

Impedantiemetingen aan batterijcellen

Elektrochemische impedantiespectroscopie

Op het gebied van elektrochemische-impedantiespectroscopie (EIS) is men al jarenlang actief, maar het is pas recent dat EIS populair is geworden voor zowel onderzoek en ontwikkeling alsook voor diverse preventieve onderhoudsgebieden. EIS combineert het vakgebied chemie met de elektrotechniek. De crossover kan soms ingenieurs en wetenschappers blootstellen aan technische termen en instrumenten die ze niet vaak tegenkomen. Dit artikel bespreekt een meetbenadering die gebruik maakt van N4L-instrumentatie, en die impedantiemetingen kan uitvoeren van een reeks batterijen/cellen, van lithium-ion tot waterstofbrandstofcellen.

RENÉ
BOS, T&M
CONSULTANT
TT&MS

Een aantal belangrijke kenmerken kan worden bepaald uit een EIS-meting. Zo zullen er bijvoorbeeld bij het snel dynamisch laden van batterijcellen voor auto's hoogfrequent transiënt belastingverschijnselen optreden die op de klemmen van de batterij voorkomen, en die een pulserende gelijkstroom door de batterij veroorzaken. Er zijn verschillende elektrochemische effecten, zoals oxidant 'afsterven', temperatuureffecten en meer. Een effect is de capaciteit binnen de batterij die wordt gevormd door de effecten van een korte ladingzone tussen elektrode en elektrolyt. Dit staat bekend als het dubbellaags condensator effect. Deze capaciteit staat parallel aan de elektrochemische lading, omdat hij op het oppervlak van de elektroden ligt. [1]

De bepaling van de kenmerken van de batterij, die als een elektrisch equivalent circuit wordt voorgesteld, is belangrijk voor zowel de batterijontwerper als voor de ontwikkelaars van elektrische vermogenssystemen. Deze kenmerken helpen de technici met het modelleren van de systeemrespons voor laadeffecten. Zo'n modellering kan worden uitgevoerd met PSMComm2-software, geschikt voor de PSM-serie instrumenten van N4L.

Ter introductie beschouwen we de impedantie-analyse van een aantal passieve

elementen en circuits, om kennis te maken met een Nyquist-weergave van een complex circuit. Daarna wordt de analyse van een Duracell MX1500 uitgevoerd met behulp van een eenvoudige verbindingmethode inclusief een PSM3750 Frequency Response Analyzer en een BATT470m EIS stroomshunt.

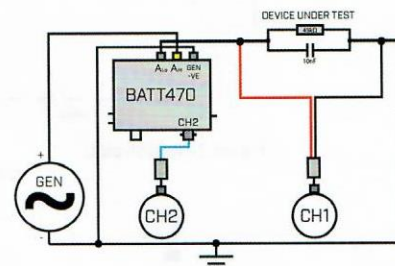
Impedantiemetingen zijn ook nodig om de batterij bij hoge frequenties te karakteriseren. Een laadshakeling bijvoorbeeld, die gebruik maakt van een pulsbreedte-gemoduleerd laadcircuit, vereist kennis van de impedantie van de batterijcel bij de laad-frequentie om de oplaadingsnelheid af te leiden. Dit kan allemaal worden afgeleid uit nauwkeurige EIS-metingen van de cel.

Initiële tests en basistheorie

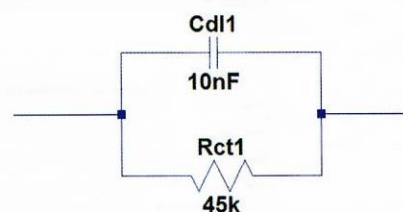
De impedantie van een eenvoudige RC-combinatie (figuur 1) kan in de Nyquist-vorm worden weergegeven, evenals een traditionele impedantie tegen frequentie XY-plot.

$$Z_{DUT} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \omega C^2}}$$

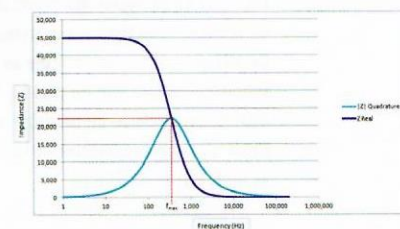
Het testcircuit bevat een 45 kΩ weerstand en 10 nF condensator in parallel, waarop een impedantiesweep wordt uitgevoerd van 1 Hz tot 200 kHz. In eerste instantie wordt de impedantie van het circuit gedomineerd door de weerstand aangezien de



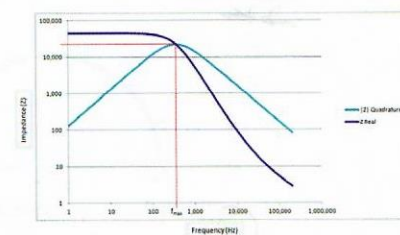
Figuur 1. Het testcircuit.



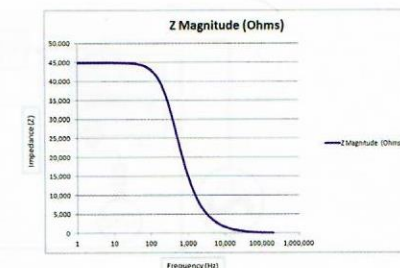
Figuur 2. Impedantie van het testcircuit.



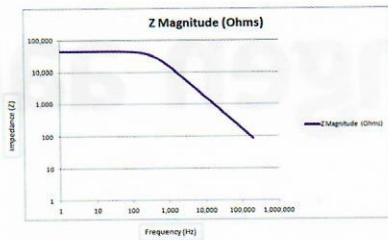
Figuur 3. Log linear plot.



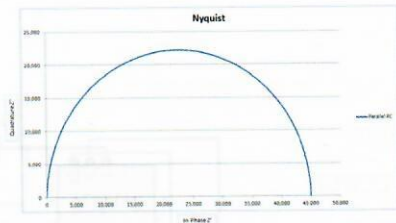
Figuur 4. Log log plot.



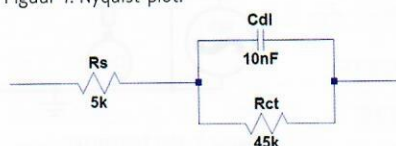
Figuur 5. Impedantieplot. >>



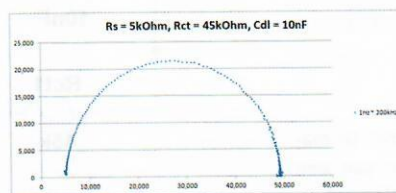
Figuur 6. Logaritmische impedantieplot.



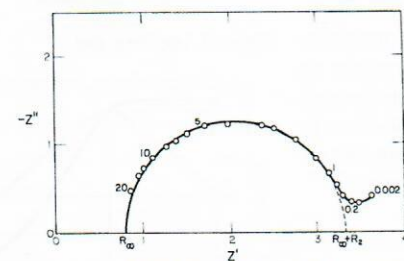
Figuur 7. Nyquist-plot.



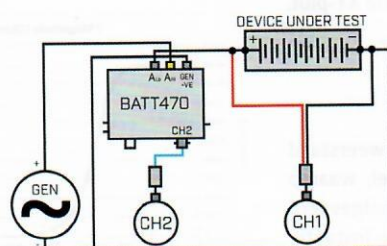
Figuur 8. Vereenvoudigde Randles cel.



Figuur 9. Deze figuur illustreert de respons van de schakeling in figuur 8 in Nyquist-formaat. De Nyquist-plot is op de reële as met 5 kΩ verschoven. De kant van de plot bij lage frequenties start op de reële as bij ongeveer 50 kΩ en loopt bij hoge frequenties terug naar de reële as bij 5 kΩ.



Figuur 10. Warburg-impedantie (0,2 Hz ~ 0,002 Hz).[2]



Figuur 11. Definitieve test schematisch.

condensator een effectief open circuit is bij 1 Hz. Dit resulteert in een in-fase impedantie en een fasehoek dicht bij 0 graden.

In praktische toepassingen vertegenwoordigt C_{dl} in figuur 2 de capaciteit die aanwezig is tussen de plaat/elektrolyt-interface die is gecreëerd door een dubbele laag van ionen binnen een elektrochemische cel. Het is deze capaciteit die aanvankelijk de bursts van hoogfrequente stroom zal leveren als een batterij of cel wordt geladen. R_{ct} is de ladingoverdrachtsweerstand, die aanwezig is door overdrachtbeperkingen van de elektrolytplaat-ion.

Naarmate de frequentie wordt verhoogd begint de condensator de totale impedantie van het parallelle paar in grotere mate te beïnvloeden en vormt uiteindelijk een kortsluiting (nominaal) bij hogere frequenties.

Het punt waarop de condensator het grootste effect zal hebben en vervolgens het circuit de grootste kwadratuurimpedantie zal vertonen, is wanneer de kwadratuurimpedantie van de condensator gelijk is aan de in-fase impedantie van de weerstand. Dit gebeurt op de volgende frequentie:

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Vervolgens is de fasehoek bij deze frequentie 45 graden (zie figuur 3 ... 6).

Het Nyquist-diagram (figuur 7) geeft een duidelijk beeld van de plaats van de maximale reactieve impedantie. Dit punt kan gebruikt worden om een onbekende C_{dl} -waarde te bepalen. Deze methode van modellering wordt gebruikt in de Randle Cell Modeling functie in PSMComm2 software.

$$\frac{1}{2\pi f \times Z_{max}} = C_{dl}$$

Het testcircuit wordt vervolgens gemodificeerd door een seriële weerstand R_s op te nemen, deze weerstand vertegenwoordigt de metallische weerstand van de platen en de weerstand van de elektrolyt (figuur 8). Bij een lage frequentie vertegenwoordigt het circuit in figuur 8 een totale impedantie van 50 kΩ. Dit komt doordat de condensator (C_{dl}) parallel aan R_{ct} effectief een open circuit zal zijn. Zodra C_{dl} bij hoge frequenties een kortsluiting wordt, zal de schakeling een impedantie van 5 kΩ vertonen en overwegend resistief zijn.

De Nyquist-plot presenteert duidelijk het resultaat, met dezelfde halve cirkel als in figuur 7 (vanwege de combinatie R_{ct} parallel aan C_{dl}) 5 kΩ verschoven van de oorsprong.

Warburg impedantie

Om de Randles-cel te voltooien wordt een impedantiecomponent, de Warburg Impedance, toegevoegd aan het model. Dit onderdeel kan niet worden gemaakt van discrete componenten aangezien het een constante-fase-element is. De Warburg-impedantie vertegenwoordigt gemeenschappelijke diffusie lineair van aard, dat wil zeggen onbeperkte diffusie van een platte elektrode. De constante fase die door het Warburg diffusie-element wordt getoond is 45° , de impedantiewaarde is omgekeerd evenredig met de vierkantswortel van de frequentie.

$$|Z_w| = \sqrt{2} \frac{A_w}{\sqrt{\omega}}$$

Hier is A_w is de Warburg coëfficiënt

Op een logaritmische plot verschijnt de Warburg-impedantie als een rechte lijn met gradiënt van een 1/2.

Experiment 1

In dit experiment wordt EIS uitgevoerd op een Duracell Ultra Power AA batterij. De Duracell-specificatie geeft een impedantie van $81 \text{ m}\Omega$ @ 1 kHz aan. Dit frequentiepunt werd aanvankelijk gecontroleerd om de testinstelling te verifiëren. Een EIS-sweep van 100 mHz tot 5 kHz wordt uitgevoerd met behulp van het testcircuit geïllustreerd in figuur 11.

Instrumentatie

PSM3750-2C
BATT470m
2x EST10m
4 mm verbindingseleidingen
Oscilloscoop probe


Connecties

De PSM-uitgangssensor is in serie met een DC-blocking condensator van $100 \mu\text{F}$ aangesloten. Het uiteindelijke testcircuit bestaat dan uit de 1,5 V Duracell MX1500-batterij in serie met de HF470m stroomshunt.

Definitieve test

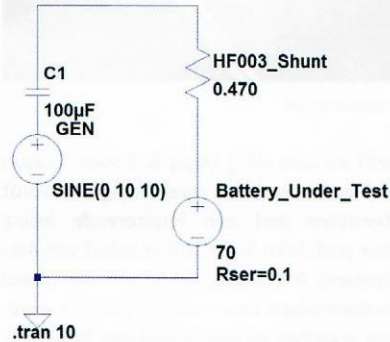
CH1 van de PSM zal de spanningsval over de batterij meten. CH2 is aangesloten over de BATT470m met de bijbehorende geïsoleerde BNC-kabel om de stroom te meten in het testcircuit. De PSM3750 voert vervolgens een discrete Fourier transformatie (DFT) analyse van de toegepaste sinusoiden uit om de in-fase- en kwadratuurcomponenten en impedantieparameters af te leiden. Aangezien de PSM3750-ingangen zijn geïsoleerd, kunnen ze direct worden aangesloten op elk testcircuit tot 500 Vpk.

De PSM3750 genereert een sinusvormig signaal dat door de DC-blokkerende



Nominal voltage	1.5 V
Impedance	81 m-ohm @ 1 kHz
Typical weight	24 g (0.8 oz)
Typical volume	8.4 cm ³ (0.5 in ³)
Terminals	Flat
Storage temperature range	5°C to 30°C (41°F to 86°F)
Operating temperature range	-20°C to 54°C (-4°F to 130°F)
Designation	IEC: LR6

Figuur 12. Specificatie van de batterij.



Figuur 13. Testcircuit.



Figuur 14 en 15. De PSM3750 registreert een serieweerstand van 86 mΩ; let op de reactantie van 36 mΩ, gelijk aan 4,4 mF.

BATT470m en het onderzochte apparaat gaat. Dit signaal gaat met een sweep over een reeks frequenties, terwijl de PSM3750 tegelijkertijd de impedantie van de batterij vastlegt. De gegevens worden op het display geplott en tevens geëxporteerd naar de PSMComm2 software.

De PSM3750 registreert een serieweerstand van 86 mΩ; let op de reactantie van 36 mΩ, gelijk aan 4,4 mF (figuur 14 en 15).

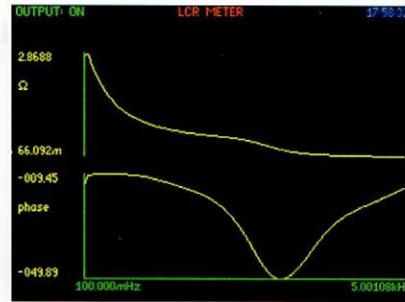
Resultaten kunnen ook direct geëxporteerd worden naar Excel. Communicatie naar PSMComm2 loopt via USB, RS232 of LAN.

Algemeen

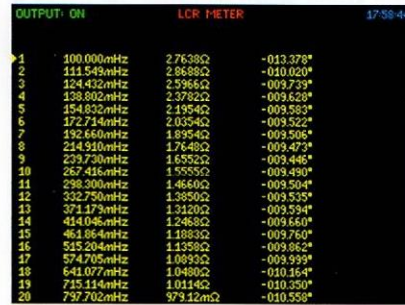
De PSM3750 beschikt over galvanisch geïsoleerde ingangen en een generator met een bandbreedte van 10 µHz tot 50 MHz en een voltage rating van 500 V_{pk}. De beschreven test kan worden toegepast op een breed scala van meetapplicaties.

Referenties

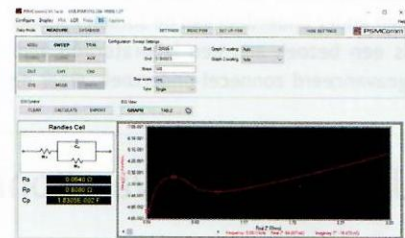
- [1] Xi Zhang, Chris Mi, *Voertuig vermogens beheer, Controle en Optimalisatie*, Springer 2011
- [2] E Barsoukov, J R Macdonald, *Impedantie*



Figuur 16. Impedantieplot van 0,1 Hz tot 5 kHz.



Figuur 17 en 18. Voorbeeldtabellen van resultaten.



Figuur 19. Resultaten kunnen ook direct worden geëxporteerd naar Excel.

Spectroscopie Theorie, Experiment en Toepassingen, Wiley 2005.

TT&MS
www.ttms.nl



Inter-Company PCB assemblage
 Proto type van Gerber / ODB / inkoop tot uitlevering, standaard levertijd 10 werkdagen.
 Productie series met Siemens Siplace line
 Controle d.m.v. Röntgen, AOI, functionele test
 BGA repair station

www.inter-company.com
 Phone: 0031 0547 263 034

