

TSFS17 Labb3 - Batterier

Lars Eriksson

December 2023

1 Introduktion

I denna labb har ni fått data som har mätts upp i industriella labb, och som ni har uppdraget att analysera. I Uppgift 1 skall cykling och åldring studeras, detta ligger i biblioteket `CellCykling`. I Uppgift 2 studeras batteridynamik, genom pulstestning, modell parametrar skall anpassas till uppmätt pulser vid olika laddningsgrad, detta ligger i biblioteket `PulseTest`. I Uppgift 3 är uppdraget att beräkna vilken laddningsgrad (SOC) ett batteri har efter en körning för att planera vilken laddning som kommer att behövas inför nästa köruppdrag.

När man analyserar flera uppsättningar med liknande data med ett program så är man mest effektiv om man kan återanvända så mycket kod och funktionalitet som möjligt. Vid batterianalys vill man integrera strömmar och effekter för att få laddning och energi. Då är det bra att skapa en funktion som beräknar integraler som man kan återanvända (i labben kommer ni att använda samma integrationsfunktion 6*3 gånger). Då är det lätt att se att man tjänar på att ha gjort en generell funktion som man kan återanvända.

När man utvärderat en datamängd och vill analysera en ny datamängd på samma sätt så är det också bekvämt att skapa beräkningarna för en datamängd och sedan bara byta ut datamängden men återanvända programmet. I labben kommer ni att utveckla analysberäkningarna på en cykel (i en funktion `myScript.m`) och sedan kan ni återanvända koden genom att bara byta ut indata och köra samma analys program igen. Det tar tid att komma igenom första analysen men sen går det fort.

2 U1: Analys av kapacitet och åldring genom cellcykling

Sammanhang: Inför att ett batteri skall användas i en produkt (t.ex. batteriprodukt, fordon, energilager, eller liknande) vill man lära sig mer om batteriets egenskaper. Bland annat vill man veta kopplingen mellan spänning och laddningsgrad. Man är även intresserad av att se hur celler reagerar och åldras då de cyklas, till exempel för att kunna prediktera när cellerna eller batteripacket skall bytas. Generella frågor som man är intresserade av är: Hur mycket laddning har man fått ut och hur mycket har man stoppat in? Hur ändras detta över tid?

Celltestning tar mycket tid och en mätkampanj kan hålla på över lång tid, just denna kampanj har sträckt sig över 1.5 år. Hela testet innehåller 2060 cykler och vi har valt ut 3 cykler (2, 463, och 2049) för att datamängden skall vara hanterbar för er. Under tiden ett test pågår kan man komma på nya saker som man vill testa och då ändrar man protokollet för testet, vilket måste hanteras vid analysen. Under detta test kördes först 462 cykler som inte cyklades till botten, sedan ändrades protokollet och cykel 463 var den första då man körde cellerna ner till botten ca 3.0V, därefter cyklar man 25-30 cykler grunt, på samma sätt som de första, och sedan kör man en djup cykel och detta mönstret repeteras. Cykel 2049 är den sista cykeln i datat som är en djup-cykel. Men en tid innan den cykeln har man återigen ändrat protokollet så att man lägger in pulser för att kunna studera dynamik med inre resistanser och kapacitanser, man har även ändrat laddningsprotokollet, så att laddningsströmmen inte håller samma C-rate under hela CC-delen av laddningen. I modulen satt det 7 celler i serie och alla cellerna får samma ström, därutöver mäts spänningen över varje enskild cell och

lagras i enskilda kolumner i U . Cellerna hade en nominell kapacitet på 24 Ah, då de var nya.

Börja genom att öppna filen `Uppgift1.m` och gå igenom koden, i det skriptet läses data in och det styr vilket data som skall analyseras. Samma analys skall genomföras för alla tre cyklerna och det görs i ett separat skript, `myScript.m`. Ni kan även öppna skriptet `myScript.m` som ni kommer att vidareutveckla under labben. I båda skripten koden finns `ReplaceME` som visar var i koden ni skall implementera ekvationer för beräkningar, det finns även en `stopHere` som avbryter exekveringen med ett felmeddelande för att leda er till den plats i koden ni behöver svara på frågor (det genereras en länk i kommandofönstret till platsen i koden där det aktiva `stopHere` stannar), för att komma vidare kommenterar ni bort `stopHere`. När `myScript` är klart för en cykel sparas resultatet `Res` undan och nästa cykel analyseras för att läggas i en ny variabel. Under arbetet rekommenderar vi att ni alltid kör `Uppgift1`. Då kör den till nästa `stopHere` och om ni klickar på länken till kod raden, enligt Figur 1, så hamnar ni där programmet stoppats. Ni kan under arbetet titta på delresultat

```
>> Uppgift1
Cykel 1
=====
cy =
  struct with fields:
    t: [2843x1 double]
    U: [2843x7 double]
    I: [2843x1 double]
    t0: 12150
    cyNo: 2

Error using stopHere (line 1)
Stanna Här!

Error in myScript (line 32)
stopHere % Kommentera denna rad när ni är klara med studierna för att få programmet att fortsätta

Error in Uppgift1 (line 38)
myScript

fx >>
```

Figure 1: Detta skall var utskriften då ni kör `Uppgift1` första gången. Den illustrerar också hur `stopHere` kan ta er till rätt ställe i koden. Vi använder `error` och det ser fullt ut, men det är ett enkelt sätt att skapa länkar som hjälper er att hitta rätt i koden.

i variabeln `Res` under utvecklingen genom att skriva `Res` i `Command Window`. När alla tre cyklerna är utvärderade kan ni se resultat från de tre cyklerna och se skillnader.

2.1 Studera signalerna från cell-cyklingen

Plotta datat $U(t)$ och $I(t)$, med tid på x-axeln för att bekanta er med ert cykel-data, (detta är redan förberett i analys-skriptet som ni fått). Diskutera till exempel följande med varandra var sker det vila, laddning, urladdning, hur lång tid tar varje cykel tar. Diskutera det som ni ser, hur hänger ström och spänning ihop? Finns det regioner med Constant Current (CC) och finns det något som liknar Constant Voltage (CV)?

Titta på data för att se vad som definieras som positiv ström, använder man generator- eller motorkonvention för batteriets strömriktning?

Vilken C-rate använder man för laddning respektive urladdning?

Plotta datat med index på x-axeln, dvs ange inte tid till plot-kommandot, för att se vid vilka data-index saker händer (detta är också förberett). Identifiera mellan vilka index urladdning samt laddning pågår (det sista med noll ström innan och första med noll ström efter), ni behöver Zooma in i plotten för att se indexet. För att zooma behöver ni göra förstoringsglasat uppe till höger precis över plotten aktiv. Ni kan använda variabelnamn såsom `disSta`, `disSto`, `chaSta`, `chaSto`, platser för dessa finns i `Uppgift1.m`. Notera att strömmen inte blir exakt 0 utan det finns osäkerheter och brus i mätdata.

2.2 Laddningsberäkningar

Skriv en integrationsfunktion där ni beräknar laddningsändringen, dvs ström-integralen, mellan två index, där ni kan skicka in tid, ström, samt era index, färdigställ funktionen

`integrateFun.m`. För att beräkna integralen av y med avseende på t numeriskt mellan två index a och b i Matlab använder man trapetsmetoden och följande

$$\int_{t(a)}^{t(b)} y(t) dt = \text{trapz}(t(a:b), y(a:b))$$

Använd integrationsfunktionen som ni implementerade gjorde tillsammans med indexen från förra uppgiften för att bestämma svara på frågorna:

Hur stor laddning går in i batteriet vid laddning?, och ut vid urladdning?

Vad är cyklingsdjupet DOD (depth of discharge)?

Vad är Coulombic Efficiency $\eta_C = \frac{Q_{dis}}{Q_{chg}}$ och Coulombic-inefficiency $1 - \eta_C$?

Skillnaden i Q mellan laddning och urladdning är ett resultat av förluster i batteriet. Detta är ett resultat av att elektroner inte stannar där det är tänkt i batteriet. Hur många elektroner motsvarar förlusten i laddning under cykeln?

2.3 Mätosäkerhet i ström

Noggrannheten i resultaten beror på noggrannheten i sensorerna. Detta är särskilt viktigt för Coulomb-räkning. Under vila är strömmen 0, men sensorn visar inte exakt 0 A. Granska strömmen under vilotiden efter testets aktiva del. Zooma in i strömplotten och se storleken. Om man antar att strömmätningen har en konstant offset kan detta faktum användas för att kalibrera strömsensorn genom att ange dess offset.

Beräkna medelvärdet av den offset I_{off} som finns med genom att använda Matlab-funktionen `mean` på strömmen över indexutsnittet (`chgSto:end`). Beräkna den korrigerade strömmen $I_{corr}(t) = I(t) - I_{off}$ och gör nu studierna av laddningsberäkningar igen med denna nya ström. Hur många gånger bättre blev data för cellen m.a.p. laddningsförlusten?

2.4 OCV och DOD kurva

Nu vill vi se hur urladdningskurvan ser ut och hur den är kopplad till cellernas spänning. Vi vill beräkna integralen

$$Q(\tau) = \int_0^{\tau} I(t) dt$$

notera att övre gränsen är varierande och vi vill ha hela vektorn med alla $Q(t)$, detta kan beräknas i Matlab med funktionen `cumtrapz`. Använd även här den korrigerade strömmen för att beräkna $Q(t)$.

2.5 Inre resistans för DC

I OCV och DOD kurvan ser man effekten av inre resistansen. OCV kurvan ligger någonstans mellan urladdnings- och laddningskurvan ju högre ström, desto större skillnad är det. Genom att för ett och samma Q , säg 5 Ah, bestämma strömmar och spänningar vid upp och urladdning, kan man med hjälp av strömmarna och spänningarna beräkna resistansen $R_i + R_C = R_{DC} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$. Leta fram de index i datat för $Q(t)$ som ligger närmast 5 Ah för ur- och upp-laddning, använd dessa index för att få fram vad spänningarna och strömmarna var vid dessa tidpunkter. Vad blir motsvarande DC resistans?

2.6 Energieffektivitet

Använd integrationsfunktionen och indexgränserna för att beräkna energin som går ut ur och in i batteriet. Vektorn för den momentana effekten $P(t) = u(t) \cdot i(t)$ beräknas enklast i Matlab med `.*`. Vi medelvärdesbildar också alla celler spänningar med `mean(U,2).*I`. Förklaring: I Matlab så används funktionen `mean` för att medelvärdesbilda kolumner eller rader i matriser, när data utgörs av en matris måste man tala om för Matlab vilken dimension

man vill medelvärdesbilda över i vårt fall med cellspänningsmatrisen så är första dimensionen tiden och andra dimension är cellerna, dvs `mean(U,1)` medelvärdesbildar över tiden för varje cell medan `mean(U,2)` medelvärdesbildar över cellerna för varje tidpunkt.

2.7 Cykel 2

Fortsätt nu i huvudfilen och gör data för cykel 2 aktiv samt påbörja evaluering. I denna cykel töms cellerna ned till dess nedre gräns 3.0 V och man ser hur spänningen sjunker mycket snabbt i slutet av urladdningen. Starta nu om i avsnitt 2.1. Vi har lagt in stop i koden för att ni skall kunna titta i figurerna och identifiera start och stop av olika laddningsprocesser, samt identifiera var man passerar 5 Ah. Koden ni skrivit återanvänds nu helt och hållet och ni får resultaten variabeln `Res` som senare lagras i `Res2`.

2.8 Cykel 3

Fortsätt nu i huvudfilen och gör data för cykel 3 aktiv samt påbörja evaluering. Studera data för denna cykel som också tömmer cellerna ned till dess nedre gräns 3.0 V och man ser hur spänningen sjunker mycket snabbt i slutet av urladdningen. Titta på signalerna och notera hur några nya fenomen dyker upp under laddningen. Här har man valt att lägga in puls och relaxations studier i samma test som cyklingen, detta för att kunna samköra experiment och få mer information ur de tester man gör. I denna analys struntar vi i pulserna (vilket vi återkommer till i nästa projektuppgift). Starta nu om i avsnitt 2.1. Komihåg att stoppa utvärderingen för att identifiera start och stop av olika laddningsprocesser, samt för att identifiera var man passerar 5 Ah. Gå igenom alla beräkningssteg för denna cykel också, sedan är det dags att jämföra resultaten.

2.9 Jämförelser och Reflektionsuppgifter

Beskriv vad som händer med följande egenskaper för en cell när den åldras, jämför främst cykel 2 och 3 som har mest liknande förutsättningar, notera resultaten era observationer sist i `Uppgift1.m`-filen: Vad händer med inre resistans, laddningskapacitet (Ah), Coulombisk (in)effektivitet och elektronförlust, cykeleffektivitet, när batteriet åldras.

State of health (SOH) beskrivs ibland som nuvarande kapacitet jämfört med kapaciteten för nytt batteri och anges i %, 100% är nytt batteri och branschstandarden är att End of Life (EOL) definieras vid $SOH=80\%$. I just dessa tester har man inte börjat vid maximal cell spänning vilket är 4.1 V, så vi kan inte räkna från data och jämföra med 24 Ah, rakt av. En enkel analys av OCV före och efter cyklerna har visat att Cykel 2 skulle teoretiskt gett 22.7 Ah om cellen var ny och Cykel 3 skulle gett 23 Ah. Använd dessa för att bestämma SOH för cykel 2 och 3.

Energi och laddningskapacitet kan inte jämföras med cykel 1 eftersom den inte laddats ur lika mycket, men i arbetet har ni noterat trender för inre resistans och effektivitet, stämmer dessa trender även om ni jämför mot data från cykel 1.

Tiden från nu till när cellen når EOL kallas ibland Remaining Useful Life (RUL), detta kan anges i månader(år), mil (för en bil) eller som i detta fallet antal cykler. RUL är svårt att veta men kan vara bra att känna till för att planera service och för att undvika onödiga avbrott. Anta nu att cellen skulle fortsätta cyklas på samma sätt och åldras i samma takt, hur många cykler till skulle man kunna köra cellen innan den når 80%? Ange för batteriet hur många cykler ni tror att cellens RUL är.

Hur stor kan strömmen bli om man råkar kortslua en fulladdad cell (tex tappar/lägger en metallbit, såsom en skruvmejsel över polerna)? Avslutande reflektion: Den inre resistansen är låg, så strömmen blir stor och det finns risk för brännskador, cellen kan också utveckla så mycket värme att den kan explodera om man inte är försiktig. När man jobbar med Litiumjon celler finns det många föreskrifter som skall skydda oss användare, en är att använda isolerade verktyg inte ha ringar eller klockor med stålarmband etc.

3 U2: Analys av batteridynamik

Sammanhang: När man använder ett batteri och belastar det dynamiskt, så räcker det inte alltid med en Thevenin equivalent (spänningskälla och inre resistans) för att förklara beteendet och sambandet mellan batteriström och polspänning. Framförallt, så tar det en stund efter ett batteri har belastats tills det har återhämtat sig. För att få kännedom om batteriets dynamiska egenskaper så gör man även stegsvarsexperiment, ofta kallade pulstester, detta syntes delvis i Cykel 3 ovan. I denna uppgift skall vi titta på data från två pulstester, och vårt uppdrag är att analysera data och bestämma de dynamiska batteriparametrarna. Ni kan byta bibliotek och jobba i filen `Uppgift2.m`.

Batteripacket består av strängar med 180 seriekopplade celler och sedan är två parallella strängar ihopkopplade för att få tillräcklig kapacitet. Varje cell har 37 Ah kapacitet. Maximal cellspänning är 4.2 V och minimal är 3.0 V, den nominella spänningen är 3.65 V. Hela packet testas i pulstestet. Vad är batteriets maximala och minimala polspänning? Hur stor är batteriets kapacitet i Ah? Om man utgår från cellernas och batteriets nominella spänning hur mycket energi kan batteriet lagra? För att spara på batteriet så använder man i praktiken bara området mellan 10-95%. Vilket är nu batteriets praktiska kapacitet?

I datamängden finns det testresultat från två pulstester ett vid 35% SOC och ett vid 65% SOC. Ladda in datat och skapa plottar för att bekanta er med datat (detta är redan förberett). Exekvera skriptet sektionvis med hjälp av Ctrl+Enter. Notera att datat innehåller en sekvens med 6 stegsvar, det första varar 1 sekund med upp/ned, nästa varar 30 sekunder med upp och ned, och de sista varar 60 sekunder, därefter kommer en lång period som kallas "Relaxation" på engelska, då batteriet återhämtar sig. Notera att svaret i spänning har tydliga dynamiska förlopp med RC-liknande karaktäristik.

Hur är det med ström- och spänningsriktningarna? Är det generator referens eller motor referens som använts om man tittar på strömmens riktning? Ledning: tecknet för strömmens riktning har bestämts av apparaten som agerar laddare för batteriet. Lärdomen är att man skall alltid granska data och se att man förstår hur mätsystemet har definierat riktningarna på strömmarna i siffrorna som är lagrade.

3.1 Steg vid 35%

Börja med datat för 35% laddning, studera stegen och diskutera med din labbpartner var ni ser R_i -karaktäristiken och var ni ser RC karaktäristiken i stegen. Koncentrera er sedan på tredje steget det första upp steget av 30 sekunders stegen som börjar vid $t=172$ s och slutar vid 202 s, med ledning av lektion 2 kan ni få fram en gissning på R_i , liksom en första gissning på R_C och C från vad ni ser i plottarna. För att simulera modellen behöver vi även ange vilken startspänning som batteriet har vid testet denna startspänning behöver anges i variabeln `U_init` i `Uppgift2.m`.

Stoppa in era gissningar i filen och kör en simulering av den dynamiska modellen i filen (detta är förberett i filen `Uppgift2.m`) efter simuleringen skapas en plot där simuleringresultatet jämförs med spänningsdatat. Justera därefter i nästa sektion manuellt R_i , C , och R_C , så att ni får god överensstämmelse med mätdata för steget. Tänk igenom om en ökning av C ger ökad eller minskad krökning av kurvformen, samt hur R_C påverkar slutvärdet. Vi ändringar så samverkar R_C med C .

När ni är nöjda skriver ni ut resultatet av de tre parametrarna.

3.2 Steg vid 65%

Byt nu till data för 65%, titta på datat, skapa er en uppfattning om det är samma parametrar som passar även för denna arbetspunkt. Modifiera startspänningen så att den stämmer, kör simulering med de bästa parametrarna från 35% och jämför med data igen. I nästa sektion så kan ni jobba med parametrarna för att få modellen att stämma ännu bättre överens med data för denna arbetspunkt.

Ser ni att olika arbetspunkter i batteriet kan ha olika parametervärden? Detta är ett tecken på att ett batteri är ett olinjärt system.

3.3 Övergång till Uppgift 3

Vad var vilospänningarna vid 35% och 65%? Notera att denna spänningsvariation motsvarar 30% förändring i laddningsgrad. Notera nu maximala spänningsskillnaden under de först stegen (då SOC knappt hinner ändra sig). Om man trodde att spänningen var det enda måttet på SOC hur mycket skulle man kunna tro att denna ström skulle förändra SOC?

Detta är kanske uppenbart om man tänker in en inre resistans med en Thevenin ekvivalent men kolla nu in tiden efter sista steget. Visst tar det ganska lång tid innan spänningen kommit tillbaka och blivit "utvilat", "after a significant relaxation time"?

Hänger ni med på budskapet att "Spänning är inte ett entydigt bra mått på SOC", om inte batteriet fått vila en god stund.

En komplicerande faktor är om OCV kurvan är väldigt platt dvs spänningen inte förändrar sig så mycket då SOC förändrar sig, i vissa fall för vissa batterityper skulle man kunna blanda ihop 10% med 90% om man bara tittar på spänningen.

4 U3: State of charge före och efter en körning

Sammanhang: När man använder batterier så är en viktig aspekt att övervaka laddningsgraden (SOC). Om det finns risk att batteriet blir för fullt eller helt tomt kan man behöva vidta åtgärder för att skydda det. En annan aspekt är att planera framåt, till exempel att planera för hur mycket laddning som behövs för nästa uppdrag eller nästa dag. För att kunna göra detta behöver man hålla koll på laddningsgraden på batteriet, och grunderna för detta skall vi studera i denna uppgiften. I denna uppgiften har vi ett batterifordon som körts från Ödeshög till Göteborg, när det kommer till Göteborg vill vi veta vilken laddningsgrad som batteriet har. Ett viktigt delresultat hittills är att det finns inte en mätare som vi kan köpa som talar om vad laddningsgrad är, utan vi måste kombinera information olika ledtrådar.

Batteriet består av 300 celler som sitter parallellt och dessa är sedan sammankopplade seriellt med 180 celler i serie. Varje cell har kapacitet $Q = 2.9646 \text{ Ah}$. Den maximala spänningen för en cell ges av OCV-kurvan som finns i labbdatat.

Det finns två sätt att följa laddningsgrad: i) spänning ii) integration av ström till laddning. Relaterat till punkt i) insåg ni i den avslutande delen av Uppgift 2 att spänningen varierade trots att laddningsgraden inte ändrade sig märkbart. Om batteriet är utvilat så är spänningen ett relativt bra mått på SOC men under körning behöver vi kolla på andra ledtrådar i data. Relaterat till punkt ii) såg ni i uppgift 1 att osäkerheter i mätningen av ström kan leda till ackumulerade fel. Därför jobbar man i praktiska applikationer med att balansera dessa storheter i de algoritmer som beräknar och övervakar SOC.

I uppgiften har ni tillgång till en OCV/SOC kurva, för batteriet, samt informationen om att cellens nominella kapacitet är $Q = 2.9646 \text{ Ah}$. Ni har fått data från en körning med en El-lastbil som laddats vid Ödeshög och kör till Göteborg, i datat finns information om körningen: höjdprofil, fordons hastighet, elmotormoment, ström, spänning och litet mer information. Det viktigaste för uppgiften, för er, är ström och spänning från fordonsbatteriet under körningen, dessa finns tillgängliga både för batteripaket och för varje cell. I detta fall kommer datat från fordonet på ström- och spänningsdata från en simuleringsmodell för en batterilastbil, modellen har utvecklats vid Fordonssystem tillsammans med Scania och Volvo Trucks. Ni kan jobba i filen `Uppgift3.m`. En första plot över körningen har förberetts för er, studera datat för $I(t)$, $U(t)$ som funktion av tid. Diskutera beteendet med din labbpartner, känner ni igen höjdprofilen för E4 mot Jönköping och väg 40 mellan Jönköping och Göteborg. Titta speciellt på uppförsbackar och nedförsbackar och studera hur ström och spänning åker jojo under körningen. Följer teckenkonventionen för batteridatat generator- eller motor-konventionen?

Utgå från ingångsdata (början av körningen) och gissa (estimera) vad laddningsgraden var då lastbilen startade med hjälp av OCV kurvan. Var lastbilen fulladdad? Beräkna sedan förändringen i laddning hos batteriet under körningen och estimer vad laddningsgraden (SOC) är i slutet av körningen. Gör slutligen en jämförelse av den laddningsgrad ni fick från beräkningen med de strömmar och spänningar gentemot OCV kurvan, titta främst i slutet av körningen. Verkar ert estimat av laddningsgrad vara rimligt eller finns det anledning att uppdatera estimatet? Eftersom detta är simulering med perfekt mätning så borde det bli bra, men om man har mätosäkerheter såsom i Uppgift1 kan ni kanske tänka er att korrigeringar kan behövas.

Perspektiv för framtiden: Med hjälp av metoder från avancerade kurser inom regler-teknik och signalbehandling kan matematiska modeller och metoder användas för att skapa systematiska algoritmer som kan användas för att övervaka och uppdatera SOC under tiden ett fordon körs (eller då ett godtyckligt energilagrar används). Håll utkik efter begrepp såsom observatörer och Kalman-filter i framtida kurser, vilket är exempel på metoder som kan användas för sådana ändamål.