

«Nullutslippshelikopter», framtidens helikopter?



Robinson R22

Studenter i samarbeid med Alva Industries har gjennomført en brukerundersøkelse som har resultert i dimensjoneringsverktøy for elektriske helikoptre.

Alva Industries er en norsk produsent som spesialiserer seg på elektromotorer til droner. Nå ønsker de seg et dimensjoneringsverktøy for enklere å kunne designe elektrisk fremdriftssystem for vertikal takeoff og landing for luftfartøy.

Fire studenter ved NTNU har benyttet seg av metoden Idealitet og gjennomført en brukerundersøkelse. Blant annet resultatene fra dette ble brukt for å designe dimensjoneringsverktøyet.

Klimavennlig lufttransport

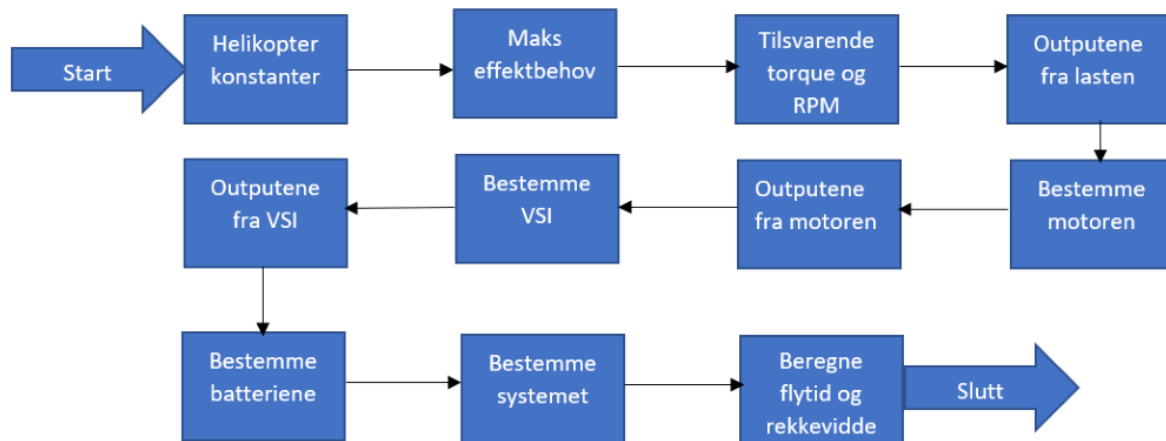
Verden er inne i en periode hvor klima og global oppvarming er sterkt i fokus blant politikere, befolkning og forskningsmiljø rundt om i verden. Det gjøres grep for å hindre videre global oppvarming ved å ta i bruk ny teknologi. Dagens situasjon er slik at det er svært få elektriske helikoptre, og det er gjort relativt lite forskning og utvikling på dette området sammenlignet med andre fremkomstmidler som for eksempel bil, båt og fly. Rotoren på et konvensjonelt helikopter drives av én eller flere gassturbiner eller stempelmotorer. Ved å drive helikoptre med elektromotor/strøm, vil utslippene fra lufttransporten kunne reduseres betraktelig.

Hovedformålet med denne bacheloroppgaven har derfor vært å gjennomføre en mulighetsstudie for elektrifisering av helikoptre av forskjellige størrelser, fra store bemannede helikoptre helt ned til droner. Studentene har gjennom en brukerundersøkelse kartlagt hva teknisk personell, piloter og mekanikere mener og tror kan bli elektrisk i et helikopter. Videre i oppgaven har studentene tatt for seg eksisterende helikoptertyper og dimensjonert fremdriftssystemene. Dette ble gjort for å se hva som kreves og for å se hvor langt unna dagens teknologi er. Til slutt har studentene brukt de kunnskapene de har tilegnet seg for å lage et grovt dimensjoneringsverktøy for slike fremdriftssystemer.

Dimensjonering av elektrisk helikopter:

For å dimensjonere et elektrisk fremdriftssystem som erstatter det eksisterende, må komponenter legges til og eller erstattes. Energikilden og motoren erstattes med elektriske ekvivalenter, batterier og en elektrisk motor. For at et helikopter skal fly må det motvirke tyngdekraften, dermed er vekten det viktigste. Komponentene må være så lette som mulig, samtidig som de må levere effekt. De må velges for å ha høyest mulig spesifikk energi. Derfor benyttes en PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) som motor, og litium ion batterier i denne oppgaven. Bruken av en PMSM gjør at en frekvensomformer er nødvendig for å kunne justere hastigheten uten at den stopper. Fordi en PMSM er en AC-motor må DC-spenningen fra batteriene gjøres om, og frekvensomformerens må være en VSI (Voltage Source Inverter). Det benyttes tenkte komponenter, og den spesifikke energien antas å være topp moderne. Det vil si 2,2kW/kg for motor og omformer, og 0,265kWh/kg for batteriene.

I et system med motor slik som for et helikopter starter dimensjoneringen i lasten, og beveger gradvis mot energikilden. Komponentene bakover i systemet er hele tiden avhengige av outputene fra de tidligere. Slik blir det en iboende sammenheng og logikk i dimensjoneringen. Oversikten over alle stegene beskrives i flytskjemaet under.



Casestudie: Robinson R66

I denne artikkelen vil helikoptertypen Robinson R66 benyttes i utregningene. De helikopterspesifikke konstantene for R66 er slik:

Konstant R66	Verdi
K	1,13
C_{do}	0,0125
T=G[N]	12017,25
ρ [kg/m ³]	1,225
A_b [m ²]	3,027
A[m ²]	79,45

De helikopterspesifikke konstantene benyttes i effektutregningene, som her er ved maksimal vertikal stigning ved maks vekt.

$$P = \kappa(V_c + v_i)T + \frac{1}{8}C_{D0}\rho A_b V_T^3$$

Formelen for de ukjente hastighetene V_c og v_i :

$$V_c + v_i = \frac{1}{2}V_c + \sqrt{\left\{\left(\frac{1}{2}V_c\right)^2 + \frac{T}{2\rho A}\right\}}$$

Det maksimale effektbehovet til R66 er 204,3kW, og det nominelle er 83% av maks som blir 169,57kW. Girene antas å være ideell så effekten fra motoren er lik effekten i lasten. Det antas vanlig frekvens på 50Hz og fire poler, så den synkrone hastigheten er $n = \frac{120 \cdot f}{p} = 1500\text{RPM}$.

Dreiemomentet blir da $\frac{169,57kW \cdot 9549,3}{1500\text{RPM}} = 1079,5Nm$, og det maksimale $\frac{1079,5Nm}{0,83} = 1300Nm$.

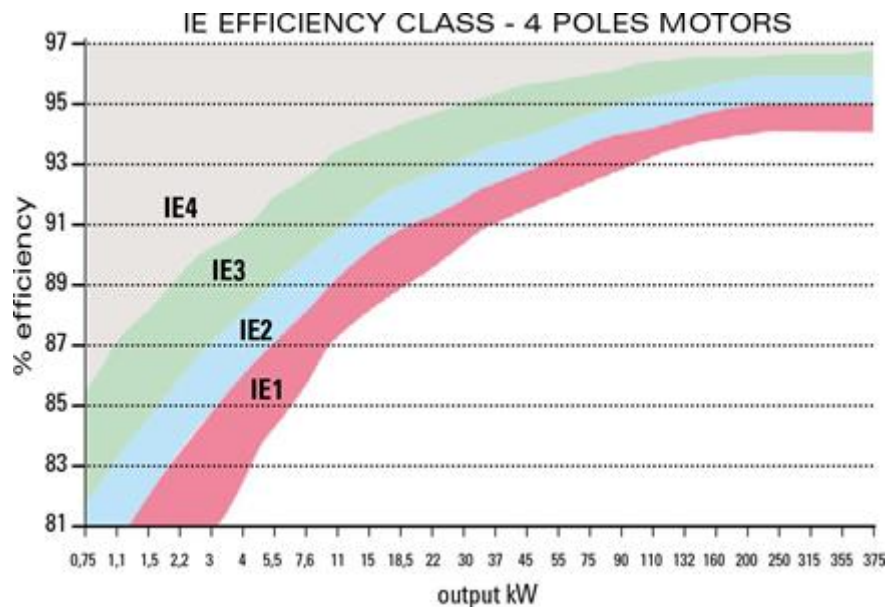
Rotasjonshastigheten til motoren er mer eller mindre lik uavhengig av arbeidspunkt, 1500RPM for maks, og 404-412RPM= ca 1485-1514RPM for nominell.

Ved en kvadratisk last skal ikke overlasten være mer enn 110% av merkeverdien, så merkeverdien til motoren blir $\frac{204,3kW}{1,1} = 185,72kW$. Det antas vanlig spenning på 380-400V,

så strømmene bestemmes ved $\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U}$ for alle punktene. Det gir en merkestrøm på

$$\frac{185,72kW}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 268,07A, \text{ maksimal strøm på } \frac{204,3kW}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 294,9A \text{ og nominell strøm på } \frac{169,57kW}{\sqrt{3} \cdot 400V} =$$

244,76A. Forutsatt effektfaktor lik 1.



For å ha en høy effektivitet antas effektivitetsklasse IE4. En fire pols motor med merkeeffekt på 185,72kW har ut ifra figuren effektivitet lik 97%.

VSI-en må lik spenning som motoren, og må tåle en strøm som er større eller lik motorstrømmen til enhver tid. Merkespenningen må derfor være lik eller større, så den settes lik 185,72kW. Effektiviteten til en lavspennings VSI som denne er typisk 98%.

Litium batterier med høyest spesifikk energi på 0.265 kWh/kg blir valgt i dette tilfellet, på maks 4.2 volt per celle, med 20 ganger utladningsraten.

Dimensjoneringen på batteriene må være lik input DC-merkespenning til frekvensomformerer, derfor settes det et antall celler i serie slik at den rette spenningen på rundt 400V kommer fram, så settes resterende celler i parallell.

$$295A/20C=14,75 \text{ Ah}$$

Det trengs en celle som tåler minst 14,75 Ah ved 20C.

Ideelt må man ta hensyn til den sykliske levetiden, som er mellom 50% DOD og 80% DOD.

$$14.75Ah * 1/0,8 = 18.44 \text{ Ah}$$

Medberegnet drivstoff er ca. 146 kg for dette helikopteret

$$265\text{Wh/kg} \cdot 146\text{ kg} \cdot 4.2\text{V} \cdot 18.44\text{Ah/celler} = 500\text{ celler}$$

Antall i serie er $400\text{V} / 4.2\text{ V} = 95$ celler

Vil ha et heltall i parallell, så sier antall i serie = 100

Ny spenning er da $100 \cdot 4.2\text{V} = 420\text{V}$ som er innenfor på frekvensomformerer.

Da kan det velges en celle ved 20C, med minimum kapasitet på:

$$295\text{A5Paralell} \cdot 20\text{C} \cdot 10.8 = 18.44\text{ Ah} \cdot 5 = 3.69\text{ Ah}$$

Den samlede vekten til motoren og frekvensomformerer er $168,84 = \text{ca } 169\text{kg}$. Effektiviteten er produktet av enkeltkomponentenes effektivitet og blir $0,97 \cdot 0,98 = 0,95 = 95\%$. Vekten til drivstoff i R66 er 224kg , men vekten til motorsystemet er 169kg kontra 91kg for det opprinnelige. Det etterlater 146kg til drivstoff. Batterienes spesifikke energi gir $146\text{kg} \cdot 0,265\text{kWh/kg} = 38,69\text{Wh}$ totalt i batteriene. Effekten som går til lasten blir da $0,95 \cdot 38,69\text{kWh} = 36,755\text{kWh}$. Dette kan forsyne helikopteret i

$$\frac{36,755\text{kWh}}{\frac{204,3\text{kW}}{12} + \frac{11 \cdot 169,57\text{kW}}{12}} = 0,213\text{h} = 12,787\text{ minutter. Opptil 5 minutter forbeholdes stigning, resten}$$

ved cruisehastighet. Rekkevidden til helikopteret blir $(12,786-5)\text{min} \cdot 204\text{km/h} = 26,4758\text{km}$, og den maksimale rekkevidden blir $12,787\text{min} \cdot 204\text{km/h} = 43,476\text{km}$.

Data for det dimensjonerte drivverket:

Maks effekt[kW]	204,3
Kontinuerlig effekt[kW]	169,57
Merkeeffekt[kW]	185,72
Vekt (motor og frekvensomformer[kg])	169
Maks drivstoff[kg]	146
Drivstoff typer	Litium ion batteri(er)
Drivstoff spesifikk energi[kWh/kg]	0,265
Effekt per kilo(PMSM og VSI)[kW/kg]	1
Rekkevidde[km]	26,4758
Maks rekkevidde[km]	43,476
Flytid[Time]	0,213

Fordeler og ulemper

Det er beregnet at det er muligheter for å spare 1200000 tonn CO2 ekvivalenter ved at all innenlands flytrafikk går over til elektriske energikilder. En annen fordel er at livskostnaden er lavere, av to grunner.

1: Vedlikeholdet til en PMSM er lavere enn for bensinmotoren, noe som sparer vedlikeholdskostnader og eventuelle kostbare pauser for kommersiell drift.

2: Drivstofforbruket per time er henholdsvis 172,46kWh og 87L. Prisene er 46,8 øre per kWh (fjerde kvartal 2019) og 17,14kr per gallon jet fuel=4,528kr per L (desember 2019). Det tilsvarer $0,468\text{kr/kWh} \cdot 172,46\text{kWh} = 80,7\text{kr}$ og $4,528\text{kr/L} \cdot 87\text{L} = 394\text{kr}$, så prisen per time er nesten 5 ganger så lav for strøm

Andre positive fordeler er økt sikkerhet med lavere vedlikeholdsbehov og færre bevegelige deler, og at en elektrisk motor er mer stillegående likt for en elektrisk bil.

Deltagernes meninger om elektriske helikoptre

Brukerundersøkelsen hadde deltagere fra følgende bedrifter/organisasjoner:

- Kongsberg Aerospace and Defence (KAD)
- Norsk helikopteransattes forbund
- Kontaktpersoner i Luftforsvaret
- Avinor

Av de 61 deltagerne som deltok på brukerundersøkelsen er de fleste positive til elektriske helikoptre, 56,8% av de som har en oppfatning mener at helikoptre vil bli helelektriske. Deltakerne er også positive til fly-by-wire.

Deltagerne er enige om at elektromotor kan benyttes til halerotor. Halerotor med elektrisk motor støttes av 80,3% av deltakerne.

På spørsmålet om pitching på halerotoren kan erstattes med en elektromotor med variabelt turtall, svarer 54,1 % ja til at dette vil fungere, mens 14,8% svarer nei. Dette spørsmålet var Alva Industries interessert i å finne utav på grunn av mulige bruksområder for deres elektromotorer.

Mye av bekymringene til deltagerne synes å være knyttet til sikkerhet ved batterier, hvor fare for brann, kortslutning og overoppheting nevnes.

Når det gjelder bruk peker deltakerne først og fremst på flytid/rekkevidde og nyttelast som viktige egenskaper, og deltakerne tror at vekt vil være en begrensende faktor her.

Dimensjoneringsverktøy for fremdriftssystemer

Det er opprettet et dimensjoneringsverktøy for enkle beregninger av flytid og dimensjonering av fremdriftssystemer. Brukergrensesnittet på verktøyet ser slik ut:

The screenshot shows a software interface for aircraft propulsion system design, divided into two main sections: 'Aircraft propulsion system design variant 1' and 'Aircraft propulsion system design variant 2'. Each section contains a series of input fields and dropdown menus for configuring various components.

Top Section: Aircraft configuration and flight cycle definition

- Aircraft configuration:** Aircraft unloaded weight g, Payload weight, g, Number of propulsion axes.
- Flight cycle definition:** Time period 1, 2, 3, sec; Thrust 1, 2, 3, g.

Variant 1 Configuration:

- Propeller:** T-motor G27 8.8CF (dropdown), RPM, Thrust vs RPM, Torque, Torque vs RPM, maxRPM, maxTorque, Thrust curve.
- Motor:** Auto (dropdown), Required max AC voltage, Type, Required rated AC current, Model number, Required max AC current, Type 1 (dropdown), Show motor efficiency map, Required frequency.
- Controller:** Auto (dropdown), Max current DC, Type, Rated current DC, Model number, DC Voltage.
- Battery type:** Lead (dropdown), Specific energy, Wh/kg, Model, Energy density, Wh/l, Parallell, Series.
- Calculated:** Flight time (unloaded), min; Flight time (loaded), min.

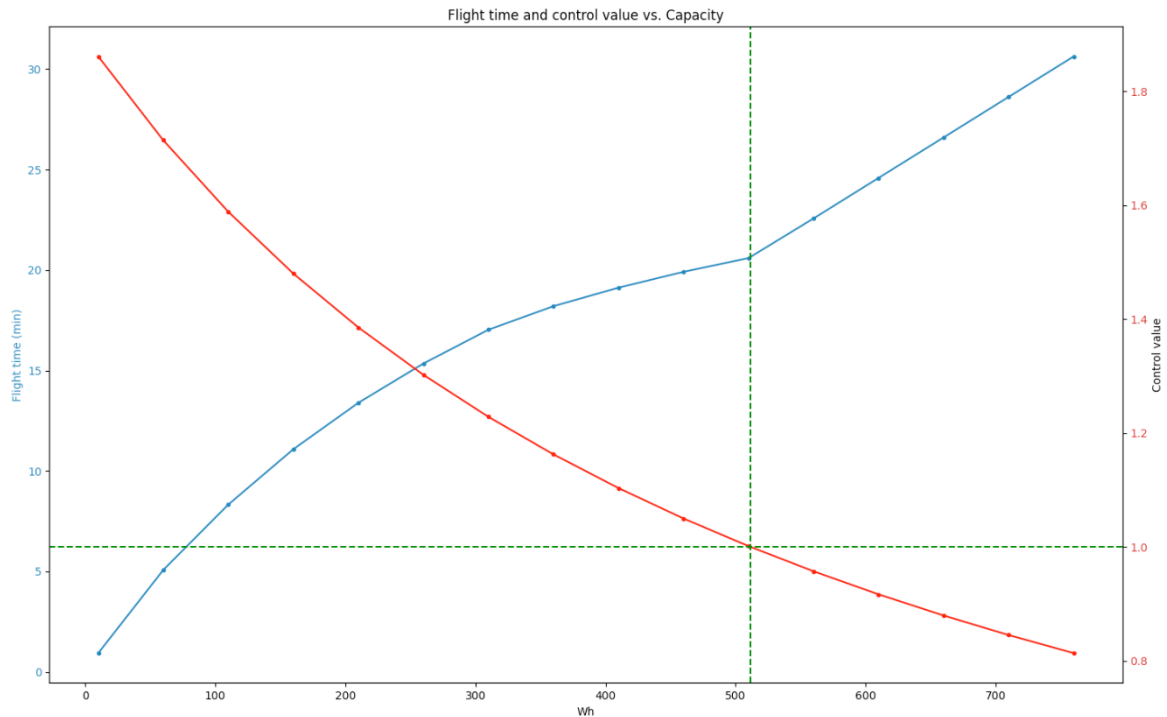
Variant 2 Configuration:

- Propeller:** T-motor G27 8.8CF (dropdown), RPM, Thrust vs RPM, Torque, Torque vs RPM, maxRPM, maxTorque, Thrust curve.
- Motor:** Auto (dropdown), Required max AC voltage, Type, Required rated AC current, Model number, Required max AC current, Type 1 (dropdown), Show motor efficiency map, Required frequency.
- Controller:** Auto (dropdown), Max current DC, Type, Rated current DC, Model number, DC Voltage.
- Battery type:** Lead (dropdown), Specific energy, Wh/kg, Model, Energy density, Wh/l, Parallell, Series.
- Calculated:** Flight time (unloaded), min; Flight time (loaded), min.

Bottom Section: Action buttons

- Calculate 1, El. eff. vs Thrust, El. eff. vs RPM, Compare systems, Compare efficiencies, Compare thrust curves, El. eff. vs RPM, El. eff. vs Thrust, Calculate 2.

Programmet brukes til å sammenligne ulike designvarianter og beregning av flytid for disse. Komponentenes spesifikasjoner er lagret i CSV-filer som programmet henter ut for beregninger. Programmet beregner til slutt en flytid og gir en graf som viser flytiden som en funksjon av batterikapasiteten. Denne grafen viser også en kontrollverdi som beskriver hvor totalvekten av fartøyet blir for tungt og dermed ikke kan løftes. Her er et eksempel på en slik graf:



Programmet gir også brukeren mulighet til å se ulike grafer for virkningsgraden av systemet, samt et sammenligningsbilde av vekt, pris, elektrisk virkningsgrad og flytid.

Konklusjon

Deltakerne i undersøkelsen har generelt tro på elektriske helikoptre. Undersøkelsen viser at deltakerne er enige med forsknings- og utviklingsmiljøer om at elektromotorer og batterier kan brukes. Deltakerne støtter ikke ladbar-hybrid som et neste utviklingstrinn, men er positive til hydrogen som energibærer.

Et elektrisk helikopter er med dagens topp moderne komponenter ikke en likeverdig erstatter for et vanlig helikopter. Flytiden og rekkevidden er mye lavere, som gjør at bruksområdet blir mindre. Det er allikevel mulig å dimensjonere et fungerende helelektrisk helikopter, som kan fly. Grunnen til at flytiden og rekkevidden er lavere er hovedsakelig på grunn av batterienes lave spesifikk energi, 0,265kWh/kg kontra ca. 12kWh/kg for drivstoffet. Likevel fortsetter ønsket om å elektrifisere luftfarten på grunn av de positive faktorene en elektrisk løsning har i forhold til et bensindrevet.