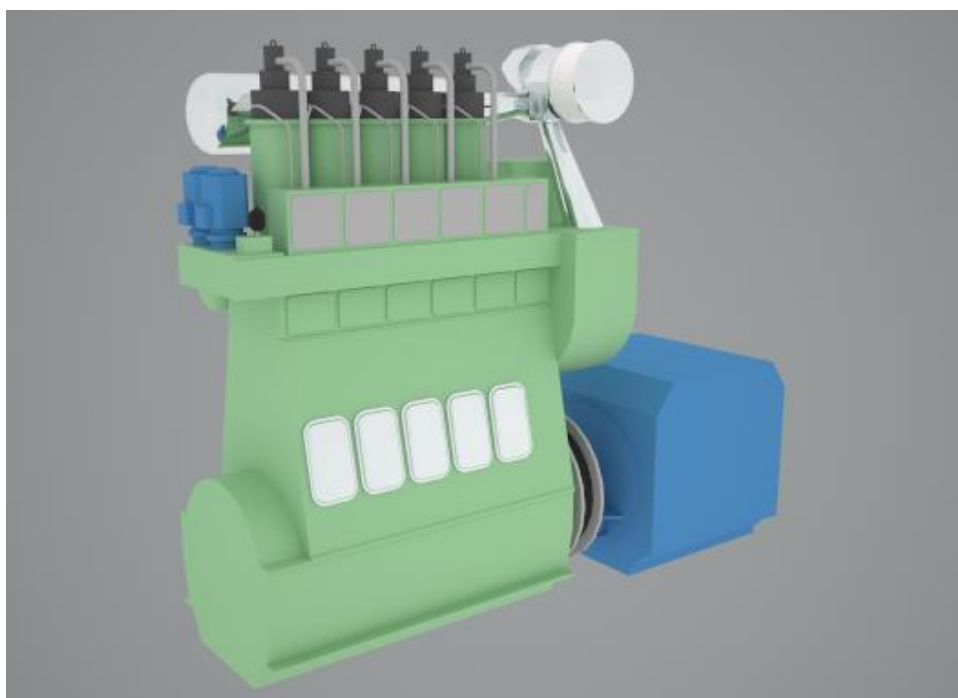




Studie kring dieselelektrisk framdrivning av fartyg

Undersökning av alternativa dieselgeneratorer

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Christian Gustavsson

Anders Göransson

Rapport Nr. Si-13/100

Studie kring dieselelektrisk framdrivning av fartyg

Undersökning av alternativa dieselgeneratorer

CHRISTIAN GUSTAVSSON
ANDERS GÖRANSSON

Institutionen för Sjöfart och Marin Teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013

Studie kring dielelektrisk framdrivning av fartyg
Undersökning av alternativa dieselgeneratorer

A study about diesel electric propulsion on ships
Examination of alternative diesel generators

CHRISTIAN GUSTAVSSON
ANDERS GÖRANSSON

© CHRISTIAN GUSTAVSSON, [2013].
© ANDERS GÖRANSSON, [2013].

Rapport Nr. Si-13/100
Institutionen för Sjöfart och Marin Teknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Försättsblad:
[Modell av en tvärstycksmotor ansluten till en generator (egen bild)]

Tryckt av Chalmers
Göteborg, Sverige 2013

A study about diesel electric propulsion on ships

Examination of alternative diesel generators

CHRISTIAN GUSTAVSSON

ANDERS GÖRANSSON

Department of Shipping and Marine Technology

Chalmers University of Technology

SUMMARY

One option for electricity generation onboard diesel electric vessels could be to use two stroke crosshead engines. These engines have the advantage that they have lower specific fuel oil consumption than the four stroke engines that are currently used in diesel electric vessels. But crosshead engines have also some disadvantages such as larger size and weight. The crosshead engine operates at a lower speed than four stroke engines which also puts different demands on the generator. The generator needed to provide the right frequency at this low speed require a large diameter and may not be suitable for installation on ships. This report shows an alternative electric power system that uses a smaller generator and still meets the low speed. This alternative electric power system consists of a generator that is built for a higher speed than the crosshead engine delivers. The generator delivers an AC voltage at a lower frequency than the consumers on board requires. This voltage is rectified immediately after the generator before it is distributed to the consumers. At each consumer there is a frequency converter that converts the DC voltage into an AC voltage with the correct frequency.

To achieve the results, three different methods have been used. First, a literature study was carried out where the relevant information has been sought in scientific databases and books. This has been the basis for the report. When only literature was not sufficient to provide answers to questions raised during the preparation of the report, there were also requirements to perform interviews and an experiment.

This report is written in Swedish.

Keywords: Diesel electric, diesel generator, ship, vessel, crosshead engine.

SAMMANFATTNING

Ett alternativ för elgenereringen ombord på dieselelektriska fartyg skulle kunna vara att använda tvåtakts tvärstycksmotorer. Dessa motorer har fördelen att de har en lägre specifik bränsleförbrukning än de fyrtaktsmotorer som idag används på dieselelektriska fartyg. Men tvärstycksmotorerna har även en del nackdelar såsom större storlek och högre vikt. Att tvärstycksmotorn arbetar vid ett lägre varvtal än fyrtaktsmotorerna ställer även andra krav på generatoren. En generator som ska klara att lämna rätt frekvens vid detta låga varvtal har stor diameter och kanske inte lämpar sig att installeras på fartyg. Denna rapport visar på ett alternativt elsystem för att kunna använda en mindre generator och ändå tillgodose det låga varvtalet. Detta alternativa elsystem består av en generator som är byggd för ett högre varvtal än det som tvärstycksmotorn levererar. Ut från generatoren fås en växelspanning med lägre frekvens än vad förbrukarna ombord kräver. Växelspanningen likriktas direkt efter generatoren innan den distribueras ut till förbrukarna. Vid varje förbrukare sitter sedan en frekvensomformare som gör om likspänningen till en växelspanning med rätt frekvens.

För att komma fram till resultatet har tre olika metoder använts. Först och främst har en litteraturstudie genomförts där relevant information har eftersökts i vetenskapliga databaser och böcker. Detta har utgjort grunden för rapporten. Då enbart litteraturstudien inte räckt till för att ge svar på frågor som uppkommit under arbetet med rapporten, har även intervjuer och experiment utförts.

Nyckelord: Dieselelektrisk, dieselgenerator, fartyg, tvärstycksmotor.

FÖRORD

Eftersom dieselelektrisk framdrivning av fartyg blir allt vanligare, trots att det har sämre verkningsgrad än ett traditionellt mekaniskt system, ansåg vi att det skulle vara intressant att undersöka möjligheten att höja verkningsgraden med hjälp av alternativa dieselmotorer. Det självklara alternativet var tvåtakts tvärstycksmotorn eftersom denna är känd för sin låga specifika bränsleförbrukning. Däremot fanns några uppenbara hinder för att direkt kunna dra en slutsats att den skulle fungera, vilket innebar att vi behövde göra en fördjupning för att nå resultat.

Denna rapport hade inte nått ett trovärdigt resultat utan hjälp från Thomas Stenhede på Wärtsilä och Lennart Widen på institutionen för Signaler och system hos Chalmers. Thomas hjälpte oss med information om tvärstycksmotorns funktion och bidrog även med andra idéer kring ett alternativt elektriskt system som möjligtvis är bättre anpassat för tvärstycksmotorn. Dessa idéer kring elsystemet testades sedan i liten skala med hjälp från Lennart på skolan. I en laborationssal utfördes några experiment, som simulerade ett verkligt system, med goda resultat. Både Thomas och Lennart ska ha ett stort tack för att tagit sig tid och engagerat sig i vårt examensarbete.

Även vår handledare Johan Eliasson ska ha tack för sitt intresse i vårt rapport. Det har under hela examensarbetets tid uppnåtts en mycket god kommunikation med många möten där rapportens utveckling kontinuerligt uppdaterats och diskuterats.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SUMMARY	I
SAMMANFATTNING	II
FÖRORD	III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	IV
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte, frågeställning och avgränsningar	1
1.2 Metod	2
1.2.1 Litteraturstudie	2
1.2.2 Intervju	2
1.2.3 Experiment	2
1.2.4 Reliabilitet, validitet och triangulering	2
2 BAKGRUND	4
2.1 Funktionsbeskrivning	4
2.2 Historia	6
2.3 Dieselgeneratorm	8
2.4 Motortyper	12
2.5 Motorstyrningar	14
2.6 Propellermotorer	16
2.7 Fördelar och nackdelar med dieselelektrisk framdrivning	18
2.7.1 Platsbesparing	18
2.7.2 Förluster i den elektriska utrustningen	18
2.7.3 Varierande belastning och miljö	19
2.7.4 Redundans och underhåll	19
2.7.5 Manöverförmåga	20
2.7.6 Installationskostnad	20
2.8 Fartygstyper	21
3 RESULTAT	22
3.1 Bäst verkningsgrad	22
3.2 Utrymmeskrav	22
3.3 Underhållsbehov	22
3.4 Jämförelser mellan olika dieselmotorer	23
3.5 Generatorval för tvärstyckmotorn	26
4 DISKUSSION	29
4.1 Metoddiskussion	29
4.2 Resultatdiskussion	30
5 SLUTSATS	32
REFERENSLISTA	34
BILAGOR	35
Bilaga 1	35
Bilaga 2	36
Bilaga 3	37
Bilaga 4	38
Bilaga 5	39

1 INLEDNING

Dieselelektriska framdrivningssystem blir allt vanligare och används idag på en rad olika typer av fartyg. Det är särskilt populärt på stora kryssningsfartyg där det närmast blivit en konstruktionsstandard. Även bland ankarhanterare och tankfartyg är dieselelektriska framdrivningssystem frekvent använda (Ådnanes, 2003).

Dieselelektriska framdrivningssystem har många fördelar gentemot konventionella mekaniska system. Bland fördelarna kan nämnas att redundansen blir bättre samt att en bättre manöverförmåga erhålls då dieselelektriskt framdrivningssystem används tillsammans med en roderpropeller. Ännu en fördel är att maskinrummet oftast tar mindre plats eftersom dieselmotorerna inte behöver vara i linje med propelleraxeln. Däremot har det dieselelektriska framdrivningssystemet överlag lägre total verkningsgrad än konventionella mekaniska framdrivningssystem vid full belastning (Ådnanes, 2003).

Enligt Ådnanes (2003) är medel- till högvarviga fyrtakts dieselmotorer det vanligaste motorvalet vid dieselelektrisk framdrivning av fartyg. Vid stora effektkrav leder detta ofta till att motorer med många cylindrar i V-format används (Koehler och Oehlers, 1998). Ett alternativ till fyrtaktarna för elgenerering, skulle kunna vara att använda tvåtakts tvärstycksmotorer. Dessa motorer har en lägre specifik bränsleförbrukning (Kuiken, 2008), vilket kan leda till en högre verkningsgrad.

1.1 Syfte, frågeställning och avgränsningar

Syftet med studien är att undersöka och analysera om tvåtakts tvärstycksmotorer är möjliga att använda för elgenerering ombord på dieselelektriska fartyg. Om det är möjligt, skulle de då kunna höja den totala verkningsgraden på det dieselelektriska framdrivningssystemet och vilka för- och nackdelar har de gentemot motorerna som idag används?

Jämförelsen med olika dieselmotorer görs endast på större fartyg som redan idag har dieselelektrisk framdrivning, detta eftersom tvärstycksmotorer tar upp stor plats. Vi avgränsar oss till att endast göra kostnadsberäkningar kring bränsleförbrukningen. Investeringskostnad och underhållskostnad analyseras inte i denna rapport eftersom dessa uppgifter är svåra att få tag på och är väldigt specifika från fall till fall.

1.2 Metod

I detta avsnitt presenteras de metoder som har använts för att genomföra rapporten. För att beskriva de olika metoderna har boken *"Att genomföra examensarbete"* (Höst et. al, 2006) använts.

1.2.1 Litteraturstudie

För att få en fördjupad insikt i ämnets konstruktion och funktion genomfördes en kvalitativ litteraturstudie. Detta innebär att litteraturen som eftersökts ska kunna förklara och beskriva ämnet på ett detaljerat sätt (Höst et. al, 2006). Litteratursökningar gjordes i vetenskapliga databaser och böcker för att finna litteratur som är relevant till rapportens frågeställning. Materialet som eftersökts har önskats uppfylla information om såväl de mekaniska som de elektriska delarna. Texterna har sedan granskats för att säkerställa att källorna som nämns i rapporten har en vetenskaplig grund.

1.2.2 Intervju

För att få tillverkarnas syn på frågeställningen samt för att få mer information rörande tvärstycksmotorer och dieselelektrisk framdrivning av fartyg har två intervjuer gjorts med Thomas Stenhede från motortillverkaren Wärtsilä. Informationen från intervjuerna sammanställdes i rapporten för att sedan godkännas av Thomas.

Den första intervjun var en halvstyrd muntlig intervju som gjordes cirka 6 veckor efter att arbetet med rapporten påbörjades. Syftet med intervjun var främst att få höra vad en tillverkare ser för möjligheter och problem med frågeställningen. Den andra intervjun var en styrd telefonintervju som genomfördes i samband med att resultatkapitlet började sammanställas. Skillnaden mellan en halvstyrd och en styrd intervju, är att i den styrda intervjun är syftet att i tur och ordning få svar på de frågor som ställs, medan den halvstyrda intervjun lämnar mer utrymme för diskussion kring frågorna och ämnet (Höst et. al, 2006).

1.2.3 Experiment

För att undersöka hur en generator beter sig vid olika driftsfall genomfördes ett experiment med en generatorrigg i Chalmers Lindholmens laborationssalar. Mätvärden noterades vid olika driftsfall och utifrån dessa kunde stora delar av resultatkapitlet sammanställas.

1.2.4 Reliabilitet, validitet och triangulering

Reliabilitet är ett mått på hur hög tillförlitligheten är hos den insamlade informationen. Validitet beskriver hur väl den insamlade informationen stämmer överens med det som avses att undersöka (Höst et. al, 2006).

Rapporten anses ha en god validitet eftersom triangulering har tillämpats, då flera olika metoder har använts för att studera frågeställningen (Höst et. al, 2006). Reliabiliteten i rapporten är överlag god men är i vissa fall tvivelaktig, då information är hämtad från tillverkare och kan därmed vara

subjektiv. Vissa vetenskapliga artiklar har dessutom ett gammalt publiceringsdatum och det kan ifrågasättas om informationen stämmer fullt ut i dagsläget.

Validiteten hos litteraturstudien anses överlag vara hög även om frågeställningen inte alltid kan besvaras direkt, utan måste studeras del för del. Dock är varje del väl dokumenterad och behöver enbart sättas in i ett perspektiv där de kan sammanfogas. Experimentet har hög validitet då detta direkt simulerar ett realistiskt resultat i samband med frågeställningen. Även intervjuerna har en hög validitet eftersom dessa gjordes hos en tillverkare som är verksam inom frågeställningens område.

2 BAKGRUND

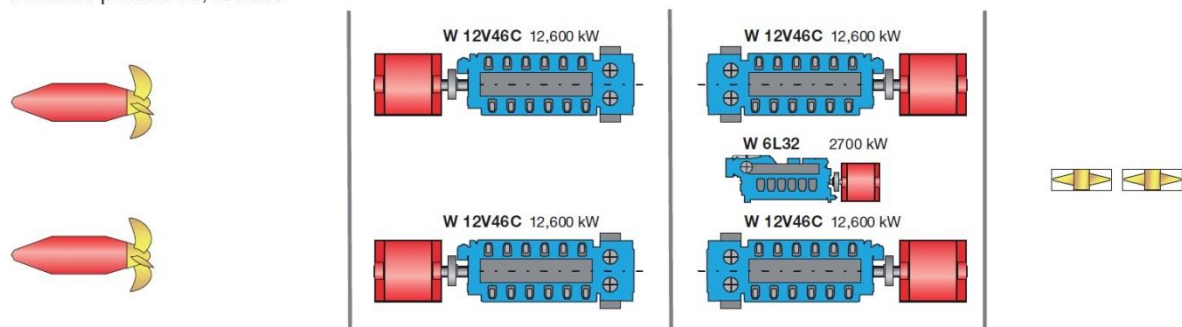
I detta kapitel kommer funktionen av dieselelektriska framdrivningssystem på fartyg förklaras, vilka komponenter som ingår och vilken funktion de har. Det kommer även redogöras för utvecklingen av dieselelektriska framdrivningssystem på fartyg samt vilka fördelar och nackdelar som erhålls av ett sådant system.

2.1 Funktionsbeskrivning

Det som i huvudsak skiljer ett dieselelektriskt framdrivningssystem från ett konventionellt, mekaniskt framdrivningssystem, är att i det dieselelektriska framdrivningssystemet är propelleraxeln inte driven direkt av en dieselmotor. Propelleraxeln drivs istället av en elmotor, även kallad propellermotor. Dieselmotorerna i det dieselelektriska framdrivningssystemet driver generatorer som genererar el till en eller flera propellermotorer. Propellermotorerna finns i huvudsak i tre olika utföranden, vilka presenteras i avsnitt 2.5 (Ådnanes, 2003). Figur 2.1 och 2.2 illustrerar hur ett dieselelektriskt respektive mekaniskt framdrivningssystem kan vara uppbyggt (Kuiken, 2008). De båda framdrivningssystemen har en likvärdig total effekt. Lägg väl märke till att propelleraxeln saknas i det dieselelektriska framdrivningssystemet.

Diesel-electric (HFO)

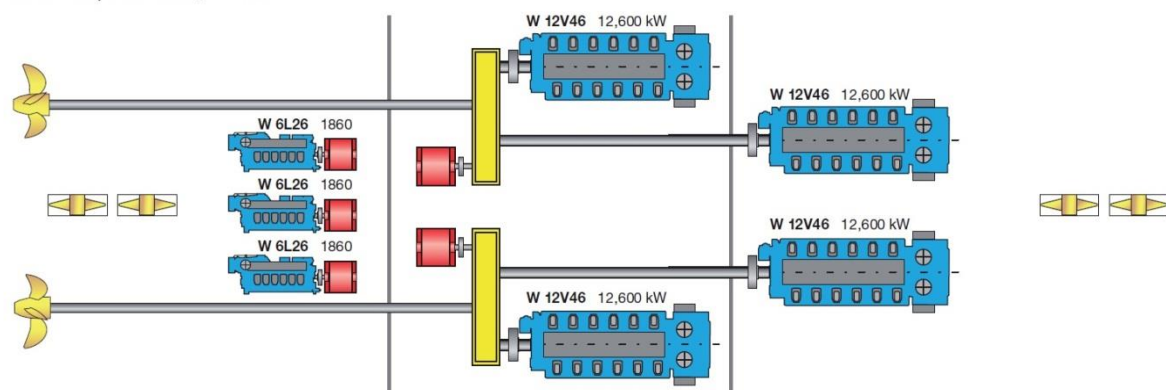
Installed power: 53,100 kW



Figur 2.1 Dieselelektriskt framdrivningssystem (Kuiken, 2008).

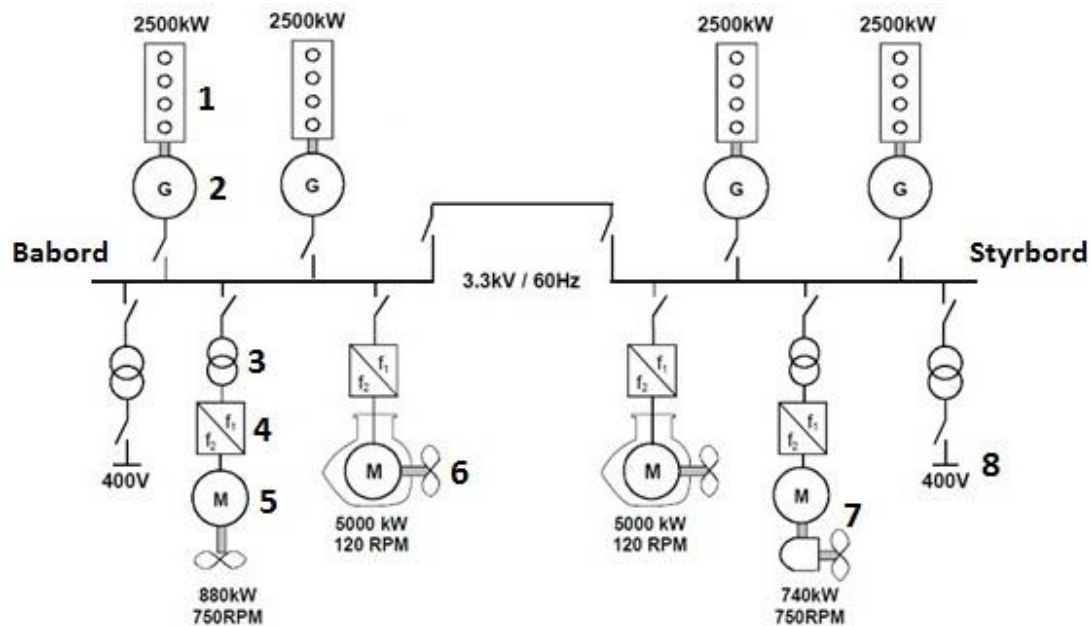
Diesel-mechanical (HFO)

Installed power: 55,980 kW



Figur 2.2 Mekaniskt framdrivningssystem (Kuiken, 2008).

Figur 2.3 visar mer detaljerat hur ett dieselelektriskt framdrivningssystem kan se ut.



Figur 2.3 Arrangemang av ett dieselelektriskt system (baserad på Ådnanes et. al, 1997).

Systemet i figur 2.3 är sektionerat med en babordssida och en styrbordssida. Fyra dieselgeneratorer, bestående av dieselmotor (1) och generator (2), genererar el till högspänningsskenan, 3,3 kilovolt (kV). På högspänningsskenan finns en brytare till varje dieselgenerator, samt två brytare för att kunna sektionera av babordssida med styrbordssida. Det finns även en brytare till varje förbrukare. Dessa är; två propellermotorer (6) för framdrivning, en vridbar bogpropeller (7), en fixerad bogpropeller (5) samt två matningar till lågspänningsnätet (8) (Ådnanes et. al, 1997).

Transformatorerna (3) används för att anpassa spänningen till rätt nivå för respektive förbrukare. Propellermotorerna för framdrivning är, i detta exempel, de enda förbrukarna som matas med högspänning och därför behövs ingen transformator till dessa. Frekvensomformarna (4) används för att varvtalsstyra elmotorerna till propellermotorerna och bogpropellrarna (Ådnanes et. al, 1997).

De olika komponenterna, förutom transformatorn och bogpropellrarna, studeras mer ingående senare i rapporten.

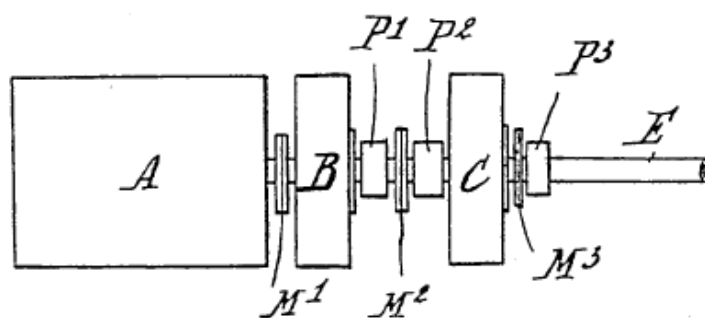
2.2 Historia

Rudolf Diesel uppfann dieselmotorn under sent 1800-tal. Jämfört med koleldad ångmaskin, som vid denna tid var den vanligaste motortypen på fartyg, hade dieselmotorn många fördelar såsom låg vikt och mindre underhåll. Detta gjorde att dieselmotorn var intressant att installera på fartyg men det stora problemet var att kunna backa fartyget. På ångmaskinen löstes detta med reversering, som innebär att motorn stoppas för att sedan startas åt motsatt håll. Vid denna tidpunkt fanns ingen sådan lösning för dieselmotorn och växellådorna som då fanns fungerade inte tillräckligt bra, samtidigt som tillförlitligheten på dessa inte var tillfredsställande. Detta ledde till idén att låta dieselmotorn driva en likströmgenerator som levererar el till en likströmsmotor som är kopplad till propellern. Genom att sedan ändra strömriktningen på likströmsmotorn kunde fartyget slå back (Gustafsson, 2008).

Det första dieseldrivna fartyget, Vandal, hade dieselelektrisk framdrivning. Vandal var ett tankfartyg som sjösattes i Ryssland 1903. Fartyget byggdes i Ryssland men dieselmotorerna levererades av det svenska företaget AB Diesel Motorer senare Atlas Diesel (Nature, 1939), medan den elektriska utrustningen designades och byggdes av ASEA senare ABB (Söderlund och Tell, 2008).

Dieselgeneratorerna var placerade i mitten på fartyget och bestod av tre stycken enkelverkande trecylindriga dieselmotorer på vardera 120 hk med varsin likströmgenerator (Harvey och Thau, 1925). Varje dieselgenerator var kopplad till varsin likströmsmotor i aktern som kunde användas var för sig, vilket gjorde att fartyget hade en god manöverförmåga för att vara i början av 1900-talet. En av nackdelarna med installationen på Vandal var att elkraftöverföringen förbrukade cirka 20 % av den genererade effekten från dieselgeneratorerna (Gustafsson, 2008). En annan nackdel var att installationen var väldigt tung, dieselmotorerna vägde 48 ton medan den elektriska utrustningen vägde 31,2 ton (Koehler och Oehlers, 1998). Det betyder att den elektriska utrustningen stod för hela 40 % av den totala vikten av maskineriet.

År 1904 sjösattes Ssarmat som var ett systerfartyg till Vandal. Dessa systerfartyg hade samma storlek men framdrivningssystemen skiljde sig åt. Ssarmat hade nämligen ett semi-elektriskt framdrivningssystem enligt italienaren Cesido Del Propostos patent (se figur 2.4) (Koehler och Oehlers, 1998). Framdrivningen fungerade på det vis att när fartyget skulle åka framåt var drivaxeln (E) direktkopplad med dieselmotorn (A). Då fartyget önskade slå back, kopplades magnetkopplingen M2 ur samtidigt som generatorn (B) och elmotorn (C) gavs elektrisk kontakt, dieselmotorn driver då generatorn som levererade spänning till elmotorn som drev propelleraxeln åt motsatt håll (Gustafsson, 2008).



Figur 2.4 Del Propostos patent (Koehler och Oehlers, 1998).

Fördelarna med framdrivningssystemet på Ssarmat jämfört med Vandal var dels att en viktninskning av den elektriska utrustningen erhöles eftersom generator och elmotor kunde dimensioneras för en mindre effekt då eldrift bara användes för att backa fartyget. En annan fördel var att verkningsgraden höjdes när fartyget färdades framåt eftersom förlusterna i den elektriska utrustningen då undveks (Koehler och Oehlers, 1998).

Det är uppenbart att dessa tidiga dieselelektriska fartyg byggdes främst på grund av problemet med att reversera dieselmotorn. År 1906 utvecklades en reverserbar och pålitlig växellåda för dieselmotorer, vilket gjorde att dieselmekanisk framdrivning kom att vara det vanligaste valet vid nybyggnation av fartyg. Men bland vissa fartygstyper fanns det ändå skäl att använda sig av dieselelektrisk framdrivning. Elmotorn har, jämfört med dieselmotorn, ett högt vridmoment vid låga hastigheter, vilket gjorde att dieselelektrisk framdrivning fortfarande var populär hos isbrytare (Gustafsson, 2008). En annan fördel med dieselelektrisk framdrivning, på isbrytare, är att om propellern skulle fastna i isen eller om varvtalet minskar på grund av hög belastning, så tar inte elmotorn lika mycket skada som en direktkopplad dieselmotor skulle gjort (Hill et. al, 1992).

På 1920-talet kom eldrift att bli populärt på passagerarfartyg som önskade korsa atlanten på så kort tid som möjligt. För att åstadkomma den stora effekt som krävdes installerades fartygen med turboelektrisk framdrivning, som vid den här tiden var det enda alternativet för att nå den stora effekt som önskades (Ådnanes, 2003). Turboelektrisk framdrivning innebär att ånga produceras för att driva en turbin som i sin tur är kopplad till en generator. På så sätt skapas den el som krävs för att driva fartygets propellermotorer (Kuiken, 2008). Ett av de mest omtalade fartygen från denna tid var S/S Normandie som var den tidens mest kraftfulla fartyg (Bowen, 1936). Normandie sjösattes 1935 (NATURE, 1939) och hade fyra propellermotorer på 29 MW vardera (Ådnanes, 2003). Detta gav en sammanlagd axeleffekt på 160 000 hästkrafter och gjorde att hon kunde ta sig över atlanten med en fart av 31 knop (NATURE, 1939).

I takt med att dieselmotorerna blev effektivare och mer ekonomiska i mitten av 1900-talet, kom eldrift av handelsfartyg i stort sett att försvinna fram till 1980-talet (Ådnanes, 2003). Härefter utvecklades växelströmsteknologin med halvledarteknik (Gustafsson, 2008) och frekvensomformare (Koehler och Oehlers, 1998) som gjorde att eldrift av fartyg blev attraktivt igen. Tidigare krävdes ett likströmssystem för framdrivningen och ett växelströmssystem för övrig elektrisk utrustning ombord. Med den nya växelströmsteknologin kunde även propellermotorn drivas med växelström, detta gjorde att det räckte med en uppsättning av växelströms-dieselgeneratorer ombord. Växelströmssystemet var dessutom mindre, lättare, driftsäkrare och mindre underhållskrävande jämfört med likströmssystemet (Harryson och Ströman, 1997).

Roderpropellern i podutförandet (förklaras i avsnitt 2.6), där elmotorn sitter i roderpropellern, introducerades på marknaden under tidigt 90-tal. Konceptet utvecklades främst för att förbättra prestandan hos isbrytare. Det erhöles även andra fördelar som bättre hydrodynamisk effektivitet och förbättrad manöverförmåga. M/S Elation var det första kryssningsfartyget som utrustades med en pod. Installationen var så lyckad och fördelarna så många att pod efter detta närmast kom att bli en standard vid nybyggnation av kryssningsfartyg (Ådnanes, 2003).

2.3 Dieselgeneratoren

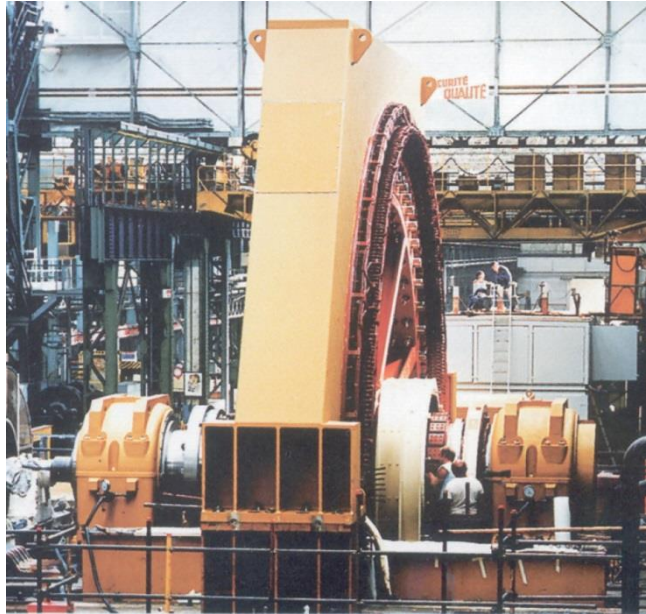
Dieselgeneratoren (figur 2.5) består av en förbränningsmotor och en generator och är den komponent som genererar elektricitet till det dieselelektriska fartygets framdrivning och kringutrustning. Dessa fartyg använder ett flertal dieselgeneratorer för att uppnå en god redundans (Ådnanes, 2003).

Förbränningsmotorn på fartyg består oftast av en dieselmotor som drivs av diesel eller tjockolja. Det finns även tillämpningar där gasmotorer, gasturbiner och ångturbiner används. De vanligast förekommande typerna av dieselmotorer är medel- och högvarviga fyrtaktsmotorer som ofta arbetar vid ett konstant varvtal. I kraftanläggningar på land förekommer det även att lågvarviga tvärstycksmotorer används för elgenerering (Kuiken, 2008). Motorerna konfigureras oftast för att arbeta vid ett konstant varvtal eftersom de flesta generatorer kräver detta för att kontinuerligt leverera rätt frekvens (Ådnanes, 2003). Gasturbiner används ibland när det önskas snabb tillgång till mycket effekt, samtidigt som de tar liten plats och väger lite i förhållande till sin effekt (Kuiken, 2008).



Figur 2.5 Generator och en högvarvig fyrtaktsmotor (Kuiken, 2008).

Generatoren som idag används på fartyg är vanligtvis en växelspännings trefas synkrongenerator som är direkt driven, utan växel, av dieselmotorn. Den består av en fast yttre del som kallas stator och en roterande inre del som kallas rotor. Statorn har tre uppsättningar lindningar som är kopplade till respektive fas och förser elnätet med en spänning och frekvens. Det är statorns konstruktion som bestämmer vilken data generatoren kommer få. Spänningen bestäms av ledarnas isoleringsmaterial, antalet varv i statorn och om faserna kopplas i Y eller D. Ledarnas area bestämmer hur mycket ström de kan leda (Alfredsson et. al, 1996). Rotorn har ett visst antal polpar som bestämmer vilken frekvens som levereras till elnätet vid ett givet varvtal (Mahon, 1992). Generators storlek bestäms av hur många polpar som finns i generatoren. En generator med ett enda polpar som bl.a. används till högvarviga ångturbiner har en lång rotor med en liten diameter. En generator med många poler (figur 2.6) som bl.a. används i vattenkraftverk har en kort rotor med en stor diameter (Alfredsson et. al, 1996; Kuiken, 2008).

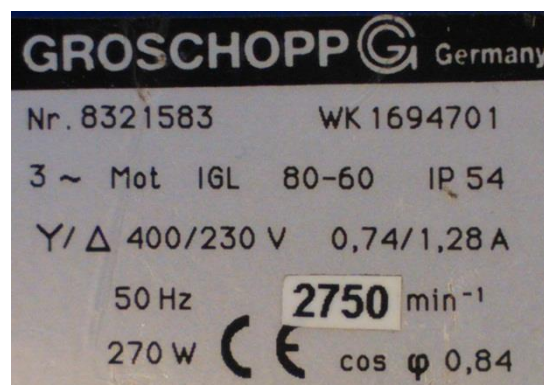


Figur 2.6 Mångpolig generator konstruerad för låga varvtal (Kuiken, 2008).

Av figur 2.7 framgår hur Y- och D-kopplingar skiljer sig åt på en generator. Vid Y-koppling framgår det att en huvudspänning av 400 volt och huvudström av 0,74 ampere kan levereras vid märkvarvtalet. Däremot vid D-koppling fås istället en huvudspänning av 230 volt och huvudström av 1,28 ampere. Effekten är densamma för båda kopplingarna. Förhållandet mellan dessa värden är 1,73 eller $\sqrt{3}$ vilket framgår enligt följande:

$$\frac{400}{230} \approx 1,73 \text{ samt } \frac{1,28}{0,74} \approx 1,73$$

Vid D-koppling blir strömmen högre än vid Y-koppling, men detta gäller enbart för huvudströmmen. Den ström som går genom varje ledare är alltid densamma oavsett koppling (Alfredsson et. al, 1996).



Figur 2.7 Märkskylt från elmaskin (egen bild).

Det finns två vanligt förekommande frekvenser, vilka är 50 Hz och 60 Hz (Kuiken, 2008). För att bestämma vilket antal poler som behövs, används formeln 1.1.

$$p = \frac{2 * f}{n}$$

Formel 1.1 (Alfredsson et. al, 1996).

p: antalet poler

f: frekvensen till elnätet

n: dieselmotorns varvtal i antal varv/sekund

Som exempel antas en dieselmotor som har ett varvtal av 750 varv per minut och det önskas att en passande generator genererar en frekvens av 50 Hz. Antalet poler som krävs räknas ut med hjälp av formel 1.1. I formel 1.2 divideras varvtalet med 60 för att få varvtalet från varv per minut till varv per sekund.

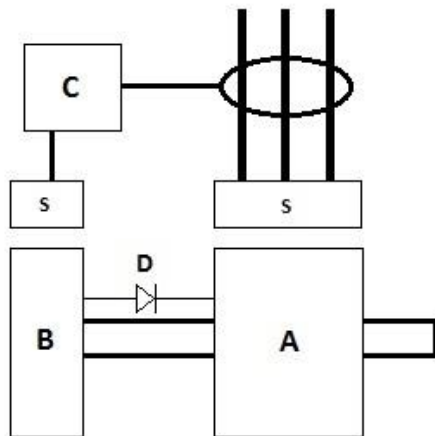
$$p = \frac{2 * f}{\left(\frac{n}{60}\right)} \rightarrow p = \frac{2 * f * 60}{n} \rightarrow \frac{2 * 50 * 60}{750} = 8$$

Formel 1.2

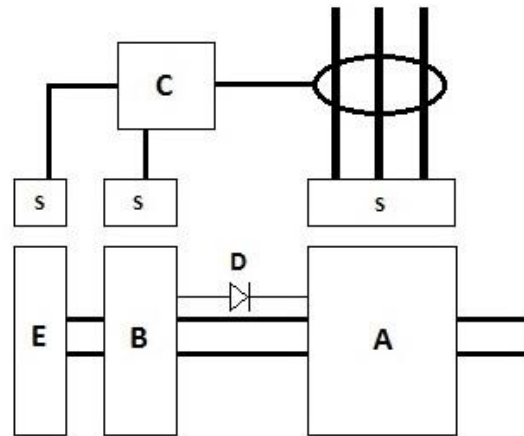
Alltså behövs en generator med 8 poler eller 4 polpar.

Rotorn behöver magnetiseras med en likström för att generatoren ska fungera. På en modern generator görs detta vanligen genom att ha en mindre generator, en så kallad huvudmatare, kopplad på samma axel som generatoren enligt figur 2.8a. Skillnaden med denna huvudmatare är att statorn och rotorn har ombytta funktioner. Statorn magnetiserar rotorn som i sin tur genererar en växelspanning som likriktas och magnetiserar rotorn i generatoren. Eftersom likriktaren sitter monterad på axeln mellan rotorerna kallas denna princip för en roterande likriktare (Mahon, 1992). Magnetiseringsströmmen på generators rotor bestämmer vilken spänning som levereras ut på elnätet. För att styra nätspänningen används en spänningsregulator som jämför den aktuella nätspänningen med ett önskat värde och reglerar magnetiseringsströmmen för att rätt spänning ska uppnås (Alfredsson et. al, 1996).

Ett problem som systemet i figur 2.8a har, är att det själv inte kan magnetisera rotorn vid uppstart, utan behöver matas med en extern spänning tills generatoren själv börjar leverera en egen spänning. Detta problem åtgärdar systemet i figur 2.8b genom att använda ytterligare en liten generator, en så kallad hjälpmatare. Hjälpmataren använder samma konstruktion som generatoren men har en rotor med permanentmagneter och behöver således inte magnetiseras. Därmed kommer den att leverera en användbar spänning så fort den börjar rotera. Det är vanligt att permanentmagneter placeras i spolen på huvudmataren (figur 2.8a) för att på så sätt kunna magnetisera rotorn vid uppstart (Mahon, 1992).



Figur 2.8a Magnetiseringssystem med huvudmatare (baserad på Mahon, 1992).



Figur 2.8b Magnetiseringssystem med huvudmatare och hjälpmatare (baserad på Mahon, 1992).

Komponentförklaring:

A: Generatorns rotor

B: Huvudmatarens rotor

C: Spänningsregulator

D: Roterande likriktare

E: Hjälpmatarens rotor

S: Stator

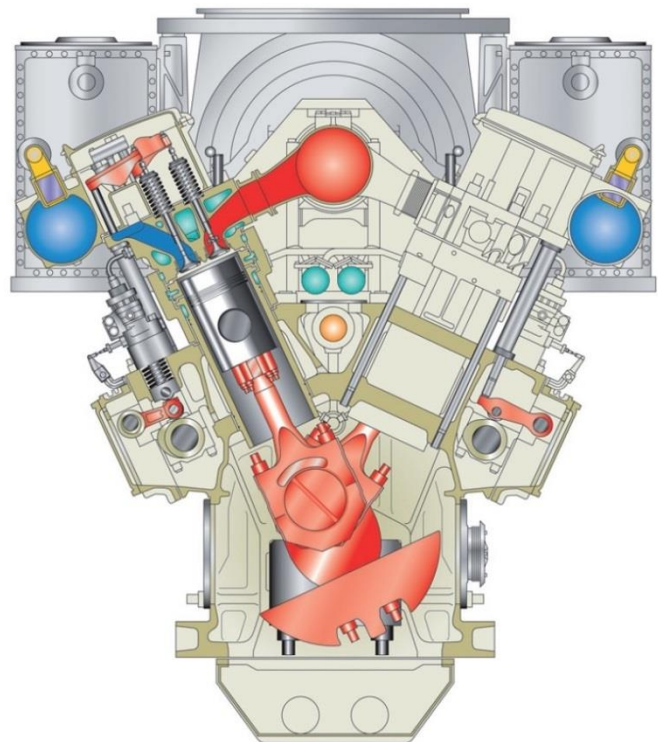
2.4 Motortyper

I en fyrtakts trunkmotor är kolven sammanlänkad med vevaxeln via vevstaken. I en tvåtakts tvärstycksmotor (figur 2.10) är däremot kolven fastbultad med en kolvstång som är fäst i ett tvärstycke. Tvärstycket är sedan sammanlänkat med vevaxeln via vevstaken. En tvärstycksmotor har därför en längre slaglängd än en fyrtakts trunkmotor för samma effekt. Den längre slaglängden gör även att tvärstycksmotorer arbetar vid ett lägre varvtal än trunkmotorer. Maxvarvtalet på tvärstycksmotorer sträcker sig från 50 till 250 varv per minut, beroende på effektuttaget, som på dessa motorer varierar mellan 1 500 och 100 000 kW (Kuiken, 2008). Om en tvärstycksmotor ska driva en generator krävs att den klarar att hålla ett konstant varvtal vid belastningsförändringar. Trots att tvärstycksmotorn arbetar vid ett lägre varvtal ska den enligt Thomas Stenhede (2013) klara belastningsförändringar minst lika bra som en fyrtaktsmotor som arbetar vid ett högre varvtal. Anledningen till detta är främst att tvärstycksmotorn har mer massa som är i rörelse och att den därmed klarar att hålla sitt varvtal även om effektbehovet skulle öka.

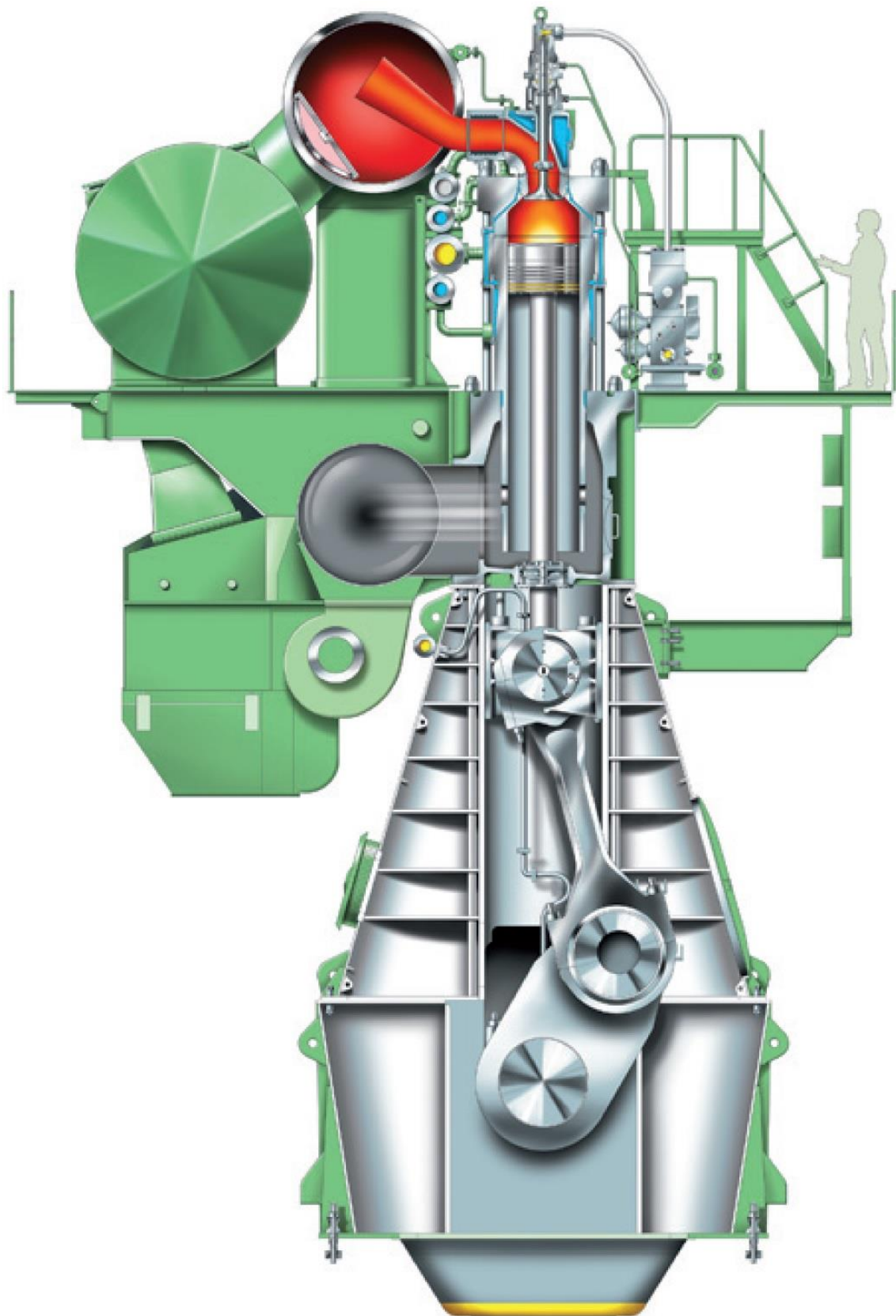
När stora effekter efterfrågas i dieselelektriska framdrivningssystem, resulterar det ofta i att V-motorer (figur 2.9) används (Koehler och Oehlers, 1998). Dessa arbetar efter fyrtaktsprincipen och har cylindrarna placerade i två rader med en vinkel från 45 till 120 grader mellan dessa. V-motorerna har egenskapen att de är kortare än raka trunkmotorer för samma effekt (Kuiken, 2008).

Vid en jämförelse mellan en V-motor och en tvärstycksmotor, för samma effektuttag, kan det konstateras att tvärstycksmotorn har ett mindre antal cylindrar vilket leder till lägre underhållskostnader samt lägre reservdelskostnader (Koehler och Oehlers, 1998).

Tvärstycksmotorn har även en lägre specifik bränsleförbrukning (Koehler och Oehlers, 1998). Enligt Thomas Stenhede (Wärtsilä, 2013) beror den lägre specifika bränsleförbrukningen på två saker. För det första har tvärstycksmotorn en större cylindervolym, vilket gör att ett större arbete uträttas av den insprutade bränslemängden. För det andra sprutar tvåtaktsmotorn in bränsle varje varv till skillnad mot fyrtaktsmotorn där bränsle sprutas in vartannat varv och där två takter går åt till gasväxlingen.



Figur 2.9 Fyrtakts V-motor (Kuiken, 2008).

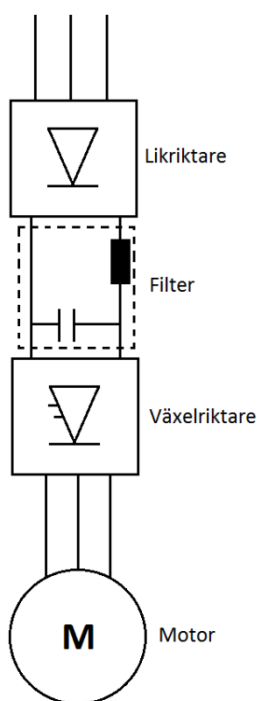


Figur 2.10 Tvåtakts tvärstycksmotor (Kuiken, 2008).

2.5 Motorstyrningar

En motorstyrning har till uppgift att styra varvtalet på propellermotorn. Sedan första installationen byggdes har det i huvudsak använts tre olika system beroende på vilken konfiguration som har varit installerad. Av dessa tre system används Ward-Leonard för likströmsmotorn och pulsbreddsmodulering eller direktomriktning för växelströmsmotorn (Harryson och Ströman, 1997).

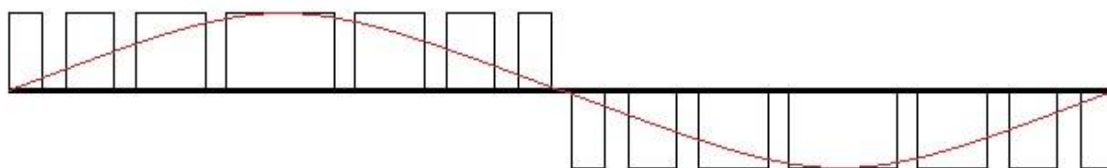
För att styra en likströmsmotor regleras spänningen till antingen rotorn eller statorn. Det som avgör vilken del som ska regleras beror oftast på hur hög spänningen är (Alfredsson et. al, 2002). Styrning enligt Ward-Leonard princip innebär att magnetiseringsspänningen regleras hos både generatoren och motorn för att på så sätt styra varvtalet, men det ger även möjlighet att styra effekt och vridmoment hos propellermotorn (Harryson och Ströman, 1997). Detta system är idag ovanligt eftersom verkningsgraden är lägre än för system som istället reglerar strömmen med halvledarteknik. Det är även utrymmeskrävande och det kan vara svårt att få kvalificerad service utförd på utrustningen (Alfredsson et. al, 2002).



Figur 2.11 Pulsbreddsmoduleringssystem (baserad på Alfredsson et. al, 2002).

Det ena systemet som används för att reglera en växelströmsmotor är pulsbreddsmodulering (eng. pulse width modulation, PWM). Detta system arbetar enligt principen att leverera en reglerbar frekvens. Figur 2.11 visar hur systemet är uppbyggt av en likriktare vilken efterföljs av ett filter för att förbättra likspänningen. Sedan matas likspänningen till en växelriktare som skapar en ny frekvens. För att reglera den utgående frekvensen används tyristorer för att skapa fyrkantspulser med varierande längd (figur 2.12). Tyristorn fungerar likt en diod som spärrar spänningen när den har fel polaritet. Istället för att leda all spänning med rätt polaritet, kan tyristorn med hjälp av en separat spänning på ett tredje ben göra så att den börjar leda när så önskas (Alfredsson et. al, 2002).

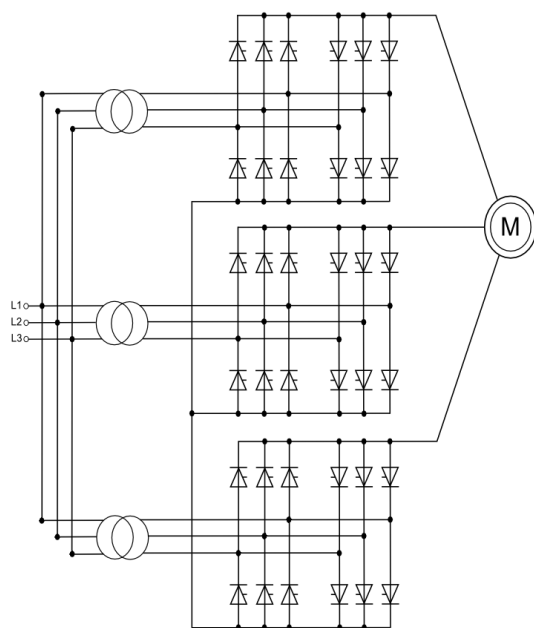
Pulserna genereras med en mycket hög frekvens av uppåt 20 kHz för att till propellermotorn kunna leverera en så jämn sinusformad kurva som möjligt. Ju högre frekvens pulserna genereras med desto jämnare blir sinuskurvan och genom att ändra längden på pulserna ökas eller minskas spänningen. Vid nollgenomgången är pulserna korta eftersom spänningen är låg medan pulserna blir längre när sinuskurvan närmar sig sitt toppvärde. Pulsernas amplitud är alltid konstant då de härstammar från en likspänning (Alfredsson et. al, 2002).



Figur 2.12 Princip för pulsbreddsmodulering (egen bild).

Eftersom en sinuskurva uppstår runt en nollgenomgång behövs två tyristorer, där den ena genererar den positiva halvan medan den andra genererar den negativa. För att styra dessa tyristorer behövs någon form av styrmodul som klarar av att räkna ut hur långa pulserna ska vara och för detta kan med fördel en mikrodator användas (Alfredsson et. al, 2002).

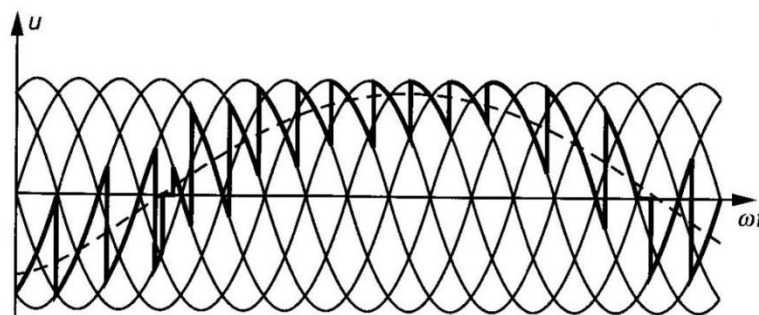
Det andra systemet som används för att styra växelströmsmotorer är en direktomriktare (eng. cycloconverter). Även detta system arbetar enligt principen att leverera en reglerbar frekvens. Den huvudsakliga skillnaden mot PWM principen är att ingen likspänning används. Ett system med tre faser är uppbyggt av 12 tyristorer per fas vilka är



placerade i en så kallad antiparallellkopplad konfiguration (se fig. 2.13). Genom att tända och släcka tyristorerna vid olika tillfällen fås en sinusformad växelström enligt figur 2.14. (Alfredsson et. al, 2002). Denna princip har en begränsning i att utgående frekvens bara kan ändras från noll till ungefär hälften av den matande frekvensen (Harryson och Ströman, 1997).

Figur 2.13 Uppbyggnad av direktomformare (Alfredsson et. al, 2002).

Dessa två system för reglering av växelströmsmotorer används vid olika tillfällen beroende på specifika krav. Storleken och typen av elmotor är ett krav som måste hanteras då PWM principen normalt används för asynkronmotorer med effekter från 0,5 kW till över 30 MW medan direktomriktaren normalt används för synkronmotorer med effekter från 1 MW upp till 30 MW (Alfredsson et. al, 2002; Ådnanes, 2003). Därutöver finns skillnader mellan systemen berörande startmoment, varvtalsreglering vid låga varvtal och effektfaktor m.m. Dessutom måste elmotorn överdimensioneras när PWM reglering används på grund av att spänningen inte är helt sinusformad vilket ger upphov till vissa störningar (Harryson och Ströman, 1997).



Figur 2.14 Utgående växelström (streckad linje) i förhållande till ingående växelströmmar (Alfredsson et. al, 2002).

2.6 Propellermotorer

Propellermotorn består, som tidigare nämnts, av en elmotor som driver en propeller. Det finns tre olika typer av elmotorer att välja bland beroende på tillgänglig spänningstyp och önskad effekt. Dessa tre typer är likspänningsmotorn, asynkronmotorn och synkronmotorn. Elmotorn kan kombineras med en propeller med fasta eller vridbara blad.

Om en propeller med vridbara blad används kan motorn vara av direktkopplad konfiguration. Detta innebär att elmotorn roterar med ett konstant varvtal som är beroende av elnätets frekvens. När en direktkopplad elmotor ska startas förbrukar denna under en kort stund upp mot fem gånger den normala strömmen vid full belastning. För att undvika höga startströmmar används ofta starthjälp i form av en mjukstartare som kan sänka startströmmen neråt två till tre gånger den normala strömförbrukningen. Några typer av mjukstartare som används är Y/D start med kontaktorer, transformatorstart och kraftelektronik med frekvensstyrande funktion. Om däremot en propeller med fasta blad används behöver elmotorn vara varvtalsstyrd. Detta innebär att någon utav tidigare nämnda motorstyrningar måste användas. Denna kombination leder till att tomgångsförlusterna blir minimala och därmed kan bränsleförbrukningen minskas. Enda nackdelen är att investeringskostnaden blir högre, eftersom fler komponenter krävs, vilka dessutom behöver underhållas. Ett alternativ är att kombinera ett variabelt motorvarvtal med variabla propellerblad. Denna kombination kan optimeras för ökad verkningsgrad och ökad respons, men den högre investeringskostnaden brukar inte vara värd användning av systemet (Ådnanes, 2003).

Som tidigare nämnts används huvudsakligen tre olika propellermotorer. Dessa är azimuth, pod samt propellermotor med rak axel som är direktkopplad med propellern.

Propellermotor med rak axel, har elmotorn monterad inuti skrovet och använder normalt en varvtalsstyrd elmotor. Vanligast är att en propeller med fasta blad används. Elmotorn kan kopplas till propelleraxeln antingen direkt eller via en växel. Genom att använda en växel kan elmotorn vara av mindre storlek men de mekaniska förlusterna ökar och systemet blir mer komplext. Denna drivenhet medför även att ett roder måste användas (Ådnanes, 2003).

Då pod eller azimuth används, behövs inget roder eftersom propellern sitter på en enhet under skrovet, en så kallad roderpropeller, som är vridbar 360 grader. Skillnaden mellan pod och azimuth är att i podutförandet sitter elmotorn i roderpropellern medan i azimuthutförandet sitter elmotorn inne i skrovet och är förbunden med propellern via en eller två växlar (Kuiken, 2008). Roderpropellrar har, på grund av sin utformning, en bättre vattentillströmning än konventionella drivsystem, vilket positivt påverkar den hydrodynamiska verkningsgraden. Roderpropellrar kan även användas i dragande läge eller med två kontraroterande propellrar vilket kan förbättra den hydrodynamiska verkningsgraden ytterligare (Ådnanes, 2003).

Figur 2.15 visar en azimut som är konstruerad med en så kallad Z-växel, där två växelsystem används för att överföra kraften från en horisontellt monterad elmotor till den horisontellt monterade propellern. Det finns även en annan variant som använder en så kallad L-växel. Skillnaden är då att det övre växelsystemet är borttaget och elmotorn är monterad vertikalt över enheten. En L-växel är att föredra om det finns plats att montera elmotorn vertikalt eftersom förlusterna i kraftöverföringen blir lägre. I azimututförandet kan propellern antingen ha fasta blad och varvtalsstyrd elmotor eller variabla blad och fast varvtal på elmotorn (Ådnanes, 2003).



Figur 2.15 Azimut (Ådnanes, 2003).

I podutförandet (figur 2.16) har elmotorn varvtalsstyrning och en propeller med fasta blad används. Eftersom elmotorn är direktkopplad med propelleraxeln har denna en något högre verkningsgrad samt en enklare uppbyggnad än azimuten. Eftersom elmotorn sitter nere i roderpropellern används ett system av släpringar för att få fram elektricitet och för att hantera datakommunikation (Ådnanes, 2003).



Figur 2.16 Två podenheter (Foto: ABB).

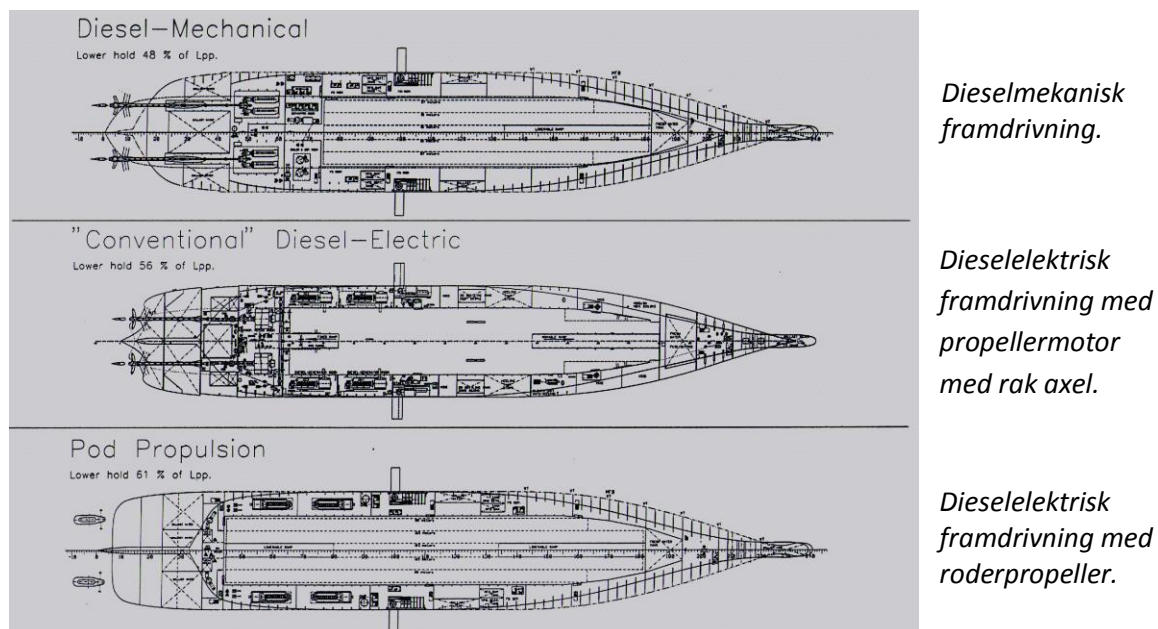
2.7 Fördelar och nackdelar med dieselelektrisk framdrivning

Ett dieselelektriskt framdrivningssystem har flera fördelar och nackdelar jämfört med ett konventionellt mekaniskt framdrivningssystem. Dessa beskrivs närmare i detta kapitel.

2.7.1 Platsbesparing

Maskinrummet tar oftast mindre plats på ett dieselelektriskt framdrivet fartyg jämfört med ett dieselmekaniskt sådant, detta eftersom dieselmotorerna inte behöver vara i linje med propelleraxeln (Ådnanes, 2003). Figur 2.17 illustrerar tre olika framdrivningssystem för ett Ro-pax fartyg.

Dieselmotorerna har placerats längs sidorna på fartyget när dieselelektrisk framdrivning används. Lägg väl märke till det ökade lastutrymmet som erhålls, särskilt då det dieselelektriska framdrivningssystemet används tillsammans med en roderpropeller (nedersta ritningen).



Figur 2.17 Utrymmeskrav för olika framdrivningssystem (Ådnanes, 2003).

2.7.2 Förluster i den elektriska utrustningen

Diselelektriska framdrivningssystem har överlag lägre verkningsgrad än konventionella mekaniska framdrivningssystem vid full belastning. Detta på grund av energiförluster i elkraftöverföringen från vevaxeln till propelleraxeln som normalt ligger mellan 8 och 12 procent vid full belastning. Den elektriska verkningsgraden illustreras i formel 1.3. Effektförlusterna ($P_{förluster}$) utgörs främst av förluster i generator, transformator, frekvensomformare och propellermotor (Ådnanes, 2003).

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = \frac{P_{ut}}{P_{ut} + P_{förluster}}$$

Formel 1.3

P_{yt} = Effekt från dieselmotorns vevaxel. P_{in} = Effekt till propelleraxeln.

2.7.3 Varierande belastning och miljö

De tidigare nämnda förlusterna enligt formel 1.3 gäller vid full belastning. Eldrift har dock visat sig vara positivt ur ett bränsleekonomiskt perspektiv för fartyg som har stora belastningsförändringar och vid slow steaming, då fartyget framförs med reducerad fart (Ådnanes, 2003).

Varje dieselmotor har ett varvtal vid en given belastning, där den är som bränsleeffektivast, räknat i gram per kilowattimme (g/kWh), även kallat specifik bränsleförbrukning. För ett fartyg med en fast stigning på propellern, en så kallad fixed pitch propeller (FPP), innebär detta att om belastningen och därmed varvtalet minskas, till exempel för att fartyget ska färdas långsammare, kommer den specifika bränsleförbrukningen att gå upp. För att kringgå detta kan dagens fartyg utrustas med controllable pitch propeller (CPP). Det innebär att stigningen på propellerbladen kan varieras och därmed även belastningen. Detta leder till att dieselmotorn kan fortsätta arbeta vid sitt effektivaste varvtal. CPP har dock en del nackdelar jämfört med FPP, bland annat högre investeringskostnad och större underhållskrav. Propellernavet blir även större på en CPP för att kunna rymma vridningsmekaniken för propellerbladen, och det finns bara en optimal stigning för propellerbladen (Gustafsson, 2008).

I ett dieselelektriskt framdrivningssystem arbetar oftast flera dieselgeneratorer vid ett konstant varvtal. Om belastningen minskar så kan en eller flera dieselgeneratorer stoppas medan de dieselgeneratorer som fortfarande är i drift fortsätter att arbeta vid sina optimala varvtal och nära sina optimala belastningar. En elmotors verkningsgrad är dessutom ungefär densamma oavsett varvtal och utrustas därför oftast med en fast stigning på propellern (Gustafsson, 2008). Detta leder till en lägre bränsleförbrukning hos dieselelektriska fartyg med stora belastningsförändringar och vid slow steaming, vilket i sin tur leder till en positiv miljöeffekt (Ådnanes, 2003).

Koehler och Oehlers (1998) beskriver hur dieselelektriska fartyg är bättre rustade för att klara framtidens miljökrav jämfört med konventionella direktdrivna fartyg. Detta eftersom dieselmotorerna som arbetar vid ett konstant varvtal kan optimeras på ett sådant sätt att avgaserna innehåller minimalt med emissioner. Vid låg belastning har dessutom dieselmotorerna, som arbetar vid ett konstant varvtal, mindre utsläpp av kväveoxid och koldioxid än en dieselmotor som arbetar med ett varierat varvtal.

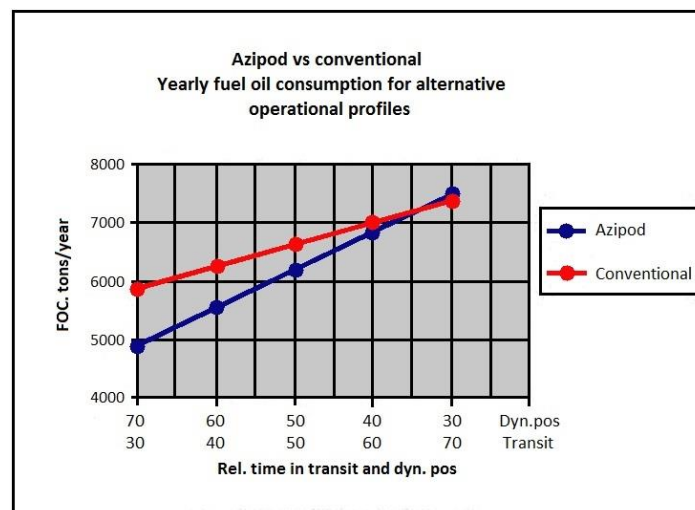
2.7.4 Redundans och underhåll

Ett typiskt dieselelektriskt framdrivningssystem har enligt Ådnanes (2003) ett flertal dieselgeneratorer som genererar el till fartygets propellermotor samt till fartygets övriga elförbrukning. Detta ger en god redundans eftersom det räcker med ett reducerat antal dieselgeneratorer för att fartyget ska kunna manövreras, om än med en lägre effekt till propellermotorn. Eftersom en dieselgenerator kan stoppas utan att fartyget behöver ligga still, har liggetiden för underhåll visat sig vara kortare för dieselelektriska fartyg jämfört med dieselmekaniska sådana (Ådnanes, 2003).

2.7.5 Manöverförmåga

Om det dieselelektriska framdrivningssystemet används tillsammans med en roderpropeller, erhålls en god manöverförmåga eftersom roderpropellern är vridbar 360 grader. Dieselelektrisk drift tillsammans med roderpropeller är att föredra för fartyg som har mycket liggetid och som då använder dynamisk positionering (DP). DP-systemet är GPS-styrt och används då fartyget ska behålla samma position men ändå inte ska, eller har möjlighet, att ankra. När DP-systemet används räcker det oftast med ett reducerat antal dieselgeneratorer för att leverera den kraft som krävs till fartygets propellermotor samt till eventuella bogpropellrar (Ådnanes, 2003).

Figur 2.18 jämför hur ett dieselelektriskt framdrivningssystem med roderpropeller står sig ur ett bränsleekonomiskt perspektiv mot ett konventionellt mekaniskt framdrivningssystem, beroende på hur mycket tid som tillbringas i DP-läge respektive sjöresor. Y-axeln i figur 2.18 visar bränsleförbrukning i ton/år medan X-axeln visar procentfördelning för tid tillbringad i dynamic position respektive sjöresor. Vid en tidsfördelning på cirka 35 % i DP-läge och 65 % i sjöresor ligger de båda framdrivningssystemen på samma bränsleförbrukning. Om mer än 35 % av tiden tillbringas i DP-läge skulle det alltså vara lönsamt med ett dieselelektriskt framdrivningssystem (Ådnanes, 2003).



Figur 2.18 Bränsleförbrukning vid olika driftförhållanden (baserad på Ådnanes, 2003).

2.7.6 Installationskostnad

Installationskostnaden för ett dieselelektriskt framdrivningssystem är generellt sätt högre än för ett mekaniskt framdrivningssystem. Prisskillnaden mellan dessa ser dock ut att minska allt eftersom dieselelektriska installationer blir allt vanligare (Harryson & Ströman, 1997). För de fartyg som utnyttjar de fördelar som det dieselelektriska framdrivningssystemet ger, så tenderar återbetalningstiden för den dyrare installationen att vara relativt kort (Ådnanes, 2003).

2.8 Fartygstyper

Även om mekanisk drift av fartyg fortfarande är det klart vanligaste, blir dieselelektriska framdrivningssystem allt vanligare och används idag på en rad olika typer av fartyg. Det är särskilt populärt på stora kryssningsfartyg där det nästan blivit standard att använda sig av dieselelektrisk framdrivning (Harryson & Ströman, 1997). Även bland ankarhanterare, supplyfartyg, borrhingsfartyg, plattformar, örlogsfartyg, kabelläggare, bojlastare, färjor och isbrytare är dieselelektriska framdrivningssystem frekvent använda. Bland andra fartygstyper är dieselelektrisk drift mindre använt men det finns ett ökat intresse för det (Ådnanes, 2003).



Figur 2.19 Bojlastare.
(Foto: Fini Patrick Holsting).



Figur 2.20 Kabelläggare (Foto: ABB).



Figur 2.21 Kryssningsfartyg (Foto: ABB).

3 RESULTAT

3.1 Bäst verkningsgrad

Verkningsgraden skiljer sig beroende på om framdrivningssystemet är mekaniskt eller dieselelektriskt. Hos det dieselelektriska framdrivningssystemet används fler komponenter än hos ett mekaniskt system och varje komponent har vissa förluster. Normalt är förlusterna från motorns vevaxel till propelleraxeln hos ett dieselelektriskt system 8-12 % vid full belastning (Ådnanes, 2003). Den elektriska utrustningens verkningsgrad förblir ungefär densamma oavsett belastning. Hos ett mekaniskt framdrivningssystem är verkningsgraden bättre men endast vid hög belastning. När belastningen minskar lämnar dieselmotorn sin optimala arbetspunkt och den specifika bränsleförbrukningen ökar. Det här kompenseras hos ett dieselelektriskt system genom att stoppa en dieselmotor när belastningen blir så låg att resterande dieselmotorer klarar att hantera all belastning (Gustafsson, 2008). Den totala verkningsgraden kan ökas genom användandet av tvärstycksmotorer med deras lägre specifika bränsleförbrukning (Koehler och Oehlers, 1998). Även genom att använda roderpropellrar kan verkningsgraden höjas gentemot ett konventionellt system då dessa har en bättre hydrodynamisk effektivitet (Ådnanes, 2003).

3.2 Utrymmeskrav

Genom att använda dieselelektrisk framdrivning ges möjligheten att placera dieselgeneratorerna där de bäst får plats eftersom de inte behöver vara i linje med propelleraxeln. Detta innebär ofta att maskinrummet tar mindre plats än ett mekaniskt framdrivningssystem och att fartyget kan designas med ett större lastutrymme (Ådnanes, 2003). Däremot kan det konstateras enligt bilaga 1 att när tvärstycksmotorer används för elgenerering måste utrymmet i höjdlängd beaktas eftersom dessa motorer är betydligt högre än fyrtaktsmotorer. Detta kan komma att resultera i ett maskinrum som är något större än då fyrtaktsmotorer används.

3.3 Underhållsbehov

Ett dieselelektriskt framdrivningssystem har, tack vare den inbyggda redundansen, bättre möjligheter att utföra underhåll utan att behöva ligga still och därmed missa möjligheten att ta en last. Är fartyget dimensionerat för att alltid ha minst en generator i beredskap kan denna underhållas utan att den tillgängliga effekten minskas. Om alla generatorer används vid normal drift, kan en stoppas och underhållas medan fartyget kan fortsätta med reducerad fart (Ådnanes, 2003).

Genom att använda tvärstycksmotorer kan underhållsbehovet minskas ännu mer. Normalt har en tvärstycksmotor färre antal cylindrar än en fyrtaktsmotor vid samma effekt. Ett färre antal cylindrar ger direkt ett mindre antal komponenter att underhålla (Koehler och Oehlers, 1998).

3.4 Jämförelser mellan olika dieselmotorer

Som nämnts tidigare i rapporten används ofta V-motorer när effektkravet är stort för ett dieselelektriskt framdrivningssystem (Koehler och Oehlers, 1998). Eftersom syftet med studien är att undersöka om tvärstyckmotorer kan användas för elgenerering, har en tvärstycksmotor jämförts med en V-motor. Detta eftersom tvärstycksmotorer för elgenerering i första hand vore intressant att undersöka för fartyg som kräver stora effekter.

Ådnanes et. al (1997) nämner flera exempel på hur typiska dieselelektriska framdrivningssystem kan se ut för olika fartygstyper. De system som beskrivs har fyra till åtta dieselgeneratorer där varje dieselgenerator har en effekt mellan 2 500 och 6 750 kW. Det ska förtydligas att vid en jämförelse med ett typiskt system, används samma antal dieselgeneratorer som innan. Till exempel skulle fyra V-motorer på 6 000 kW vardera ersättas med fyra tvärstyckmotorer på 6 000 kW vardera.

En jämförelse har gjorts mellan en 5-cylindrig tvåtakts tvärstycksmotor och en 12-cylindrig fyrtakts V-motor. De båda motorerna tillverkas av Wärtsilä och har ett likartat effektuttag. Datablad för dessa motorer finns med i bilaga 1.

Tvärstycksmotorn, RT-flex 50, har ett maximalt effektuttag på 6 100 kW, vid 124 varv per minut och 14,7 bar medeltryck. V-motorn, 12V32, har ett maximalt effektuttag på 6 000 kW, vid 750 varv per minut och 24,9 bar medeltryck. Effektskillnaden på 100 kW får anses försumbar i sammanhanget. I övrigt är det en rad parametrar som skiljer dessa motorer åt. I diagram 1 har den mest relevanta informationen från bilaga 1 sammanställts.

	Wärtsilä 12V32	Wärtsilä RT-flex50	Differens
Effektuttag	6 000 kW	6 100 kW	+ 100 kW
Varvtal	750 varv/minut	124 varv/minut	– 626 varv/minut
Medeltryck	24,9 bar	14,7 bar	– 10,2 bar
Slaglängd	400 mm	2 050 mm	+ 1 650 mm
Specifik bränsleförbr. vid 85 % belastning	176 g/kWh	159,9 g/kWh	– 16,1 g/kWh
Längd	6 615 mm	6 952 mm	+ 337 mm
Höjd*	3 595 mm	10 906 mm	+ 7 311 mm
Bredd	3 020 mm	3 530 mm	+ 510 mm
Vikt	58,7 ton	200 ton	+ 141,3 ton

Diagram 1. Jämförelse mellan dieselmotorer. Baserad på bilaga 1.

*Inklusive överhålningshöjd.

För V-motorn var bränsleförbrukningen angiven vid 85 % belastning i bilaga 1. Däremot för tvärstycksmotorn var bränsleförbrukningen för 85 % belastning bara angiven för ett medeltryck på 21,0 bar. För att få fram bränsleförbrukningen vid 85 % belastning och medeltrycket 14,7 bar, har därför värdena interpolerats enligt följande:

21,0 bar medeltryck och 100 % belastning ger 170 g/kWh.

21,0 bar medeltryck och 85 % belastning ger 165,7 g/kWh.

14,7 bar medeltryck och 100 % belastning ger 164 g/kWh.

Förhållande i bränsleförbrukning mellan 85 och 100 % belastning vid 21,0 bar medeltryck:

$$\left(\frac{165,7}{170}\right)$$

Bränsleförbrukning vid 14,7 bar medeltryck och 85 % belastning:

$$\left(\frac{165,7}{170}\right) * 164 = 159,9 \text{ g/kWh}$$

Som framgår av diagram 1 är tvärstycksmotorn större och tyngre. Längd och bredd skiljer sig inte så mycket mellan motorerna, däremot är tvärstycksmotorn hela 7,3 meter högre och väger 141 ton mer än V-motorn. Vinsten med tvärstycksmotorn är att den specifika bränsleförbrukningen blir 16,1 g/kWh lägre, vilket motsvarar 9,1 %.

Om utgångspunkten är att de båda motorerna lämnar 6 000 kW vid full belastning och att motorerna körs på 85 % belastning (5 100 kW) under ett dygn, fås en genererad effekt på 122 400 kWh per dygn och motor.

$$0,85 * 6\,000 * 24 = 122\,400 \text{ kWh per dygn}$$

En minskning av den specifika bränsleförbrukningen med 16,1 g/kWh skulle då motsvara en bränslebesparing på 1,97 ton per dygn. Med ett tjockoljepris på 597 dollar/metrisk ton för IFO380 olja (Bunkerworld, 2013) skulle det motsvara en kostnadsbesparing på 1 176 dollar per dygn och motor.

I följande exempel antas en bojlastare med fyra dieselgeneratorer och en hamngenerator som körs enligt följande driftparametrar under ett år:

	Antal DG* vid 85 % bel.	Antal dagar	Total effekt från DG
Marschfart	3	200	73 440 MWh
Reducerad fart	2	40	9 792 MWh
Manövrering/DP	1	60	7 344 MWh
I hamn	0	65	0 MWh
Summa		365	90 576 MWh

Diagram 2. Effektbehov på ett år.

*Dieselgeneratorer.

Eftersom bränsleförbrukningen är given vid 85 % belastning antas att dieselgeneratorerna arbetar vid denna belastning. Då fartyget är i hamn behövs ingen dieselgenerator utan hamngeneratorn räcker då till för att generera den el som krävs. Antagandena i diagram 2 är bara en grov uppskattning på hur det skulle kunna se ut. Hur många dagar som tillbringas i respektive driftläge är individuellt från fartyg till fartyg och likaså hur många dieselgeneratorer som är i drift vid respektive driftläge.

Den totala effekten som krävs från dieselgeneratorerna under ett år skulle enligt diagram 2 bli 90 576 MWh. Eftersom den specifika bränsleförbrukningen är 16,1 g/kWh lägre, enligt diagram 1, skulle det motsvara en bränslebesparing på 1 458 ton/år eller 870 589 dollar med tjockoljepriset 597 dollar/metriskt ton (Bunkerworld, 2013).

3.5 Generatorval för tvärstycksmotorn

Tvärstycksmotorn arbetar vid ett lägre varvtal än fyrtaktsmotorn, därför ställs andra krav på den generator som ska användas. En tvärstycksmotor som arbetar vid ett maximalt varvtal av 124 varv per minut behöver enligt formel 1.2, 48 poler. Detta leder till att diametern på generatoren blir stor och den kan bli svår att placera i fartyget (Alfredsson et.al, 1996; Kuiken, 2008). Alternativet till den mångpoliga generatoren skulle vara att använda en växel för att erhålla ett högre varvtal till generatoren. Detta innebär att en mindre generator med färre poler kan användas. En växel har dock mekaniska förluster vilket påverkar den totala verkningsgraden negativt (Kuiken, 2008).

Ett alternativ till ovanstående lösningar, är att använda en generator med färre poler och mindre diameter som direktkopplas till dieselmotorn. Om tvärstycksmotorn, som arbetar vid 124 varv per minut, kopplas till en generator (bilaga 5) med 30 poler som normalt arbetar vid 200 varv per minut kommer frekvensen endast bli (enligt formel 1.2):

$$f = \frac{p * n}{60 * 2} \rightarrow \frac{30 * 124}{60 * 2} = 31 \text{ Hz}$$

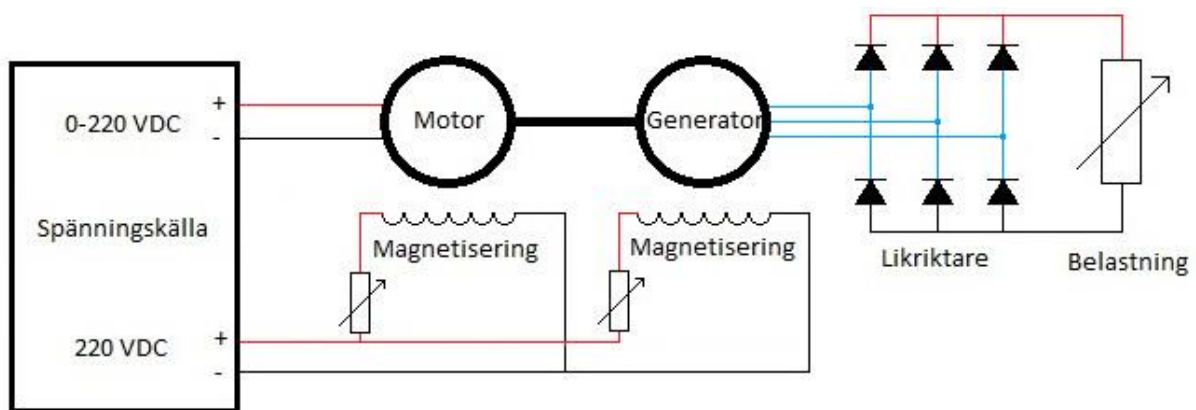
Med en nätfrekvens på endast 31 Hz kommer bl.a. alla elmotorer rotera med ett lägre varvtal. Därför är det nödvändigt att använda ett system med likriktare direkt efter varje generator och distribuera likspänning till alla förbrukare. För att sedan generera den växelspänning som krävs av förbrukare används ett antal olika pulsbreddsmoduleringsenheter med antingen fast eller variabel frekvens (Ådnanes, 2003). Denna lösning uppkom och diskuterades under mötet med Thomas Stenhede (Wärtsilä, 2013) och ansågs som en möjlig lösning som skulle kunna fungera i verkligheten.

Därför har en serie tester genomförts med en generatorrigg för att testa hur generatoren uppför sig vid olika varvtal och belastningar. Testresultaten finns tillgängliga i bilaga 2. Variabler som övervakades var varvtal, magnetiseringsström samt in- och utgående spänning och ström. Dessa test hade som huvuduppgift att undersöka möjligheten att generera rätt nätspänning vid ett lägre varvtal än vad generatoren är designad för. Effektförbrukning och effektgenerering räknades fram för att kunna undersöka eventuella skillnader i verkningsgrad mellan de olika testerna.

Testserierna ett till fyra utfördes alltid vid fem olika varvtal där belastningen var det som i huvudsak skiljde mellan testerna. Belastningen var låg i första testet för att sedan ökas succesivt vid varje nytt test. Syftet med test ett till fyra var att försöka förstå hur generatoren fungerade vid olika varvtal och med olika inställningar. I test fem var syftet att hitta det lägsta varvtal då en huvudspänning av 220 volt kunde uppnås. Test sex hade syftet att undersöka hur generatoren fungerade i följande scenario: En tvärstycksmotor med ett varvtal av 124 varv per minut driver en generator (bilaga 5) med 30 poler som därmed är byggd för 200 varv per minut. Generatoren är tänkt att vara konstruerad för drift i D-koppling men används Y-kopplad vilket leder till en högre spänning vid det designade varvtalet. För att erhålla den tänkta spänningen som annars fås vid 200 varv per minut och D-koppling, kan varvtalet sänkas till det som tvärstycksmotorn klarar.

Ett oscilloskop användes för att undersöka likspänningens utseende. En ideal likspänning är helt rak men eftersom den spänning som uppstår efter likriktaren i testet härstammar från en växelspanning som inte blir filtrerad på något sätt får den en vågig form (bilaga 3). Det visade sig att en likriktardiod var skadad vilket syns på en av kurvorna som en störning. Det syns även att dioderna inte är riktigt lika utan amplituden skiljer sig åt på alla tre.

Generatorriggen var uppbyggd av en likströmsmotor och en trefas synkrogenerator, båda med manuellt reglerad magnetiseringsström. Till denna rigg anslöts en spänningskälla som hade möjlighet att leverera de olika spänningar som behövdes för att styra utrustningen. En variabel likspänning användes för att reglera varvtalet på likströmsmotorn och en fast likspänning användes för magnetisering av både motorn och generatorns rotor. Efter generatören kopplades sex likriktardioder i en så kallad sexpulskoppling för att göra om växelspanningen till likspänning. Därefter användes en variabel resistor för att skapa en belastning för generatören. Bilaga 4 illustrerar ett fotografi av utrustningen som även schematiskt framgår av figur 3.1.



Figur 3.1 Testutrustningens uppbyggnad (egen bild).

Förutsättningar hos utrustningen var enligt följande:

Spänningskällan kunde leverera en kontinuerlig spänning av maximalt 220 volt och en ström av 15 ampere. Likströmsmotorn klarade en kontinuerlig maximal spänning av 220 volt, ström av 6,8 ampere, effekt av 1,5 kW och varvtal av 1 500 varv per minut. Synkrogeneratören var permanent Y-kopplad och klarade en kontinuerlig maximal spänning av 220 volt huvudspänning, ström av 2,65 ampere, effekt av 1 kW och varvtal av 1 500 varv per minut. Rotorn tålde en kontinuerlig maximal ström av 0,65 ampere. Diodlikriktarna var märkta för maximalt 1 000 volt och 11 ampere. Belastningen var konstruerad av tre separata resistorer och tålde maximalt en spänning av 220 volt och en ström av 15 ampere när resistorerna var kopplade i serie.

Utifrån testet har ett antal resultat framställts som berör magnetiseringsström hos synkrogeneratören. Av mätvärdena i bilaga 2 framgår att magnetiseringsströmmen inte går att höja tillräckligt mycket för att generera en huvudspänning av 220 volt vid ett varvtal under 1 260 varv per minut och 85 % av maxbelastning. Dessutom var belastningen inte maximal vilket, av de andra testerna att döma, tenderar spänningen att bli lägre vid ökande belastning. En möjlig lösning hade varit om magnetiseringsströmmen gick att öka ännu mer vilket troligtvis hade krävt en annan konstruktion av generatorrotorn.

Ett alternativ till att behöva öka magnetiseringsströmmen skulle vara att använda en generator som är konstruerad för D-koppling men istället används Y-kopplad. Utifrån test 6 (bilaga 2) antas igen en tvärstycksmotor som arbetar vid ett varvtal av 124 varv per minut och en generator (bilaga 5) med 30 poler som är konstruerad för 200 varv per minut. Vid en märkeffekt av 6,25 MVA fås vid 200 varv per minut och en huvudspänning av 3,3 kilovolt vid D-koppling, en maximal ström av 1 094 ampere.

Om generatoren istället körs vid ett varvtal av 124 varv per minut så motsvarar det en minskning på 38 % gentemot det tänkta varvtalet 200 varv per minut. Granskas testresultaten i bilaga 2, konstateras att spänningen från generatoren ändras proportionerligt med varvtalet. Det leder till att spänningen och effekten kommer bli 38 % lägre.

Eftersom varvtalet är 38 % lägre än märkvarvtalet behöver märkspänningen vara proportionerligt mycket större för att kunna lämna 3,3 kilovolt vid 124 varv per minut. Detta resulterar i att märkspänningen i generatoren behöver konstrueras för minst 5,32 kilovolt. Om generatoren istället Y-kopplas kommer spänningen att bli $\sqrt{3}$ gånger större, alltså ca 5,72 kilovolt och behöver bara regleras med magnetiseringsströmmen.

Däremot kommer huvudströmmen inte längre stämma överens med vad som krävs. Så fort generatoren Y-kopplas sjunker den högsta tillgängliga huvudströmmen med $\sqrt{3}$ till 632 ampere och den maximala effekten sjunker proportionerligt. Därför behöver generatoren dimensioneras både för högre spänning och högre ström utan att effekten behöver höjas. I detta fall är värdena 5,32 kilovolt, 1 094 ampere, men fortfarande endast 6,25 MVA vid 200 varv per minut. Normalt skulle denna spänning och ström resultera i en effekt på ca 10 MVA. Ett alternativ vore att använda en specialbyggd generator på 6,25 MVA men som klarar att leverera den högre huvudströmmen. Fördelen med detta är att generatoren med den lägre effekten blir mindre i storlek.

4 DISKUSSION

I detta kapitel diskuterar vi våra valda metoder samt vårt resultat från studien. Diskussionen är uppdelad i metoddiskussion och resultatdiskussion.

4.1 Metoddiskussion

En kvalitativ litteraturstudie var nödvändig eftersom vi behövde fördjupa våra kunskaper kring dieselektrisk framdrivning. Litteraturstudien gav oss en god grund att stå på inför vår målsättning att besvara frågeställningen. Men allteftersom arbetet med rapporten fortskred insåg vi att enbart en litteraturstudie inte skulle ge oss tillräckligt med information för att kunna besvara frågeställningen.

För att få mer information till vår studie försökte vi därför etablera kontakt med ett antal berörda motor- och generatortillverkare. Detta resulterade i en god kontakt med motortillverkaren Wärtsilä medan övriga motor- och generatortillverkare visat ett minimalt intresse. Kontakten med Wärtsilä var dock mycket givande och gav oss information som gjorde att vi kunde angripa vår frågeställning på ett nytt sätt. Eftersom endast ett företag har medverkat i studien kan den därmed ha sina brister. Det kan tänkas att om fler företag varit involverade hade våra infallsvinklar blivit fler och därmed hade resultatet kunnat bli annorlunda. Vi är dock glada att kontakten med Wärtsilä föll väl ut, den gav rapporten en ny dimension och gjorde att vi kom vidare med vår frågeställning. Det ska tas i beaktning att informationen i bilaga 1 och 5 är tillverkarnas egna och ska därför granskas kritiskt. Vi anser dock att informationen är tillförlitlig och att innehållet ger en god och rättvis bild av produkterna.

Eftersom vi hade svårt att finna information om hur generatorer uppför sig vid olika driftsfall genomfördes ett experiment med en generatorrigg. Experimentet har sina brister eftersom generatorn som användes i experimentet var av betydligt mindre storlek än de som används ombord på fartyg. Men vi, tillsammans med vår experimenthandledare, anser ändå att experimentet ger en god insikt om hur generatorer beter sig vid olika driftsfall.

4.2 Resultatdiskussion

Av de resultat som framkommit kan vi konstatera att rent teoretiskt är tvärstycksmotorer möjliga att använda för elgenerering ombord på dieselelektriska fartyg. Dieselmotorerna i sig är inget hinder för denna lösning. Det som krävs av motorerna är att de klarar att hålla ett konstant varvtal vid belastningsändringar. Detta bör en tvärstycksmotor klara minst lika bra som en fyrtaktsmotor (Stenhede, 2013).

Aspekter som talar för att använda tvärstycksmotorer är lägre bränsleförbrukning och minskade underhålls- och reservdelskostnader. Aspekter som talar emot tvärstycksmotorerna är den större storleken och den högre vikten. Det kan även finnas andra aspekter som talar för eller emot användandet av tvärstycksmotorer, men som inte behandlas i denna rapport. Enligt Kuiken (2008) utgör bränslekostnader cirka 72 % av driftkostnaderna för fartyg medan reservdelskostnaderna utgör cirka 13 %. Om då en bränslebesparing på 9,1 % kan göras enligt diagram 1, samtidigt som utgifterna för underhåll och reservdelar kan minskas, torde detta vara av största intresse för de redare som planerar att investera i dieselelektriska fartyg.

Mångpoliga generatorer som är byggda för tvärstycksmotorns låga varvtal finns idag, och används på vissa landbaserade kraftanläggningar. Dessa generatorer har en väldigt stor diameter i förhållande till effekten som kan göra att de inte lämpar sig för installation på fartyg. Det kan även finnas andra hinder såsom stabilitet och hållfasthet som gör att dessa generatorer inte lämpar sig för marint bruk. Det finns även en möjlighet att använda en växel för att höja varvtalet till det som en mindre och mer vanligt förekommande generator med färre poler kräver. Detta innebär dock att det tillkommer icke önskvärda mekaniska förluster i växeln. På grund av dessa förluster har vi valt att inte studera denna lösning närmare i denna rapport.

Ett alternativ till en mångpolig generator alternativt växelkopplad generator, vore att använda en generator med färre poler som genererar en växelspanning med en lägre frekvens än den som krävs. Denna växelspanning likriktas innan den distribueras ut till förbrukarna. Varje förbrukare är sedan försedd med varsin växelriktare som omformar likspänningen till en växelspanning med rätt frekvens. Denna lösning har diskuterats med tillverkare samt studerats teoretiskt och praktiskt och vi kan inte se något hinder för att detta skulle kunna fungera ombord på fartyg. Om systemet granskas från likriktningen efter generatorerna till förbrukarna, konstateras att systemet är uppbyggt enligt samma princip som pulsbreddsmodulering, vilket är en beprövad och effektiv teknik. Skillnaden är att varje generator har en egen likriktarmodul och är sammankopplade till ett gemensamt likspänningsnät som alla växelriktare är anslutna till. Att alla växelriktare delar på samma likspänningskälla bör inte vara något hinder för att systemet ska fungera. Det som kan vara ett hinder för denna lösning är generatören, som måste arbeta vid ett lägre varvtal än den är konstruerad för. Av experimentet att döma påverkar detta inte på något märkbart sätt funktionen hos generatören men vi kan endast spekulera i om detta skulle fungera på en stor generator i en verklig situation.

Tvärstycksmotorernas storlek gör att de inte lämpar sig att installeras i alla fartyg. Större fartyg har ofta mer plats för maskinrummet, vilket innebär att tvärstycksmotorer förmodligen skulle lämpa sig bäst för installation på dessa fartyg. På ett större fartyg kan även motorernas ökade vikt spela en mindre roll eftersom både fartyget i sig och lasten står för en betydande del av totalvikten.

Förlusterna i den elektriska utrustningen hos ett dieselelektriskt framdrivningssystem ligger mellan 8-12 % (Ådnanes, 2003). Detta skulle kunna kompenseras genom att använda tvärstycksmotorer för elgenereringen som enligt diagram 1 skulle ge en bränslebesparing på 9,1 %. Dessa värden innebär att ett dieselelektriskt framdrivningssystem med tvärstycksmotorer för elgenerering skulle vara konkurrenskraftigt mot ett konventionellt mekaniskt framdrivningssystem som använder fyrtaktsmotorer. Om dessutom det dieselelektriska framdrivningssystemet används tillsammans med roderpropellrar, kan den högre hydrodynamiska verkningsgraden hos dessa göra att det dieselelektriska framdrivningssystemet till och med kan konkurrera mot ett konventionellt mekaniskt framdrivningssystem som använder en tvärstycksmotor direktkopplad med propelleraxeln.

5 SLUTSATS

Kan tvåtakts tvärstycksmotorer användas för elgenerering på dieselelektriska fartyg?

Teoretiskt finns inga hinder för att tvåtakts tvärstycksmotorer kan användas för elgenerering på dieselelektriska fartyg. Resultaten pekar på att tvärstycksmotorn klarar att driva en generator på ett tillfredsställande sätt. Dock har en mångpolig generator, anpassad för tvärstycksmotorns låga varvtal, sina brister. Denna skulle bli väldigt stor, vilket troligtvis gör att den inte är önskvärd att installera på fartyg. Även en växelkopplad generator har sina svagheter med en minskad verkningsgrad. Resultatet visar på ett alternativt generatorval som fungerar tillfredsställande, men som ställer andra krav på elsystemets uppbyggnad.

Om tvåtakts tvärstycksmotorer används för elgenerering på dieselelektriska fartyg, skulle de kunna höja den totala verkningsgraden på det dieselelektriska framdrivningssystemet, samt vilka är för- respektive nackdelarna?

Resultaten visar på att tvärstycksmotorn har en lägre specifik bränsleförbrukning än de fyrtaktsmotorer som idag används i dieselelektriska framdrivningssystem. Detta innebär att den totala verkningsgraden för det dieselelektriska framdrivningssystemet kommer att förbättras om tvärstycksmotorer används istället för fyrtaktsmotorerna. Även valet att använda roderpropeller istället för ett konventionellt system med rak propelleraxel påverkar verkningsgraden positivt och kan till och med konkurrera mot direktdrivna mekaniska system. Resultatet pekar även på att tvärstycksmotorn har vissa nackdelar jämfört med de fyrtaktsmotorer som idag används. De nackdelar som framkommit i denna rapport är tvärstycksmotorns storlek och vikt.

För vidare forskning inom området vore det önskvärt att det utreds mer kring investeringskostnader samt generatorns funktion under de förutsättningar som presenterats i resultatet.

REFERENSLISTA

- Alfredsson, A., Jacobsson, K. A., Rejminger, A. och Sinner, B. (1996) *Elkraftshandboken: Elmaskiner*. Malmö: Elanders Sverige.
- Bowen, H. G. (1936) Steam in relation to marine engineering. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 222, nr. 6, s. 731.
- Bunkerworld (2013) *Latest prices Rotterdam*
<http://www.bunkerworld.com/prices/port/nl/rtm/> (4 April 2013)
- Gustafsson, D. (2008) *När ska dieselektrisk framdrivning av fartyg väljas?*. Halmstad: Högskolan Halmstad.
- Harryson, S. och Ströman, C. (1997) *Diesel-elektriskt framdrivningsmaskineri för fartyg*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Examensarbete för Institutionen för maskinteknik. Ingenjör- och sjöbefälsskolan).
- Harvey, Jr, H. F. och Thau, W. E. (1925) Electric Propulsion of Ships. *Transactions A.I.E.E.*, ss. 497-522.
- Hill, W. A., Creelman, G. och Mischke, L. (1992) Control Strategy for an Icebreaker Propulsion System. *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 28, nr 4, ss. 887-892.
- Höst, M., Regnell, B. och Runeson, P. (2006) *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Koehler H. W. och Oehlers W. (1998) 95 years of diesel-electric propulsion form a mekeshift solution to a modern propulsion system. *Diesel electric propulsion*; 26-29 april, 1998, Helsinki. ss. 1-10.
- Kuiken K. (2008) *Diesel Engines I och II*. Onnen: Target global energy training.
- Mahon, L. L. J. (1992) *Diesel generator handbook*. Oxford: Butterworth- Heinemann.
- Nature (1939) Electric Propulsion of Ships. *Nature*, vol. 143, s. 652.
- Söderlund, J. och Tell, E. (2008) The P-form organization and the dynamics of project competence: Project epochs in Asea/ABB, 1950-2000. *International Journal of Project Management* 27, s. 102.
- Ådnanes, A. K. (2003) *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*. Oslo: ABB AS.
- Ådnanes, A. K., Sørensen, A. J. och Hackman, T. (1997) *Essential Characteristics of Electrical Propulsion and Thruster Drives in DP Vessels*. Houston: Marine Technology Society.

BILAGOR

Bilaga 1

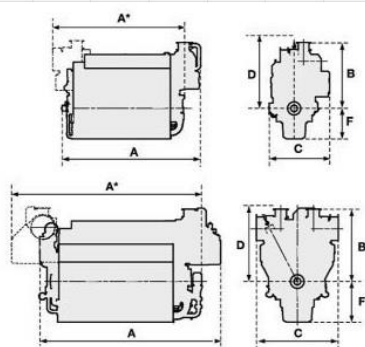
Använd med tillstånd från Wärtsilä.

Informationen är baserad på data från Wärtsiläs produktbok: Marine solutions 2012.

Wärtsilä 32		IMO Tier II	
Cylinder bore	320 mm	Fuel specification:	
Piston stroke	400 mm	Fuel oil	700 cSt/50oC
Cylinder output	500 kW/cyl, 580 kW/cyl		7200 sR1/100oC
Speed	750 rpm	ISO 8217, category ISO-F-RMK 700	
Mean effective pressure	24.9 bar, 28.9 bar	SFOC 176 g/kWh at ISO condition	
Piston speed	10.0 m/s		
Option: Common rail fuel injection.			

Rated power		
Engine type	500 kW/cyl	580 kW/cyl
6L32	3 000	3 480
7L32	3 500	-
8L32	4 000	4 640
9L32	4 500	5 220
12V32	6 000	6 960
16V32	8 000	9 280
18V32	9 000	-

Dimensions (mm) and weights (tonnes)								
Engine type	A*	A	B*	B	C	D	F	Weight
6L32	4 980	5 260	2 560	2 490	2 305	2 345	1 155	33.3
7L32	5 470	5 750	2 560	2 490	2 305	2 345	1 155	39.0
8L32	5 960	6 245	2 360	2 295	2 305	2 345	1 155	43.4
9L32	6 450	6 730	2 360	2 295	2 305	2 345	1 155	46.8
12V32	6 935	6 615	2 715	2 665	3 020	2 120	1 475	58.7
16V32	8 060	7 735	2 480	2 430	3 020	2 120	1 475	74.1
18V32	8 620	8 295	2 480	2 430	3 020	2 120	1 475	81.2

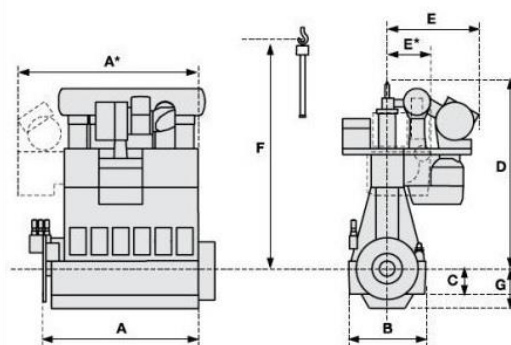


Wärtsilä RT-flex50, version D		IMO Tier II	
Cylinder bore	500 mm	Fuel specification:	
Piston stroke	2050 mm	Fuel oil	700 cSt/50°C
Speed	99-124 rpm	ISO-F 8217:2005	
Mean effective pressure at R1	21.0 bar	category ISO-RMK700	
Piston speed	8.5 m/s		

Rated power, principal dimensions and weights							
Cyl.	Output in kW at				Lenght A mm	Lenght A* mm	Weight tonnes
	124 rpm		99 rpm				
	R1	R2	R3	R4			
5	8 725	6 100	6 975	6 100	5 582	6 952	200
6	10 470	7 320	8 370	7 320	6 462	7 950	225
7	12 215	8 540	9 965	8 540	7 342		255
8	13 960	9 760	11 160	9 760	8 222		280

Dim. mm	B	C	D	E	E*	F ¹	G
	3 150	1 088	7 646	3 300	1 955	9 270	1 636

1- Standard piston dismantling height, can be reduced with tilted piston withdrawal.



Brake specific fuel consumption (BSFC) in g/kWh						
Full load						
Rating point			R1	R2	R3	R4
BMEP, bar			21.0	14.7	21.0	18.4
BSFC	RT-flex	Standard Tuning	170	164	170	166

Part load, % of R1	85	70	85	70	60
RT-flex tuning variant	Standard	Standard	Delta	Delta	Low-Load
BSFC	166.4	166.0	165.7	164.5	162.2

Bilaga 2

Resultat från test med generatorrigg.

Test	Varvtal	Frekvens Hz	Vin VDC	Iin ADC	Pin Watt	Im ADC gen.	Vut VAC	Iut AAC	Vut VDC	Iut ADC	Put Watt	Verkningsgrad
1	250	8,3	38,9	0,8	30,3	0,55	43,0	0,1	57,6	0,1	6,9	22,8
2	250	8,3	37,3	0,7	27,6	0,28	36,5	0,1	48,9	0,2	8,8	31,9
3	250	8,3	37,3	1,1	40,7	0,33	38,0	0,3	50,9	0,4	18,8	46,3
4	250	8,3	38,2	1,7	64,9	0,41	39,5	0,5	52,9	0,7	35,5	54,6
1	500	16,7	77,0	1,1	82,4	0,55	89,5	0,2	119,9	0,3	30,0	36,4
2	500	16,7	73,5	1,1	77,9	0,28	73,8	0,3	98,9	0,4	34,6	44,4
3	500	16,7	73,6	1,8	129,5	0,33	76,4	0,5	102,4	0,7	74,7	57,7
4	500	16,7	74,0	2,9	210,9	0,41	78,8	0,9	105,6	1,3	139,4	66,1
1	750	25,0	119,0	1,4	161,8	0,55	136,0	0,3	182,2	0,4	65,6	40,5
2	750	25,0	109,8	1,4	151,5	0,28	111,4	0,4	149,3	0,5	77,6	51,2
3	750	25,0	109,0	2,4	257,2	0,33	114,3	0,8	153,2	1,1	166,9	64,9
4	750	25,0	109,5	4,0	438,0	0,41	117,1	1,4	156,9	2,0	307,5	70,2
1	1000	33,3	157,0	1,6	251,2	0,55	180,5	0,3	241,9	0,5	113,7	45,3
2	1000	33,3	146,0	1,7	243,8	0,28	148,0	0,5	198,3	0,7	136,8	56,1
3	1000	33,3	144,5	2,9	420,5	0,33	151,0	1,0	202,3	1,4	289,3	68,8
4	1000	33,3	144,0	5,0	724,3	0,41	154,3	1,8	206,8	2,6	531,4	73,4
1	1500	50,0	217,5	1,6	341,5	0,26	220,0	0,4	294,8	0,6	168,0	49,2
2	1500	50,0	216,5	2,2	482,8	0,28	221,0	0,7	296,1	1,0	302,1	62,6
3	1500	50,0	214,5	3,9	834,4	0,33	220,0	1,5	294,8	2,1	613,2	73,5
4	1500	50,0	209,3	6,6	1383,5	0,41	220,0	2,6	294,8	3,6	1070,1	77,4
5	1260	42,0	175,4	6,6	1157,6	0,65	220,0	2,0	294,8	2,9	852,0	73,6
6	930	31,0	152,5	6,8	1030,9	0,44	127,5	3,1	170,9	4,4	758,6	73,6

Förklaringar:

Vin: Spänning till motor.

Iin: Ström till motor.

Pin: Effekt till motor.

Im: Magnetiserings ström i generatorns rotor.

Vut: Spänning från generator.

Iut: Ström från generator.

Put: Effekt från generator.

VDC: Volt likspänning.

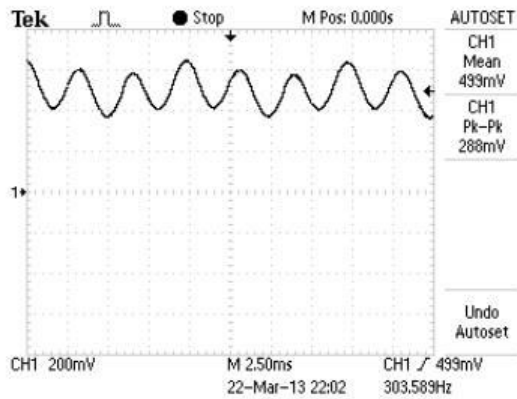
ADC: Ampere likström.

VAC: Volt växelspanning.

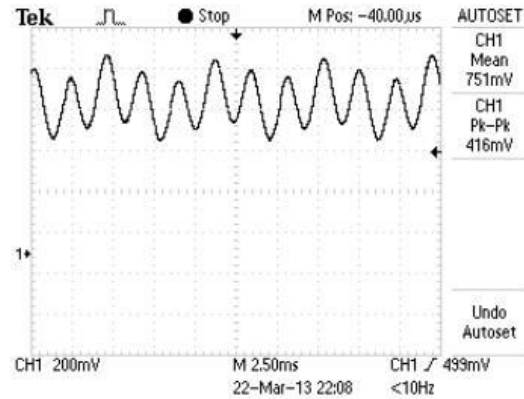
AAC: Ampere växelström.

Bilaga 3

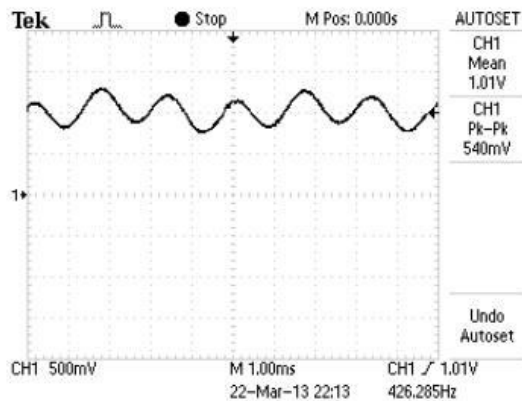
Bilder tagna på oscilloskop visar likspänningen efter diodlikriktarna vid olika varvtal.



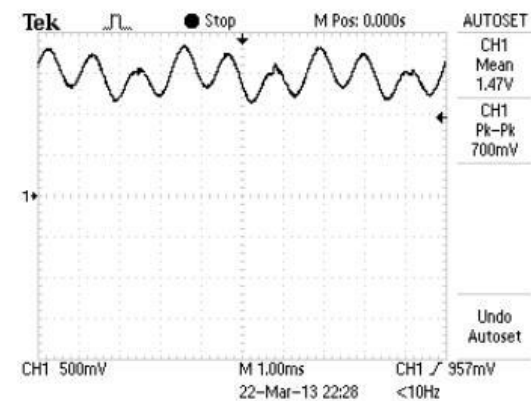
500 rpm 100 VDC Test 2



750 rpm 150 VDC Test 2



1000 rpm 198 VDC Test 2



1500rpm 290VDC Test 2

Förklaring:

Olika utseende hos kurvorna beror på olika upplösning i oscilloskopet. På y axeln visas spänning med en upplösning på 200 millivolt per ruta i de två övre bilderna och 500 millivolt per ruta i de två undre bilderna. På x axeln visas frekvens med en upplösning på 2,5 millisekunder per ruta i de övre bilderna och 1 millisekund i de två undre bilderna.

I ingången kopplades en differensprob som har till uppgift att dela spänningen för att inte skada oscilloskopet med höga spänningar. Denna differensprob delade spänningen med 200.

Bilaga 4

Experimentutrustning. Egen bild.



Utrustning från vänster:
Spänningsaggregat
Likströmsmotor
Synkrongenerator
Likriktare
Variabel resistor

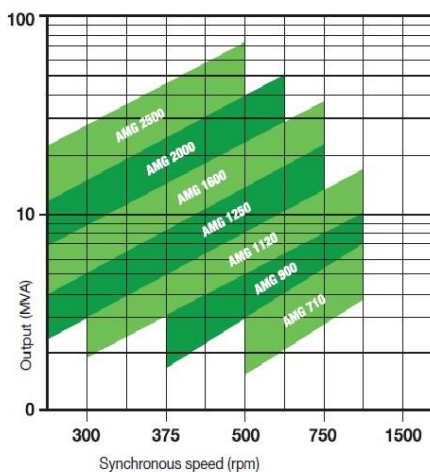
Bilaga 5

Använd med tillstånd från ABB.

www.abb.se/productguide - Synkrogeneratorer - Generatorer för diesel- och gasmotorer - Flygblad
(Product note - Synchronous marine generators. Dok.nr: PM004)

Key figures:

Frame sizes	710 - 2500 (IEC)
Voltage	upto 15 kV
Number of poles	4 - 30
Frequency	50/60 Hz
Power range	upto 50 MVA



Output vs. speed at 6 kV and 50 Hz

Main features of the AMG marine generator

- Synchronous generator with brushless excitation
- Rigid construction with flange mounted or pedestal bearing
- Temperature rise / insulation class F/F (std)
- Totally enclosed, water cooled (IC8A1W7/TEWAC) with possibility of emergency cooling as an open machine
- Protection classes IP23, IP44 up to IP56
- Freedom to determine direction of main connection
- Latest design digital AVR's
- Designed according to applicable IEC regulations
- Available with following certificates:
 - LRS, DNV, GL, BV, NK, KRS, Russian Maritime, CCS, ABS, US Coast Guard, RINA
- Supplied for wide range of different vessel types:
 - cruisers, car and train ferries, ice-breakers, multi-purpose tankers, LNG tankers, ice-going vessels, supply vessels, drilling rigs
- Wide range of application specific accessories, both standard and optional

After sales services

ABB has built a global presence through its worldwide organization and network of carefully selected partners. We aim to provide active support to all our customers at every stage of the project and beyond.

For more information please contact:

www.abb.com/motors&generators

© Copyright 2010 ABB. All rights reserved.

PM004 EN Rev C

Power and productivity
for a better world™

