

Elektrisk Fremdriftsystem for Shell Eco-marathon PureChoice Kjøretøy

Beregning av motorstørrelse for drivstoffgjerrig elektrisk
hydrogenkjøretøy.

Bjørn Ola Wiik

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2008
Hovedveileder: Lars Einar Norum, ELKRAFT

Oppgavetekst

Hovedfokuset i denne masteroppgaven vil være å sørge for elektrisk framdriftssystem i Shell Eco-marathon hydrogenkjøretøyet. Dette innebærer bl.a. følgende arbeidsoppgaver:

- Beregne nødvendig motorstørrelse for PureChoice kjøretøyet.
- Valg av hensiktsmessige komponenter.
- Testing og verifisering av aktuelle komponenter for kjøretøyet.
- Simulering av mulige kjøremønstre for løpet.
- Overvåking av framdriftsparameter for kjøretøyet (bl.a. hastighet, strøm- og spenningsmåling) fra førerposisjon.
- Oppgaven inngår i et samarbeid med øvrige studenter i Shell Eco-marathon gruppen ved NTNU.
- Kandidaten skal være med på planlegging av reise og opphold i Frankrike i forbindelse med konkurransen "Shell Eco-marathon 2008".

Oppgaven gitt: 22. januar 2008

Hovedveileder: Lars Einar Norum, ELKRAFT

1 Forord

I forbindelse med arbeidet med masteroppgaven våren 2008 har jeg støtt på mange utfordringer hvor jeg har måtte kombinere teori og praksis. Læringskurven gjennom semesteret har vært bratt, men veien har ikke vært tung. Det har vært mitt mest lærerike semester noen sinne. Arbeidet i en tverrfaglig gruppe har belyst nye fagfelt og vinklinger som jeg tidligere ikke har vært borte i. Å kunne avslutte utdanningen med å skape et konkret produkt, for så å verifisere målene som ble satt med noe så konkret som en konkurranse var utrolig inspirerende.

Jeg vil gjerne få takke alle på PureChoice-teamet for et uforglemmelig semester.

Jeg vil og takke Nils Arild Ringheim ved SINTEF Energiforskning for all hjelp i forbindelse med bruk av hydrogenlaben på el-bygget, Bård Almås ved servicelaben for all hjelp med måleutstyr og komponenter og Asbjørn Solberg for at du blant annet "stakk innom" på Perleporten klokka tre på natta i slutten av april da teamet jobbet overtid for å ferdigstille bilen til 1. mai. Ellers vil jeg takke min hovedveileder, Lars Norum, og alle andre veiledere og øvrige personer som har vært delaktige i prosjektet.

En spesielt stor takk til samboeren min Elin Bøen for en utrolig grad av tålmodighet og forståelse for det jeg har jobbet med dette semesteret. Og takk til sønnen min, Snorre, for at du alltid er så blid.

Bjørn Ola Wiik
NTNU, Trondheim

Innholdsfortegnelse

1	Forord	I
2	Sammendrag	VI
3	Innledning	8
4	Paul Armagnac Race Circuit i Nogaro	10
4.1	Data for banen og løpet	10
5	Dimensjonering av motor	11
5.1	Valg av motortype	13
5.2	Sammenligning av ulike motordesign	13
5.3	Børsteløs likestrømsmotor	15
5.3.1	Formelverk for BLDC motor	18
5.3.2	Virkningsgrad og tap i BLDC	23
5.3.3	Motordrift for BLDC	25
6	Kjøretøy og bane – Beregningen og målinger	27
6.1	Start og akselerasjon	29
6.2	Luftmotstand og rullestand	30
6.3	Banens helning	31
6.4	Totalt sett	31
6.5	Regenerativ bremsing	32
7	Testing av motor med motordrift	35
7.1	Testoppsett	35
7.2	Model Motors AXI 5360/20	38
7.3	Transmotec B8671-36	41
7.4	DTC Lenze likestrømsmotor	44
7.5	SPIN 77 OPTO	45
7.6	Motordrift fra Ametek	47
7.7	Hastighetsregulering av system med AXI5360/20 og Spin 77 Opto	49
7.7.1	Målinger	49
7.7.2	Elektronisk krets for puls posisjon modulasjon	50
8	Oppkobling og oppsett i PureChoice kjøretøyet	53
8.1	Regulering av hastighet	53
8.2	Monitorering av parametre under kjøring	54
8.3	Vekten av systemet	55
8.4	Vern	55
8.5	Innfesting av motor	56
9	Optimaliseringer	57
10	Kjørestrategi	58
11	Diskusjon	60
12	Konklusjon	63
13	Referanser	64
14	Vedlegg	65
14.1	Måleserier for motortesting	65
14.2	Matlab-kode	69
14.3	Komponenter i "PPM-krets"	78
14.4	Kontaktinformasjon	78

Illustrasjonsliste

Illustrasjon 2.1: Tap i fremdriftssystemet.....	VII
Illustrasjon 4.1.1: Paul Armagnac Race Circuit.....	10
Illustrasjon 5.3.1: BLDC - Rotor og stator.....	18
Illustrasjon 5.3.2: Børsteløs DC-motor.....	18
Illustrasjon 5.3.3: Feltforhold i BLDC.....	19
Illustrasjon 5.3.4: Strømretninger for en rotasjon.....	20
Illustrasjon 5.3.5: Ekvivalent krets for BLDC og vekselretter.....	21
Illustrasjon 5.3.6: Moment- turtallskarakteristikk for BLDC.....	22
Illustrasjon 5.3.7: Kraftelektronisk motordrift.....	25
Illustrasjon 6.1: Banetopografil "Paul Armagnac Race Circuit".....	28
Illustrasjon 6.1.1: Effektbehov som funksjon av kjøretøyets hastighet ved konstant akselerasjon.....	29
Illustrasjon 6.2.1: Effektbehov som funksjon av hastighet. Variasjon i masse og aerodynamikk.....	30
Illustrasjon 6.3.1: Effektbehov som funksjon av banens helning.....	31
Illustrasjon 6.5.1: Komponenter i et regenerativ bremsesystem.....	32
Illustrasjon 6.5.2: Energitalp ved bruk av regenerativt bremsesystem.....	33
Illustrasjon 7.1.1: Skisse for oppsett i laboratoriet.....	35
Illustrasjon 7.1.2: Oppkobling BLDC og DC-generator.....	36
Illustrasjon 7.1.3: Måleoppsett for testing av BLDC motor med motordrift.....	37
Illustrasjon 7.2.1: Motordata for AXI5360/20.....	38
Illustrasjon 7.2.2: AXI5360/20 BLDC-motor.....	38
Illustrasjon 7.2.3: Moment- hastighetskurve for AXI5360/20.....	39
Illustrasjon 7.2.4: Arealplott av virkningsgrad for AXI5360/20. Funksjon av rotasjonshastighet og effekt.....	39
Illustrasjon 7.3.1: Transmotec B8671-36 BLDC-motor.....	41
Illustrasjon 7.3.2: Motordata for Transmotec B8671-36.....	41
Illustrasjon 7.3.3: Moment- hastighetskurve for Transmotec B8671-36.....	42
Illustrasjon 7.3.4: Arealplott av virkningsgrad for B8671-36. Funksjon av hastighet og effekt.....	42
Illustrasjon 7.4.1: Motor og generator fra DTC Lenze.....	44
Illustrasjon 7.5.1: Spin 77 Opto.....	45
Illustrasjon 7.5.2: "Jetibox". Programmeringsenhet for Spin 77 Opto.....	45
Illustrasjon 7.5.3: Spin 77 Opto uten kjøleribbe.....	46
Illustrasjon 7.5.4: Spin 77 Opto uten deksel.....	46
Illustrasjon 7.6.1: Data for Transmotec DBL motordrift.....	47
Illustrasjon 7.6.2: Transmotec DBL motordrift.....	47
Illustrasjon 7.6.3: Ametek motordrift med DSP.....	47
Illustrasjon 7.6.4: Data for Ametek motordrift.....	48
Illustrasjon 7.7.1: Forskjellen mellom PBM og PPM.....	49
Illustrasjon 7.7.2: "555-timer" fra Faichild.....	50
Illustrasjon 7.7.3: Skisse over krets som ble brukt til å generere hastighetspuls.....	50
Illustrasjon 7.7.4: Spennings-regulator.....	51
Illustrasjon 7.7.5: PPM, der T(høy) er bredden på pulsen.....	51
Illustrasjon 7.7.6: Krets for regulering av hastigheten motert på karbonfiberplate.....	52
Illustrasjon 8.1.1: Fremdriftssystemet i PureChoice kjøretøyet.....	53
Illustrasjon 8.1.2: Hastighetspedal.....	54
Illustrasjon 8.1.3: Motorrom.....	54
Illustrasjon 8.1.4: Motor og motordrift.....	54
Illustrasjon 8.2.1: Dashboard.....	54
Illustrasjon 8.4.1: Sikringsholder med smeltesikring.....	55

Illustrasjon 8.5.1: AXI5360/20 festet på "dropp-arm"	56
Illustrasjon 8.5.2: Motor og utveksling.....	56
Illustrasjon 11.1: Teoretisk kjørelengde som funksjon av virkningsgrad.....	62

Tabelliste

Tabell 1: Sammenligning mellom BLDC og DC-motor med børster.....	14
Tabell 2: Sammenligning mellom BLDC og Asynkronmotor.....	15
Tabell 3: Parametere for PureChoice kjøretøy og Nogaro banen.....	28
Tabell 4: Vekt av elektrisk fremdriftsystem i PureChoice kjøretøyet.....	55
Tabell 5: AXI5360/20 ved 75 watt akseleffekt	65
Tabell 6: AXI5360/20 ved 100 watt akseleffekt	65
Tabell 7: AXI5360/20 ved 150 watt akseleffekt	65
Tabell 8: AXI5360/20 ved 200 watt akseleffekt	66
Tabell 9: AXI5360/20 ved 250 watt akseleffekt	66
Tabell 10: AXI5360/20 Test for høy akseleffekt.....	66
Tabell 11: AXI5360/20 Test for 24 volt klemmespenning.....	66
Tabell 12: AXI5360/20 Test for 18 volt klemmespenning.....	67
Tabell 13: AXI5360/20 Test for 14,5 volt klemmespenning.....	67
Tabell 14: Transmotec B8671-36 ved 75 watt akseleffekt.....	67
Tabell 15: Transmotec B8671-36 ved 100 watt akseleffekt.....	68
Tabell 16: Transmotec B8671-36 ved 150 watt akseleffekt.....	68
Tabell 17: Transmotec B8671-36 ved 200 watt akseleffekt.....	68
Tabell 18: Transmotec B8671-36 ved 250 watt akseleffekt.....	68
Tabell 19: DTC Lenze 200 watt DC-motor ved 100 watt akseleffekt.....	69
Tabell 20: DTC Lenze 200 watt DC-motor ved 250 watt akseleffekt.....	69
Tabell 21: Komponenter i "PPM_krets"	78

2 Sammendrag

Shell Eco-marathon Europe ble første gangen arrangert i 1985 og går ut på at studenter fra høyskoler og universiteter i Europa konkurrerer om å bygge den mest energieffektive bilen. NTNU stilte i år med sitt første bidrag i konkurransen i klassen Urban Concept. Studentene som har stått for byggingen av bilen er tverrfaglig gruppe fra fem institutter og har hatt prosjektet som masteroppgave våren 2008.

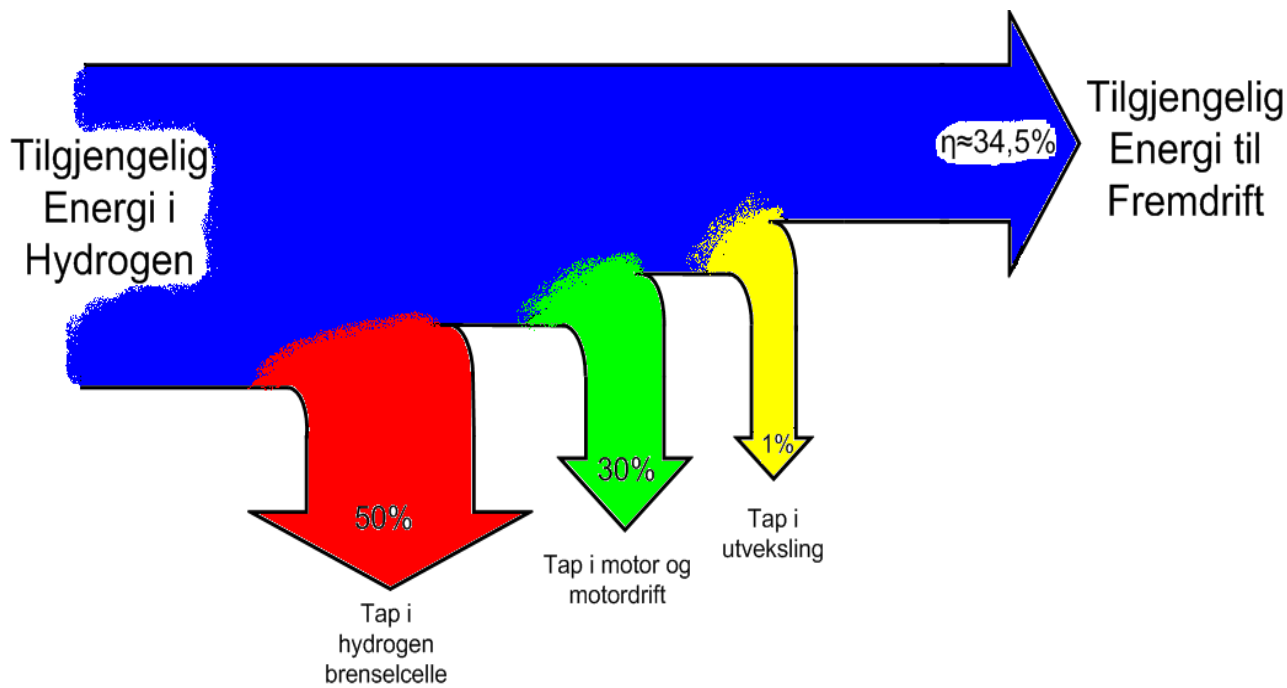
Shell Eco-marathon 2008 ble avholdt "Paul Armagnac Race Circuit" utenfor Nogaro i Sør-Frankrike. Data for banen er hentet inn, og sammen med PureChoice kjøretøyets parametre ble det gjort beregninger for effektområdet for elektrisk motor til bruk i fremdriftssystem. Beregninger viste at det var hensiktsmessig med kraftig akselerasjon ved start, og effektbehovet her ble dimensjonerende for motorens størrelse.

Ulike motortyper gir ulike muligheter. Etter en del vurderinger rundt teknologier og behov endte valget på børsteløs likestrømsmotor. Motorer av denne typen er separatmagnetisert ved hjelp av permanentmagneter og komuterer ved bruk av motordrift med komuteringslogikk og vekselretterbro. BLDC-motorer har høyt forhold mellom effekt og vekt, noe som var spesielt gunstig i denne situasjonen.

Testing av fremdriftssystemet i laboratoriet har vist forskjellen i virkemåte for ulike former for tilbakekobling av rotorposisjon. Både løsning med Hallsensor og metode for måling av motindusert spenning er prøvd ut. Målinger gjort for de ulike motorenes virkningsgrad avgjorde hvilken modell som ble brukt i fremdriftssystemet.

I løpet av april og mai ble PureChoice kjøretøyet satt sammen og ferdigstilt for deltakelse i Shell Eco-marathon den 22. til 24. mai 2008. Ved montering av fremdriftssystemet i kjøretøyet ble det lagt vekt på så enkle løsninger som mulig. Med dette menes at det ikke ble lagt til funksjoner utover det som var behovet for et funksjonelt fremdriftssystem. Resultatet ble et ryddig og oversiktlig motorrom som var lett å feilsøke og endre på.

Virkningsgraden for fremdriftssystemet er avgjørende for hvor langt det er mulig å kjøre på energiinnholdet i en liter bensin. Illustrasjon 8.5.2 viser tapene som forekommer fra hydrogentank til bevegelsesenergi ut på hjulet for PureChoice kjøretøyet.



Illustrasjon 2.1: Tap i fremdriftssystemet



Illustrasjon 2.2: PureChoice kjøretøyet eksplodert



Illustrasjon 2.3: PureChoice kjøretøyet

3 Innledning

Shell Eco-marathon

Shell Eco-marathon er en årlig konkurranse mellom studenter fra høyskoler og universiteter i Europa. Shell Eco-marathon startet opp i Europa i 1985, men ble første gang avholdt i Illinois, USA i 1939. Konkurransen går ut på å bygge et kjøretøy som kan kjøre lengst mulig på energien i en liter bensin. Stuntene kan selv velge hvilken type drivstoff de vil benytte og forbruket regnes om til energiekvivalent for Shell Unleaded Petrol 95. Konkurransen deles inn i to klasser etter kjøretøyets utforming; i Prototyp-klassen er det meste lov innenfor design og konstruksjon, mens i Urban Concept er det krav om at kjøretøyet skal være mest mulig likt en kommersiell bil. En tverrfaglig gruppe bestående av studenter fra fem forskjellige institutt utgjorde teamet som våren 2008 stilte med NTNUs første bidrag i konkurransen.

Rapporten

Rapporten er en slutføring av arbeidet som ble gjort i forbindelse masteroppgave ved NTNU, institutt for elkraftteknikk våren 2008. Oppgaven gikk i hovedsak ut på å dimensjonere elektrisk fremdriftsystem, bestående av elektrisk motor og motordrift, til hydrogenkjøretøy for deltakelse i Shell Eco-marathon 2008. Rapporten er konsentrert rundt dette arbeidet, men i tillegg innebar arbeidet gjennom semesteret oppkobling av systemet og bygging av kjøretøy. Planlegging av reise til Frankrike hvor konkurransen ble avholdt var også en del av de praktiske oppgavene som ble gjort i forbindelse med deltakelsen.

Rapporten følger progresjonen i arbeidet gjennom semesteret fra beregninger for nødvendig størrelse på motor, testing og verifikasjon av komponentene, til praktisk implementering av systemet i PureChoice kjøretøyet.

Tidsrammen for arbeidet var vårsemesteret 2008, noe som begrenset mulighetene for spesialdesign av motor og motordrift. Det innebar at komponentene i hovedsak måtte være kommersielle produkter konstruert av en uavhengig part. I denne situasjonen er det spesielt viktig å ha kjennskap til områdene motor og motordrift jobber innenfor. På denne måten kan man dra nytte av kunnskapene for optimal utnyttelse av fremdriftsystemet under løpet.

Tidligere arbeider

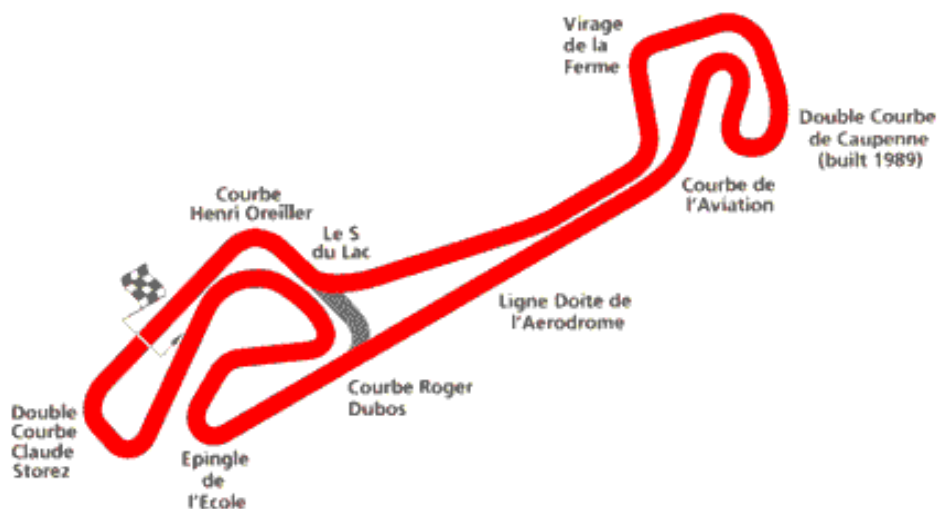
Største parten av de øvrige gruppemedlemmene startet arbeidet med kjøretøyet i høstsemesteret 2007, da som forprosjekt til masteroppgaven. Rapporten fra dette arbeidet tar for seg de innledende fasene for prosjektet og anbefales for å danne et større overblikk over omfanget av gruppens arbeid.

4 Paul Armagnac Race Circuit i Nogaro

"Paul Armagnac Race Circuit" ligger rett nord for byen Nogaro sør i Frankrike. Banen er konstruert med tanke på bil- og motorsykkellrace, den har derfor doserte svinger og veidekke som holder høy standard. Bilde av banen er å finne på Google Earth. Dette bildet er fra før stadionområdet ble bygget ut, men det viser banens form og størrelse. Under Shell Eco-marathon 2008 var det den nord-vestlige delen av banen som ble brukt for deltakere i klassen Urban Concept.

4.1 Data for banen og løpet

Banens lengde for klassen Urban Concept er 1620 meter og et løp består av 14 runder, tilsammen 22680 meter. Et løp skal gjennomføres innen maksimaltid på 54 minutter og 25 sekunder, inkludert tre "pit-stopp". Banens bratteste punkt har en stigning på hele 2,2 % stigning, men strekkingen utgjør bare litt over 52 meter. Banens krappeste sving har en radius på omtrent 30 meter, basert på måling i Google Earth. Banens topografi er vist i illustrasjon 6.1.



Illustrasjon 4.1.1: Paul Armagnac Race Circuit

5 Dimensjonering av motor

Parametere for den elektriske motoren beregnes på bakgrunn av kjøretøyet og banens fysiske mål. Turtallsområde, moment og tilgjengelig akseleffekt for motoren er de tre viktigste med tanke på ren bevegelse. For å kunne hevde seg i konkurransen er god virkningsgrad for fremdriftssystemet avgjørende. Vekt har også en viss betydning, særlig ved kjøring på bane med store høydedifferanser. Følgende formler ble lagt til grunn for beregning av motorens effektbehov.

Rullemotstand.

Kjøretøyets rullemotstand kommer i hovedsak fra friksjon mellom dekk og underlag. I tillegg er det friksjon i utveksling og kulelager. Rullemotstanden varierer i liten grad med kjøretøyets hastighet og blir ofte antatt å være konstant.

$$F_r = \mu_r m g \quad (5.1)$$

Koeffisienten for rullemotstand, μ_r , avhenger i hovedsak av trykket i dekkene og gummiblandingen som blir brukt. Verdien kan variere fra 0,0024, for dekk brukt i klasse for Prototyp, til 0,015 for vanlige radialdekk. Rullemotstand kan måles ved for eksempel å trekke kjøretøyet på plant underlag og måle kraften med fjærvekt. Rullemotstanden er da forholdet mellom utslaget på vekten og kjøretøyets vekt.

Aerodynamisk motstand.

Aerodynamisk motstand er kjøretøyets friksjon mot luften som passerer rundt det. Vanligvis utnyttes det til å skape løftekraft på fly, eller mark-trykk for en racerbil. Aerodynamisk motstand er avhengig av lufttetthet, frontareal, "drag" koeffisient og hastighet.

$$F_{ad} = 1/2 \rho A_{Cd} v^2 \quad (5.2)$$

Lufttettheten avhenger av trykk, temperatur og fuktighet, men i de fleste sammenhenger kan verdien antas å være konstant ved $1,25 \text{ kg m}^{-3}$. Koeffisienten for luftmotstand C_d ble antatt å være cirka 0,2 for PureChoice-kjøretøyet.

Motstand i bakke.

Kraften som trengs for å komme opp en bakke er kun avhengig av kjøretøyets vekt (målt i Newton), og vinkelen på helningen.

$$F_b = m g \sin(\psi) \quad (5.3)$$

Det er verdt å merke seg at selv en liten helning på bare noen få grader, vil gi et stort utslag i hvor stor kraft motoren må ha til rådighet.

Akselerasjon.

I følge Newtons andre lov er lineær akselerasjon gitt som

$$F_{la} = m a \quad (5.4)$$

Motorens treghetsmoment.

For de fleste elektriske motorer vil ikke treghetsmoment for motoren utgjøre mange prosent i forhold til bilens masse. Derimot vil motorens akselerasjon ha betydning ved høye hastigheter. Her er det også naturlig å ta hensyn til girets virkningsgrad.

$$F_{\omega a} = I \left(\frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) a \quad (5.5)$$

Ligningen tar hensyn til motorens treghetsmoment, utveksling, utvekslingens virkningsgrad og vinkel-akselerasjon. For tannreim- og kjededrift vil "r" være dekkets radius. I tilfeller der motorens treghetsmoment ikke er kjent kan en god tilnærming være å legg til 5% på akselerasjonskraften.

Summen av kreftene.

Den totale kraften vil være summen av disse leddene:

$$F_{tot} = F_r + F_{ad} + F_b + F_{la} + F_{\omega a} \quad (5.6)$$

Effekt kan beregnes ved å multiplisere kraften med hastighet:

$$P = F_{tot} v \quad (5.7)$$

Moment er kraft multiplisert med armen kraften virker på:

$$T = F_{tot} s \quad (5.8)$$

5.1 Valg av motortype.

Forskjellige design av elektrisk motor har ulike egenskaper utover å dekke behovet for effekt levert til lasten. Følgende kriterier ble ansett som viktige ved valg av motortype for bruk i PureChoice kjøretøyet.

- Effektområde.
- Moment ved start.
- Moment for kjøring i bakke.
- Turtallsområde.
- Moment- turtalls karakteristikk.
- Vekt.
- Forhold mellom effekt og vekt (antall watt per kilo).
- Behov for kraftelektronikk og styring.
- Virkningsgrad.
- Systemspenning under 50 volt i henhold til Shell Eco-marathon reglement.

Mindre viktige aspekter.

- Støynivå.
- Mekanisk styrke.
- Pris.

5.2 Sammenligning av ulike motordesign.

Tabell 1 og Tabell 2 er en sammenfatning av motordesign som ble vurdert ved valg av motor til PureChoice kjøretøyet. Alle former for motordesign som innebar separat magnetisering av rotor/stator (av type synkronmotor og separatmagnetisert DC) ble ikke vurdert da energien til dette i så fall måtte blitt tilført systemet. Permanentmagnetdesign ble ansett som en fornuftig teknologi ved siden av asynkronmotor. Permanentmagnet synkronmotor (PMSM), som har omtrent samme virkemåte som børsteløs likestrømsmotor (BLDC), ble også vurdert. Børsteløs DC og permanentmagnet synkronmotor er forholdsvis like i konstruksjon. Begge komuterer elektronisk ved hjelp av halvledere, uten bruk av børster og lameller. Synkronmotor er en betegnelse som omfatter motorer der feltet fra magnetene og feltet generert i viklingene roterer ved samme frekvens. Det innbefatter både PMSM og BLDC. Etter å ha undersøkt sortimentet til flere motorleverandører viste det seg at de PMSM var kun var kun å finne i størrelse med en faktor på ti over det det var behov for.

Tabell 1: Sammenligning mellom BLDC og DC-motor med børster

Egenskap	BLDC	DC motor med børster
Komutering	Elektronisk. Basert på hallsensor, rotasjonsensor eller måling av mot-indusert spenning fra motoren	Lameller og børster (mekanisk).
Vedlikehold	Fravær av børster gir mindre vedlikehold.	Børster har begrenset levetid før de slites ned
Turtall- moment karakteristikk	Flat karakteristikk. Kan stort sett levere nominell last ved alle hastigheter.	Delvis flat. Ved store hastigheter vil friksjon i børstene øke og føre til reduksjon i moment som kan leveres.
Virkningsgrad	Høy. Ingen spenningstap over børster og lameller	Moderat.
Akseleffekt i forhold til størrelse/vekt	Høy. Høyt potensiale for kjøling siden viklingene legges i utvendig stator. Noen BLDC motorer er konstruert som "outrunner"	Moderat til lav. Varmen som produseres i armaturet vil dissipere gjennom luftgapet, noe som fører til økt temperatur i luftgapet og begrense forholdet mellom effekt og størrelse/vekt.
Rotors treghetsmoment	Som regel lavt på grunn av permanentmagneter i rotor. Det gir også bedre dynamisk respons.	Høyere treghetsmoment som begrenser den dynamiske karakteristikken.
Turtallsområde	Høyt. Ingen mekanisk begrensning grunnet børster og lameller.	Lavere grunnet børster.
Regulering/kraftelektronikk	Forholdsvis kompleks og dyr. Motoren er avhengig av kraftelektronikk for å fungere. Samme kraftelektronikk kan brukes til å regulere hastigheten.	Enkel og billig, særlig for fast motorhastighet. Kraftelektronikk må brukes for å regulere hastigheten
Elektrisk støynivå	Lavt.	Gnistning over børster og lameller kan gi støy og problemer med EMI i nærliggende elektronisk utstyr
Kostnad	Kostnadene for permanentmagneter gjør motoren dyrere.	Lav.

Tabell 2: Sammenligning mellom BLDC og Asynkronmotor

Egenskap	BLDC	Asynkronmotor
Turtall- moment karakteristikk	Flat karakteristikk. Kan stort sett levere nominell last ved alle hastigheter.	Ulineær. Lavt moment ved lav hastighet.
Akseffekt i forhold til størrelse/vekt	Høy. Konstruksjon med permanentmagneter og viklinger i utvendig stator tillater en kompakt konstruksjon.	Moderat. Siden det er viklinger i både stator og rotor vil forholdet mellom effekt og størrelse være lavere enn for BLDC.
Rotors treghetsmoment	Lavt. Gode dynamiske egenskaper.	Høyt. Dårlige dynamiske egenskaper.
Startstrøm	Ingen spesielle krav til elektronikk for å sette igang. Ved "open-loop" bør hastighetspådraget tidsforsinkes (integreres).	Blir opptil syv ganger høyere enn nominell strøm. Vanlig å koble i "stjerne-delta" ved start.
Regulering/kraftelektronikk	Forholdsvis kompleks og dyr. Motoren er avhengig av kraftelektronikk for å fungere. Samme kraftelektronikk kan brukes til å regulere hastigheten.	Det trengs kraftelektronikk for å regulere hastigheten. Det er ikke nødvendig ved konstant hastighet.
"Slip"	Ingen "slip".	Rotor roterer med lavere hastighet enn statorfeltet. "Slip-frekvens" øker med lasten.

5.3 Børsteløs likestrømsmotor.

På grunn av lavere kostnader for konstruksjon av permanentmagneter, samt kraftelektronikk og mikrokontrollere, kan BLDC motorer også konkurrere på pris. Siden BLDC falt innenfor så mange av kriteriene for motor til PureChoice kjøretøyet ble det ansett å være optimal teknologi for denne sammenhengen. De påfølgende kapitlene omhandler BLDC og omformer, samt noen sammenligninger mot andre lignende motorkonstruksjoner.

Stator

Det er mest vanlig å konstruere motoren med trefase viklinger i stator, koblet i stjerne. Det brukes også en- og to-fase konfigurasjoner. BLDC er som regel konstruert med konsentrerte viklinger. Det gir en firkantet, eller trapesformet "mot-indusert" spenning (Elektromotorisk kraft – EMK). Strømmens form i statorviklingene, og fluksfordelingen i luftgapet er også delvis rektangulær eller trapesformet. En PMSM har sinus-distribuerte viklinger i stator. Dette medfører at motorens moment blir jevnere, men også at mengden kobber i viklingene øker grunnet mer kompleks viklingstruktur.

Rotor

I rotor legges det inn permanentmagneter. Kravet til magnetenes feltstyrke per volumenhet er avgjørende for valg av magnetisk materiale. Tradisjonelt er ferritt-magneter brukt grunnet lave kostnader ved fremstilling. Men med sin kraftige feltstyrke per volumenhet tillater materialer som Neodym (Nd) og Samarium Kobolt (SmCo) enda mer kompakt design enn feritter (Fe). Forskning og teknologisk utvikling har ført til at produksjonskostnadene for denne typen permanentmagneter stadig reduseres.

Konstruksjonen med viklinger i stator og permanentmagneter i rotor gjør naturlig og tvungen kjøling enkelt.

Tilbakekobling av feltposisjon.

For en vanlig DC motor fungerer børster og lameller både som leder for strømmen og som posisjonangivere for komuteringstidspunktet. For BLDC består hver komuteringsekvens av at en fase leder positiv strøm, en leder negativ og en leder ikke strøm. Momentet kommer av koblingen mellom magnetenes felt og feltet som settes opp av de strømførende viklingene. Maksimalt moment oppnås når den elektroniske vinkelen mellom disse to feltene er 90° på hverandre og minker når feltene nærmer seg hverandre. Ved å skifte posisjon på feltet som er satt opp av viklingene i stator ett hakk, vil rotor bevege seg etter for å "ta igjen" feltet. Motoren vil på denne måten rotere. For å gjennomføre dette ved elektronisk komutering (halvledere) må rotorposisjon (og rotasjonsretning) bestemmes for at en komuteringslogikk skal kunne styre hvilke halvledere som må skrues av eller på. Slik endres strømretningen i de tre fasene. Vanligvis brukes Hallsensor eller en lignende form for angivelse av posisjon til å bestemme rotor posisjon og hastighet. Det er også mulig å måle mot-indusert spenning på alle fasene og sammenligne disse for å bestemme tidspunktet for komutering.

Hallsensor.

Hall effekten er et resultat av interaksjon mellom magnet og strømførende leder. Når en strømførende leder befinner seg i et magnetisk felt, vil feltet påvirke den på en slik måte at det setter opp en motvirkende kraft som flytter frie ladninger til motsatt side av lederen. For en tynn flat leder vil opphoping av ladning på den ene siden føre til at magnetens innvirkning balanseres. Det resulterer i en målbar spenningsdifferanse mellom de to sidene av lederen.

Basert på Hall sensorenes fysiske plassering er det to muligheter for posisjonssignalet. Sensorene kan plasseres med enten 60° eller 120° faseforskjell mellom hverandre. Denne plasseringen avgjør komutering sekvensen.

Argumentet for å velge bort Hallsensor, eller eventuelt kodeskive og optokobler, er at begge trenger tilførsel av energi for å fungere. Hallsensor fra produsenten Honeywell (SS40) trenger fra 4 til 24 volt og en strøm på 15 milli-ampere. Dette utgjør i de fleste sammenhenger ikke noe stort energitap, men for kjøretøyer som deltar i Shell Eco-marathon vil det være en vurdering som må tas. Bruk av denne typen sensor fører også til en liten økning i kostnadene for motoren.

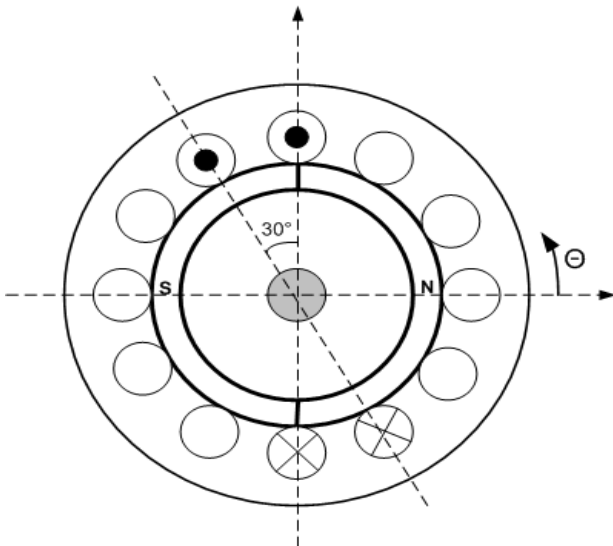
Bestemmelse av komutering sekvens uten sensor på motor.

Komutering sekvensen for BLDC kan også bestemmes ved å sammenligne mot-indusert spenning i de tre fasene. Når rotor roterer ved en gitt hastighet vil mot-indusert spenning tilsvare klemmespenningen fra vekselretteren minus spenningsfall over motstanden i viklingene. Det sees bort fra spenningstap over halvleder elementene i vekselretteren. En modell for BLDC med vekselretter er vist senere i kapittelet. Ved å måle den mot-induserte spenninger for de tre fasene er det mulig å generere et signal som brukes til å bestemme rotorposisjon. Metoden er basert på at rotor er i bevegelse, ingen rotasjon vil tilsvare ingen indusert spenning.

Ved start av motoren må de benyttes en annen strategi. En mulig løsning er å forhåndsdefinere et halvlederpar som skal lede. Klemmespenningen inn på vekselretteren gir da opphav til en strøm i to av motorens faser. Ved å kommutere til de neste to faser er det trolig at permanentmagnetene henger seg på feltet fra viklingene. I reguleringsteknisk sammenheng kalles dette "open-loop". Etter kort tid øker motorens rotasjonshastighet og det blir mot-indusert en spenning som beskrevet over. Denne metoden har en stor svakhet. Ved behov for stort startmoment, for et system med stor treghet, vil strømmen gjennom motoren bli stor grunnet tilnærmet kortslutning i rotor. Hvis permanentmagnetene ikke følger med statorfeltet vil det kun være spenningskilden som begrenser strømmen. Det betyr i et praktiske tilfellet at kildens eventuelle vern kobler inn for å hindre et mulig havari. Denne kontrollstrategien er derfor lite egnet for mekaniske laster med stor treghet. Et eksempel er bakkestart av kjøretøy.

5.3.1 Formelverk for BLDC motor.

Illustrasjon 4.1.1 viser en prinsipiell skisse av en BLDC med to magnetpoler og to av viklingene med strømretningen for fase a tegnet inn. De to faseviklingene utgjør to spoler, hver med N_s tårn,



Illustrasjon 5.3.1: BLDC - Rotor og stator

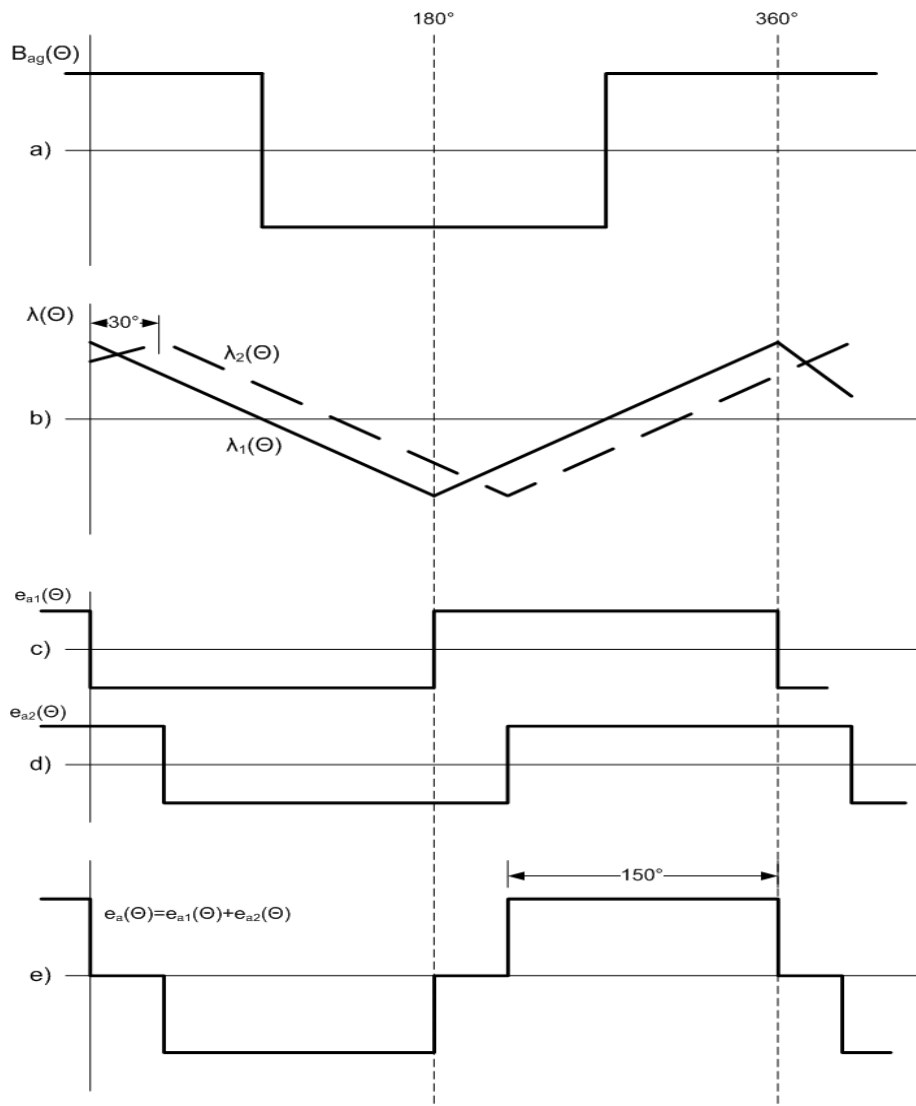
som omslutter en poldeling med en forskyving på 30° mellom spoleaksene. En komplett trefase motor vil ha til sammen 12 spor med ankerviklinger. Permanentmagnetene spenner hver over 180 mekaniske grader og gir en magnetisk flukstetthet i luftgapet lik den vist i Illustrasjon 5.3.1a.

Ved å velge referansesystem slik at x-aksen legges ved permanentmagnetens nordpol kan rotasjon beskrives ved vinkelen θ . Fluksforslyngningen over en magnetpol vil variere lineært når flukstettheten i luftgapet er konstant. Uttrykket for fluksforslyngningens maksimalverdi finnes ved å integrere flukstettheten over en poldeling.



Illustrasjon 5.3.2: Børsteløs DC-motor

$$\lambda_{1\max} = N \int_a^b B_{ag}(\theta) r d\theta l = N B_{ag} \pi r l \quad (5.3.1.1)$$



Illustrasjon 5.3.3: Feltforhold i BLDC

Ut fra Illustrasjon 5.3.2b kan følgende uttrykk settes opp for variasjon i fluksforsyngning fra 0 til 180°:

$$\lambda_{1}(\theta) = \left[1 - \frac{\theta}{\frac{\pi}{2}} \right] \lambda_{1\max} \quad (5.3.1.2)$$

Spenningen som induseres i en spole når magnetfeltet varieres er gitt av:

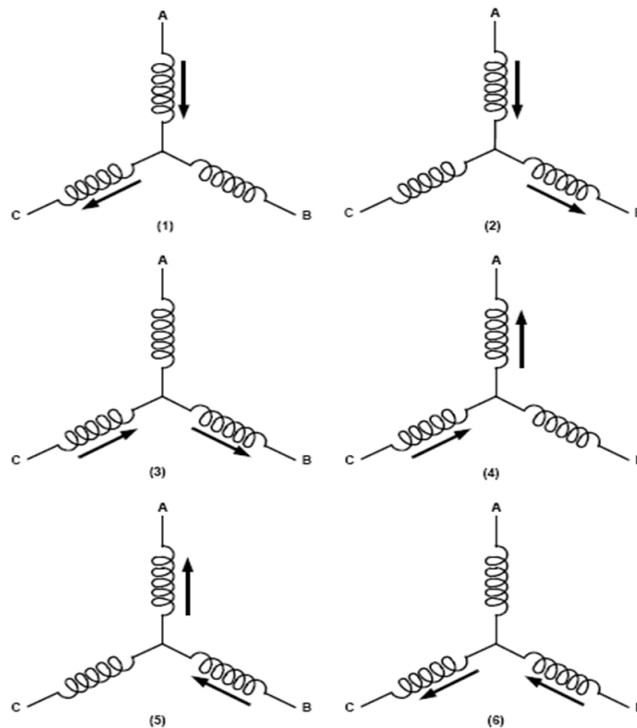
$$e_1 = - \frac{d\lambda_1}{dt} = \left(\frac{-d\lambda_1}{d\theta} \right) \frac{d\theta}{dt} = -\omega \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (5.3.1.3)$$

Ligningene kombineres til:

$$e_1 = 2 N B_{ag} l r \omega \quad (5.3.1.4)$$

Ligningen viser størrelsen på e_{a1} som i Illustrasjon 5.3.2c. Illustrasjon 5.3.2d viser e_{a2} som er 30° forskjøvet i forhold til e_{a1} . Illustrasjon 5.3.2e viser seriekobling av e_{a1} og e_{a2} . Når flere enn to spoler legges innenfor vinkelen på 30° vil den resulterende induserte spenningen gå mot en trappetrinnform. Ligning (5.3.1.4) kan for n spoler i serie skrives som:

$$e = 2 n N_{ph} B_{ag} l r \omega_m \quad (5.3.1.5)$$



Illustrasjon 5.3.4: Strømretninger for en rotasjon

Figurene over viser strømretning i fasene i en BLDC (fire poler) med Hallsensor (60° fordeling) ved seks steg komutering. Stjerneklede motorer fører strøm i to fase av gangen.

Forholdet mellom elektrisk og mekanisk effekt ved et gitt tidspunkt er gitt av:

$$P = 2eI = \omega_m T_{em} \quad (5.3.1.6)$$

Kombinert med ligningen over gir det et uttrykk for elektromagnetisk moment:

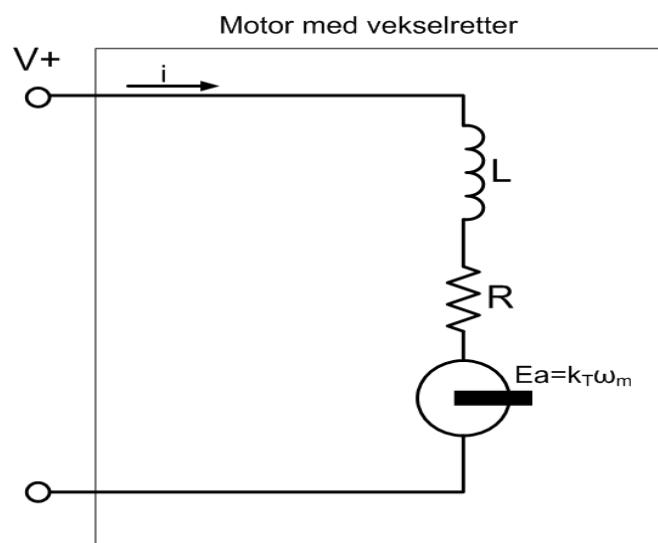
$$T_{em} = 4 N_{ph} B_{ag} l r I_m \quad (5.3.1.7)$$

Det vil være "rippel" i motorens elektromagnetiske moment som følge av at halvlederelementene har en endelig svitsjehastighet. Hvis det antas at den kraftelektroniske komuteringen er perfekt betyr det at BLDC med kraftelektronikk kan betraktes som en ren DC-motor.

Ligningene for indusert spenning i et gitt antall faseviklinger i serie og motorens elektromagnetiske moment kan skrives på generell form som:

$$E_a = k \Phi_{ag} \omega_m \quad (5.3.1.8)$$

$$T_{em} = k \Phi_{ag} I_m \quad (5.3.1.9)$$



Illustrasjon 5.3.5: Ekvivalent krets for BLDC og vekselretter

Figuren viser ekvivalentskjema for BLDC og vekselretter hvor $V_+ (=V_d)$ er en ren likespenning og spenningsfallet over halvlederelementene er neglisjert..

- L er induktansen i to faserviklinger.
- R er summen to fase-resistanser i serie.
- $K_T = k\Phi_{ag}$ som er motorens spenningskonstant

For stasjonære forhold gjelder:

$$V_d = E_a + R I_m = k_t \omega_m \quad (5.3.1.10)$$

$$T_{em} = k_T I_m \quad (5.3.1.11)$$

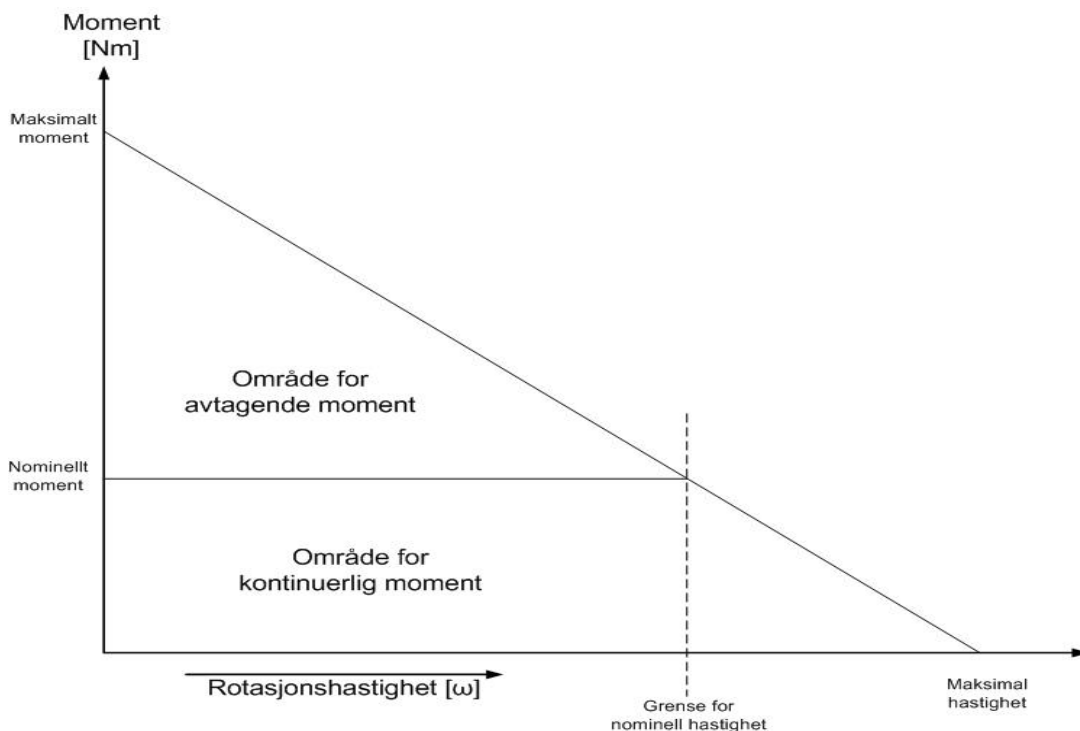
Ligningene 5.5.1.10 skrives om til:

$$I_m = \frac{V_d - E_a}{R} = \frac{V_d}{R} - \left(\frac{k_t}{R}\right) \omega_m \quad (5.3.1.12)$$

Det settes inn i ligningen 5.5.1.11 for momentet:

$$T_{em} = \frac{V_d k_T}{R} - \frac{k_T^2}{R} \omega_m \quad (5.3.1.13)$$

Ligningen viser at maksimale moment for en motor med konstant magnetisk fluks er ved null hastighet (blokkert rotor). Motorens moment faller etter dette med stigningstall lik andre ledd i ligningen. Ligningen tar ikke hensyn til friksjonstap i motorens lager. Motorens moment-turtallskarakteristikk vises ved å plote ligningen i et koordinatsystem som vist under.



Illustrasjon 5.3.6: Moment- turtallskarakteristikk for BLDC

For en virkelig motor vil det maksimale momentet være begrenset av spenningskildens (og omformerens) evne til å levere strøm. Et teoretisk eksempel med bruk av en spenningskilde som kan levere ubegrenset strøm sammen med Transmotec's B8671-36 vil gi en startstrøm gitt av:

$$I_m = \frac{V_d}{R} = \frac{36}{0.3} = 120 \text{ Ampere} \quad (\text{Eksempel 5.3.1.1})$$

En startstrøm på denne størrelsen ville mest sannsynlig ødelegge motoren. Utfra motorens datablad kan maksimalstrømmen beregnes.

$$I_{max} = \frac{T_{max}}{k_T} = \frac{2.1}{0.091} = 23.07 \text{ Ampere} \quad (\text{Eksempel 5.3.1.2})$$

Motorens hastighet er avhengig av spenningen V_d og lastmomentet T_L . Ligning 5.3.1.13 kan skrives om for å finne et uttrykk for motorens hastighet.

$$\omega_m = \frac{1}{k_T} \left(V_d - \frac{R}{k_T} T_{em} \right) \quad (5.3.1.14)$$

Motoren vil balansere lastens moment ved å trekke en tilstrekkelig strøm. Settes elektromagnetisk moment lik lastmomentet vil strømmen være:

$$I_m = \frac{T_L}{k_T} \quad (5.3.1.15)$$

5.3.2 Virkningsgrad og tap i BLDC

Det er i hovedsak tre faktorer som bidrar til tap i BLDC-motorer og andre typer elektriske motorer med permanentmagneter.

Kobbertap

Kobberviklingene i stator utgjør en endelig ohmsk motstand som gjør en del av den elektriske energien om til varme. Tapet er proporsjonal med kvadratet av strømmen

$$P = I^2 R \quad (5.3.2.1)$$

Siden strømmen er proporsjonal med elektromagnetisk moment kan ligningen skrives om til:

$$Kobbertap = k_k T_{em}^2 \quad (5.3.2.2)$$

der k_k er en konstant som er avhengig av ohmsk motstand over viklingene og den magnetiske fluksen.

Jerntap

Sett fra jernet i stator vil magnetfeltet i luftgapet variere og fører til to typer tap. Når en magnet passerer en del av jernet vil det magnetiseres, for så å bli demagnetisert igjen. Denne prosessen krever energi og blir kalt "hysteresetap". Den andre typen jerntap kommer av induerte strømmer i jernet som følge av den samme endringen i magnetfelt. Disse "eddy-strømmene" fører til varmeutvikling i jernet. Siden begge prosessene er et resultat av magnetfelt i endring vil feltets frekvens ha betydning for størrelsen på tapet. Denne frekvensen er direkte proporsjonal med rotasjonshastigheten for rotor.

$$Jerntap = k_j \omega_m \quad (5.3.2.3)$$

der k_j er avhengig av styrken på magnetfeltet. Ved permanentmagnetdesign vil den være tilnærmet konstant.

Friksjon og luftmotstand

Friksjonstapene kommer av friksjon i motorens opplagring. Normalt sett er friksjonstapet nærmest konstant. Friksjonen mot den omkringliggende luften (luftmotstand) gjør seg gjeldende i de tilfelle det monteres en kjølevifte på motoren.

$$Friksjonstap = T_f \omega_m \quad (5.3.2.4)$$

der T_f er friksjonsmoment

$$Luftmotstand = k_\omega \omega^3 \quad (5.3.2.5)$$

konstanten k_ω avgjøres av utformingen av rotor og om det er montert på en kjølevifte.

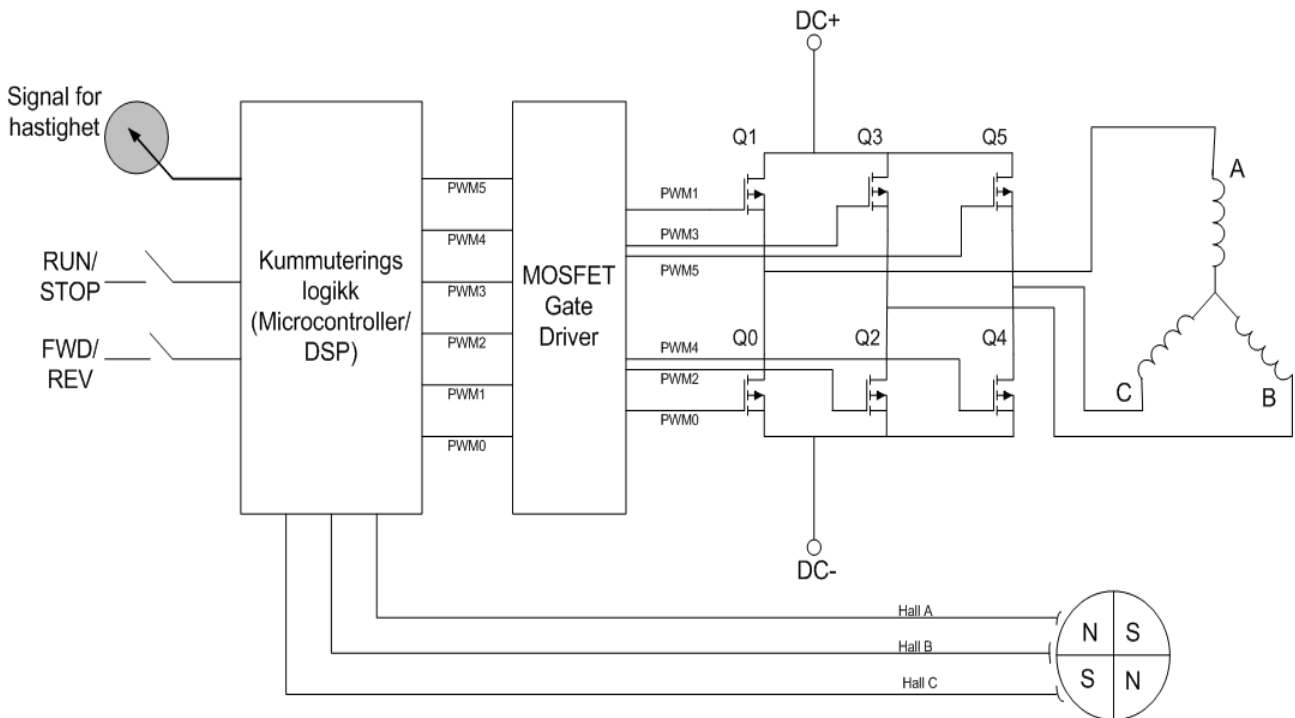
$$\sum Tap = k_k T^2 + k_j \omega + T_f \omega + k_\omega \omega^3 \quad (5.3.2.6)$$

Virkningsgraden for en motor kan da defineres som:

$$\eta_m = \frac{\text{effekt ut}}{\text{effekt inn}} = \frac{\text{effekt ut}}{\text{effekt ut} + \text{tap}} = \frac{T \omega}{T \omega + k_k T^2 + k_j \omega + T_f \omega + k_\omega \omega^3} \quad (5.3.2.7)$$

5.3.3 Motordrift for BLDC.

Det vil bli tatt utgangspunkt i figuren under for beskrivelse av motordriftens virkemåte. Figuren viser vekselretter-bro med "gate-driver", mikrokontroller/DSP og Hallsensor for måling av rotorposisjon.



Illustrasjon 5.3.7: Krafterlektronisk motordrift

Systemet bestående av vekselretter, mikrokontroller og hallsensor (eller annen type måling av rotorposisjon) utgjør en kraft elektronisk motordrift. I tillegg vil en motordrift inneholde ulike former for beskyttelse (vern) mot overspenninger, overstrømmer og kortslutninger.

Hallsensorene gir tre signaler som entydig beskriver hvilket intervall motorens rotor befinner seg i. Komuteringsrekkefølge og hastighet beregnes i mikrokontrolleren/DSP på bakgrunn av informasjonen fra Hallsensorene. På figuren er Pulsbredde modulering, PBM (eng. Pulse With Modulation, PWM), valgt som måte for å drive halvlederelementene (MOSFET, IGBT) og gi motorspenningens amplitude.

En BLDC-omformer gjør om likespenning til trefase vekselspenning. Sett fra motorklemlene vil vekselspenningen innenfor en kort periode (rotasjon tilsvarende 120 til 150 elektriske grader) være likespenning. Pulsbredden avhenger av strømmen som kreves for å dekke motorens lastmoment.

Høy svitsjefrekvens gir mindre "strøm-ripple", men også større svitsje-tap. Ofte velges svitsjefrekvensen til 20 kilo Hertz for å oppnå lav "strøm-ripple" og minimere akustisk støy.

Frekvensen for hallsensorenes signaler kan brukes for estimering av motorens turtall. Det er vanlig å benytte turtallregulator av proporsjonal-integral (PI) type med hensikt å redusere differanser i dynamisk og stasjonært turtall.

6 Kjøretøy og bane – Beregningen og målinger

Dette kapitlet vil ta for seg beregninger som er gjort med bakgrunn i formlene som ble forklart i forrige kapittel. Beregningene vil danne grunnlaget for arbeidsområde motoren må jobbe innenfor med tanke på effekt, moment og rotasjonshastighet.

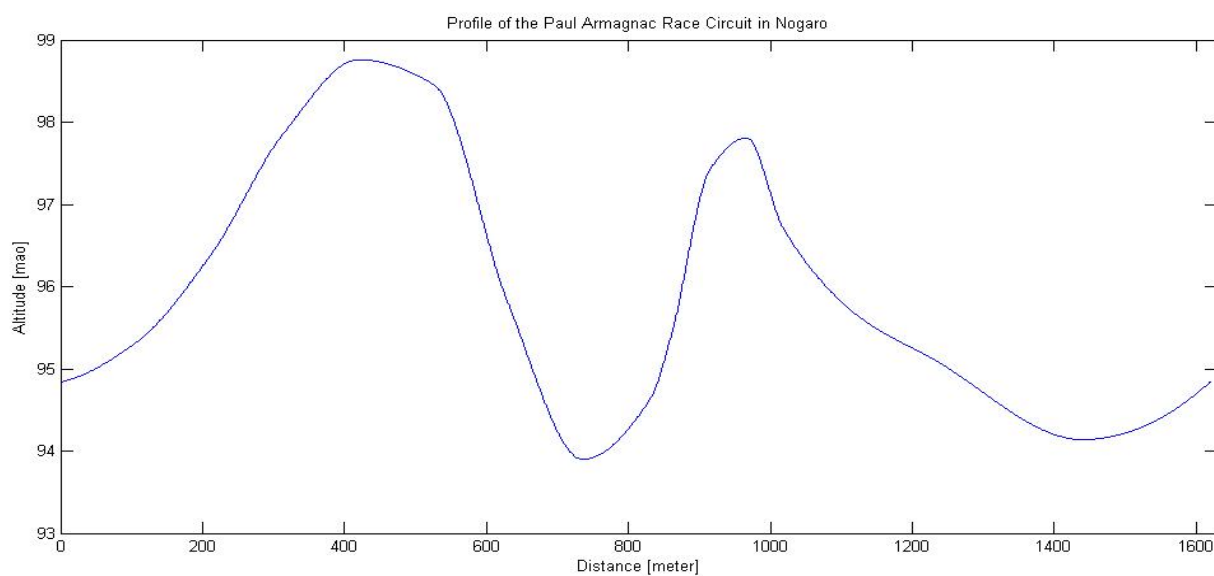
I hovedsak var det to motorer med tilhørende motordrifter som ble ansett som aktuelle for bruk i PureChoice kjøretøyet, Transmotec B8671-36 og AXI5360/20. Det ble gjort tester av begge med tanke på moment, rotasjonshastighet, effekt ut på akslingen og virkningsgrad. Resultatene dannet grunnlaget for hvilken motor som ble valgt og hvordan den kunne utnyttes på best mulig måte.

Med det valget som ble gjort med tanke på motor og motordrift fulgte det et par praktiske problemer. Hvordan skulle føreren på en enkel måte kunne regulere hastigheten på kjøretøyet, og hvilken type signal var påkrevd for at motordriften skulle utføre denne reguleringen av hastighet?

Verdiene for PureChoice kjøretøyets vekt og rullemotstand er endelig målinger gjort i etterkant av løpet, verdiene for frontareal og koeffisienten for luftmotstand er teoretisk beregnet. Da disse beregningene ble gjort første gang ble det tatt utgangspunkt i verdier som ikke lå langt fra de som er brukt i den påfølgende beregningen. Kjørehastighet på 8 m/s er over hastigheten for en ideell simuleringen, der er verdien 7,222 m/s. Fremgangsmåtene som er vist i dette kapitlet er de samme som ble brukt tidlig i våsemesteret 2008, for å sette kriterier for effektområde, rotasjonshastighet og krav til moment fra motoren som skulle brukes i PureChoice kjøretøyet.

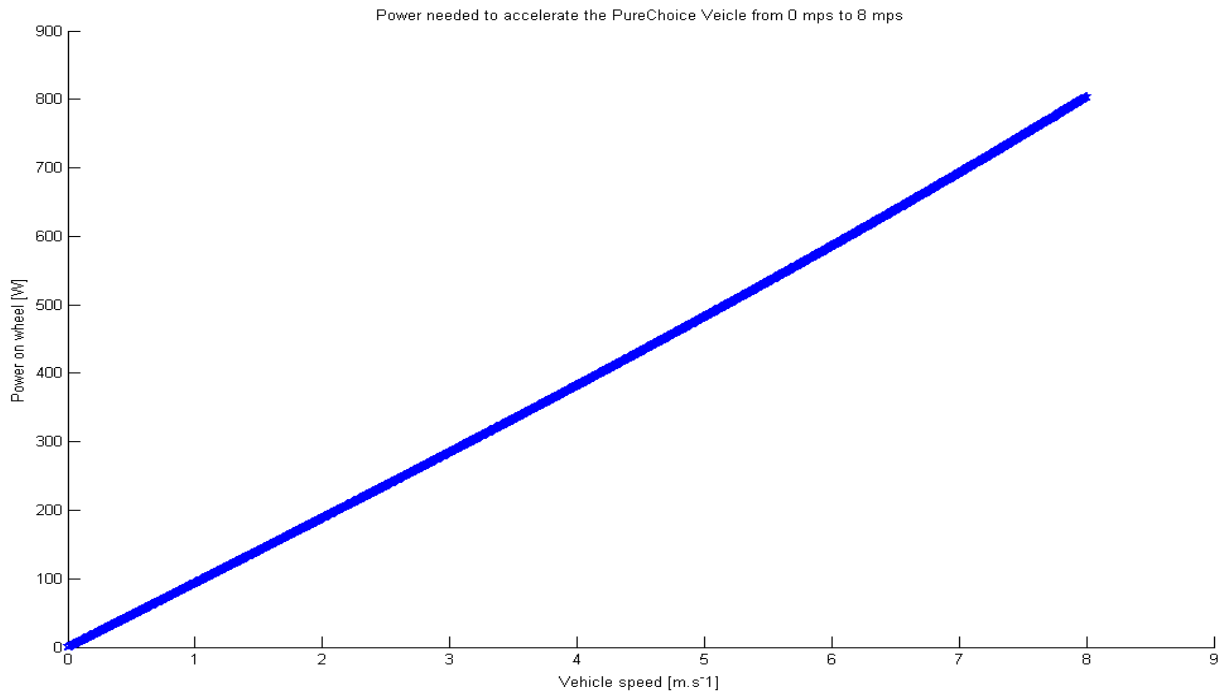
Tabell 3: Parametere for PureChoice kjøretøy og Nogaro banen

<i>Parameter</i>	<i>Verdi</i>
<i>Vekt</i>	<i>69 kg (Totalvekt med fører 120 kg)</i>
<i>Koeffisient for rullemotstand</i>	<i>0.005</i>
<i>Koeffisient for luftmotstand</i>	<i>0.18</i>
<i>Kjøretøyets frontareal</i>	<i>0.884 m²</i>
<i>Akselerasjon</i>	<i>0.7 m/s²</i>
<i>Kjørehastighet</i>	<i>8 m/s</i>
<i>Bratteste helning for banen</i>	<i>2.2 %</i>
<i>Systemvirkningsgrad</i>	<i>35 %</i>
<i>Utveksling</i>	<i>1:10</i>



Illustrasjon 6.1: Banetopografil "Paul Armagnac Race Circuit"

6.1 Start og akselerasjon.



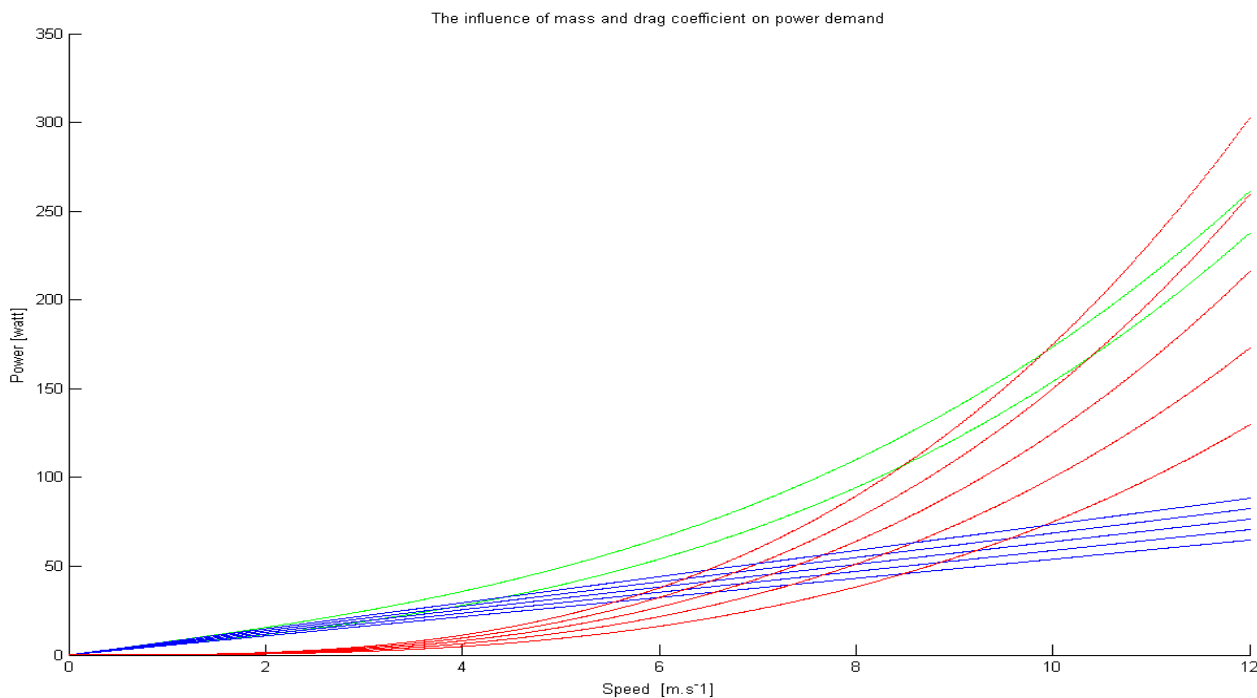
Illustrasjon 6.1.1: Effektbehov som funksjon av kjøretøyets hastighet ved konstant akselerasjon

Verdien for akselerasjonen er valgt på bakgrunn av simuleringer for ulike kjøreprofiler. Simuleringene viste at ved krav om maksimal tid for gjennomføring av løpet var det hensiktsmessig å akselerere kraftig over en kort periode, i motsetning til å gli sakte i gang. Det viste seg også å være gunstig å bruke høy effekt over korte perioder med tanke på virkningsgraden for motoren og brenselcellen. I løpet av denne akselerasjonen er det forbrukt 4451,7 joule på hjulet, med topp effekt på 803 watt. Det tilsvarer en energimengde på 12719 joule med hydrogen, forutsatt 35% systemvirkningsgrad. For et løp med krav om tre "pit-stop" vil det totalt sett bety et forbruk på over 50 kilo joule, som er cirka 0,16% av den totale energien i en liter Shell Unleaded Petrol 95 ($E_{\text{SUP95}} = 32\,010$ kJ/liter). Til sammenligning vil en akselerasjon på $0,1 \text{ m/s}^2$ bare kreve 200 watt, men energien som kreves for å nå ønsket hastighet er på hele 6936,9 joule. Det betyr at det totalt sett forbrukes 58% mer energi på akselerasjon for ett løp. I mange tilfeller vil ikke motoren jobbe innenfor det samme området for virkningsgrad.

Ligningen for akselerasjon vil også gi et overslag på hvor stort moment som er nødvendig ved start. I startøyeblikket vil rullemotstand og luftmotstand ha liten betydning. Ved start er det friksjonen mot bakken som må overvinnes for at hjulene skal begynne å rulle. Startområdet for banen i Nogaro

heller svakt oppover. De første 105 meterne stiger det 0,45%, noe som utgjør 6,3% av kraften som behøves for å akselerere. Ved start betyr det at effekttoppen nåes ved 846 watt, og energienforbruket øker til 4694,3 Joule. En differanse på 5,45%.

6.2 Luftmotstand og rullemotstand

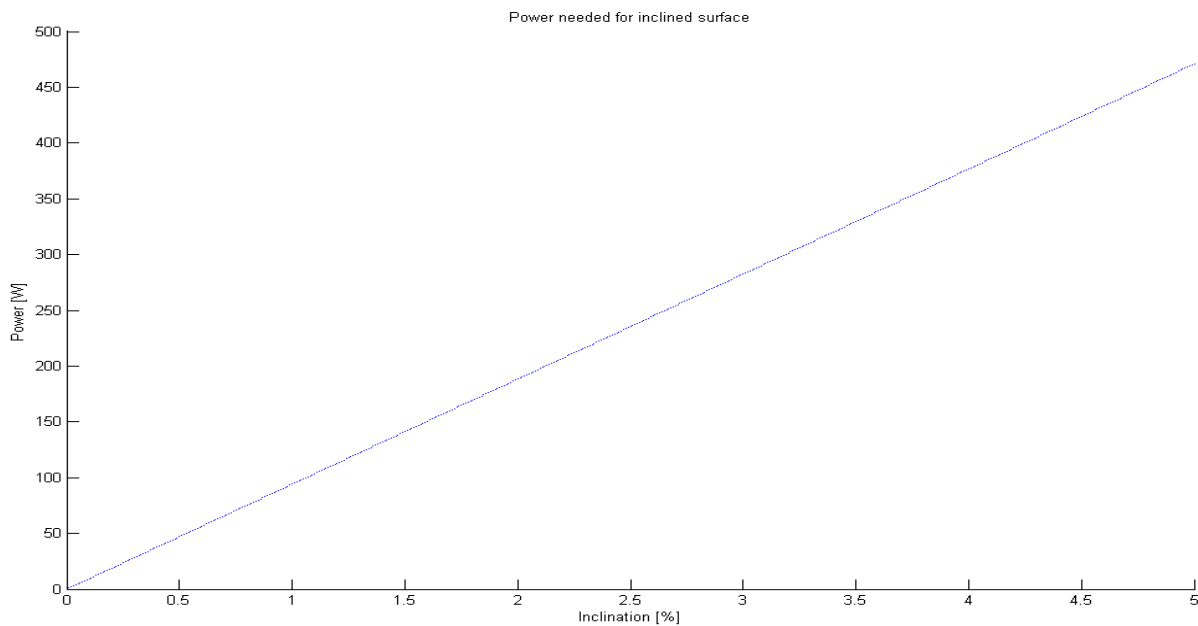


Illustrasjon 6.2.1: Effektbehov som funksjon av hastighet. Variasjon i masse og aerodynamikk

Illustrasjon 7.2.1 viser hvilken betydning masse og endring av koeffisient for luftmotstand har. Røde grafer viser effektforløpet ved ulike koeffisienter for luftmotstand. Frontarealet av kjøretøyet kan i særdeles liten grad endres etter at bilen er satt sammen, det er derfor satt som konstant. På grunnlag av at Shell selv leverer dekk fra Michelin til bruk i konkurransen skiller ikke koeffisienten for rullemotstand mye for to ulike lag. Derimot vil kjøretøyet vekt inkludert fører si mye om arbeidet som er lagt ned. De blå grafene viser effektbehov ved totalvekt fra 110 til 150 kilo. Sammenfatningen av disse to motarbeidende kreftene vises ved de grønne grafene. Figuren gir et godt bilde av hvor potensialet for å spare energi er, og innflytelsen rulle- og luftmotstand har på energiforbruket.

Ved en hastighet på åtte meter per sekund trenger PureChoice kjøretøyet 93 watt på hjulet.

6.3 Banens helning.



Illustrasjon 6.3.1: Effektbehov som funksjon av banens helning

Illustrasjon 7.2.2 viser hvilken betydning få graders helning har for effektbehovet på hjulet. For en helning på 2,2% vil det tilsvare cirka 210 watt mer enn på flat mark. De første beregningene ble gjort med tanke på flat bane. Grunnen til dette var at markering av banen på Shell sine egne hjemmesider viste den østlige delen som trase for Urban Concept klassen. Det førte til at valg av motor ble gjort om.

6.4 Totalt sett

Ut fra beregningene over er det mulig å beskrive et effektområde som motoren må dekke i løpet av en runde.

Effektbehov ved start: 846 watt

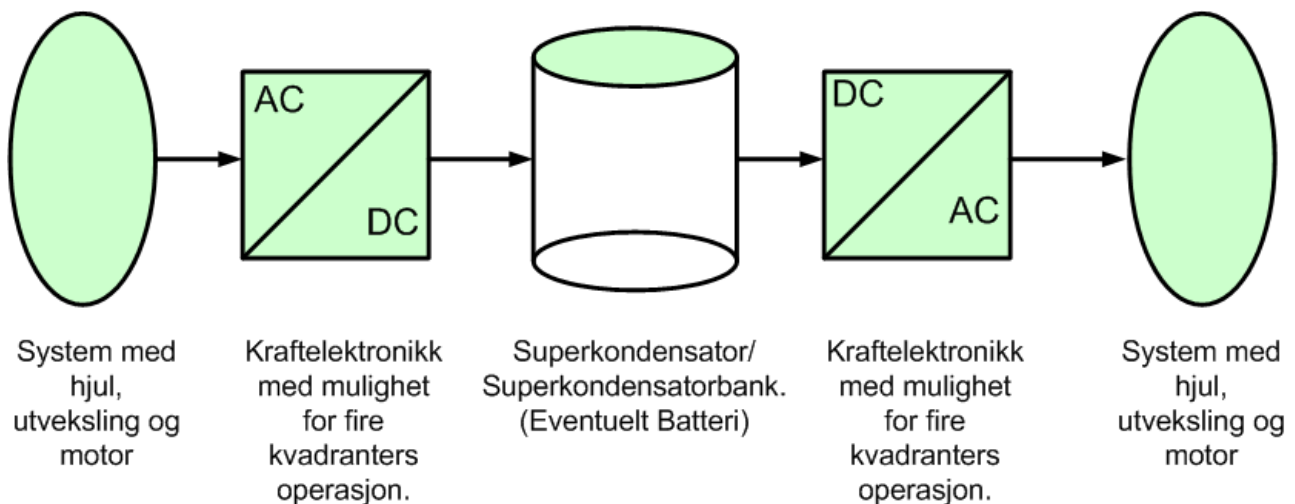
Effektbehov ved plant underlag: 93 watt

Effektbehov ved stigning på 2,2%: 210 watt

Effektbehovet ved plant underlag henviser til den delen av energien som utgjør minste mulig forbruk for et løp. I nedoverbakke med helning på 2,2% vil det være tilgjengelig 210 watt "gratis" som følge av at kraften skifter fortegn.

6.5 Regenerativ bremsing.

Termodynamikkens første hovedsetning sier at energi hverken kan oppstå eller forgå. Den kan kun gå over i andre former. Et system med regenerativ bremsing gjør om kinetisk energi til elektrisk, lagrer den, for så å gjøre den om til kinetisk igjen. Regenerativ bremsing har blitt vurdert, men det ble så forkastet som en løsning for å spare energi gjennom løpet. Begrunnelsen var at de finnes bedre måter å utnytte den kinetiske energien i kjøretøyet.



Illustrasjon 6.5.1: Komponenter i et regenerativ bremsesystem

Energibetraktning.

For et ideelt system (uten tap) vil energien være bevart. Den potensielle energien ved Nogarobanens høyeste punkt kan nyttegjøres ved å omdanne den til kinetisk energi.

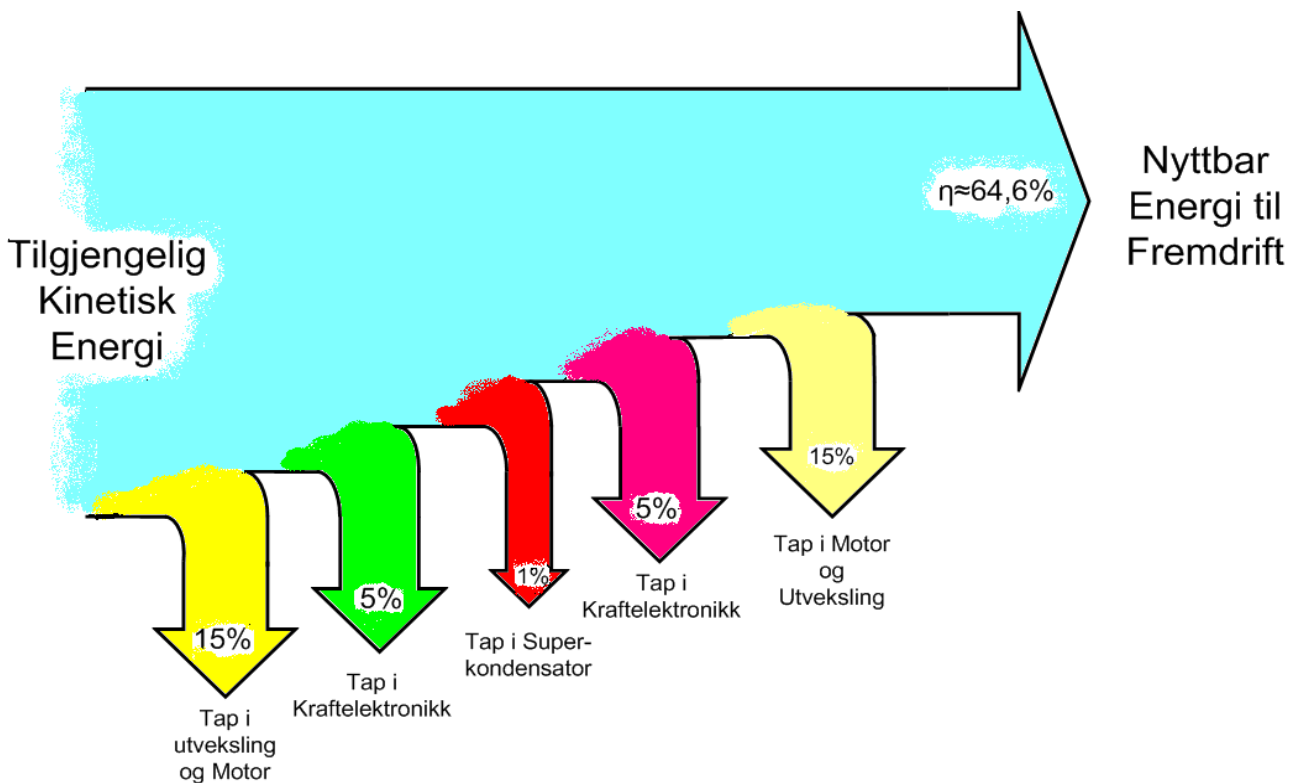
Ved en gitt hastighet har kjøretøyet kinetisk energi gitt ved:

$$E_{kj} = 1/2 m v^2 \quad (6.5.1)$$

For et hypotetisk løp hvor det ikke er gitt en maksimaltid for gjennomføring vil det være optimalt å bruke opp energien som puttes inn i systemet. Med det menes at bruk av bremsere vil tilsvare å brenne bort kinetisk energi til varme ved hjelp av friksjon. For Shell Eco-Marathon er det satt en maksimaltid for et løp. Denne begrensningen fører til at det finnes en nedre hastighet hvor det er gunstig å bremse bort kinetisk energi ved stopp. Begrunnelsen er at tiden det tar å trille ned til null hastighet må hentes inn igjen senere i løpet. Det betyr at den andelen av tiden hvor motoren brukes til fremdrift må kjøretøyet ha en høyere hastighet. Luftmotstanden øker med kvadratet av

hastigheten, det fører til at energien som tapes her ikke tjenes inn igjen ved å rulle på kinetisk energi. En simulering viste at grensen for minste hensiktsmessige rullehastighet lå ved 5,5 meter i sekundet.

Siden ingen virkelig prosess er ideell, det vil si uten tap, vil en del av den opprinnelige kinetiske energien være tapt når den skal føres tilbake på hjulet. Virkningsgrad for utveksling og motor ble antatt å ha maksimalverdi på 85%, mens kraftelektronikk kan ha opptil 95%. Superkondensator kan lades opp og ut igjen med virkningsgrad på hele 99%. Med disse verdiene vil energien som kan førestilbake på hjulet være 64,6% av den opprinnelige kinetiske energien. Resten er omsatt som varme. Det er da ikke tatt høyde for luft- og rullemotstand i beregningen. Trilling vil til sammenligning gi 100% virkningsgrad.



Illustrasjon 6.5.2: Energitalp ved bruk av regenerativt bremsesystem

Mekanisk sett vil et fremdriftssystem med regenerativ bremsing være mer komplisert. I visse situasjoner er det hensiktsmessig å kunne trille kjøretøyet uten at motoren roterer (noe som ville gitt friksjonstap). Ved bruk av regenerativt bremsesystem vil den mekaniske løsningen være en form for clutch. Det innebærer en vektøkning for kjøretøyet (vekten av clutch og superkondensator for lagring av energi). Løsningen som ble valg for PureChoice kjøretøyet var uten regenerativ bremsing og med friløpshjul montert mellom motoraksling og tannhjul.

Det ble ikke gjort simuleringer på hvor mye på energi som kan spares ved å bruke regenerativ bremsing for hastighet under 5,5 meter per sekund. Utfra formelen vil den tilgjengelige energien være på 7260 joule for fire stopp. Det tilsvarer 0,0227% av energien i en liter bensin. Skal en modell for et slikt system settes opp bør den inkludere en rekke faktorer. For å minimere vekten av systemet kan spenningen for superkondensator-pakken reduseres (færre kondensatorer i serie). Det innebærer at det blir behov for én eller flere DC-DC-omformere mellom kondensator og fremdriftsystem. De vil igjen representere et ytterligere tap i virkningsgrad. Flyten av effekt mellom fremdriftsystem og kondensator må også optimaliseres slik at det til enhver tid er mulig å lagre all tilgjengelig energi. Bruk av superkondensator kan også medføre muligheten for å redusere brenselcellens størrelse med tanke på effekt. Effekttoppene vil da dekkes av energien i kondensator-pakken.

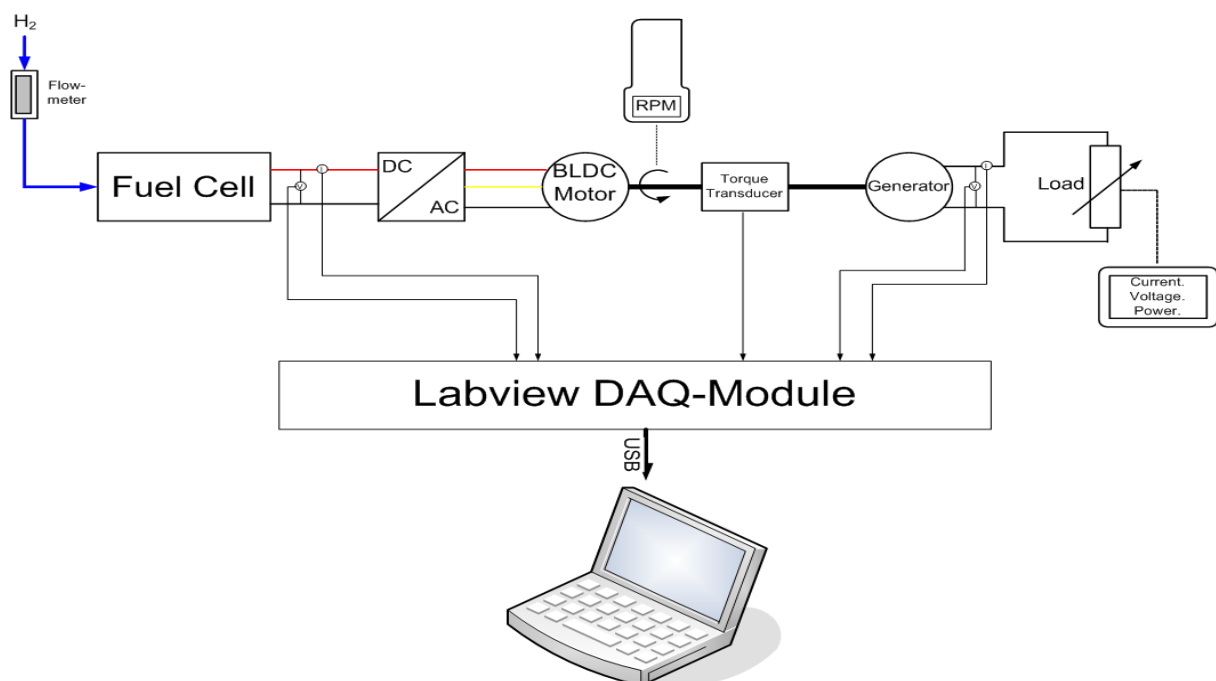
7 Testing av motor med motordrift.

Produsenter av motorer og invertere oppgir sjeldent detaljerte beskrivelser som moment-hastighetskurve og virkningsgrad for produktet. Beskrivelsen er ofte begrenset til fysiske mål, vekt, nominell effekt, strøm og spenning. Enkelte produsenter/leverandører oppgir nominelt moment og høyeste moment, ofte basert på teoretiske beregninger. For vekselrettere begrenser det seg også til rent praktiske opplysninger som er strengt nødvendig for å kunne bruke produktet.

Grunnet de ytterst sparsomme opplysningene for motoren og motordrift levert av Model Motors (leverandør av AXI motor og SPIN OPTO motordrift), var testing i laboratoriet særdeles viktig med tanke på strategi for gjennomføring av Shell Eco-Marathon 2008.

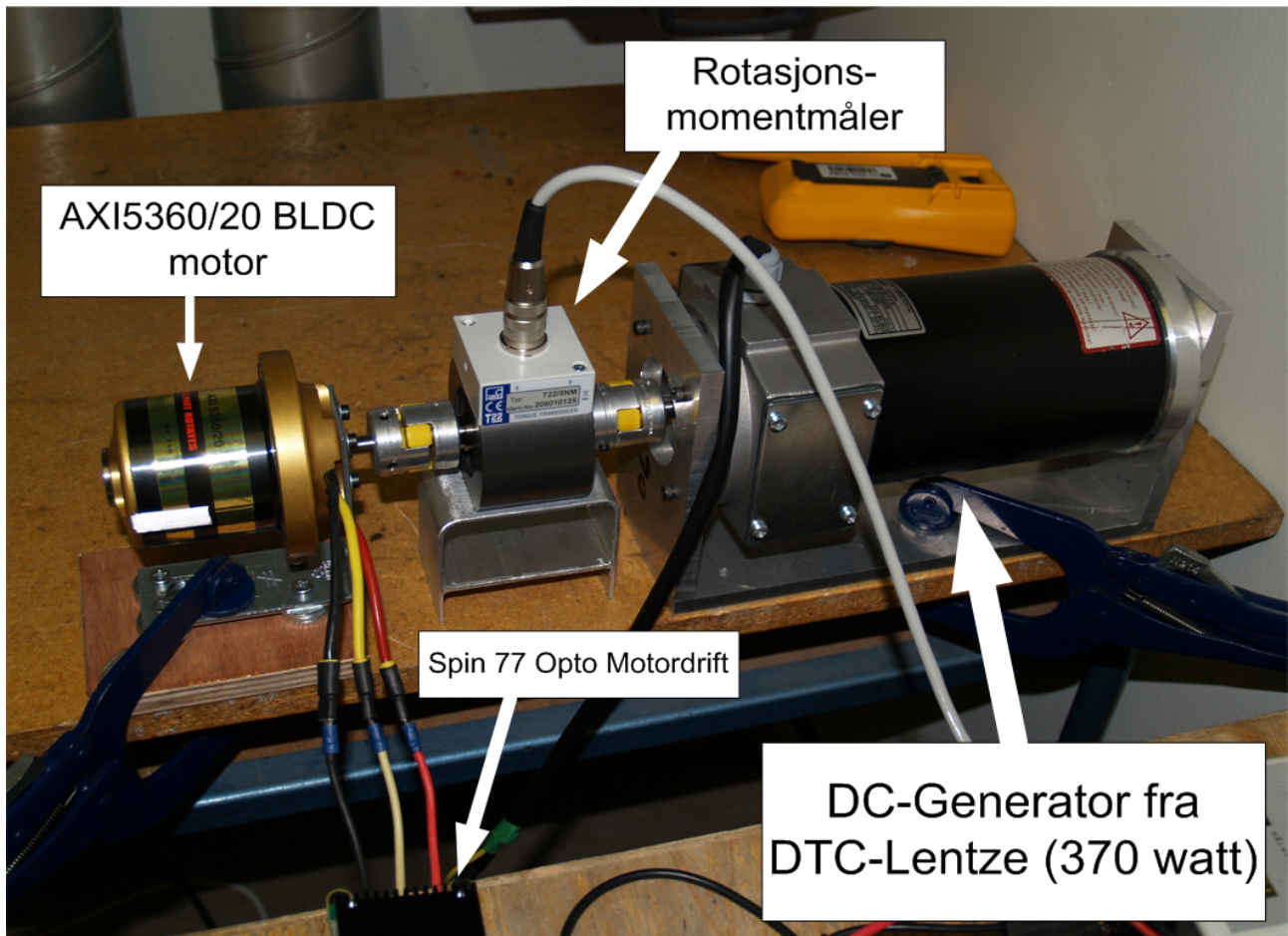
7.1 Testoppsett

Testing av motor ble gjennomført i to omganger. I første omgang ble det brukt en spenningskilde for å drive motoren. Denne hadde en øvre strømgrense på ti ampere, og gav derfor ikke et komplett bilde av formålet motoren var tiltenkt til. Hydrogen brenselcellen (Ballard, Nexa Power module) har en maksimal effekt på 1200 watt og kan levere opp til 70 ampere før sikkerhetssystemet kobler inn. I andre testoppsett var spenningskilden byttet ut med den aktuelle brenselcellen. Testen ble gjennomført i laboratorium godkjent for bruk av hydrogen og brenselcelle, og i henhold til HMS-krav.



Illustrasjon 7.1.1: Skisse for oppsett i laboratoriet

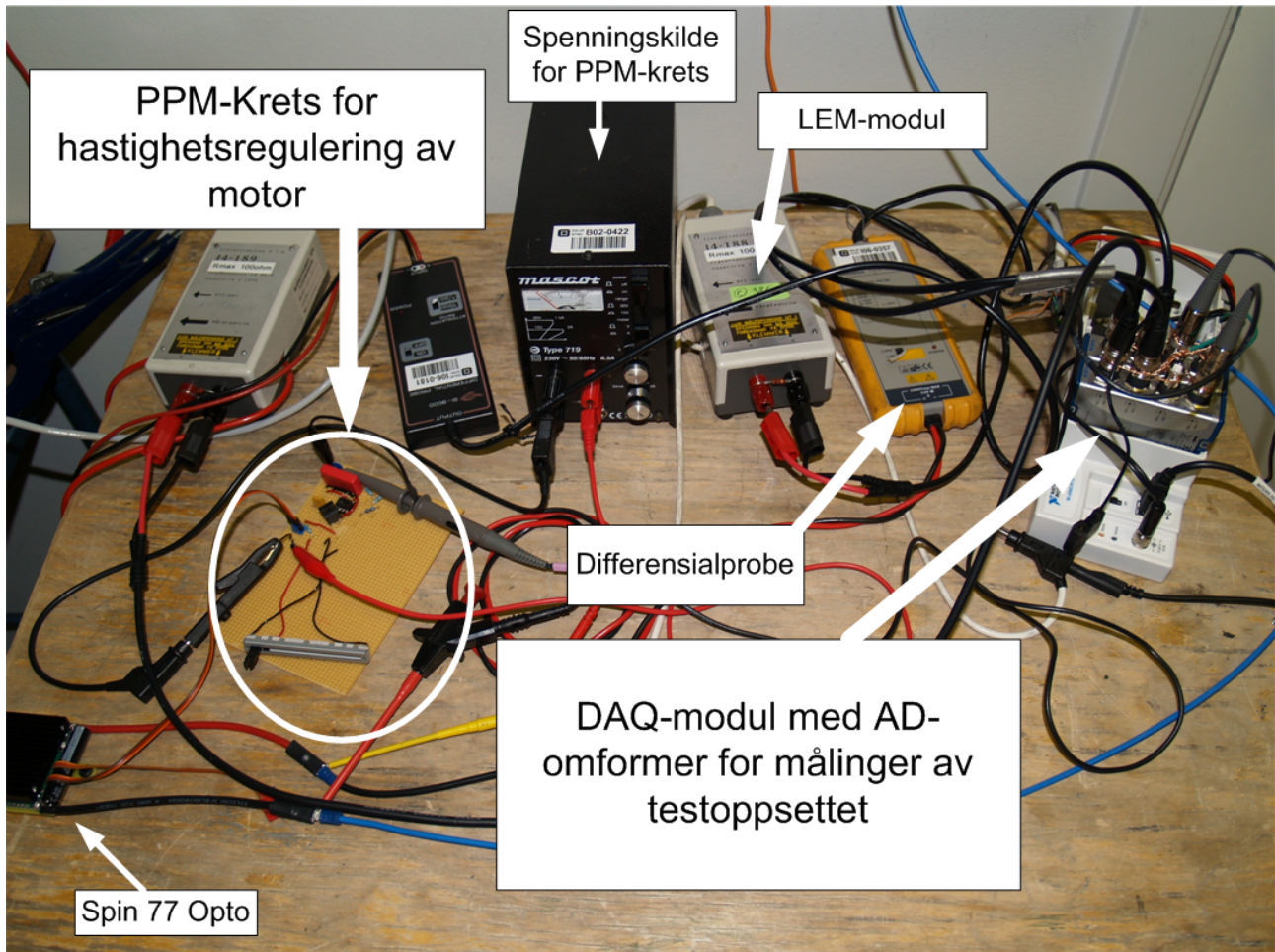
Testoppsettet besto av en spenningskilde/brenselcelle, motor, roterende momentmåler, DC-generator og en svitsjet last. I tillegg ble det brukt et håndholdt "tachometer" for måling av rotasjonshastighet. Alt ble logget via en spennings DAQ-modul, produsert av National Instruments, og registrert på PC med USB-grensesnitt. PCens loggeprogram er skrevet i Labview og kompilert som en egen selv-fungerende fil (exe-fil).



Illustrasjon 7.1.2: Oppkobling BLDC og DC-generator

Måleseriene ble lagt opp med effekt ut på motoraksling som referanse. Det ble gjort tester for flere aktuelle akseffekter ved rotasjonshastigheter fra 3000 omdreininger per minutt (Eng. Rounds per minute, RPM), ned til minste hastighet motoren kunne levere last ved. For akseffekt over 200 watt var det ikke mulig å få pålitelige målinger under 1000 omdreininger per minutt for noen av motorene. Av informasjonshensyn er det valgt å se bort fra alle målinger under 1000 rpm for grafene som presenteres senere i oppgaven. En komplett oversikt over måledata er å finne i vedlegg 14.1. Det ble også gjort forsøk med igangsetting av motor med blokkert rotor. Dette var for å teste motorens startmoment.

Måling ble tatt for strøm og spenning inn på vekselretter og ut av generator. Moment om akslingen mellom motor og generator ble målt sammen med rotasjonshastighet. På denne måten er oversikten over effekt-flyten i systemet bevart.



Illustrasjon 7.1.3: Måleoppsett for testing av BLDC motor med motordrift

Det har ikke blitt gjort egne målinger på virkningsgrad for de to aktuelle motordriftene. Argumentasjonen for dette er at motoren ikke vil fungere uten kraftelektronikk og derfor er det kun interessant med virkningsgrad for systemet bestående av omformer og motor. Virkningsgraden for kraftelektronikken er isolert sett av interesse, men i denne sammenhengen ble tiden den begrensende faktoren.

7.2 Model Motors AXI 5360/20

Model Motors er et firma som holdet til i Tsjekia og har spesialisert seg på å lage motorer til radiostyrte fly og helikopter. På verdensbasis finnes det flere selskaper som leverer lignende løsninger der effekt i forhold til vekt er en viktig parameter. I tillegg vil høy virkningsgrad avgjøre modellens flytid for én batteriladning.

Data for motoren gitt i tabellen under er hentet fra produsentens hjemmeside.



Illustrasjon 7.2.2: AXI5360/20 BLDC-motor

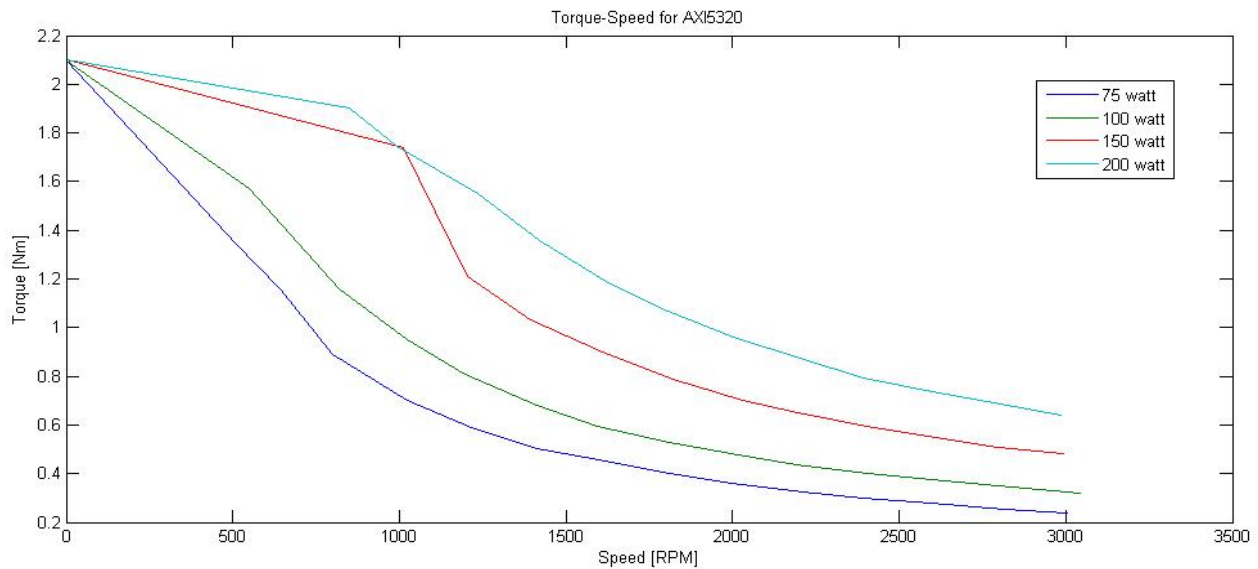
under kjøring være to sammenhenger hvor tilstrekkelig moment er kritisk. Igangsetting med en ønske akselerasjon, og kjøring i bakke. For en kommersiell bil vil muligheten for bakkestart også være dimensjonerende, men den er sett bort fra her. Begrunnelsen er at det vil være en overdimensjonering å anta behov for bakkestart.

Motoren er konstruert som en trefase børsteløs likestrømsmotor med 14 magnetpoler og har 12 spor med konsentrerte viklinger. Med det menes at viklingens 180 elektriske grader spenner over 1/12 mekaniske grader (tilsvarende 30 mekaniske grader). Permanentmagnetene av Neodym innretter seg slik den magnetiske kraften på jernet (poltennene) i stator blir stor. Dette kalles "cogging" (No. Fortanning). Konstruksjonen er motsatt av "vanlig" BLDC ved at rotor med permanentmagneter ligger utenpå stator, dette kalles for "outrunner". På denne måten bidrar sentrifugalkraften til å presse permanentmagnetene mot rotorveggen og holde dem stabile ved høye turtall.

AXI 5360/20 GOLD LINE	Order no. 536020
No. Of cells	10s Li-Poly
Betriebsspannung / Počet článků	
RPM/V / Drehzahl/Volt / Ot./V	120
Max. efficiency / Max. Wirkungsgrad / Max. účinnost	94 %
Max. efficiency current	20 - 59 A
Strom bei max. Wirk. / Proud při max. účinnosti	(> 85 %)
Current capacity / Max. Strom / Max. zatížitelnost	65 A / 30 s
No load current / Leer Strom / Proud na prázdno 30 V	1,8 A
Internal Resistance / Innenwiderstand Ri / Vnitřní odpor Ri	68 mΩ
Dimensions (Ø x L) / Abmessungen / Rozměr	89x94 mm
Shaft diameter / Achsdurchmesser / Průměr hřídele	8 mm
Weight with cables / Gewicht / Hmotnost vč. kabelů	1350 g

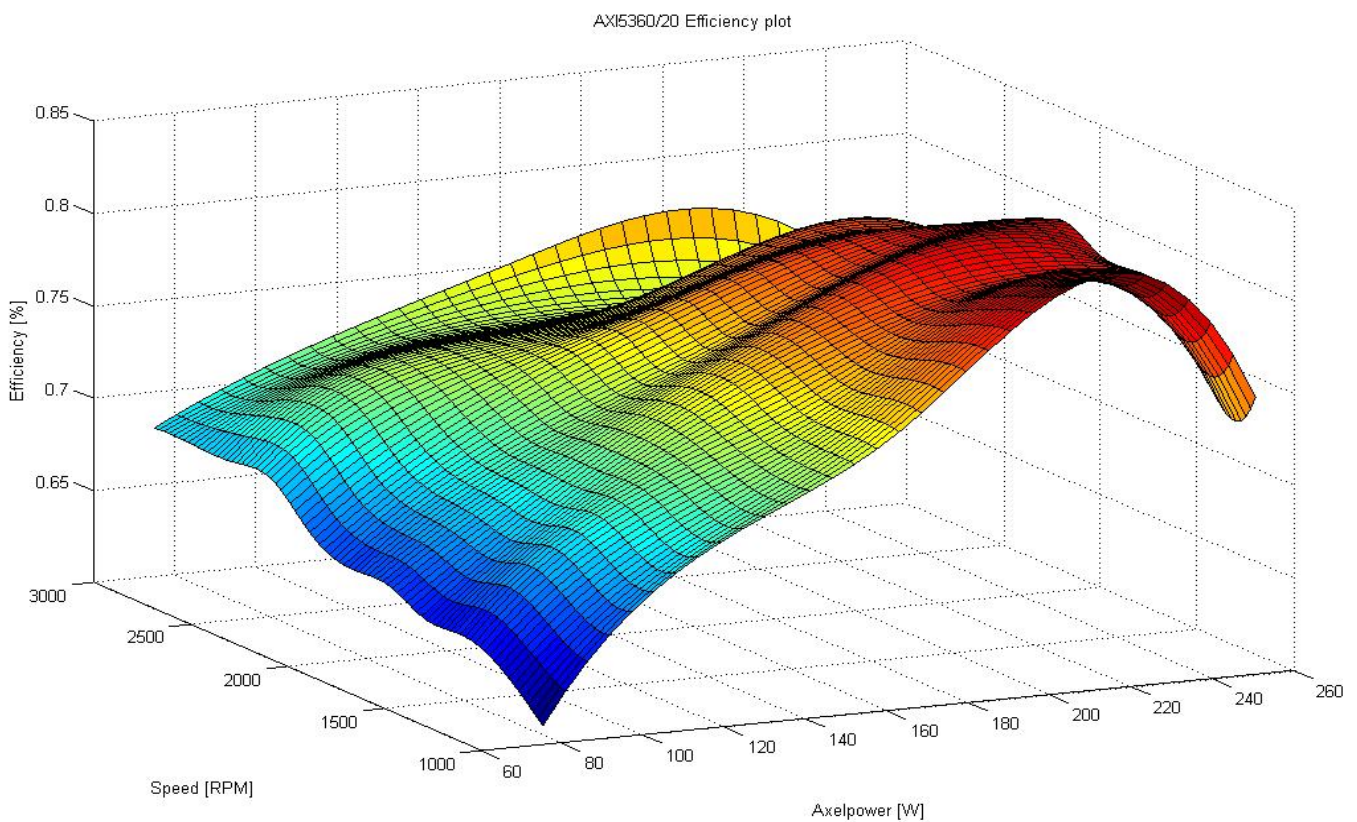
Illustrasjon 7.2.1: Motordata for AXI5360/20

Et kjennetegn for motorer av denne typen er at de er konstruert for å drive hurtig roterende propeller, de har høy vltkonstant. Det innebærer at selv ved høy motoreffekt vil momentet være forholdsvis lavt. Ved bruk av denne typen motor i PureChoice kjøretøyet vil det



Illustrasjon 7.2.3: Moment- hastighetskurve for AXI5360/20

Illustrasjon 7.2.3 viser målinger gjort av moment som funksjon av hastighet for AXI5360/20. Målingene er gjort for fire ulike effektreferanser på akslingen. Kurvene er ekstrapolert ned til null hastighet. Startmomentet er målt med blokkert rotor. Kurvene viser den karakteristiske formen for forholdet mellom moment og rotasjonshastighet for BLDC-motorer.



Illustrasjon 7.2.4: Arealplott av virkningsgrad for AXI5360/20. Funksjon av rotasjonshastighet og effekt

Illustrasjon 7.2.4 viser virkningsgrad for AXI5360/20 utfra målingene gjort i laboratoriet. Plottet er generert ved hjelp av interpolasjon gjort i Matlab. Av figuren kommer det frem to markante områder med høy virkningsgrad, der det første starter ved cirka 150 watt og følger linjen for 1500 rpm. Det andre starter ved 75 watt og stiger langs linjen 2300 rpm. Siden dett område har størst utstrekning i effekt med høy virkningsgrad (over 70%) er det naturlig å ta utgangspunkt i denne rotasjonshastigheten ved valg av forhold for utvekslingen. På denne måten er virkningsgraden for motoren med motordrift optimal ved konstant hastighet og varierende lastpådrag. Utvekslingen beregnes utfra hjulets omkrets, motorens optimale driftspunkt og ønsket hastighet ved kjøring. Simuleringer viste at for en systemvirkningsgrad på over 35% (antar konstant virkningsgrad for brenselcellen på 50%), vil optimal hastighet være 7.22 meter per sekund (26 km/t).

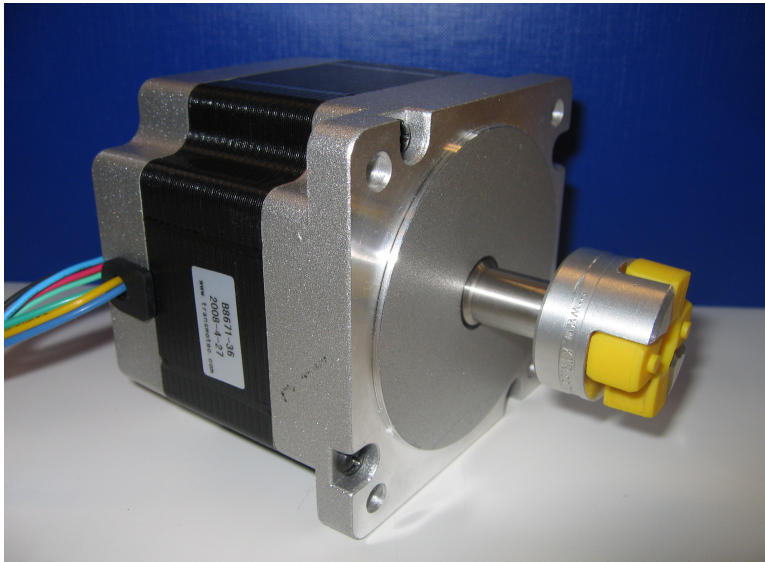
$$Utteksling = \left(\frac{60[s/min]}{Motorhastighet[runder/min]} \right) * \left(\frac{Kjøretøyhastighet[m/s]}{Omkrets\ av\ hjul[m]} \right) \quad (7.2.1)$$

Innsetting av verdiene over gir det en utveksling på hjulet på 1:10.

Ved å følge det andre området og basere beregningen på 1500 rpm vil utvekslingen være 1:6.5. Dette området gir en bedre virkningsgrad ved last over 150 watt. Denne utvekslingen ble prøvd ut, men resulterte i at påkjenningen på friløpshjulet ble for stor så det havarerte. For å kunne dra nytte av denne utveksling burde strategien innebære et kjøremønster med akselerasjon og trilling. Altså ikke konstant hastighet gjennom løpet.

7.3 Transmotec B8671-36

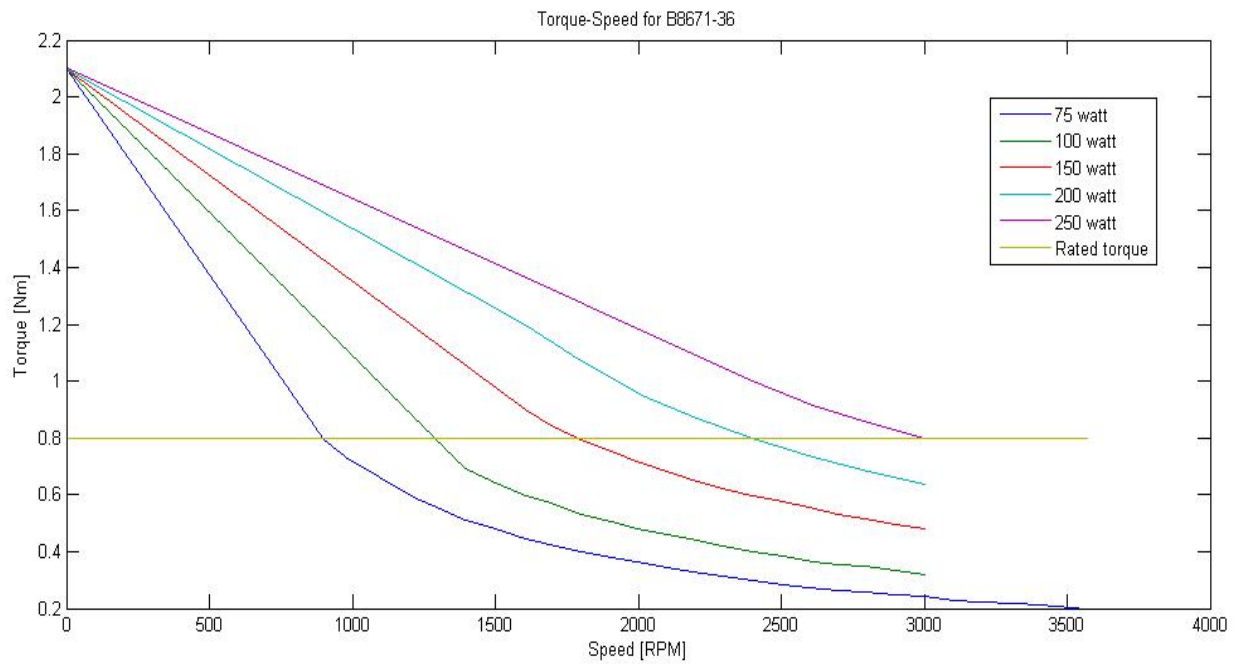
Motoren som ble kjøpt inn fra Transmotec i Sverige ble valgt med tanke på en flat baneprofil. Det ble ikke gjort like omfattende tester av motoren og den har ikke vært montert i kjøretøyet. Noe av grunnen til dette er at den ikke ble levert før 15. mai 2008. Motoren er også av typen BLDC, men er levert med Hall-sensorer for bedre reguleringsmulighet. Data for motoren er gitt i tabellen under.



Illustrasjon 7.3.1: Transmotec B8671-36 BLDC-motor

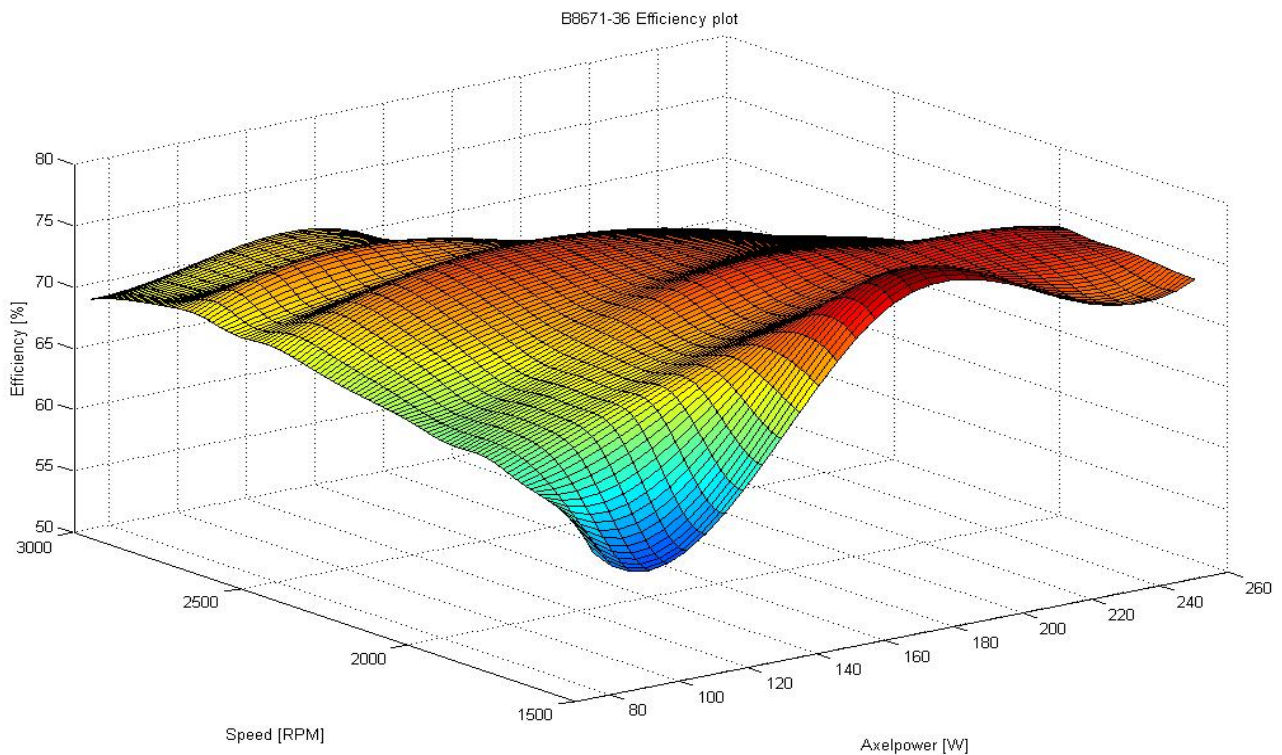
BRUSHLESS MOTOR DATA		
MODEL	UNITS	B8671-36
Rated terminal voltage	VDC	36
Poles		8
Rated speed	RPM	3000
Continuous stall torque TENV	N.m (oz-in)	0.8 (114.4)
Peak stall torque	N.m (oz-in)	2.1(300.3)
Continuous stall current TENV	Amps	8.8
Armature polar moment of inertia	Kg.cm ² / lb-in Sec ²	0.8 (6.930E-04)
Voltage constant KV	V/K rpm	9.58
Torque constant KT	N.m/Amp (oz-in/Amp)	0.091 (13.01)
Line to line resistance	Ohms	0.25
Line to line inductance	mH	0.8
Mechanical time constant	ms	0.6
Electrical time constant	ms	3.2
Static friction torque	N.m (oz-in)	0.02 (2.86)
Weight	Kg (lb)	1.9 (4.14)

Illustrasjon 7.3.2: Motordata for Transmotec B8671-36



Illustrasjon 7.3.3: Moment- hastighetskurve for Transmotec B8671-36

Transmotec B8671-36 er oppgitt å ha nominelt moment ved 0.8 Nm. Ved å benytte forholdet mellom moment og rotasjonshastighet gir det nominell effekt på 251 watt ved 3000 rpm. Illustrasjon 7.1.1 viser linjen for nominelt moment og måledata for 250 watt, kurvene skjærer hverandre i punktet 3000 rpm og bekrefter oppgitte spesifikasjoner for motoren.



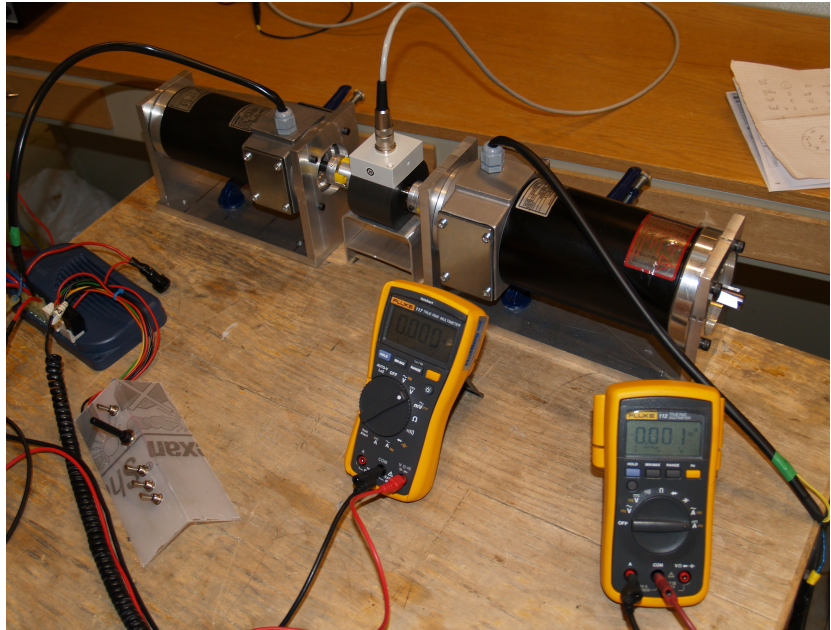
Illustrasjon 7.3.4: Arealplott av virkningsgrad for B8671-36. Funksjon av hastighet og effekt

Test av virkningsgraden for B8671-36 viser at den er marginalt bedre ved lavere last (under 100 watt) enn AXI5360/20. Den er derfor mer egnet for å dekke effektbehovet ved kjøring der bare luft- og rullemotstand er gjeldende.

Spesifikasjonene for motoren oppgir nominell strøm ved nominelt moment til å være 8,8 ampere. Multiplisert med nominell spenning på 36 volt gir det 316,8 watt elektrisk effekt. Virkningsgraden for motoren ved 3000 rpm blir da 79,2%, det betyr at motordriften fra Ametek har en virkningsgrad på 88,35% i dette punktet. Til sammenligning har en DC-DC-omformer som opererer innenfor samme område for spenning inn på klemmene blitt testet. Virkningsgraden for denne hadde en toppverdi på 86%. Jfr. masteroppgave for Elvedin Grudic.

7.4 DTC Lenze likestrømsmotor

Det ble i høstsemesteret 2007 kjøpt inn to likestrømsmotorer, med merke-effekt på henholdsvis 200 og 370 watt, tiltenkt brukt i PureChoice kjøretøyet. Begge motorene kan drives med samme type DC-omformer med nominell matespenning på 24 volt og øvre spenningsgrense på 36 volt. I tomgang (leverer ikke effekt) er klemmespenningen for hydrogen brenselcellen på 41-42 volt.



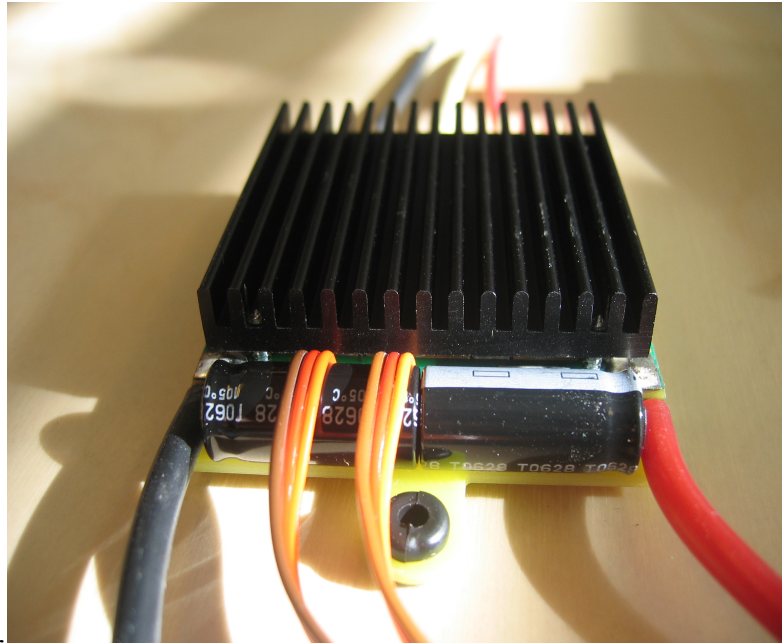
Denne spenningen ville føre til at motordriften for likestrømsmotorene ville koble ut hvis det ikke brukes DC-DC-omformer mellom brenselcelle og motordrift. Dette fører til ytterligere tap og lavere systemvirkningsgrad.

I løpet vårsemesteret 2008 ble begge motorene testet med tanke på virkningsgrad. Den største (merkeeffekt 370 watt) fungerte som likestrømsgenerator i test-oppsettet (se Illustrasjon 7.4.1). For denne er det gjort mange målinger for mekanisk effekt inn på akslingen og elektrisk effekt ut av generatoren. På denne måten er motoren testet isolert uten bruk av motordrift og de ekstra tapene det medfører. Motoren med merkeeffekt på 200 watt har blitt testet direktekoblet (uten utveksling) til momentmåler og generator. Her var det behov for kraftelektronikk for å hastighetsregulere motoren. Måleseriene for begge motorene er å finne i vedlegg 14.1.

Testdata for begge motorene, samt AXI5360/20 ble sammenlignet for å velge den beste løsningen for PureChoice kjøretøyet. Måleseriene viste entydig at virkningsgraden for AXI5360/20 var høyere enn for likestrømsmotor både med og uten motordrift. Av den grunn ble begge motorene forkastet med tanke på fremdriftssystem, men den største har gjort god nytte som generator i samband med tester som er gjort på andre motorer.

7.5 SPIN 77 OPTO

Jeti Model holder også til i Tsjekkia og er samarbeidspartner med Model Motors. Da Model Motors ble kontaktet angående AXI motoren anbefalte de å bruke Jeti sine kontrollere. Spin 77 Opto blir ofte omtalt som en hastighetskontroller (Eng. Electronic Speed Controller, ESC), men fungerer som en vekselretter med programmerbar mikrokontroller. Spin 77 Opto fungerer for inngangspenninger fra 12 til 50 volt. Det innebærer at det ikke er behov for en egen DC-DC-omformer mellom brenselcelle og vekselretter.



Illustrasjon 7.5.1: Spin 77 Opto

Spin kan programmeres ved hjelp av programmeringsenheten "Jetibox" som er ekstrautstyr. Det er mulig å kjøre motoren ved hjelp av Jetibox, men dette er en lite praktisk løsning annet enn i lab-sammenheng. En fullstendig oversikt over mulighetene for programmering er å finne på produsentens hjemmeside [3] og i ZIP-fil på DAIM (Digital Arkivering og Innlevering av Masteroppgaver [7]).



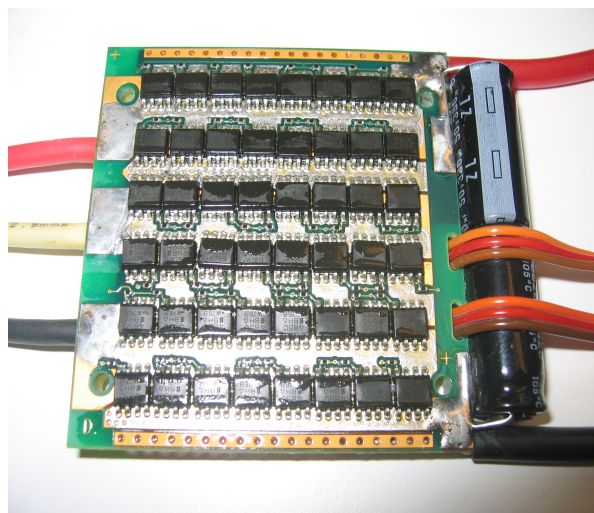
Illustrasjon 7.5.2: "Jetibox".
Programmeringsenhet for Spin 77 Opto

De viktigste parametrene som må legges inn før bruk er antall poler motoren har og frekvens for svitsjing av halvlederne (MOSFET). Det er også mulig å legge inn en tidsforsinkelse (integrasjon) av hastighetssignalet. Det har ikke vært mulig å fremskaffe dokumentasjon angående virkemåte for Spin 77 Opto fra leverandøren. Det har heller ikke vært mulig å gjennomføre en dyptgående analyse av vekselretteren grunnet mangel på tid.

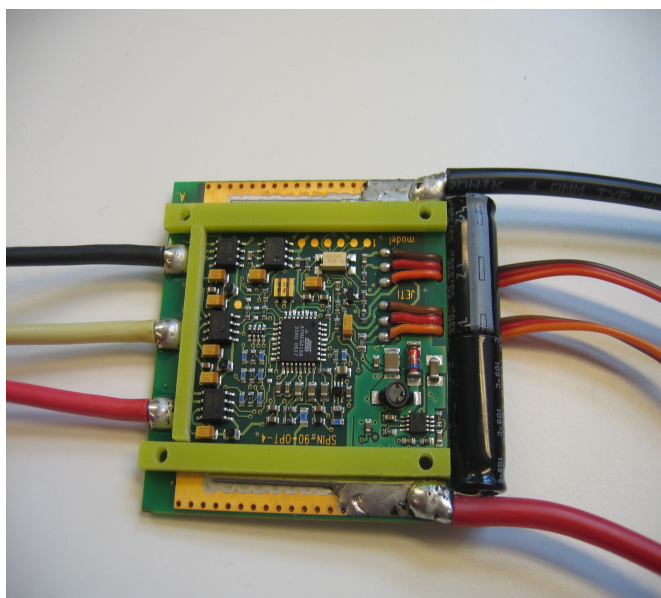
Spin 77 Opto er basert på komutering uten

sensorer (beskrevet tidligere). Ved start innebærer det at motoren "hakker", tilsvarende pol-slipp (eng. Cogging). Vibrasjonene forplanter seg til "dropp-armen" som motoren er festet i, og resulterer i litt mekanisk støy. Støyen gir seg når motoren har oppnådd en viss rotasjonshastighet. Det har ikke vært mulig å måle punktet denne vibrasjonen gir seg ved, men det er naturlig å anta at det er når vekselretteren går over fra "open-loop" til å måle mot-indusert spenning på motorens tre faser.

Vekselretteren i Spin 77 Opto består av 48 MOSFET fordelt på tre ben, det gir 16 MOSFET per ben (fase). Bildene under viser Spin 77 Opto uten kjøleribbe og deksel. Konfigurasjonen av disse 16 er en form parallellkobling som tillater strømmer på opptil 77 ampere gjennom vekselretteren. Motsetningen til parallellkobling er multinivå der et antall MOSFET kobles i serie for å variere spenningen i flere nivå. Fordelene ved å bruke MOSFET fremfor IGBT (som kan lede store strømmer) er at svitsje-frekvensen for MOSFET er høyere enn for IGBT. Det fører til at "strøm-rippelen" blir mindre, som igjen gir mindre "rippel" i moment for motoren. Parallellkobling av MOSFET fører til at kretsen kan lede en større strøm (to MOSFET i parallell gir halve strømmen gjennom hver, eventuelt kan de være halvparten så store) og kan i prinsippet gjøres ved å koble sammen gate-terminalene. Det er ikke mulig med IGBT.



Illustrasjon 7.5.3: Spin 77 Opto uten kjøleribbe



Illustrasjon 7.5.4: Spin 77 Opto uten deksel

Mikrokontrolleren som sitter i Spin 77 Opto er av typen Atmega168 fra Atmel. Den har 8 bits minne og seks utganger for pulsbredde modulasjon. Illustrasjon 7.5.3 viser vekselretterens 48 MOSFET merket 4850. Det er trolig modellen Si4850EY fra fra Vishay eller lignende det refereres til. Datablad for denne modellen er finne i [9].

7.6 Motordrift fra Ametek.

Transmotec leverer vekselrettere med drivekrets til sine motorer, men siden en av fordelene med BLDC er at den ikke er avhengig av én spesiell type omformer for å fungere falt valget på en løsning fra Amerikanske Ametek. Begge løsningene er basert på bruk av Hallsensor for tilbakekobling av rotorposisjon og kan tilkobles et potensiometer for trinnløs regulering av hastighet.

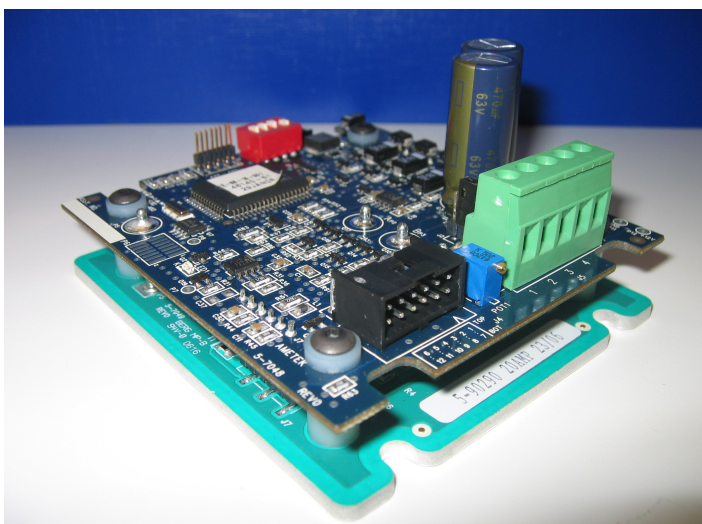


Illustrasjon 7.6.2: Transmotec DBL motordrift

Voltage in	VDC	24 / 36 / 48 +/-10%
Rated current	A	8
Peak current	A	15
Rated power	W	360
Peak power	W	720
Insulation resistance	ohm	>100M at 500VDC
Dielectric strength	VAC	500 50Hz 1 minute
Operating temperature	°C	0..+50

Illustrasjon 7.6.1: Data for Transmotec DBL motordrift

Transmotec sin løsning er begrenset av at kontinuerlig strøm kun er på åtte ampere, med høyeste strøm på 15 ampere. For Ametek er maksimal kontinuerlig strøm på 20 ampere. Den kan også håndtere inngangspenninger mellom 11 og 52 volt. Transmotec er avgrenset til 36 volt $\pm 10\%$.



Illustrasjon 7.6.3: Ametek motordrift med DSP

Det er mulig å programmere den digitale signal-prosessoren (DSP) i motordriften fra Ametek via PC og porten merket J-1. Da Ametek ble kontaktet i forkant av bestillingen var beskjeden at porten ble brukt til å forhåndsprogrammere DSPen på fabrikken, eventuelt for programvare oppdateringer og nedlasting av egne programmer. Motordriften ble dog ikke levert med hverken kabel eller programvare for PC.

Controller Data	Motor/Blower Contoller
	48140*
Maximum Continuous Current	20 A
Input Voltage Range	11-52 VDC (optional 60 VDC)
Controller PWM Frequency	20 kHz
Analog Speed Input	0-5 VDC, 2k-20k Potentiometer
Electrical Hall Spacing	60° or 120°
Waveform	6-Step Trapezoidal
Current Limit Protection	Yes
Rotation	CW / CCW

Illustrasjon 7.6.4: Data for Ametek motordrift

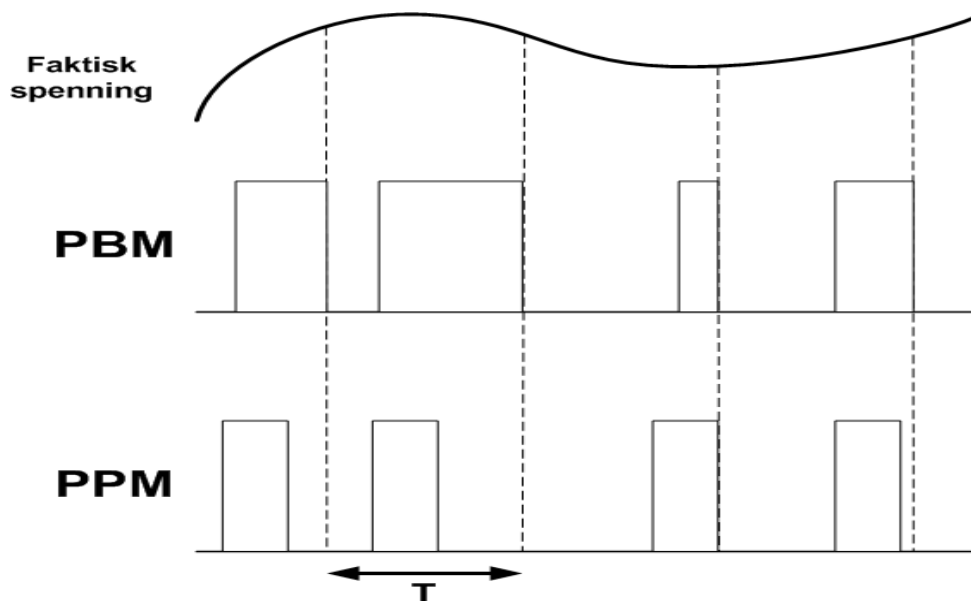
På grunn av at motoren fra Transmotec ble levert så sent har ikke motordriften fra Ametek blitt testet i stor grad. Den ble brukt til å drive Transmotec B8671-36 ved testing av virkningsgrad. I den sammenhengen ble det gjort undersøkelser rundt effekten av hallsensor sammenlignet med "open-loop" og EMK-måling. Jeti sin løsning med "open-loop" gir problemer med stor startstrøm, noe som ble bekreftet i et forsøk på bakkestart med PureChoice kjøretøyet. Strømmen ble da så stor at vernet i brenselcellen koblet inn og stengte den av. Ved test av igangsetting av B8671-36 med Ametek motordrift med høyt startmoment (bremsing av aksling), fortsatte motoren å rotere ved lavt turtall og strømmen var begrenset til fire ampere målt på spenningskilden. Som beregnet tidligere kan strømmen ved blokkert rotor ha maksimalverdi på 23 ampere. Under test var rotasjonen jevn uten noen form for "cogging", relativt til AXI5360/20. Testen viste at tilbakekobling av rotorposisjon er å foretrekke ved start av last med stort treghetsmoment.

7.7 Hastighetsregulering av system med AXI5360/20 og Spin 77 Opto

Jetibox, levert av Jeti Models, kan tilkobles inngangen for hastighetsignal på Spin 77 Opto via flatkabel med tre ledere. Jetibox har muligheten å gi ut et puls-tog av riktig type for å sette ønsket hastigheten for motoren. Hvilken type modulasjon som brukes for å generere pulsen er ikke oppgitt i dokumentasjon som følger med programmeringsboksen eller motordriften. I bruksanvisningen er funksjonen for hastighetregulering beskrevet under "Servo pulse generator". Den eneste nyttige informasjonen der er at pulsens bredde er mellom 1,024 og 2,047 milli-sekunder for henholdsvis null og største mulige hastighet.

7.7.1 Målinger

Det ble gjort målinger ved hjelp av oscilloskop for å finne pulsens amplitude, frekvens og form. Pulsen hadde frekvens på 50 Hertz, og pulsbredde på ett milli-sekund ved stopp (ingen rotasjon), til to milli-sekunder for maksimalt turtall. Pulsens amplitude var på fem volt.



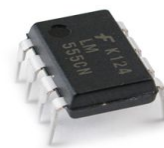
Illustrasjon 7.7.1: Forskjellen mellom PBM og PPM

Denne typen modulasjon kalles Puls Posisjon Modulasjon (PPM). For å forklare PPM vil det bli sammenlignet med Puls Bredd Modulasjon (PBM). Ved PBM er bredden på hver puls direkte proporsjonal med amplituden til informasjonsignalet (amplitude for klemmespenningen fra vekselretteren). Ved PPM blir det brukt pulser med konstant bredde (konstant frekvens). Den posisjon eller tidspunktet pulsene forekommer ved, i forhold til en referansetid, er direkte

proporsjonal med amplituden til informasjonsignalet. Motordriften (Spin 77 Opto) er i utgangspunktet tiltenkt for bruk i radiostyrte modell kjøretøy som fly og helikopter. Bakgrunnen for å velge PPM som modulasjons metode er trolig at PPM allerede er brukt for overføring av radiosignaler og er en form for etablert standard innen miljøet.

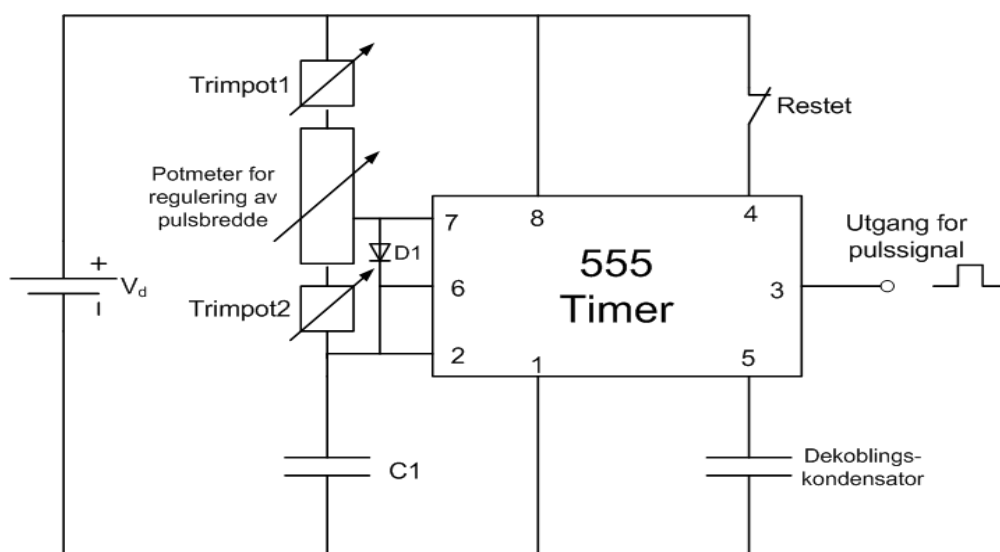
Det er i hovedsak to måter å konstruere en elektronisk krets som gir ut en puls av denne typen. Den mest elegante er ved bruk av mikrokontroller og programmering. Kretsen er da å regne som digital og det er behov for analog til digital omformer (AD-omformer) for å tolke den mekaniske informasjonen føreren av kjøretøyet gir ved ønske om endring av hastighet.

En annen måte å konstruere en elektronisk puls er ved bruk av en "555-timer". For en mer detaljert beskrivelse av "555-timer" henvises det til [10], eventuelt tilleggs informasjon på internett og i fagbøker.



Illustrasjon 7.7.2: "555-timer" fra Faichild

7.7.2 Elektronisk krets for puls posisjon modulasjon



Illustrasjon 7.7.3: Skisse over krets som ble brukt til å generere hastighetspuls

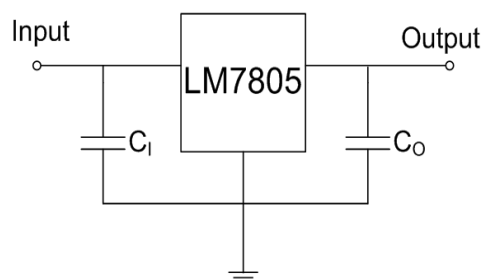
For å kunne variere bredden på pulsen mellom ett og to milli-sekunder er det lagt inn et lineær potensiometer. Det fungerer som grensesnittet mellom wirens posisjon (avhengig av utslaget på "gasspedalen") og den elektroniske kretsen. Potensiometeret er koblet slik at totalverdien av den ohmske motstanden over det ligger mellom "trimpot1" og "trimpot2". Variasjonen i motstand (mekanisk koblet til wire) er koblet til ben sju på "555-timeren".

Ved å legge en diode mellom ben seks og sju er det mulig å få en puls med "duty-cycle" under 50%. "Reset"-funksjonen er erstattet med en kortslutning. Det ble lagt til en "dekoblings-kondensator" mellom ben fem og jord for å minske støy, men ved måling på oscilloskop ble det ikke påvist at denne hadde noen funksjon for signalet.

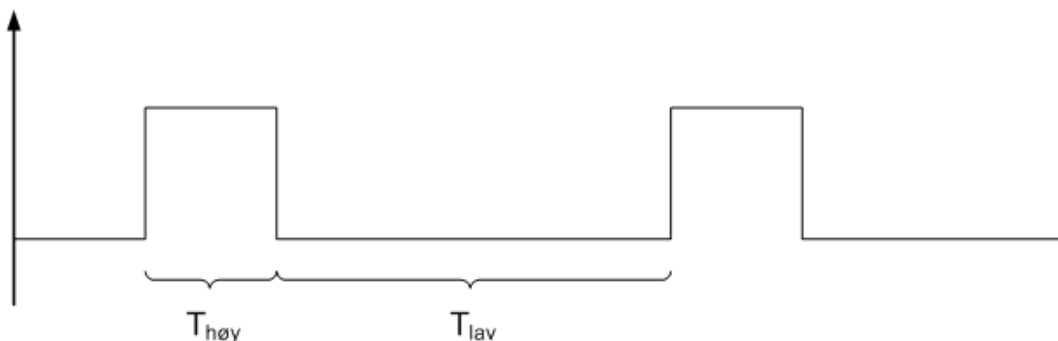
Isteden for ohmske motstander med endelig verdi er det benyttet to trimpotensiometrene for å kunne justere grenseverdiene til pulsen (nedre og øver grense, samt frekvens).

Spenningsregulator

Spenningen V_d som ligger over kretsen ble regulert ned fra ni volt batterispennning til fem volt ved hjelp av en LM7805 spenningsregulator. Siden det er et spenningsfall over kretsen ble utgangssignalet litt lavere enn fem volt. En bedre løsning hadde vært å legge denne regulatoren mellom utgangssignalet på ben tre og jord.



Illustrasjon 7.7.4: Spenningsregulator



Illustrasjon 7.7.5: PPM, der $T(høy)$ er bredden på pulsen

Pulsbredden for henholdsvis høy og lav puls beregnes utfra:

$$T_{høy} = 0,693 R_1 C_1 \quad (7.7.2.1)$$

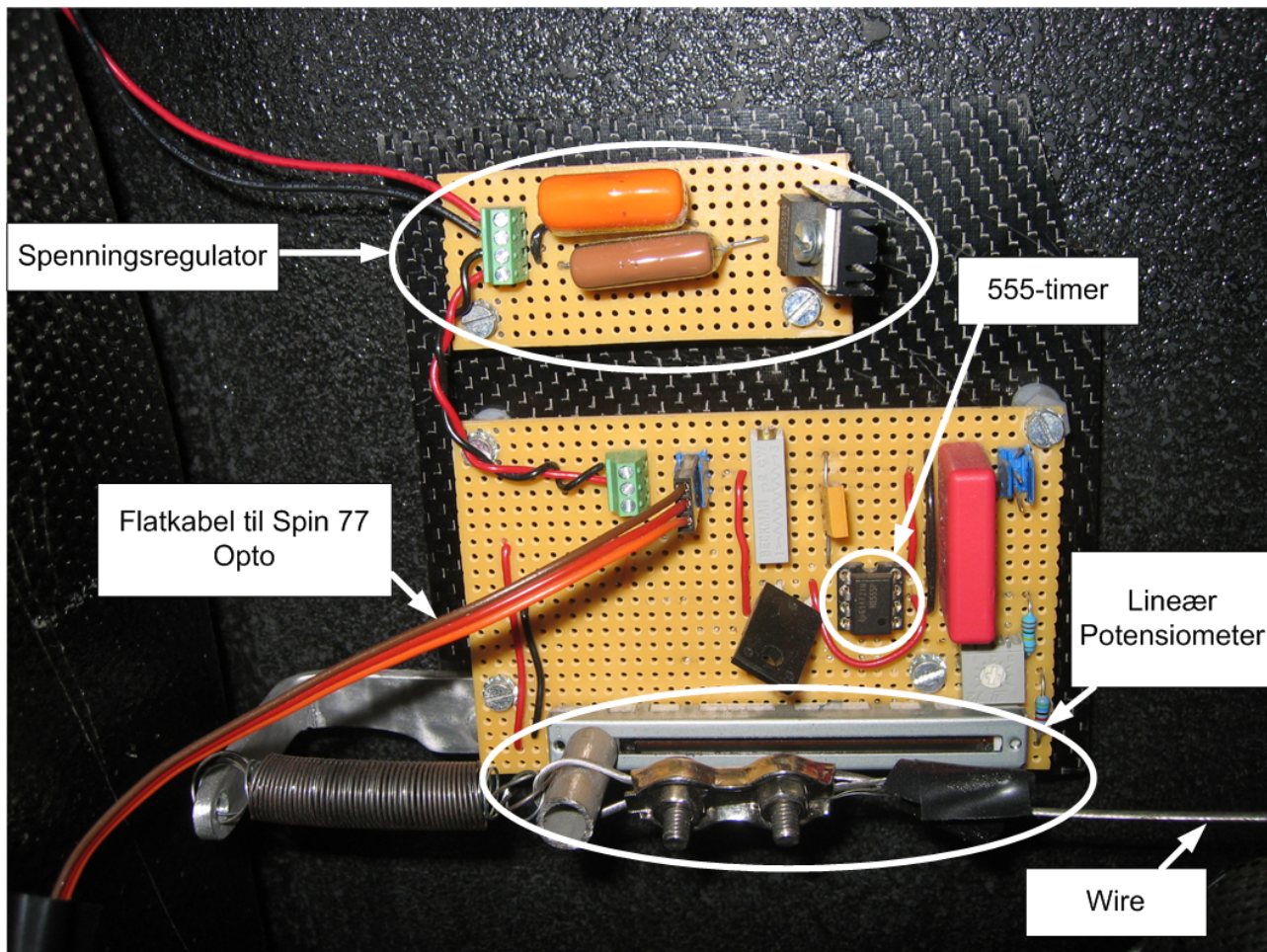
$$T_{lav} = 0,693 R_2 C_1 \quad (7.7.2.2)$$

Frekvensen er gitt ved én over perioden:

$$f [Hz] = \frac{1}{T_{høy} + T_{lav}} = \frac{1,443}{C_1 (R_1 + R_2)} \quad (7.7.2.3)$$

- Der R_1 er den ohmske verdien mellom ben sju og åtte (summen av "trimpot1" og delen av potensiometeret som er ned til ben sju).
- C_1 er verdien av kondensatoren merket C_1 i Illustrasjon 7.7.3
- R_2 er den ohmske verdien mellom ben sju og to, målt over potensiometer og "trimpot2".

Liste over komponentene som ble bruk og verdiene av disse er å finne i vedlegg, Tabell 21.



Illustrasjon 7.7.6: Krets for regulering av hastigheten motert på karbonfiberplate

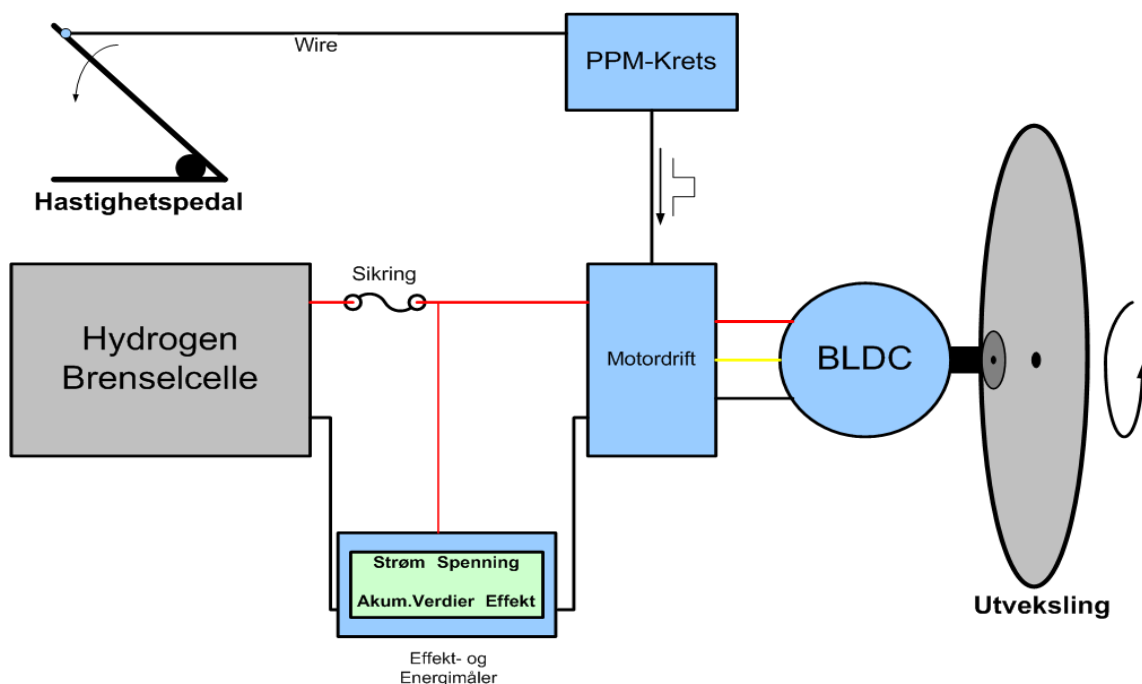
8 Oppkobling og oppsett i PureChoice kjøretøyet.

I dette kapittelet vil den praktiske oppkoblingen av det elektriske fremdriftssystemet bli forklart. Det er lagt vekt på den delen av fremdriftssystemet som består av motor, motordrift, hastighetsregulering under kjøring og monitorering av systemets tilstand (strøm og spenning) og flyten av effekt. Kapittelet er en presentasjon av hvilke komponenter som ble brukt i PureChoice kjøretøyet og grensesnittet mellom disse.

8.1 Regulering av hastighet

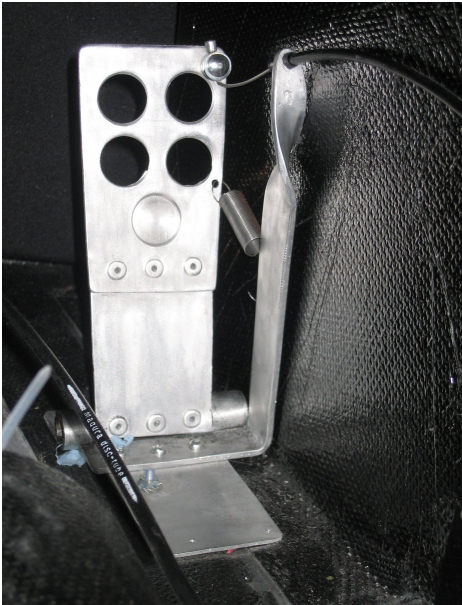
Under kjøring er det viktig at føreren kan operere kjøretøyet på en mest mulig intuitiv måte. Det ble vurdert løsninger med "håndgass", både på rattet og plassert andre steder i kjøretøyet hvor det kunne være naturlig for føreren. Ved bruk av "håndgass" må det tas stilling til om det er hensiktsmessig å implementere den med en form for cruisekontroll. Hvis cruisekontroll ikke velges betyr det at når "gassen" slippes vil kjøretøyet pådrag på motoren. Det er trolig at det alltid er behov for en hånd på rattet under kjøring, den andre bør derfor være tilgjengelig hvis det er behov for det.

Den endelige løsningen for PureChoice kjøretøyet ble "fot-gasspedal" utformet i aluminium, med wire for regulering av fart. Ved å velge et konsept som er mest mulig likt det som er vanlig i en kommersiell bil, vil terskelen for bruk senkes og føreren kan konsentrere seg om viktigere oppgaver.

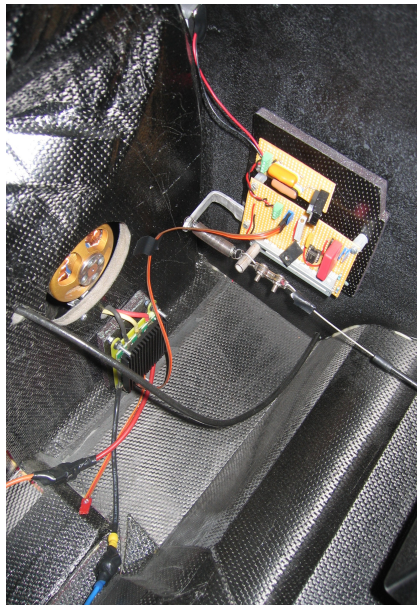


Illustrasjon 8.1.1: Fremdriftssystemet i PureChoice kjøretøyet

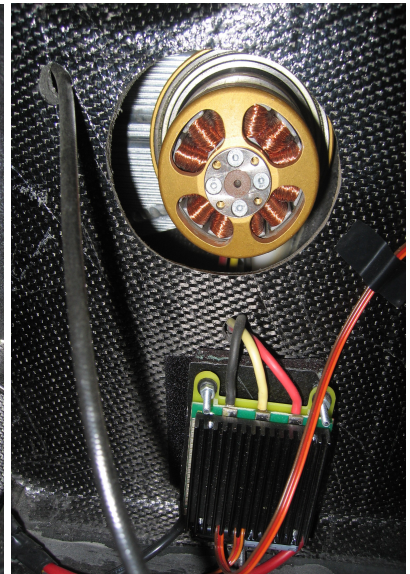
Mellom pedal og elektronisk krets for hastighetsignal ble det lagt en 1,2mm² wire i strømpe, tilsvarende den typen som bruker til girwire for vanlige tråsykkel. Kretsen gjør pedalen og wirens bevegelse om til en elektrisk puls via et lineært potensiometer. Bredden av firkanspenningen er analog med pedalens utslag. Pulsen tolkes som ønsket rotasjonshastighet for motoren (og en eventuell endring i denne) av Spin 77 Opto. Den omsetter signalet til en spenning på motorens tre faseledninger. Spenning omgjøres så til rotasjon og kjøretøyet beveger seg fremover.



Illustrasjon 8.1.2: Hastighetspedal



Illustrasjon 8.1.3: Motorrom



Illustrasjon 8.1.4: Motor og motordrift

8.2 Monitorering av parametre under kjøring



Illustrasjon 8.2.1: Dashbord

For at føreren skal kunne holde oversikt over effektflyten og tilstanden til fremdriftssystemet er det installert en måler i førerhusets dashbord. Måleren viser momentan effekt, strøm og spenningen etter sikringen. På denne måten vil det være mulig å oppdage en avbrent sikring uten å fysisk måtte åpne og sjekke sikringsholderen. I tillegg beregner måleren energi i form av watt-timer, den lagrer høyeste effekt og strøm, og laveste spenning. Det ble også satt inn et voltmeter

for å måle spenningen på eventuelle superkondensatorer.

8.3 Vekten av systemet.

Tabell 4: Vekt av elektrisk fremdriftssystem i PureChoice kjøretøyet

Komponent	Verdi
Pedal	140 gram
Wire med strømpe	70 gram
Elektronisk krets for PPM-signal inkl. Festeplate i karbonfiber	60 gram
Energimåler ("Watt's up")	60 gram
Spenningsmåler for superkondensator	80 gram
Spin 77 Opto med festeplate i karbonfiber	130 gram
AXI5360/20	1350 gram
<i>Totalt</i>	<i>1890 gram</i>

Det ble satt ett mål i forbindelse med vekt før noen av komponentene ble kjøpt inn eller konstruert. Målet var diffust og gikk ut på å velge letteste løsning. For motoren betydde det den løsningen med høyest forhold mellom effekt og masse. Tabell 4 er en oppsummering av vekten for de ulike komponentene i det elektriske fremdriftssystemet, totalvekt for systemet endte på under to kilo. Vekten av hydrogen brenselcellen med sikkerhetssystem er ikke tatt med da det var en annen gruppedeltaker ansvarsområde.

8.4 Vern

Selv om "Nexa Power Modul"e allerede er levert med vern/sikring var det krav om ekstra sikring mellom brenselcelle og motordrift. Her ble det valgt en smeltesikring på 60 ampere. Til tross for litt ekstra kabelføring ble det besluttet at sikringen skulle plasseres inne i førerhuset slik av føreren selv hadde muligheten til å bytte under løpet.

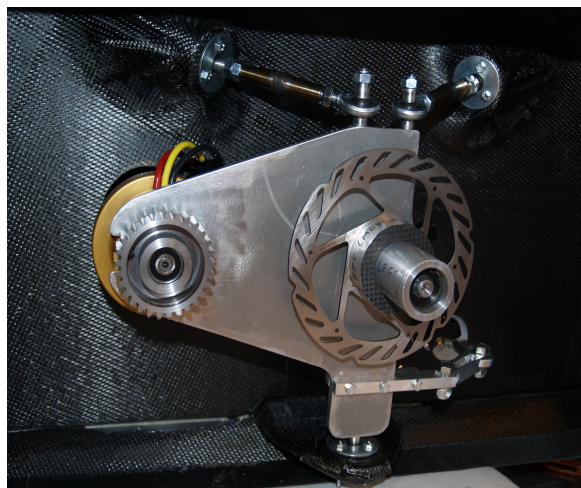


Illustrasjon 8.4.1: Sikringsholder med smeltesikring

8.5 Innfesting av motor

På grunn av motorens størrelse og vekt var det mulig å konstruere et kombinert motor og hjuloppheng. Bildet viser motoren montert som en integrert del av hjuloppheng. Tannhjulet virker direkte på tannkransen i felgen, noe som gir en moment-arm tilsvarende tannhjulets radius.

Motorens tre faseledere ble trukket gjennom et hull i hjulbrønnen fra motordriften som var festet med borrelås på innsiden. På grunn av motorens lengde ble det skåret ut et hull for i hjulbrønnen med større diameter enn motoren. Dette hullet fungerte også som tilførselkanal for luft til hydrogen brenselcellen.



Illustrasjon 8.5.1: AXI5360/20 festet på "dropp-arm"



Illustrasjon 8.5.2: Motor og utveksling

9 Optimaliseringer

I dette kapitlet er det foreslått noen optimaliseringer av fremdriftssystemet slik det er i dag. Det var ment å utføre noen av forslagene før start til tredje løp i Shell Eco-marathon 2008, men på grunn av at løpet ble fremskyndet flere timer var det ikke tid til dette.

Alle elektriske koblinger er gjennomført med kabelsko. Det er brukt både vanlig klips-type og typen som festes med skrue og mutter. Dette gjør det lett å koble fra enkeltkomponenter eller ta systemet fra hverandre. Det medfører også et lite spenningsfall over hver kobling. Dette tapet er det mulig å redusere ved å lodde sammen kablene. Ved å fjerne energimåler, voltmeter og flytte sikringen til motorrommet, kan kabellengdene reduseres og tapene går ytterligere ned.

Kapittel 5 tar for seg teoretiske beregninger for hvor mye effekt det er behov for i banens ulike punkter. Dette er kun verdier for minste mulig effektforbruk. I en situasjon der den kinetiske energien ikke utnyttes til rulling, eller hvis idealfarten overstiges vil gjennomsnittlig effekt for løpet øke. Hvis det antas at det for et gitt løp kjøres med en gjennomsnittlig effekt på 100 watt og systemvirkningsgrad på 35%, vil den totale energien for hele løpet (54 minuttet og 25 sekunder) være 938 857 joule. Blir løpet gjennomført med snitt effekt på 90 watt (simulering gav 93 watt) vil energiforbruket reduseres til 839 571 joule. Hvis energiforbruket ved 100 watt tilsvarer kjørelengden 729 kilometer, beste resultat for PureChoice kjøretøyet, vil kjørelengden ved 90 watt øke til 810 kilometer. 10 watt gjennom et helt løp kan tapes ved inkonsekvent kjøring. Det kan også tjenes inn ved å flytte energitilførselen for komponenter i systemet, som ikke omfattes av fremdriftssystemet i henhold til reglement, over til batterier. Dette ble gjort med blant annet magnetventilene for hydrogentilførselen og kretsen for hastighetsregulering ("PPM-krets").

10 Kjørestrategi

Dette kapittelet er ikke en fasit på optimal kjørestrategi for PureChoice kjøretøyet ved kjøring på banen i Nogaro. Det er et forslag på gjennomføring av et løp med vekt på mest mulig energieffektiv kjøretil. Kapittelet gjenspeiler noe av det arbeidet som ble lagt ned i analysering av bane, kjøretøy, brenselcelle, motor og taktikk. På grunn av omfanget av beregninger og tanker som er gjort rundt temaet optimal kjøreteknikk, av personene som har jobbet med fremdriftssystemet, vil kun en liten del av materialet bli behandlet her. Kapittelet er ment som en liten pekepinne på hvilke faktorer som er aktuelle å studere, samt at det forhåpentligvis kan være av interesse for de som senere måtte arbeide med lignende problemstillinger.

Startprosedyre

Optimal verdi for akselerasjon kan beregnes på to måter. Den ene måten er å sammenligne energiforbruket ved ulike verdier for akselerasjon og plukke ut den som gir lavest forbruk. Det er denne metoden som det vises til i kapittel 5.

En mer komplisert beregning krever bruk av PC og beregningsprogram som for eksempel Matlab. Modellen som da må settes opp må ta hensyn til variable som banetopologi, tidsforbruk (under maksimaltid), dynamisk systemvirkningsgrad og optimal hastighet. Modellen må også inneholde parametre for kjøretøyet. Denne beregningen vil gi et teoretisk svar på optimal kjørestrategi.

Konstant eller variabel hastighet?

For å kunne gjøre potensiell energi ved banens høyeste om til kinetisk energi kan ikke momentanhastigheten være konstant gjennom hele løpet. Når kjøretøyet triller ned en bakke vil farten øke helt til rullemotstand og luftmotstand (i effekt) er større enn kinetisk effekt. Som ved regenerativ bremsing vil det være en laveste hastighet hvor det er hensiktsmessig å koble inn motoren igjen.

I tilfeller det kun rullemotstand og luftmotstand er å regne som gjeldende vil lavest mulig hastighet føre til minst mulig effekt- og energiforbruk. Også her vil maksimaltiden for løpet dimensjonere denne hastigheten.

Det ekstra pådraget av effekt når kjøretøyet skal opp en bakke kan utnyttes. Arealplottet over motorens virkningsgrad-område kan brukes for å finne den mest hensiktsmessig måten å håndtere

en stigning. For AXI5360/20 øker virkningsgraden når lasten øker. Dette kan kombineres med akselerasjon i bakken. I denne sammenhengen er det viktig å kjenne til et komplett bilde av motorens virkningsgrad. Når stigning og akselerasjon kombineres kommer også dynamisk respons for motoren inn som en viktig parameter. I en situasjon der motorens moment ikke er tilstrekkelig for å takle både akselerasjon og stigning kan resultatet være det samme som for bakkestart med AXI5360/20, strømmen øker uten at den omsettes til moment på akslingen (polslipp).

Kjøretøyets hastighet mot toppen av bakken og over bakkens høyeste punkt kan være så lav at det er akkurat nok til å komme over toppen. Denne hastigheten kan legges inn som variabel i simuleringen.

En mulig tilnærming for simuleringen er å ta utgangspunkt i banetopologien og simulere løpet på tid.

Under siste løpet i Shell Eco-marathon 2008 ble følgende strategi lagt opp for PureChoice kjøretøyet.

- Kraftig akselerasjon på cirka 800 watt.
- Holde hastigheten konstant på 27 km/t gjennom hele løpet.
- Utnytte kinetisk energi i nedoverbakke.
- Bremsse ved "pit-stopp" når hastigheten kom under 20 km/t.

Det resulterte i en økning fra 703 kilometer dagen før, til 729 kilometer som er høyeste noterte resultat. Den eneste forbedringen som ble gjort på kjøretøyet mellom disse to løpene var å øke lufttrykke i dekkene fra fire til fem bar.

11 Diskusjon

Beregninger og simulering

Beregningene som tar for seg data for Nogaro-banen og PureChoice kjøretøyet er grunnleggende ligninger og en forenkling av virkeligheten. Det vil for eksempel være vanskelig å praktisk gjennomføre et løp i overensstemmelse med simuleringer gjort i forkant. Faktorer som ikke er tatt med i simuleringen er blant annet effekten av vindretning under løpet og energien som går tapt gjennom svinger. Variasjon i temperatur og trykk vil ha betydning for brenselcellens virkningsgrad. En simuleringsmodell som tar hensyn til klimatiske forhold kan baseres på registrerte værdata for banens beliggenhet, men vil være å regne som kvalifisert gjetting.

Simuleringsmodell for gjennomføring av et løp tar kun hensyn til kjøring på plant underlag. Grunnen til at banens topologi ikke ble inkludert i modellen var en misforståelse av hvilken del av banen det skulle konkurreres på. Her var informasjonen fra Shell litt uklar. Den delen som ble antatt å være gjeldende er å regne som helt plan. Med denne antakelsen var Transmotecs B8671-36 antatt å være en godt kandidat for valg av motor. Teknologien med bruk av Hallsensor gir presis regulering av motoren og god respons ved start. Det begrenser også strømmen som motoren trekker fra brenselcellen.

Valg av motorprodusent

Det har blitt nevnt tidligere at informasjonen fra produsenten/leverandøren omkring spesifikasjonene for ulike motorer er sparsomme. Moment- effekt- og turtall-området for motoren som skulle brukes i PureChoice kjøretøyet var i denne sammenhengen forholdsvis begrensende for utvalget. I tillegg kom reglementet for Shell Eco-marathon og satte øvre grense for spenning i systemet til 50 volt. Veldig mange produsenter reklamerer med motorer som har høy virkningsgrad, de oppgir da som regel hverken kurve eller maksimalverdi for virkningsgrad. Inntrykket man sitter igjen med etter å lest på produsentenes hjemmesider er at virkningsgrad ikke er en viktig parameter. Transportbånd viftedrift er ofte oppgitt å være vanlige bruksområder for motorer i denne klassen, her er virkningsgrad av liten betydning for brukeren.

Budsjettet vårt tillot kjøp av motorer fra flere produsenter. Det førte til at vi fikk flere muligheter til å finne en motor som tilfredsstilte vårt behov.

Bruk av kraftelektronikk

Strøm- spenningskarakteristikken for en hydrogen brenselcelle skiller seg fra batterier og solcellepaneler ved at spenningen ikke holdes tilnærmet konstant for økende strøm. Ballard Nexa Powermodule strekker seg fra 41-42 volt ved null last, til ned mot 25 volt. For å beholde en høyest mulig virkningsgrad var det ønskelig med færrest mulige ledd i kjeden fra brenselcelle til motor. Bruk av DC-DC-omformer ville redusert systemvirkningsgraden betraktelig. Motordriften som ble brukt i kjøretøyet tillot et stort spenn i klemmespenning inn på vekselretteren. Det er trolig at en slik dimensjonering fører til at virkningsgraden for komponenten går ned noe i forhold til en med mindre toleranse.

Oppsett i laboratoriet

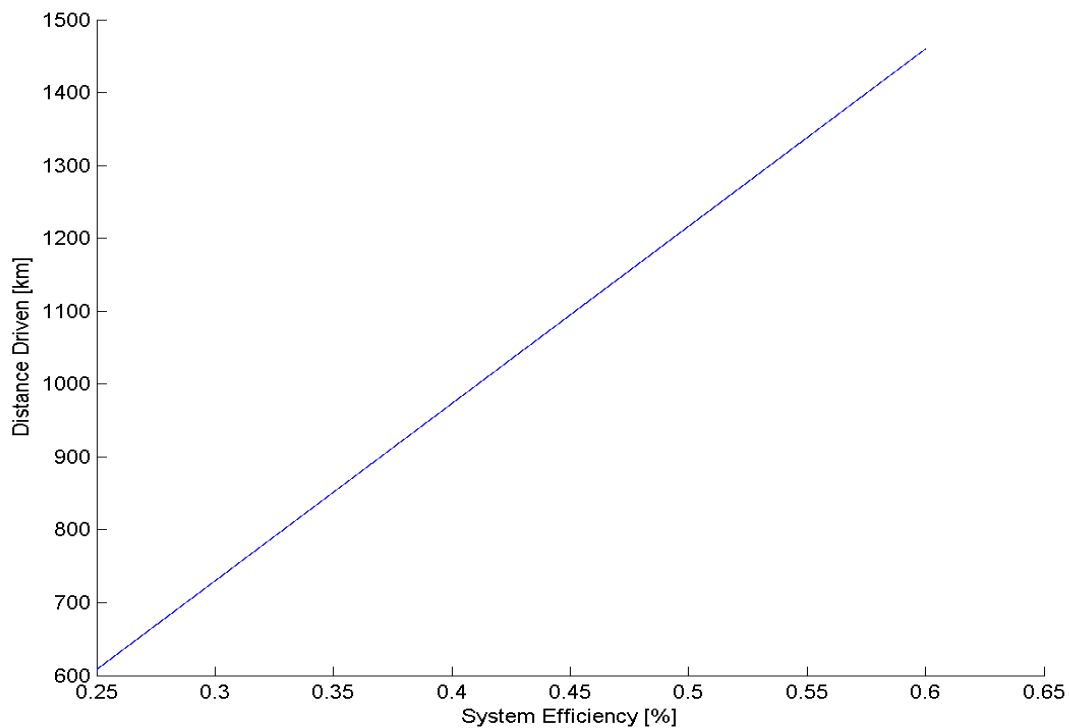
For å forenkle byttingen mellom det ulike motorene i testoppsettet, og ikke legge beslag på tiden til de andre deltakerne i gruppen unødig, ble festebrakettene utført som individuelle moduler. Det førte til at akslingen bestående av motoraksling, aksling for momentmåler og generatoraksling ikke ble helt på linje. Det var også en liten skjevhet i borryngen av klo-koblingen som forbandt disse tre akslingene. Dette ga forholdsvis kraftige vibrasjoner under testing ved noen rotasjonshastigheter. Disse vibrasjonene førte til at momentet motoren leverte ble ujevnt, noe som kom tydelig frem under måling. Variasjonen gav et utslag i målingene på $\pm 5\%$. For å kompensere ble målingene av moment midlet over måleperioden.

En bedre løsning på testoppsett ville vært en fast plate (underlag), med nøyaktig tilpassede braketter for innfesting av motor og generator. Et slikt stabilt oppsett ville trolig gi mer pålitelige måleserier og et bedre tallmateriale for analyse av motorene.

Potensialet i kjøretøyet

Lengste noterte kjørelengde for PureChoice kjøretøyet er på 729 km/l. En liter Shell Unleaded Petrol 96 inneholder 32 010 kJ/l. Det betyr at kjøretøyet forbrukte en gjennomsnittseffekt i hydrogen på 305 watt fra tanken. Med utgangspunkt i simuleringer gir det en virkningsgrad for fremdriftssystemet på 32,79%. Hvis det antas at brenselcellen har konstant virkningsgrad på 50% betyr det at motor og motordrift samler har virkningsgrad på 66,23%, medregnet 99% virkningsgrad i utveksling . Dette er ifølge testene som ble gjort på motoren litt for lavt, den bør være over 70%. Trolig var effekten ut på hjulet høyere. Med virkningsgrad på 70% eller mer for motor og motordrift, vil effekten på hjulet være 105,7 watt eller høyere.

Illustrasjon 11.1 viser teoretisk kjørelengde i kilometer som funksjon av fremdriftssystemets virkningsgrad.



Illustrasjon 11.1: Teoretisk kjørelengde som funksjon av virkningsgrad

Grafen tar utgangspunkt i effektforbruk på 100 watt på hjulet, en verdi som er reell for PureChioce kjøretøyet. For at påstanden om at det er mulig å kjøre 1000 kilometer med kjøretøyet skal holde stand må virkningsgraden for fremdriftssystemet være høyere enn 41%. Dette er et mål som kan ansees å være realiserbart.

12 Konklusjon

Gjennom tverrfaglig samarbeid har gruppen klart å utnytte styrken hos de enkelte deltakerne for å skape et produkt som har innfridd kravene som ble stilt i de initielle fasene av arbeidet. Ved å benytte teoretiske kunnskaper sammen med praktisk forståelse og moderne teknologi klarte PureChoice-teamet å notere det beste resultatet noen gang for førstegangs deltakelse i Shell Eco-marathon Europe.

Kjøretøyets parametre kombinert med banens profil har vært dimensjonerende for kraften som må til for å forflytte det rundt banen. Ved å velge riktig strategi for gjennomføring av løpet ble gjennomsnittlig effekt holdt så lav som mulig.

Til slutt var det virkningsgraden for fremdriftssystemet som avgjorde hvor langt det var mulig å kjøre på energien i en liter bensin.

13 Referanser

- [1] http://www.shell.com/home/content/eco-marathon-en/welcome_global.html (15. juni 2008)
- [2] www.modelmotors.cz (15. juni 2008)
- [3] www.jetimodel.com (15. juni 2008)
- [4] www.transmotec.com (15. juni 2008)
- [5] www.ametek.com (15. juni 2008)
- [6] <http://www.globalspec.com> (15. juni 2008)
- [7] <http://www.daim.idi.ntnu.no> (15. juni 2008)
- [8] <http://www.fairchildsemi.com/pf/LM/LM7805.html> (15. juni 2008)
- [9] <http://www.vishay.com/mosfets/list/product-71146/> (15. juni 2008)
- [10] <http://www.national.com/mpf/LM/LMC555.html> (15. juni 2008)
- [11] http://www.shell.com/home/content/eco-marathon-en/europe/2008/rules_and_regulations/rules_2008.html (15. juni 2008)
- [12] <http://www.paccar.ch> (15. juni 2008)
- [13] J.J. Santin et.al. *The World's Most Fuel Efficient Vehicle, Design and Development of Pac-Car II*, ISBN 978-3-7281-3134-8, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich/Singen.
- [14] James Larminie and John Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, ISBN 0-470-85163-5, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.

14 Vedlegg

14.1 Måleserier for motortesting

Tabell 5: AXI5360/20 ved 75 watt akseleffekt

Speed	Amp FC	Volt FC	Power FC	Etha motor	Amp Gen	Volt Gen	Power Gen	Torque	Power Axel
3004	3,500	35,600	124,600	0,606	1,400	21,200	29,680	0,240	75,497
2814	3,350	35,700	119,595	0,628	1,570	19,680	30,898	0,255	75,142
2595	3,300	35,900	118,470	0,635	1,900	17,900	34,010	0,277	75,272
2391	3,230	35,850	115,796	0,643	2,200	16,500	36,300	0,298	74,512
2210	3,200	36,000	115,200	0,651	2,500	15,400	38,500	0,324	74,981
1996	3,200	35,900	114,880	0,655	3,100	13,900	43,090	0,360	75,245
1809	3,190	35,800	114,202	0,663	3,600	12,600	45,360	0,400	75,773
1599	3,100	36,000	111,600	0,683	4,300	11,100	47,730	0,455	76,186
1414	3,033	36,000	109,188	0,683	4,950	9,800	48,510	0,504	74,627
1217	3,050	36,000	109,800	0,685	6,100	8,400	51,240	0,590	75,190
1022	3,060	36,000	110,160	0,683	7,600	6,900	52,440	0,703	75,235
800	3,140	35,900	112,726	0,662	10,100	5,300	53,530	0,891	74,642
640	3,660	35,100	128,466	0,605	14,000	4,000	56,000	1,160	77,742
512	3,520	35,500	124,960	0,575	16,000	3,500	56,000	1,340	71,844

Tabell 6: AXI5360/20 ved 100 watt akseleffekt

3042	4,180	34,780	145,380	0,701	2,100	24,200	50,820	0,320	101,935
2798	3,960	36,570	144,817	0,704	2,500	22,200	55,500	0,348	101,963
2595	3,975	36,390	144,650	0,710	2,960	20,270	59,999	0,378	102,718
2403	3,940	36,320	143,101	0,707	3,320	18,570	61,652	0,402	101,157
2190	3,890	36,350	141,402	0,709	3,760	16,850	63,356	0,437	100,217
1994	3,860	36,330	140,234	0,715	4,310	15,200	65,512	0,480	100,226
1809	3,820	36,100	137,902	0,723	5,000	13,660	68,300	0,526	99,698
1594	3,780	36,240	136,987	0,726	5,920	11,740	69,501	0,596	99,483
1412	3,830	36,020	137,957	0,729	7,020	10,180	71,464	0,680	100,545
1196	3,900	36,080	140,712	0,721	8,740	8,200	71,668	0,810	101,445
1025	3,910	36,070	141,034	0,723	10,560	6,540	69,062	0,950	101,968
820	3,990	35,880	143,161	0,696	13,380	4,510	60,344	1,160	99,606

Tabell 7: AXI5360/20 ved 150 watt akseleffekt

2993	5,700	35,100	200,070	0,752	4,250	19,500	82,875	0,480	150,440
2797	5,670	35,000	198,450	0,753	4,670	18,120	84,620	0,510	149,375
2606	5,660	35,100	198,666	0,751	5,130	16,850	86,441	0,547	149,272
2422	5,600	35,000	196,000	0,765	5,700	15,600	88,920	0,591	149,892
2197	5,600	35,000	196,000	0,764	6,500	14,200	92,300	0,651	149,771
2031	5,660	35,000	198,100	0,753	7,200	13,200	95,040	0,701	149,088
1820	5,690	35,000	199,150	0,756	8,300	11,800	97,940	0,790	150,562
1610	5,810	34,820	202,304	0,751	9,750	10,300	100,425	0,901	151,903
1395	5,850	34,730	203,171	0,743	11,620	8,630	100,281	1,033	150,900
1203	6,000	34,600	207,600	0,734	13,900	7,200	100,080	1,210	152,429
1012	7,300	33,800	246,740	0,747			0,000	1,740	184,393

Tabell 8: AXI5360/20 ved 200 watt akseleffekt

2985	7,400	33,000	244,200	0,819	6,170	21,120	130,310	0,640	200,051
2803	7,500	33,100	248,250	0,809	6,810	19,700	134,157	0,684	200,768
2600	7,540	33,000	248,820	0,804	7,560	18,100	136,836	0,735	200,114
2391	7,570	33,000	249,810	0,795	8,340	16,600	138,444	0,793	198,549
2214	7,640	33,000	252,120	0,800	9,300	15,200	141,360	0,870	201,703
2001	7,720	32,800	253,216	0,794	10,480	13,600	142,528	0,960	201,157
1805	7,750	32,850	254,588	0,794	11,970	11,970	143,281	1,070	202,245
1634	7,890	32,757	258,453	0,781	13,400	10,600	142,040	1,180	201,906
1420	8,030	32,730	262,822	0,767	15,500	8,900	137,950	1,356	201,634
1234	8,500	32,400	275,400	0,727	18,500	7,200	133,200	1,550	200,292
991	7,230	32,500	234,975	0,769	20,800	4,600	95,680	1,742	180,775
850	7,780	32,500	252,850	0,669			0,000	1,900	169,117

Tabell 9: AXI5360/20 ved 250 watt akseleffekt

3015	7,80	33,8	263,640	0,754	5,680	18,600	105,648	0,630	198,904
2828	7,90	33,8	267,020	0,743	6,370	17,200	109,564	0,670	198,413
2610	7,60	33,8	256,880	0,777	7,140	15,600	111,384	0,730	199,517
2405	7,50	33,8	253,500	0,787	7,950	14,300	113,685	0,792	199,460
2215	7,48	33,8	252,824	0,789	8,900	13,200	117,480	0,860	199,475
2006	7,30	33,8	246,740	0,800	9,900	11,900	117,810	0,940	197,458
1824	7,63	33,8	257,894	0,780	11,500	10,500	120,750	1,053	201,126
1610	7,80	33,78	263,484	0,761	13,300	9,000	119,700	1,190	200,627
1415	7,80	33,78	263,484	0,759	15,400	7,700	118,580	1,350	200,035
1208	8,25	33,8	278,850	0,708	18,300	6,200	113,460	1,560	197,336
978	7,40	33,8	250,120	0,725	20,700	4,800	99,360	1,770	181,271

Tabell 10: AXI5360/20 Test for høy akseleffekt

1897	16,690	27,730	462,814	0,795	20,910	12,960	270,994	1,853	368
2837	16,510	29,500	487,045	0,871	15,950	20,900	333,355	1,428	424
1841	16,300	29,500	480,850	0,818	23,890	11,500	274,735	2,040	393
2920	15,900	29,500	469,050	0,867	14,900	21,300	317,370	1,330	407
2302	15,800	29,600	467,680	0,843	18,900	15,700	296,730	1,635	394
2063	15,700	29,600	464,720	0,830	20,900	13,300	277,970	1,785	386

Tabell 11: AXI5360/20 Test for 24 volt klemmespenning

2577	5,750	23,860	137,195	0,736	3,020	20,100	60,702	0,374	100,926
2405	5,620	23,870	134,149	0,751	3,395	18,630	63,249	0,400	100,737
2210	5,540	23,880	132,295	0,756	3,810	16,900	64,389	0,432	99,975
1998	5,350	23,900	127,865	0,777	4,250	15,200	64,600	0,475	99,381
1795	5,470	23,880	130,624	0,770	5,174	13,370	69,176	0,535	100,562
1607	5,420	23,890	129,484	0,771	5,950	11,740	69,853	0,593	99,790
1414	5,450	23,890	130,201	0,765	7,000	10,050	70,350	0,673	99,651
1210	5,560	23,890	132,828	0,754	8,570	8,280	70,960	0,790	100,099
1008	5,610	23,890	134,023	0,755	10,710	6,390	68,437	0,958	101,121
824	5,780	23,890	138,084	0,726	13,360	4,560	60,922	1,162	100,265

Tabell 12: AXI5360/20 Test for 18 volt klemmespenning

1801	7,100	17,700	125,670	0,795	4,950	13,610	67,370	0,530	99,955
1610	7,040	17,710	124,678	0,799	5,740	12,100	69,454	0,591	99,639
1415	7,110	17,710	125,918	0,799	6,879	10,290	70,785	0,679	100,610
1198	7,2	17,71	127,512	0,787	8,48	8,25	69,960	0,8	100,360
1005	7,35	17,7	130,095	0,777	10,55	6,46	68,153	0,96	101,031

Tabell 13: AXI5360/20 Test for 14,5 volt klemmespenning

1512	8,5	14,5	123,250	0,812	6,28	11,1	69,708	0,63	100,066
1419	8,51	14,5	123,395	0,816	6,91	10,24	70,758	0,68	100,746
1198	8,4	14,5	121,800	0,813	8,38	8,18	68,548	0,79	98,980
999	8,42	14,5	122,090	0,823	10,56	6,4	67,584	0,96	100,427
916	9,12	14,4	131,328	0,772	11,87	5,56	65,997	1,06	101,388

Tabell 14: Transmotec B8671-36 ved 75 watt akseffekt

Speed	Freq	Torque	Amp FC	Volt FC	Power FC	Etha Motor	Amp Gen	Volt Gen	Power Gen	Power Axel	Etha Gen
3570	238	0,200	3,660	36,000	131,760	0,567	1,050	29,000	30,450	74,768	0,407
3405	227	0,212	3,610	36,000	129,960	0,582	1,240	27,590	34,212	75,591	0,453
3315	221	0,218	3,700	36,000	133,200	0,568	1,510	26,400	39,864	75,676	0,527
3195	213	0,225	3,620	36,000	130,320	0,578	1,540	25,800	39,732	75,278	0,528
3105	207	0,230	3,500	36,000	126,000	0,594	1,550	25,020	38,781	74,783	0,519
3000	200	0,241	3,400	36,000	122,400	0,619	1,600	24,000	38,400	75,710	0,507
2895	193	0,250	3,260	36,000	117,360	0,646	1,640	23,100	37,884	75,789	0,500
2790	186	0,256	3,170	36,000	114,120	0,655	1,690	22,350	37,772	74,793	0,505
2700	180	0,264	3,110	36,000	111,960	0,667	1,760	21,330	37,541	74,642	0,503
2595	173	0,274	3,100	36,000	111,600	0,667	1,830	20,500	37,515	74,457	0,504
2505	167	0,284	3,070	36,000	110,520	0,674	1,990	19,800	39,402	74,498	0,529
2400	160	0,300	3,080	36,000	110,880	0,680	2,240	18,700	41,888	75,396	0,556
2295	153	0,313	3,050	36,000	109,800	0,685	2,380	18,000	42,840	75,222	0,570
2190	146	0,327	3,010	36,000	108,360	0,692	2,550	17,000	43,350	74,991	0,578
2100	140	0,343	3,000	36,000	108,000	0,698	2,780	16,230	45,119	75,427	0,598
1995	133	0,363	3,020	36,000	108,720	0,698	3,000	15,000	45,000	75,834	0,593
1905	127	0,381	3,000	36,000	108,000	0,704	3,220	14,700	47,334	76,004	0,623
1800	120	0,398	2,970	36,000	106,920	0,702	3,500	13,680	47,880	75,019	0,638
1710	114	0,420	3,000	36,000	108,000	0,696	3,800	13,000	49,400	75,208	0,657
1605	107	0,446	3,030	36,000	109,080	0,687	4,220	12,000	50,640	74,959	0,676
1500	100	0,480	3,000	36,000	108,000	0,698	4,460	11,200	49,952	75,396	0,663
1395	93	0,512	3,050	36,000	109,800	0,681	5,100	10,200	52,020	74,793	0,696
1305	87	0,550	3,020	36,000	108,720	0,691	5,470	9,350	51,145	75,160	0,680
1215	81	0,590	3,120	36,000	112,320	0,668	6,040	8,600	51,944	75,066	0,692
1095	73	0,660	3,250	36,000	117,000	0,647	7,000	7,450	52,150	75,679	0,689
990	66	0,723	3,360	36,000	120,960	0,620	7,900	6,500	51,350	74,953	0,685
900	60	0,792	3,510	36,000	126,360	0,591	8,800	5,780	50,864	74,642	0,681

Tabell 15: Transmotec B8671-36 ved 100 watt akseleffekt

3000	200	0,320	4,330	36,000	155,880	0,645	0,000	100,528
2895	193	0,334	4,200	36,000	151,200	0,670	0,000	101,254
2790	186	0,350	4,030	36,000	145,080	0,705	0,000	102,256
2700	180	0,355	3,960	36,000	142,560	0,704	0,000	100,371
2610	174	0,364	3,920	36,000	141,120	0,705	0,000	99,485
2505	167	0,383	3,950	36,000	142,200	0,707	0,000	100,467
2400	160	0,400	3,910	36,000	140,760	0,714	0,000	100,528
2295	153	0,420	3,860	36,000	138,960	0,726	0,000	100,936
2205	147	0,440	3,830	36,000	137,880	0,737	0,000	101,596
2100	140	0,459	3,810	36,000	137,160	0,736	0,000	100,936
1995	133	0,480	3,880	36,000	139,680	0,718	0,000	100,277
1905	127	0,505	3,820	36,000	137,520	0,733	0,000	100,740
1800	120	0,530	3,890	36,000	140,040	0,713	0,000	99,900
1695	113	0,570	3,970	36,000	142,920	0,708	0,000	101,172
1605	107	0,595	3,930	36,000	141,480	0,707	0,000	100,002
1500	100	0,640	4,010	36,000	144,360	0,696	0,000	100,528
1395	93	0,690	4,100	36,000	147,600	0,683	0,000	100,795

Tabell 16: Transmotec B8671-36 ved 150 watt akseleffekt

3000	200	0,480	5,420	36,000	195,120	0,773	0,000	150,792
2895	193	0,497	5,380	36,000	193,680	0,778	0,000	150,668
2790	186	0,517	5,590	36,000	201,240	0,751	0,000	151,046
2700	180	0,531	5,690	36,000	204,840	0,733	0,000	150,132
2595	173	0,555	5,710	36,000	205,560	0,734	0,000	150,816
2505	167	0,577	5,630	36,000	202,680	0,747	0,000	151,356
2400	160	0,595	5,630	36,000	202,680	0,738	0,000	149,535
2295	153	0,623	5,630	36,000	202,680	0,739	0,000	149,722
2205	147	0,648	5,600	36,000	201,600	0,742	0,000	149,623
2100	140	0,682	5,630	36,000	202,680	0,740	0,000	149,975
1995	133	0,720	5,760	36,000	207,360	0,725	0,000	150,415
1905	127	0,751	5,810	36,000	209,160	0,716	0,000	149,813
1800	120	0,793	5,880	36,000	211,680	0,706	0,000	149,473
1695	113	0,844	6,020	36,000	216,720	0,691	0,000	149,806
1605	107	0,898	6,140	36,000	221,040	0,683	0,000	150,927

Tabell 17: Transmotec B8671-36 ved 200 watt akseleffekt

3000	200	0,639	7,360	36,000	264,960	0,7576	0,000	200,742
2805	187	0,682	7,400	36,000	266,400	0,7520	0,000	200,324
2610	174	0,735	7,400	36,000	266,400	0,7541	0,000	200,883
2400	160	0,798	7,520	36,000	270,720	0,7408	0,000	200,553
2205	147	0,870	7,690	36,000	276,840	0,7256	0,000	200,883
2010	134	0,952	7,840	36,000	282,240	0,7100	0,000	200,377
1800	120	1,070	8,530	36,000	307,080	0,6568	0,000	201,684
1605	107	1,200	9,900	36,000	356,400	0,566	0,000	201,684

Tabell 18: Transmotec B8671-36 ved 250 watt akseleffekt

3000	200	0,800	9,290	36,000	334,440	0,751	0,000	251,320
2805	187	0,855	9,380	36,000	337,680	0,744	0,000	251,139
2610	174	0,913	9,270	36,000	333,720	0,748	0,000	249,532
2400	160	1,000	9,950	36,000	358,200	0,702	0,000	251,320

Tabell 19: DTC Lenze 200 watt DC-motor ved 100 watt akseleffekt

3540	4,320	35,890	155,045	0,669	1,610	19,320	31,105	0,280	103,795	0,300
3270	4,180	35,900	150,062	0,666	1,860	17,700	32,922	0,292	99,988	0,329
2960	4,070	35,910	146,154	0,679	2,160	16,100	34,776	0,320	99,188	0,351
2698	4,500	35,890	161,505	0,651	2,930	14,420	42,251	0,372	105,100	0,402
2490	4,330	35,910	155,490	0,662	3,200	13,440	43,008	0,395	102,994	0,418
2247	4,200	35,920	150,864	0,650	3,520	12,230	43,050	0,417	98,119	0,439
1900	4,410	35,810	157,922	0,643	4,680	10,770	50,404	0,510	101,470	0,497
1732	4,480	35,850	160,608	0,621	5,300	9,810	51,993	0,550	99,753	0,521
1519	4,730	35,790	169,287	0,601	6,310	8,730	55,086	0,640	101,801	0,541
1289	4,970	35,780	177,827	0,569	7,790	7,280	56,711	0,750	101,235	0,560

Tabell 20: DTC Lenze 200 watt DC-motor ved 250 watt akseleffekt

3540	4,320	35,890	155,045	0,669	1,610	19,320	31,105	0,280	103,795	0,300
3270	4,180	35,900	150,062	0,666	1,860	17,700	32,922	0,292	99,988	0,329
2960	4,070	35,910	146,154	0,679	2,160	16,100	34,776	0,320	99,188	0,351
2698	4,500	35,890	161,505	0,651	2,930	14,420	42,251	0,372	105,100	0,402
2490	4,330	35,910	155,490	0,662	3,200	13,440	43,008	0,395	102,994	0,418
2247	4,200	35,920	150,864	0,650	3,520	12,230	43,050	0,417	98,119	0,439
1900	4,410	35,810	157,922	0,643	4,680	10,770	50,404	0,510	101,470	0,497
1732	4,480	35,850	160,608	0,621	5,300	9,810	51,993	0,550	99,753	0,521
1519	4,730	35,790	169,287	0,601	6,310	8,730	55,086	0,640	101,801	0,541
1289	4,970	35,780	177,827	0,569	7,790	7,280	56,711	0,750	101,235	0,560

14.2 Matlab-kode

```
% Paul Armagnac in Matlab. Script for plotting track topography
clear all
n=0;
elevation = zeros(1,17);
Z= zeros(2,17);
dista = [0.0 105.1 210.2 315.3 420.4 525.5 630.6 735.7 830.3 861.8 914.3
          966.8 1019.3 1124.4 1229.5 1439.7 1620]; %Vector for distance
alt = [94.84 95.31 96.37 97.88 98.76 98.46 95.80 93.90 94.63 95.46 97.42
        97.81 96.69 95.64 95.12 94.14 94.84]; %Vector for altitude
pkt = length(dista);

xx = 1:1:1620;
yi = interp1(dista,alt,xx,'cubic');
plot(yi)
hold on

pkt2 = length(yi);
for n=2:pkt
    diffdista(n) = dista(n)-dista(n-1);
    diffalt(n)=alt(n)-alt(n-1);
    elevation(n) = (diffalt(n))/(diffdista(n));
end
grad = max(elevation)
elevation

plot(dista,alt)
```

```
A=max(alt);
B=max(yi);
```

```
%Script for areaploting of AXI5360/20 efficiency
```

```
clear all
clear plot
```

```
etha = zeros(11,5);
etha = [
0.61, 0.7, 0.75, 0.82, 0.75
0.63, 0.7, 0.75, 0.81, 0.74
0.64, 0.71, 0.75, 0.8, 0.78
0.64, 0.71, 0.76, 0.79, 0.79
0.65, 0.71, 0.76, 0.8, 0.79
0.65, 0.71, 0.75, 0.79, 0.8
0.66, 0.72, 0.76, 0.79, 0.78
0.68, 0.73, 0.75, 0.78, 0.76
0.68, 0.73, 0.74, 0.77, 0.76
0.68, 0.72, 0.73, 0.73, 0.71
0.68, 0.72, 0.75, 0.77, 0.72];
```

```
XI=[75, 100, 150, 200, 250];
YI=[3000, 2800, 2600, 2400, 2200, 2000, 1800, 1600, 1400, 1200, 1000];
[X,Y]= meshgrid(XI,YI);
```

```
DI = linspace(75,250,33);
EI = linspace(1000,3000,81);
[D,E]=meshgrid(DI,EI);
```

```
Z2 = interp2(etha,3,'spline');
size(Z2);
ZI = interp2(D,E,Z2,D,E,'spline');
```

```
surf(D,E,ZI)
```

```
%Script for areaploting of Transmotec B8671-36 efficiency
```

```
clear all
clear plot
```

```
etha = zeros(22,5);
etha = 100*[0.6185, 0.6449, 0.7728, 0.7576, 0.7437,
0.6458, 0.6697, 0.7779, 0.7548, 0.7457,
0.6554, 0.7048, 0.7506, 0.7520, 0.7477,
0.6667, 0.7041, 0.7329, 0.7530, 0.7477,
0.6672, 0.7050, 0.7337, 0.7541, 0.7477,
0.6741, 0.7065, 0.7468, 0.7474, 0.7247,
0.6800, 0.7142, 0.7378, 0.7408, 0.7016,
0.6851, 0.7264, 0.7387, 0.7332, 0.7000,
0.6921, 0.7368, 0.7422, 0.7256, 0.6900,
0.6984, 0.7359, 0.7400, 0.7178, 0.6800,
0.6975, 0.7179, 0.7254, 0.7100, 0.6700,
0.7037, 0.7325, 0.7163, 0.6834, 0.6600,
```

```

0.7016, 0.7134, 0.7061, 0.6568, 0.6500,
0.6964, 0.7079, 0.6912, 0.6113, 0.6400,
0.6872, 0.7068, 0.6828, 0.5659, 0.6300,
];

XI=[75, 100, 150, 200, 250];
YI=[3000, 2900, 2800, 2700, 2600, 2500, 2400, 2300, 2200,2100, 2000, 1900,
1800, 1700, 1600,1500];%, 1400,1300, 1200,1100, 1000,900];
[X,Y]= meshgrid(XI,YI);

Z2 = interp2(etha,3,'spline');
[A,B]=size(Z2);

DI = linspace(75,250,B);
EI = linspace(1500,3000,A);
[D,E]=meshgrid(DI,EI);

ZI = interp2(D,E,Z2,D,E,'spline');

surf(D,E,ZI)

-----
-----

%Script for Calculating optimum driving speed on flat surface
%Calculating Energy, power, time
%Function for calculating minimum energy usage for various speeds
%
clear all

%=====
%Time
Tmax = 3205; %Maximum allowed time for race (max:
3265sek)
Tpit = 10; %Minimum time in pit
Ta = 0; %Acceleration time
Tbr = 0; %Breaking time
dt = 0.01;

%Rules
ant_pit = 3;
ant_aks = 4;
ant_deaks = 4;

%Track
Stotal = 22680; %Total distance of race
Strack = 1620; %Track lenght

%Vehicle
myrr = 0.005; %Rolling coefficient
mass = 120; %Vehicle mass inc. driver
g = 9.81; %Gravity
area = 0.884; %Front area
Cd = 0.18; %Drag coefficient
r = 8*0.0254+0.9; %Wheel radii
Gratio = 10; %Gear retio
ETHAsys = 0.35; %System efficiency
ETHAregen = 1; %Regen system efficiency

```



```

%Other
Pfc = 45; %Fuel cell-power on "no-load"
Erec = 854000; %Energy for driving 810km on 32MJ H2

Etot = zeros(100,50,12);
Q = inf;
Qq = 0;
los_OK=0;
los_OK2=0;
los_OK3=0;
VAAC=0;
%=====
%=====CALCULATIONS=====
%=====

%Building speed vector
Vcz = zeros(1,44); %Cruzing speeds from 0-12m/s
for m=1:45
    Vcz(m)=m;
    Vcz(m)=Vcz(m)/3.6;
end

for b=0.01:0.01:1
    for c=0.01:0.01:1

a = b;
da = c;

        for n=1:45 %Following the speed-vector

            %Calculating acceleration
            %a = Vcz(n)/Ta; %Acceleration
            %da = (-Vcz(n))/Tbr; %Breaking

            Ta = Vcz(n)/a;
            Tbr = Vcz(n)/da;

            Ttap = (ant_pit*Tpit) + (ant_aks*Ta) + (ant_deaks*Tbr); %Pit-time,
acceleration- and breaking-time
            Tcz = Tmax - Ttap; %Cruzing time

            a_min(n) = (Vcz(n)^2)/(2*3*Strack); %Minimum acceleration for reaching
pit in time

            %Calculating force needed
            e_acc = 0;
            v_acc = 0;
            e_dacc = 0;
            e_motion = 0;
            e_reg = 0;
            E_regen = 0;

            %Regenerative Energy
            v_dacc = Vcz(n);

            for t=(0:dt:Tbr)
                v_dacc = v_dacc - da*dt;

                e_motion = 0.5 * mass * (Vcz(n))^2;

```

```

        Frr = myrr * mass * g; %Rolling force
        Fda = area * Cd * 0.5 * 1.25 * (v_dacc^2); %Drag force
        f_dacc = Frr + Fda; % Deacceleration force
        p_dacc = f_dacc * v_dacc; % Deacceleration power
        e_dacc = e_dacc + (p_dacc*dt); %total deacceleration energy consumed
by vehicle

        %hold on
        %plot(t,p_acc,'p')
    end
E_regen = e_motion - e_dacc; %Total energy from regen breaking from Vcz to 0m/s;
E_regen_tot = ant_deaks * E_regen * ETHAregen;

%while v_acc<Vcz(n)
for k=(0:dt:Ta)

    v_acc = v_acc + a*dt;

    Frr = myrr * mass * g; %Rolling force
    Fad = 0.5 * 1.25 * area * Cd *Vcz(n).^2; %Drag force
    Fhc = 0; %Assuming flat
    %Fla = 1.05 * mass * a; %Acceleration force. Adding margin of 5%
    Fcz = Frr + Fad; %Cruzing force

    Fd = area * Cd * 0.5 * 1.25 * (v_acc.^2);
    f_acc = (1.05*mass*a) + Frr + Fd; % acceleration force
    p_acc = f_acc * v_acc; % acceleration power
    e_acc = e_acc + (p_acc*dt); % total acceleration energy
    %hold on
    %plot(t,p_acc,'p')
end
%end

%Calculating distance traveled
Sa = (0.5*a*(Ta^2)); %Acceleration distance
Sda = (Vcz(n)*Tbr) - (0.5*da*(Tbr^2)); %Breaking distance
Scz_x = Stotal - (4*(Sa+Sda)); %Cruise-speed distances
Scz = Vcz(n)*Tcz; %Cruise-speed distances

%Calculating time
%T(n) = Tmax - Ttap - (Scz(n)/Vcz(n)); %Vector for "do-able time"
Ttot = Ttap + (Scz/Vcz(n)); %Travell time for one race

S = Scz + (ant_aks*(Sa+Sda)); %Travelled distance for one
race
S = floor(S);
%Torque
Tq_max = ((f_acc)*r)/Gratio; %Maximum torque
Tq_cz = (Fcz*r)/Gratio; %Cruzing torque

%Power
Pcz = Fcz * Vcz(n); %Cruzing Power

%Energy
Ecz = Tcz * Pcz; %Total cruizing energy
%Ea = 2*Ta * Pa; %Acceleration energy
Ebr = 4*Tbr * Pfc; %FC-energy during breaking
Epit = ant_pit*Tpit*Pfc; %FC-energy in pit
Esum = Ecz + e_acc + Ebr + Epit - E_regen; %Total energy consumption on
wheel

```

```

Esum2 = Ecz + e_acc + Ebr + Epit;
Evekt = Esum / Esum2;

Psnitt = Esum / Ttot; %Avg. power consumption

%daks(n) = Fcz(n)/mass; %Deacceleration caused by drag and rolling
force
%saks(n) = (Vcz(n)^2)/(2*daks(n)); %Stopping distance for free rolling
%taks(n) = Vcz(n)/daks(n); %Stopping time for free rolling

    if S==Stotal
        los_OK=los_OK+1;

        if Ttot<=Tmax
            I=n;
            Qq = Esum2;
            los_OK2=los_OK2+1;

            if Q > Qq
                Q = Qq;

VAAC = v_acc;
Ta_opt = Ta; %Optimum acceleration time
Tbr_opt = Tbr; %Optimum breaking time
Vcz_opt = Vcz(n); %Optimum cruise-speed
a_opt = a; %Optimum acceleration
da_opt = da; %Optimum retardation (breaking)
Psnitt_opt = Psnitt; %Optimum average power on wheel
T_opt=Ttot; %Time
Tcz_opt = Tcz; %Cruise time
Pcz_opt = Pcz; %Optimum cruise power
Pa_opt = p_acc; %Optimum acceleration power
Sdrv = S; %Driven distance
Sa_opt = Sa; %Optimum acceleration distance
Sda_opt = Sda; %Optimum breaking distance
Scz_opt = Scz; %Optimum cruise distance
Ecz_opt = Ecz; %Optimum cruising energy
Ea_opt = e_acc; %Optimum Acceleration energy
Ebr_opt = Ebr; %FC-energy during breaking
Epit_opt = Epit; %Energy spent in pit
E_regen_pos = E_regen_tot; %Energy from regenerative breaking
Econ_opt = Esum; %Energy with regenerative breaking
Evekt_opt = Evekt; %Procentage of gained energy from regenerative breaking
Tq_max_opt = Tq_max; %Maximum torque
Tq_cz_opt = Tq_cz; %Cruising torque

        los_OK3 = los_OK3+1;
    end

end

end

end

Ta = 0;
Tbr = 0;
end
end

VAAC

```

```

T_opt1 = (T_opt/60);
T_opt2 = floor(T_opt1);
T_opt3 = (T_opt1-T_opt2)*60;

Ehy = Q/ETHAsys;           %Energy spent from H2-tank
Egoal = (Ehy/Erec)*100;    %Related to goal

disp([' '])
disp(['Antall gyldige løsninger ' num2str(los_OK3)])
disp([' '])

%Power
disp(['Snitt effektforbruk: ' num2str(Psnitt_opt) ' Watt'])
disp(['Cruzing Power: ' num2str(Pcz_opt) ' Watt'])
disp(['Acceleration power: ' num2str(Pa_opt) ' Watt'])
disp([' '])

%Energy
disp(['Energiforbruk vektet mot rekord : ' num2str(Egoal) ' %'])
disp(['Energi på hjul: ' num2str(Q) ' Joule'])
disp(['Energi fra tank: ' num2str(Ehy) ' Joule'])
disp(['Optimum cruising energy: ' num2str(Ecz_opt) ' Joule'])
disp(['Acceleration energy: ' num2str(Ea_opt) ' Joule'])
disp(['FC-energy during breaking: ' num2str(Ebr_opt) ' Joule'])
disp(['Energy spent in pit: ' num2str(Epit_opt) ' Joule'])
disp(['Energy from regenerative breaking: ' num2str(E_regen_pos) ' Joule'])
disp(['Energy with regenerative breaking: ' num2str(Econ_opt) ' Joule'])
disp(['Prosentage of gained energy from regenerative breaking: '
num2str(Evekt_opt) ' %'])
disp([' '])

%Speed
disp(['Cruise hastighet: ' num2str(Vcz_opt) ' m/s'])
disp([' '])

%Time
disp(['Akselerasjonstid: ' num2str(Ta_opt) ' sek'])
disp(['Bremsetid: ' num2str(Tbr_opt) ' sek'])
disp(['Cruise time: ' num2str(Tcz_opt) ' sek'])
disp(['Race tid: ' num2str(T_opt2) ' min, og ' num2str(T_opt3) ' sek'])
disp(['Totaltid: ' num2str(T_opt) ' sek'])
disp([' '])

%Acceleration
disp(['Akselerasjon: ' num2str(a_opt) ' m/s^2'])
disp(['Bremseakselerasjon: ' num2str(da_opt) ' m/s^2'])
disp([' '])

%Torque
disp(['Maximum torque: ' num2str(Tq_max_opt) ' Nm'])
disp(['Cruzing torque: ' num2str(Tq_cz_opt) ' Nm'])
disp([' '])

%Distance
disp(['Distance driven: ' num2str(Sdrv) ' meter'])
disp(['Acceleration distance: ' num2str(Sa_opt) ' meter'])
disp(['Breaking distance: ' num2str(Sda_opt) ' meter'])
disp(['Cruising distance: ' num2str(Scz_opt) ' meter'])

```

```

-----

%Script for calculating "Walve Open Throttle" for PureChoice with Transmotec
motor
clear all

%Parameters

%Vehicle
mass = 120; %Vehicle mass inc. driver
myrr = 0.005; %Rolling coefficient
grav = 9.81; %Gravity
area = 0.884; %Front area
Cd = 0.2; %Drag coefficient
radi = (8*0.0254)+0.1; %Wheel radii
Gratio = 10; %Gear retio
ethaGear = 0.97; %Gear Efficiency
omegaCrit = 253.5; %End of const. torque
T = 0;
Tmax = 2.1; %Maximum torque (Starting torque)
deltaT = 0.1; %Increment size

velocity = zeros(1,1500); %1500 reading of velocity
t = linspace(0,15,1501); %0 to 15 seconds, in 0.01 second steps

aold=0;

Vcrit = (omegaCrit*radi)/Gratio;
RS1 = myrr*mass*grav;
RS3 = mass * 1.05;

for n=1:1500
    RS2 = 0.625*area*Cd*((velocity(n)).^2);
    if velocity(n)<Vcrit
        T = Tmax;
        LS = (Gratio/radi)*T*ethaGear;
        velocity(n+1) = velocity(n) + (deltaT*((LS-RS1-RS2)/RS3));
    else
        T = (radi*Tmax*omegaCrit)/(Gratio*velocity(n));
        LS = (Gratio/radi)*T*ethaGear;
        velocity(n+1) = velocity(n) + (deltaT*((LS - RS1 - RS2)/RS3));
    end
    if n>100
        amax = (velocity(n)-velocity(n-100))/1;
        if amax>aold
            aold=amax;
        end
    end
end

end
velocity = 3.6*velocity;
plot(t,velocity);
xlabel('Time / seconds');
ylabel('velocity / m.s ^-^1');
title('Full power acceleration of PureChoice FuelCell-Vehicle');
axis([0 15 0 60]);
aold

```

```

-----

%Script for plotting force and power during start and acceleration
%Linear konstant acceleration
clear all
clear plot

mass = 120;
myrr = 0.005;
g = 9.81;
rho = 1.25;
area = 0.884;
Cd = 0.18;
v_acc = 0;
Vx = 8;
acc = 0.7;
dt = 0.01;
p_acc = 0;
e_acc = 0;
T = Vx/acc;

Frr = myrr*mass*g;
Fla = 1.05*mass*acc;

for t=(0:dt:T)
    v_acc = v_acc + acc*dt;
    Fad = 0.5*rho*area*Cd*(v_acc.^2);
    f_acc = Frr + Fla + Fad + 5.3;
    p_acc = f_acc * v_acc;
    e_acc = e_acc + (p_acc*dt);
    hold on
    plot(v_acc,p_acc,'p')
end
p_acc
disp(['Energy used: ' num2str(e_acc) ' Joule'])

```

14.3 Komponenter i "PPM-krets"

Tabell 21: Komponenter i "PPM_krets"

Navn i krets	Verdi	Type
C ₁	0,015μF	Polypropylen-kondensator
Potensiometer	20Ω - 100kΩ	Lineær potmeter
Trimpot1	100 kΩ	
Trimpot2	2 MΩ	
D ₁	Ingen	Diode - IN4148
Dekoblings-kondensator	0,01μF	Keramisk kondensator
555-timer	ingen	LMC555 – National Semiconductors
LM7805		Spenningsregulator - Fairchild
C ₁	0,33μF	Keramisk kondensator
C ₀	0,1μF	Keramisk kondensator

14.4 Kontakinformasjon

Model Motors s.r.o.

Sladkovského 594
530 02 Pardubice
Czech Republic

fax: +420 495 544 019

e-mail: info@modelmotors.cz

web: www.modelmotors.cz

JETI Model s.r.o

Lomena 1530
742 58 PRIBOR
Czech Republic

tel: +420 556 810 708

e-mail: jeti@jetimodel.cz

web: www.jetimodel.com

Transmotec Sweden AB

Polygonvagen 49

SE-187 66 TABY

SWEDEN

tel: +46 (0)76 837 06 75

e-mail: sandra@transmotec.com

web: www.transmotec.com

AMETEK Corporate Office

37 N. Valley Road, Building 4

P.O. Box 1764

Paoli, PA 19301

U.S.A.

Tel: 610-647-2121

Fax: 215-323-9337

e-mail: webmaster@ametek.com

web: www.ametek.com