvecklas och produceras dukportar, sektionsportar samt snabbullportar. Beroende på vilka egenskaper porten ska ha så måste man välja en elektrisk motor som klarar av olika förhållanden och förspecifierade drivrutiner.

Dukportarna är designade för att klara av extrema industriella miljöer. Miljön kan vara exempelvis fuktig, dammig med höga och låga temperaturer. Porten kan även anpassas till kunden så den klarar av stora dörröppningar samt vindlast. Vissa typer av dukportar har inbyggd snabböppning vilket bidrar till en låg väntetid samt minskar energiförlust genom porten. Dukportarna använder sig av olika typer av trefas asynkronmotorer oftast styrda av frekvensomriktare. Spänningsintervallet för dessa motorer ligger mellan 230 V och 480 V där 400 V är den vanligaste motorn för standard dukportar.

Sektionsportar är de vanligaste typen av portar som ASSA ABLOY säljer. Portarna rullar upp under taket när den öppnas vilket gör att porten har en stor öppning. Beroende på vilka krav kunden har på portarna så har ASSA ABLOY utvecklat olika modeller. Sektionsportarna använder sig av varianter av en asynkronmotor. Effektintervallet är mellan 370 W och 600 W.

## 3. Metod

Examensarbetet delades in i tre olika faser. Genom ständig kommunikation med de anställda på ASSA ABLOY samt mellan författarna kunde man säkerställa att examensarbetet utfördes effektivt.

Faserna är :

- Teori och dokumentation
- Databas och produktsortering för motorer i Excel
- Förberedelse till redovisning

### 3.1. Faser

#### 3.1.1. Fas 1

I denna fas används tiden till att hitta information om elektriska motorer. För att påbörja denna fas var vi tvungna att skriva klart den initiala beskrivningen vilket gjorde det enklare att sammanställa tankarna kring hur examensarbetet skulle planeras och utföras. Efter den initiala beskrivningen slog författarna fast att dela upp den teoretiska delen. Då vi inte visste hur mycket som skulle behövas skrivas i varje delkapitel så börjades rapporten med att skriva historia och om asynkronmotor. Historia delen valdes att skrivas först för att ge en inledning och kontext till läsaren samt att det gav författarna en utökad förståelse för elektriska motorers användning. Vi valde även att påbörja skriva om asynkrona motorer då vi visste att den delen skulle bli den största i rapporten då asynkronmotorer används mest i liknande applikationer och att delen skulle bli en mall för andra typer av motorer. Asynkrondelen visades senare för vår handledare på ASSA ABLOY som godkände omfattningen av informationen kring motorn. Efteråt planerades resten av rapporten då vi visste hur de andra delarna i rapporten skulle se ut samt att vi hade en fingervisning på hur lång tid de olika delarna skulle ta att skriva. När teoridelen på rapporten blev klar påbörjades fas 2 i examensarbetet då vi kunde använda teoridelen av rapporten i excel programmet.

#### 3.1.2. Fas 2

Då ASSA ABLOY behövde ett program som underlättar sökning av olika motorer fick vi i uppgift att skapa ett Excel program. Programmet Excel valdes av ASSA ABLOY då alla anställda har förinstallerade Excel på arbetsdatorerna samt att användningen av programmet är mest populär och användarvänligt. Skapandet av programmet inleddes med att göra olika ritningar på hur programmet ska fungera och vilken information som den skulle innehålla. Efteråt ägnade vi några dagar till att söka information om hur man kan skapa ett excelprogram med sökningsfunktion som ASSA ABLOY var intresserade av. Programmet kodades och tabellen fylldes på med information om olika typer motorer som ASSA ABLOY gav till oss. Efter att programmet godkändes av vår handledare påbörjades sista faser på examensarbetet samtidigt som att dokumentationen kompletterades.

### 3.1.3. Fas 3

Efter att fas 2 slutfördes började författarna att förbereda sig till presentationen av examensarbetet. Examensarbetet presenteras till ASSA ABLOY samt Lunds tekniska högskola. Under denna perioden gjordes Powerpointen, affisch samt opponeringen på ett annat examensarbete.

### 3.1.4. Kommunikation

Författarna har haft periodiska samtal med handledaren samt de anställda på ASSA ABLOY. En gång i veckan hade handledaren och författarna möte där man diskuterade examensarbetets framgångar samt motgångar. Vid behov fick examensarbetarna extra hjälp av de anställda på ASSA ABLOY. Mötena skedde både online genom Teams samt fysiskt på plats. Då författarna tyckte att kommunikationen med ASSA ABLOY var viktigt så arbetade författarna på plats hos företaget. Detta hjälpte oss med att få fram kvaliteten på examensarbetet som ASSA ABLOY vill ha samt att vi fick en bra insyn på hur arbetslivet ser ut för ingenjörer.

Coronapandemin gjorde att i början av examensarbetet kunde vi inte åka in till kontoret mer än en gång per vecka. Under denna perioden valde författarna att jobba hemifrån samt på Campus för att följa restriktionerna.

Vi har valt att arbeta på detta sätt då vi insåg att examensarbetet krävde mycket tid. Tiden var väldigt begränsad på grund av all information som skulle samlas till rapporten. Att göra en rimlig planering för varje vecka samt att hitta bra källor var en prioritering. Detta bidrog till att vi kunde sammanställa rapporten och Excel programmet under en begränsad tid.

Inhämtning av information, parametrar och grafer togs mestadels från Lunds tekniska högskola och internet. För att säkerhetsställa källornas trovärdighet så jämfördes de med andra källor samt att vi frågade de anställda på ASSA ABLOY om källorna var trovärdiga. Källorna på internet togs från pålitliga sidor som skrevs på engelska då trovärdigheten att faktan stämmer är högre. Tabeller och grafer togs från olika datablad som innehåller befintliga värden från bland annat olika företag som till exempel Bonfiglioli som konstruerar och producerar elektriska motorer. Motorerna som ASSA ABLOY använder i sina portar fick vi fram från en inköpare på företagen som berättade för oss om vilka motorer som används i de olika typerna av portar. ASSA ABLOY har gett oss tillgång till sin databas som bland annat innehåller datablad till deras motorer.

## 4. Resultat

Ett av kraven som ASSA ABLOY hade på examensarbetet var att rapporten skulle innehålla information, parametrar samt ekvationer för specifika elektriska motorer. Denna del i examensarbetet kommer att läggas upp hos ASSA ABLOY i deras databas där de anställda ska kunna ta del av informationen. Teoridelens parametrar används även i Excel program för att ingenjörerna på företaget snabbt ska kunna få fram information om olika motorer som de senare kan fördjupa sig i genom rapporten.

ASSA ABLOY är även i behov av ett program som ska på ett enkelt och smidigt sätt få fram information och parametrar till olika typer av motorer. Programmet ska användas till framtida projekt för att underlätta valet av motortyp till olika portar.

ASSA ABLOY ville att programmet skulle göras i Excel då alla anställda på företaget har programmet förinstallerat på sina arbetsdatorer. För att skapa programmet användes SQL-query och Visual Basic Application (VBA) via Excel. Programmet består av en databas och en programdel som samarbetar med varandra. Databasen i programmet kallas för "DataBase" och programmet för "Program"

Databasen består av en tabell som innehåller 14 kolumner med olika specifikationer och parametrar till de olika motortyperna. Motortyperna som används i programmet är nuvarande motorer som ASSA ABLOY använder i sina portar. Databasen innehåller en sökfunktion i form av en sökningsknapp som tillåter användaren att söka upp specifika parametrar och därefter få fram resultat med de önskade kraven. Trycker man på sökningsknappen kommer man fram till programdelen i Excel dokumentet. Programdelen innehåller knapparna "Click here to search" och "Add new motor". "Add new motor" tillåter användaren att lägga till nya motorer och deras parametrar i DataBase tabellen. "Click here to search" öppnar upp ett nytt fönster där användaren kan söka upp olika parametrar med maximum- och minimumvärde i DataBase tabellen. Fönstret är uppbyggd av integer och string. Söker man med integer, exempelvis vridmoment så kommer ett fönster öppnas med tre stycken rutor. Första rutan innehåller alla parametrar som finns i databasen, till exempel vridmoment, effekt, effektfaktor och så vidare. I den rutan kan man även söka med string beroende på vilken typ av sökning man gör, dvs. att man kan skriva in till exempel "BLDC" och få fram alla BLDC motorer och deras parametrar.

Den andra och tredje rutan är minimum- och maximumvärdet på parametrarna. ASSA ABLOY hade som önskemål att man ska kunna sätta in ett intervall på en typ av parameter och få fram vilka motorer som uppfyller kraven.

Databasen innehåller för tillfället en tabell som är 15x9 med olika motortyper och parametrar som ASSA ABLOY använder i sina portar. Excelprogrammet tillåter användaren

att lägga till fler motortyper samt parametrar till databasen genom funktionen "Add a new motor". I framtiden kan ASSA ABLOY använda denna funktionen till att göra en stor databas till sina framtida projekt, som kan innehålla både nuvarande och framtida motortyper. Ett förslag till framtiden är att man lägger till fler viktiga parametrar som underlättar valet av elektriska motorer till portar. Dessa hade kunnat vara till exempel isolationsklass, tillverkare, ljudnivå samt priset för motortypen.

Parametrarna som används i databasen är från motorerna som ASSA ABLOY använder och är följande:

- Serienumret på motorn
- Motortyp
- Vilken port som motorn används i
- Poltal
- Spänning vid  $\Delta$ -koppling
- Spänning vid Y-koppling
- Ström
- Effektfaktorn
- Frekvens
- Effekt
- Vridmoment
- Varvtal
- Verkningsgrad
- Vikt
- ED-tal

Dessa parametrarna valdes av anledningen till att de är väsentliga för valet av en elektrisk motor till olika porttyper. Faktorerna som har störst påverkan är porttyp, effekt, vridmoment och vikt. Beroende på porttyp måste man välja en motor som har tillräckligt hög effekt och vridmoment att lyfta upp porten men samtidigt måste den ha en låg vikt för att inte påverka portens vikt.

Fördelarna med databasen är att man kan snabbt och smidigt söka upp samt lägga till nya motorer och parametrar på ett enkelt sätt genom att använda de inbyggda funktionerna. Nästa fördel är att programmet är gjord i Excel vilket innebär för ASSA ABLOY att den blir lättillgänglig då alla anställda har Excel på sina arbetsdatorer. Designen på programmet är även användarvänligt då det är väldigt enkelt och lätt att hantera. Programmet tillåter användaren att jämföra olika motorer på ett smidigt sätt då man kan se hela tabellen med parametrar eller att man använder sig av sökningsfunktionen för att jämföra en viss parameter. Om användaren är till exempel intresserad av motorer som ligger i effektområdet mellan 0,6 kW och 0,8 kW kan man enkelt söka intervallet som kommer ge resultatet på alla möjliga motorer och deras andra parametrar som uppfyller användarens krav.

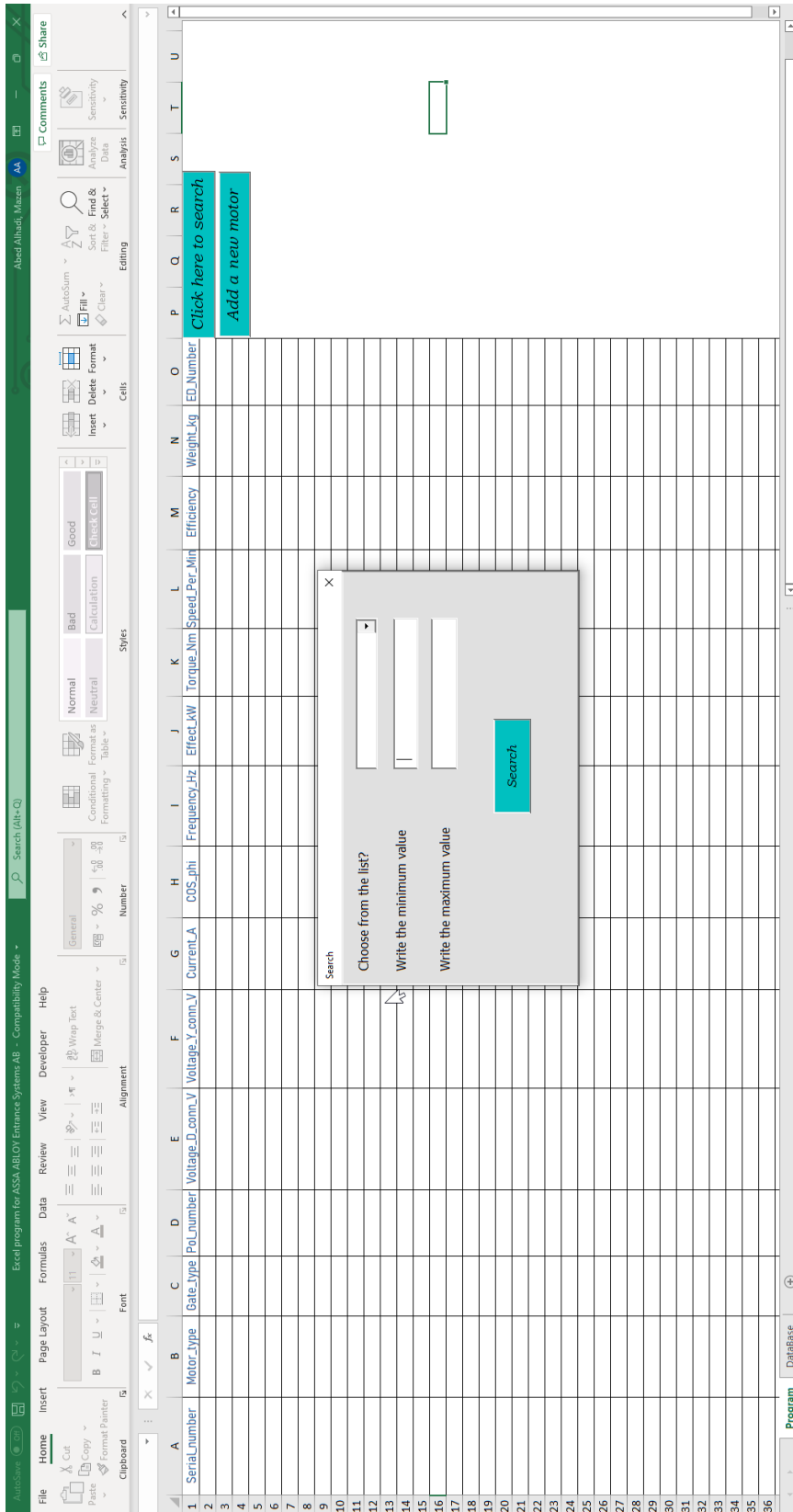


Nackdelarna med databasen är att man måste fylla på tabellen manuellt vilket leder till en högre risk av att man lägger in fel data i databasen.

Figureerna 23, 24, 25, 26, 27 visar Excel programmet och databasen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Serial number	Motor type	Data type	PbL number	Voltage D conn. V	Voltage Y conn. V	Current A	COS phi	Frequency Hz	Effect kW	Torque Nm	Speed Per Min	Efficiency	Weight kg	ED Number
1	CDM9	Asynkron	High speed	4	230	0	1,96	0,72	50	0,366	2,52	1384	64,9	10	S3
2	CDM9 HD	Asynkron	High speed	4	230	0	3,2	0,76	50	0,6	4,2	1335	62	15	S3
3	CDM9 S	Asynkron	High speed	2	230	0	3	0,7	50	0,55	1,92	2747	65,4	30	S3
4	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	2	230	400	1,75	0,81	50	0,825	2,6	2810	76,2	8,6	S3
5	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	1,85	0,78	50	0,825	5,1	1400	75	9,9	S3
6	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	3,6	0,77	50	1,65	10,2	1410	78,7	13,6	S3
7	AEG35-06A (OLLE)	BLDC	High speed	4	37	0	24	1	50	0,76	1,9	3815	86,55	1,16	S3
8	GR 63-55	DC	High speed	2	24	0	4,9	1	50	0,245	2,57	3350	90	1,7	S3
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															

Figur 23 visar tabellen med de olika motortyperna samt parametrar som används i databasen.



**Figur 24** visar hur programmet ser ut innan sökningen

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a search dialog box open. The spreadsheet has columns labeled A through U and rows numbered 1 to 36. The columns contain the following headers: A: Serial\_number, B: Motor\_type, C: Gate\_type, D: Pol\_number, E: Voltage\_D\_conn\_V, F: Voltage\_Y\_conn\_V, G: Current\_A, H: COS\_phi, I: Frequency\_Hz, J: Effect\_KW, K: Torque\_Nm, L: Speed\_Per\_Min, M: Efficiency, N: Weight\_kg, O: ED\_Number, P: U, Q: R, S: T, U: U.

The search dialog box is titled 'Search' and contains the following text and list:

- Choose from the list?
- Write the minimum value
- Write the maximum value
- Search
- Serial\_number
- Motor\_type
- Gate\_type
- Pol\_number
- Voltage\_D\_conn\_V
- Voltage\_Y\_conn\_V
- Current\_A
- COS\_phi

A red box highlights the search input field in the dialog box. In the spreadsheet, a red box highlights the cell in column P, row 1, containing the text 'Click here to search'. Another red box highlights the cell in column Q, row 1, containing the text 'Add a new motor'.

Figur 25 visar exempel på vilka parametrar som användaren kan söka på.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	SerialNumber	Motor_type	Gate_type	PoL_number	Voltage_D_conn_V	Voltage_Y_conn_V	CurrentLA	COs_phi	Frequency_Hz	EffectKW	Torque_Nm	Speed_Per_Min	Efficiency	Weight_kg	ED_Number						
2	CDM9	Asynkron	High speed	4	230	0	1.96	0.72	50	0.366	2.52	1384	64.9	10	S3						
3	CDM9 HD	Asynkron	High speed	4	230	0	3.2	0.76	50	0.6	4.2	1335	62	15	S3						
4	CDM9 S	Asynkron	High speed	2	230	0	3	0.7	50	0.55	1.92	2747	0.654	30	S3						
5	BN-AC IET 3 fas	Asynkron	High speed	2	230	400	1.75	0.81	50	0.825	2.6	2810	76.2	8.6	S3						
6	BN-AC IET 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	1.85	0.825	50	0.825	5.1	1400	75	9.9	S3						
7	BN-AC IET 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	3.6	0.77	50	1.65	10.2	1410	78.7	13.6	S3						
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					

Figur 26 visar resultaten som användaren kan få. I högra hörnet finns knapparna "Click here to search" samt "Add a new motor".

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of motor parameters. A search dialog box is open over the table, allowing the user to search for a specific motor type. The dialog box contains a search input field, a dropdown menu for 'Motor\_type' (currently showing 'Asynkron'), and a 'Search!' button. The spreadsheet data is as follows:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	SerialNumber	Motor_Type	Gate_Type	PoLNumber	Voltage_D_comm_V	Voltage_Y_comm_V	Current_A	COS_phi	Frequency_Hz	Effect_kW	Torque_Nm	Speed_Per_Min	Efficiency	Weight_kg	ED_Number						
2	CDM9	Asynkron	High speed	4	230	0	1.96	0.72	50	0.366	2.52	1384	64.9	10	S3						
3	CDM9 HD	Asynkron	High speed	4	230	0	3.2	0.76	50	0.6	4.2	1335	62	15	S3						
4	CDM9 S	Asynkron	High speed	2	230	0	3	0.7	50	0.55	1.92	2747	0.654	30	S3						
5	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	2	230	400	1.75	0.81	50	0.825	2.6	2810	76.2	8.6	S3						
6	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	1.85	0.77	50	0.825	5.1	1400	75	9.9	S3						
7	BN-AC IE1 3 fas	Asynkron	High speed	4	230	400	3.6	0.77	50	1.65	10.2	1410	78.7	13.6	S3						
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					

Figur 27 visar ett exempel på hur användaren kan nyttja strings till att söka upp parametrar för en vald motortyp.

## 5. Lösningförslag och slutsats

Examensarbetet i sin helhet uppfyller kraven som ASSA ABLOY har. Målet med examensarbetet är att ge företaget en rapport och ett program som kompletterar informationen som finns i teoridelen. Arbetet kan ses som en introduktion samt vägledning till elektriska motorer för både nya och erfarna anställda på företaget.

Lösningförslag som finns är att man ändrar på informationen som finns i tabellerna i programmet. Nuvarande program innehåller information som ASSA ABLOY använder i sina portar men ett förslag hade varit att man använder sig av parametrar som är mer allmänna för olika typer av motorer. Med allmänna parametrar menas att man söker upp datablad bland de ledande tillverkarna av olika elektriska motorer där man tar ett medelvärde på de olika parametrarna. Ett exempel är att man söker upp vridmoment för olika BLDC motorer och tar medelvärdet på parametrarna, vilket bidrar till att man får en indikation på ungefärlig vridmoment som en BLDC motor producerar. Detta hade bidragit till att programmet kan användas till framtida projekt där man vill använda sig av motorer som ASSA ABLOY inte redan köper in.

## 6. Källförteckning

- [1] Olsson Gustaf, Petersson, Alaküla Mats, Samuelsson Olof, Svensson Tore.(2000) EMS: Elmaskinsystem. IEA/LTH. (Hämtad 24/1 2022)
- [2] [https://sv.hrvwiki.net/wiki/Michael\\_Faraday](https://sv.hrvwiki.net/wiki/Michael_Faraday) (Hämtad 24/1 2022)
- [3] <https://varldenshistoria.se/teknik/maskiner/vem-uppfann-elmotorn> (Hämtad 25/1 2022)
- [4] [Gramme machine - Wikipedia](#)  
[https://www.google.com/url?q=https://en.wikipedia.org/wiki/Gramme\\_machine&sa=D&source=docs&ust=1648553961524984&usq=AOvVaw1L-YldTRgSSZNFqVpbko7d](https://www.google.com/url?q=https://en.wikipedia.org/wiki/Gramme_machine&sa=D&source=docs&ust=1648553961524984&usq=AOvVaw1L-YldTRgSSZNFqVpbko7d) (Hämtad 25/1 2022)
- [5] [Electric Motor: Construction, Working, Types and Applications \(elprocus.com\)](#) (Hämtad 3/2 2022)
- [6] <https://www.electricityforum.com/what-is-a-watt> (Hämtad 4/2 2022)
- [7] <https://westaroze.se/vad-ar-egentligen-en-hastkraft/> (Hämtad 4/2 2022)
- [8] [Torque \(article\) | Khan Academy](#) (Hämtad 6/2 2022)
- [9] [Hur fungerar en elmotor? - Experten \(classicmotor.se\)](#)(Hämtad 6/2 2022)
- [10]<https://www.lrf.se/globalassets/dokument/foretagande/vektyg/mallar/handbok-om-energieffektivisering/del-3-elmotorer-och-elektricitet.pdf> (Hämtad 6/2 2022)
- [11] [Välj en högeffektiv elmotor - PDF Free Download \(docplayer.se\)](#) (Hämtad 8/2 2022)
- [12]<https://www.yumpu.com/sv/document/read/32971851/bestamning-av-verkningsgrad-och-faruster-i-en-asynkronmaskin-5> (Hämtad 8/2 2022)
- [13] [Varv per minut – Wikipedia](#) (Hämtad 10/2 2022)
- [14] [1 Inledning \(diva-portal.org\)](#) (Hämtad 11/2 2022)
- [15] [Vad är en frekvensomriktare? | Danfoss](#) (Hämtad 13/2 2022)
- [16] [Elmotorstyrning Kompendium Frekvensomriktare Paul Wargenstahm - PDF Free Download \(docplayer.se\)](#) (Hämtad 16/2 2022)
- [17] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/duty-cycle> (Hämtad 18/2 2022)
- [18] <https://www.bevi.dk/bevi/kunskapsbanken/allman-teknisk-information-elmotorer> (Hämtad 19/2 2022)
- [19]<https://www.tutorialspoint.com/difference-between-slip-ring-and-squirrel-cage-induction-motor> (Hämtad 25/2 2022)
- [20] <https://www.electrical4u.com/induction-motor-types-of-induction-motor/>(Hämtad 27/2 2022)
- [21] Arne Englund och Rune Sundin, Begränsad elbehörighet faktabok ISBN 91-634-1632-8 (Hämtad 1/3 2022)
- [22] <https://instrumentationtools.com/advantag-es-disadvantages-induction-motor/> (Hämtad 2/3 2022)
- [23] <https://www.britannica.com/technology/electric-motor/Permanent-magnet-motors> (Hämtad 7/3 2022)
- [24] <https://instrumentationtools.com/advantages-disadvantages-synchronous-motors/> (Hämtad 10/3 2022)
- [25] <https://www.maxongroup.co.uk/maxon/view/news/Why-do-DC-motors-have-brushes> (Hämtad 11/3 2022)
- [26] <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-the-commutator-in-a-dc-motor/> (Hämtad 12/3 2022)
- [27] <https://www.electriceasy.com/2014/02/universal-motor-construction-working.html> (Hämtad 15/3 2022)



- [28] <https://electricityshock.com/advantages-and-disadvantages-of-universal-motor/> (Hämtad 16/3 2022)
- [29] [https://www.electro-mobile.se/wp-content/uploads/2017/02/Borstad-eller-borstl%C3%B6s-motor\\_a.pdf](https://www.electro-mobile.se/wp-content/uploads/2017/02/Borstad-eller-borstl%C3%B6s-motor_a.pdf) (Hämtad 17/3 2022)
- [30] <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors> (Hämtad 17/3 2022)
- [31] <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1916.pdf> (Hämtad 18/3 2022)
- [32] [Reluctance Motor | AC Motors | Electronics Textbook \(allaboutcircuits.com\)](#) (Hämtad 20/3 2022)
- [33] [https://www.iea.lth.se/eief10/lectures/F4\\_%20LM.pdf](https://www.iea.lth.se/eief10/lectures/F4_%20LM.pdf) (Hämtad 22/5 2022)
- [34] [Torque Speed Characteristics of Synchronous Motor \(eeeguide.com\)](#) ( hämtad 22/5 2022)
- [35] <https://www.electricaleasy.com/2014/07/characteristics-of-dc-motors.html> (hämtad 22/5 2022)
- [36] <https://www.electricaleasy.com/2014/02/universal-motor-construction-working.html?fbclid=IwAR3T2GT5BhoVOFUOFAU0dzPYtEcxa5qp-qfw-LrcJ7nnohRtQCur1alvbD0> (hämtad 22/5 2022)
- [37] <http://www.topband-e.com/en/PdfShow.aspx?pdf=file/2021-03-26/1b22cb6b-5d76-46c5-b2fa-07d5ad334bcb.pdf> (hämtad 22/5 2022)
- [38] [https://www.iea.lth.se/eief10/lectures/F6\\_AM\(I\)%20och%20mjukstartaren.pdf](https://www.iea.lth.se/eief10/lectures/F6_AM(I)%20och%20mjukstartaren.pdf) (hämtad 30/6 2022)