

Analyse van supercondensatoren in een toepassing voor automatische magazijnen

Thijs Vanbecelaere

Promotoren: prof. Kurt Stockman, Simon Houwen

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: elektrotechniek

Vakgroep Industrieel Systeem- en Productontwerp
Voorzitter: prof. Kurt Stockman
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2014-2015



Analyse van supercondensatoren in een toepassing voor automatische magazijnen

Thijs Vanbecelaere

Promotoren: prof. Kurt Stockman, Simon Houwen

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: elektrotechniek

Vakgroep Industrieel Systeem- en Productontwerp
Voorzitter: prof. Kurt Stockman
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2014-2015



Toelating tot bruikleen

"De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

"The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation."

1 juni 2015
Thijs Vanbecelaere

Voorwoord

Er schuilt in iedereen een wereldverbeteraar, al zijn de ene ideeën de andere niet en qua realisme scoort de één al wat beter dan de ander. Als toekomstig elektrotechnisch ingenieur wil ik zaken op een nuchtere manier bekijken. Ik wil met andere woorden de wereld verbeteren door kleine dingen, want vele kleintjes maken een groot geheel.

Vertrekkende vanuit die optiek en mijn eigen interesses, ben ik gaan kijken wat er allemaal mogelijk is. We kunnen bijvoorbeeld massaal inzetten op hernieuwbare energiebronnen zoals zon, wind en water. Maar als we daarbij vergeten te denken aan het bredere kader en geen rekening houden met alle scenario's, duiken er tal van problemen op waarvan ik denk dat die op Europees niveau aangepakt moeten worden.

In de plaats van meer energie te produceren, kunnen we ook kijken om het energieverbruik te verminderen, want vandaag de dag gaat er veel energie verloren in warmte. Een van die manieren is bijvoorbeeld energierecuperatie. Met energierecuperatie creëer je een win-winsituatie. Elke Joule die gerecupereerd kan worden, is energie die niet opnieuw geproduceerd moet worden. Je voorkomt er CO_2 -uitstoot mee, wat goed is tegen de opwarming van de aarde. Anderzijds kunnen die elementen ervoor zorgen dat het energietekort in België opnieuw een klein beetje minder nijpend is. De andere winsituatie is er voor de ondernemer die investeert in de technologie. Die ondernemer wordt een tikkeltje minder afhankelijk van het elektriciteitsnet en uiteraard is elke kWh die minder betaald moet worden extra winst voor het bedrijf.

Om die redenen heb ik gekozen voor een masterproef die het element energierecuperatie bevat. In mijn masterproef onderzoek ik of energieopslag (met behulp van supercondensatoren) bij recuperatie van energie een goede manier kan zijn om energie te besparen.

In het laatste jaar als ingenieursstudent brengt een masterproef al eens wat zorgen met zich mee. Het was een jaar met heel wat ups en downs. Een ingenieur kan je alleen worden, maar een goede ingenieur word je pas in groep, door samen te werken. Daarom had ik graag nog een aantal personen willen bedanken voor de medewerking. Ik wil ing. Simon Houwen en prof. dr. ing. Kurt Stockman, mijn promotoren, bedanken voor de kritische kijk op het inhoudelijk aspect van mijn masterproef. Voor het taalkundig gedeelte kon ik de hulp inroepen van Marie-Laure Haerens, MA. Vervolgens wens ik Maxime Vuylsteke, BSc te bedanken voor de praktische kijk op supercondensatoren. Daarnaast wil ik prof. dr. eng. Noshin Omar van de VUB bedanken voor de informatie omtrent de theoretische beschouwing om supercondensatoren praktisch in een systeem te integreren. Tot slot zou ik mijn ouders en mijn collega-studenten een merci willen zeggen voor de blijvende interesse in hetgeen ik onderzocht heb.

Thijs Vanbecelaere
mei 2015

Abstract

This master's thesis is about the recovery of energy in an automated warehouse, where there is major potential for saving energy.

First, a market research of various regenerative technologies is conducted to place supercapacitors in the market. Only those technologies that are relevant to an automated warehouse are considered. Then, the taxonomy of the supercapacitors has viewed as well the implementation of an energy buffer in a DC link.

Next, a theoretical model is developed to analyse of the energy flows in three systems: AFE, a brake resistor and a setup with supercapacitors.

That model is validated using a scalemodel that is able to detect errors. Once the model has been compared with the practical results, the dimensioning of the energy buffer can be performed. When dimensioning the buffer, an additional economic study should be able to tell what the payback time is of a buffer with supercapacitors. Meanwhile, the buffer is also compared with the burning of the braking energy and AFE.

Analysis of supercapacitors in an application for automated warehouses

THIJS VANBECELAERE

Promoters: Prof. Dr. Eng. Kurt Stockman, Eng. Simon Houwen

In cooperation with University Ghent campus Kortrijk and Egemin

Academy year: 2014 – 2015

I. INTRODUCTION

IN the industry, there are many applications in which energy is released in the process in the form of kinetic and potential energy. In the past, people did not think about recovering of energy and up until today, energy is burned into resistors. Today, companies realize that energy is expensive and scarce. That is why those companies are investigating whether or not supercapacitors could play an important role in the recovery of energy. In an automated warehouse, for example, braking energy can be recovered of a falling load. The stored energy can, further down in the process, be reused to absorb the peak load when accelerating.

II. OBJECTIVE

The thesis starts with a market study of a variety of technologies to place regenerative supercapacitors into the market. Then, a literature study is performed on the taxonomy of supercapacitors, as well as on its implementation in a DC link. Based on the knowledge gained from the literature study, a simulation model is defined that simulates the energy flow in a industrial application. In this model, several technologies are implemented to create an overview of the energy costs and savings with supercaps compared with a brake resistor and active front end (AFE). The simulation model is validated using a scaled down version of a warehouse crane. In the future, the model can be used while dimensioning the capacitor bank.

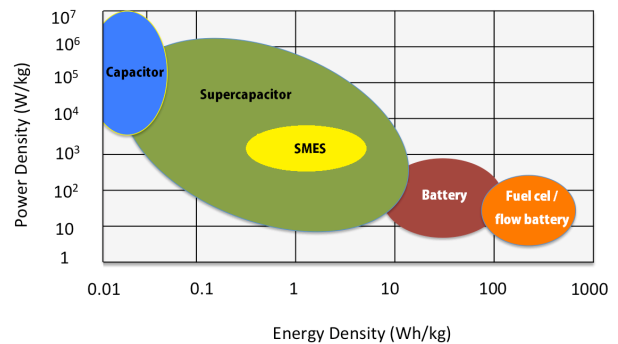
III. MARKET RESEARCH AND TAXONOMY

A. Regenerative technologies

There are several ways to buffer energy oversupplies. Figure 1 [1] is a ragoneplot that displays several technologies, which can be used for energy storage in a warehouse crane.

Batteries

Batteries are powered by redox reactions. Compared to capacitors, batteries react slower. On the other hand bat-



Figuur 1: Ragoneplot of the main regenerative technologies

teries can store more energy compared with capacitors.

Flow battery

The principle of a flow battery is based on a fuel cell. There is an important difference between a fuel cell and a battery. Fuel cells require a continuous source of reagents from the outside, for example hydrogen and oxygen, to sustain the chemical reaction (open system). In a battery the present chemicals react with each other (closed system). A flow battery is reversible, like a battery. The difference between a flow battery and a conventional battery is that fluid is being pumped through a flow battery. The development of flow batteries is still going on, but they will play an important role in the future.

SMES

In superconducting magnetic energy storage (SMES), the energy is stored in the magnetic field of a coil. The current flowing in the coil has almost no resistance, because the installation is supercooled. Because of the supercooling, the costs of this technology are high.

AFE

In case of active front end (AFE), the conventional diode bridge is replaced by a bi-directional IGBT bridge, through which energy can be sent back to the energy grid.

Capacitors

In a capacitor, the energy is stored in an electric field. They have, in contrast to batteries, a quick response but may not have high levels of energy storage.

Between capacitors and batteries, there is a void. This emptiness can be filled with supercapacitors (see Figure 1). Supercapacitors combine the best properties of the two technologies into a entirety.

B. Taxonomy

EDLC

In an electric double-layer capacitor (EDLC), there are 2 properties of the ordinary capacitor optimized. In order to increase the capacitance value, the surface of the electrode is increased, and the dielectric adapted. Enlarging the surface can be realised by replacing the solid structure of the electrode. That can be a powder (active carbon), but also carbon fibers, aerogels, nanotubes and graphene in the future. The insulator is replaced by an electrolyte. In these cases, it must be ensured that the electrodes do not come into contact with each other.

Pseudo-capacitors

Pseudo-capacitors use redox reactions to buffer energy. There are two types: conductive polymers and metal oxides. Pseudo-capacitors have in general a greater capacity compared with an EDLC. There is a forced redox reaction when charging of the capacitor takes place. This causes stability problems with conductive polymers. Metal oxides do not have that problem, but they have a higher cost.

Hybrid capacitors

A hybrid capacitor combines the features of an EDLC with that of a pseudo-capacitor to improve the performance. There are three types: the composites, asymmetrical and battery-like capacitors. Table 1 shows the types displayed together with the combination of EDLC or pseudocap which they are constructed. Because the charge is stored chemically and physically, the capacity value of hybrid capacitors is the highest.

IV. IMPLEMENTATION OF A POWERBANK

The capacitor bank can be integrated into the DC circuit of the drive of a motor. According to research conducted at the VUB [2], the emplacement that works as shown in Figure 2 is the most efficient. There is a DC/DC converter between the DC link and the capacitor bank. First, the transducer is positioned because the intermediate

Table 1: Combination to form hybrid capacitors

type	+ electrode	- electrode	electrolyte
composite	EDLC	EDLC	conducting polymer / metaaloxide
asymmetric	conducting polymer	EDLC	conducting polymer
batteries	metal oxide	EDLC	metal oxide

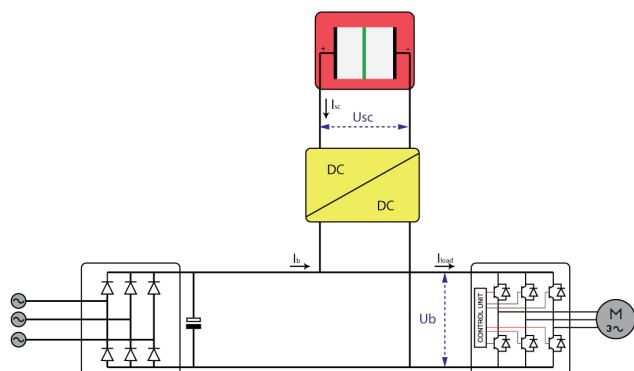


Figure 2: Optimal implementation of an energy buffer

circuit voltage fluctuates around 600V. Supercaps do not have high voltage unless there is a large number connected in series. Second, the drive includes a regulation so that the energy buffer is charging and discharging optimal.

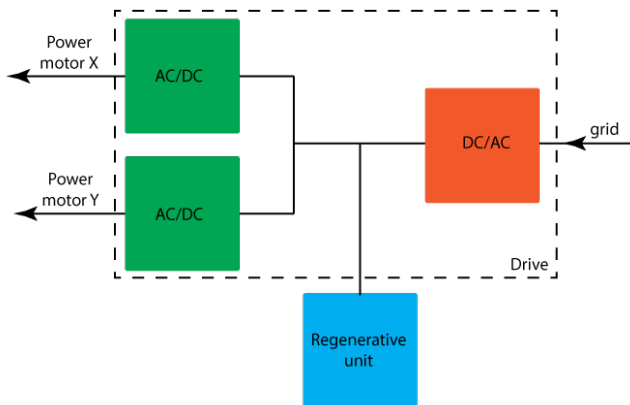
V. THEORETICAL MODEL

A regenerative unit was added to the energetic model of a warehouse crane. The unit consists of 3 parts for three types of simulations. The tests are performed where AFE, brake resistors and an energy buffer with supercaps can be compared with each other. In Figure 3, the electrical part of the model is displayed.

Energy is fed back into the grid by AFE if there comes energy from the application. In the case of a braking resistor, the released energy is burned so that it is converted into heat. When choosing the energy buffer with supercapacitors, the buffer is charged by an oversupply of energy and discharged when the system needs energy. If the buffer is exhausted, energy is injected from the grid.

VI. MODELATION

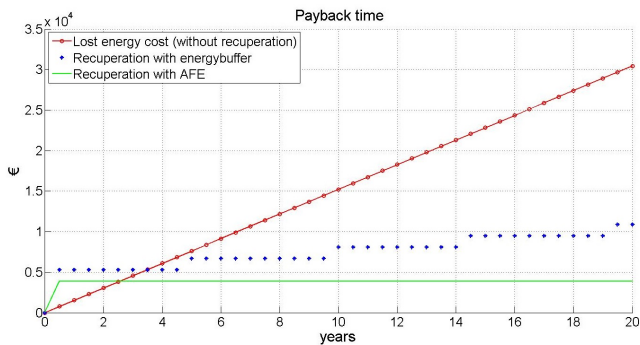
With the aid of a model, the energy flows of the three systems can be analyzed. The route which is selected



Figuur 3: Electrical part of the simulation model

exists of a dropping from 10.8 m with a mass of 3450 kg and then a rise with the same parameters. This analysis shows that the efficiency of the inverter (DC/DC inverter for the energy buffer and DC/AC converter for the emplacement of AFE and the energy buffer) is the main factor in order to determine the energy-efficiency. The result of this modelation is that an energy buffer with supercapacitors works about 1% more efficiently compared with AFE.

VII. DIMENSIONING



Figuur 4: Payback period with energy recuperation

The simulation model is the foundation for an analysis of the energy surplus in a DC link. With the data, combined with the calculation of the service life of the components, the payback period can be calculated. Figure 4 shows that an installation of AFE is cheaper than an emplacement of supercapacitors. The supercaps have to be replaced after a while. This entails an additional cost, but this is still better compared to the burning of the released energy. Nevertheless, the payback period is less than 4 years.

VIII. CONCLUSION

It can be concluded that energy buffering through supercapacitors is more efficient compared to AFE. In contrast, it is certain that the technique of AFE is cheaper and requires less support compared with a energy buffer of supercapacitors. Another advantage of supercaps is to absorb peak loads of an application, for example, during acceleration. As a result, the grid is less overloaded and the cables can be dimensioned smaller.

IX. SUGGESTIONS FOR FURTHER RESEARCH

In this masters thesis, the focus lies on an energy buffer based on supercapacitors. To optimize the energy storage for larger storage volumes, research can be done to combine systems wherein there are parallels to the supercapacitors batteries. Also, a combination of AFE and energy buffering can be examined. As a second item, the economic study can be refined by taking into account the dimensioning of transformers and power cables. In addition, the difference in consumption between AFE and an energy buffer can be included, which was neglected in this study. In the study, it was assumed that the inverters operate with a constant efficiency. However, that is not the case. The model can be extended with the efficiency curves of the inverters. Finally, the effect of the internal resistance of the supercap can be investigated to detect a loss of efficiency.

REFERENTIES

- [1] M. Aslani, "Electrochemical double layer capacitors (supercapacitors)," 2012.
- [2] J. V. Mierlo, J.-M. Timmermans, G. Maggetto, and P. V. D. Bossche, "Peak power based fuel cell hybrid propulsion system," in *The World Electric Vehicle Association Journal*, pp. 54–61, WEVA, 2007.

Analyse van supercondensatoren in een toepassing voor een automatisch magazijn

THIJS VANBECELAERE

Promotoren: prof. dr. ing. Kurt Stockman, ing. Simon Houwen
In samenwerking met Universiteit Gent campus Kortrijk en Egemin
Academiejaar: 2014 – 2015

I. INLEIDING

IN de industrie zijn er heel wat toepassingen waar er kinetische of potentiële energie vrijkomt in het productieproces. Vroeger dacht men nog niet aan het recupereren van die energie en wordt het nog tot op vandaag de dag verbrand in remweerstanden. Nu begint meer en meer het gedacht te groeien dat energie schaars en duur wordt. Om die reden gaat men kijken om de energie te recupereren waarbij supercondensatoren een belangrijk rol kunnen spelen. In, bijvoorbeeld, een automatisch magazijn kan remenergie van een dalende last gerecupereerd worden. Die energie kan gestockeerd worden om het later terug te kunnen gebruiken in het proces om de piekbelasting op te vangen.

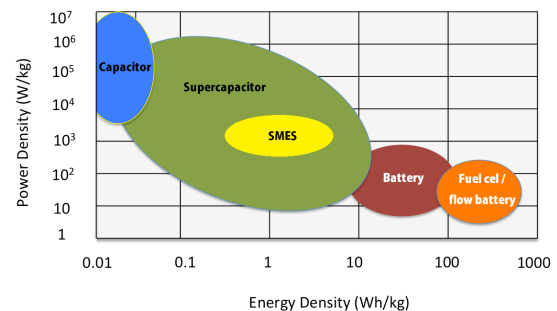
II. DOELSTELLINGEN

In de masterproef wordt er gestart met een marktstudie van diverse regeneratieve technologieën om supercondensatoren in de huidige markt te kunnen situeren. Vervolgens wordt er een literatuurstudie uitgevoerd naar de taxonomie van de supercaps alsook de implementatie ervan in een DC-tussenkring. Op basis van de opgedane kennis uit de literatuurstudie wordt een simulatiemodel opgesteld die de energie flow in een industriële applicatie simuleert. In dit model worden er verschillende technologieën geïmplementeerd om een beeld te schetsen van de mogelijke energiekosten en besparing van supercaps ten opzichte van conventionele remweerstanden of *active front end* (AFE). Dat model wordt aan de hand van een schaalmodel gevalideerd om een dimensioering te kunnen uitvoeren van de condensatorbank.

III. MARKTSTUDIE EN TAXONOMIE

A. Regeneratieve technologieën

Er zijn verschillende mogelijkheden om vrijgekomen energie te bufferen. In figuur 1 [1] wordt een ragonplot weergegeven van diverse technologieën die gebruikt kunnen worden voor energieopslag bij een magazijnkraan.



Figuur 1: Ragoneplot van significante regeneratieve technologieën

Batterijen

Batterijen slaan energie chemisch op via een redoxreactie. Vergelijken met condensatoren reageren batterijen trager, maar kunnen meer energie opslaan.

Flow battery

Het principe van een *flow battery* is gebaseerd op een brandstofcel. Een brandstofcel lijkt op het eerste zicht op een batterij, maar er is een belangrijk verschil. In een brandstofcel kunnen namelijk steeds opnieuw reagentia (bijvoorbeeld: waterstof en zuurstof) van buitenaf worden aangevoerd, terwijl de reagentia in een batterij of accu opgeslagen zitten in een compact gesloten stelsel. Een *flow battery* is net als een batterij reversibel. Het verschil tussen een *flow battery* en een traditionele batterij is dat er een vloeistof rondgepompt wordt. De ontwikkeling staat nog in zijn kinderschoenen, maar zal in de toekomst een belangrijke rol kunnen spelen.

SMES

Bij supergeleidende magnetische energieopslag (SMES), wordt de energie opgeslagen in het magnetische veld van een spoel. De stroom die in de spoel vloeit, ondervindt nagenoeg geen weerstand, omdat de opstelling supergekoeld wordt. Omwille van de superkoeling loopt de kostprijs voor die technologie hoog op.

Active Front End

Bij AFE wordt de klassieke diodebrug in een drive vervangen door een bidirectionele IGBT-brug waardoor er energie kan teruggestuurd worden naar het net.

Condensatoren

In een condensator wordt de energie opgeslagen in een elektrisch veld. In tegenstelling tot batterijen hebben condensatoren een snelle respons, maar kunnen ze geen grote hoeveelheid energie opslaan.

Tussen condensatoren en batterijen is er een leegte. Dat gat kan opgevuld worden met supercondensatoren (zie figuur 1). Die supercaps combineren de beste eigenschappen van beide technologieën tot een geheel.

B. Taxonomie

EDLC

Bij een elektrische dubbellaagscondensator (EDLC) worden 2 eigenschappen van de gewone condensator geoptimaliseerd. Enerzijds wordt het oppervlak van de elektrode vergroot. Dat gebeurt door de vaste materie van de elektrode te vervangen. Dat kan een poeder (actief kool) zijn, maar ook koolstofvezels, aerogels, nanobuisjes en in de toekomst grafeen. Daarnaast wordt het dielektricum aangepast. De isolator in een gewone condensator wordt vervangen door een elektrolyt. Daarbij moet er wel voor gezorgd worden dat de elektroden niet in contact komen met elkaar.

Pseudocondensatoren

Pseudocondensatoren maken gebruik van redoxreacties om energie te bufferen. Er bestaan 2 types: geleidende polymeren en metaaloxiden. Pseudocondensatoren hebben in het algemeen een grotere capaciteitswaarde vergeleken met een EDLC. Bij het opladen van de condensatoren vindt er een geforceerde redoxreactie plaats die bij geleidende polymeren voor stabiliteitsproblemen zorgt. Daardoor wordt er maar weinig onderzoek daaromtrent gevoerd. Metaaloxiden hebben dat probleem niet, maar hebben een hoge kostprijs.

Hybride condensatoren

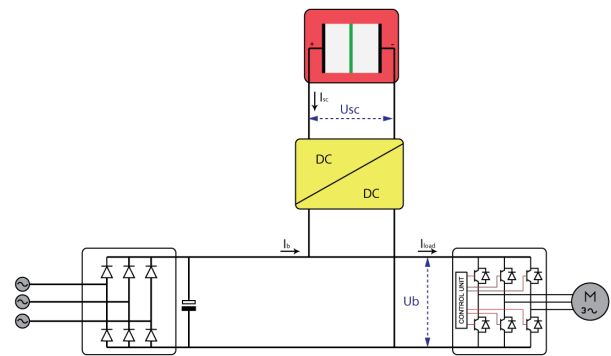
Een hybridecondensator combineert de eigenschappen van een EDLC met dat van een pseudocondensator om de prestaties te verbeteren. Er bestaan 3 types: de composieten, de asymmetrische en de batterij-achtige condensatoren. In tabel 1 worden de types weergegeven samen met de combinatie van EDLC of pseudocap waaruit ze zijn opgebouwd. Omdat er zowel fysisch als che-

misch lading opgeslagen wordt, zijn de capaciteitswaarden van hybride condensatoren het hoogst.

Tabel 1: Combinaties om de hybride condensator te vormen

type	+ elektrode	- elektrode	elektrolyt
composieten	EDLC	EDLC	geleidende polymeer / metaaloxide
asymmetrisch	geleidende polymeer	EDLC	geleidende polymeer
batterij-achtigen	metaaloxide	EDLC	metaaloxide

IV. IMPLEMENTATIE VAN EEN CONDENSATORBANK

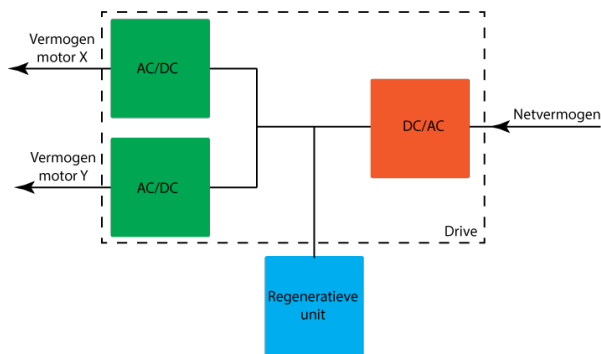


Figuur 2: Optimale implementatie van een energiebuffer

De condensatorbank kan geïntegreerd worden in de tussenkring van de snelheidsregelaar van een motor. Volgens onderzoek dat gevoerd werd aan de VUB [2], werkt de opstelling zoals weergegeven in figuur 2 het efficiëntst. Tussen de tussenkring en de condensatorbank is er een DC/DC-omvormer. Die omvormer wordt ten eerste geplaatst omdat de tussenkringspanning rond de 600 V schommelt. Supercaps kunnen die hoge spanning niet aan tenzij er een groot aantal in serie geschakeld wordt. Ten tweede bevat de omvormer een regeling zodat de energiebuffer optimaal op- en ontladen wordt.

V. SIMULATIEMODEL

In het energetisch model van een magazijnkraan wordt er een regeneratieve unit toegevoegd. De unit bestaat uit 3 delen voor 3 types simulaties. Er worden testen uitgevoerd waarbij AFE, remweerstand en een energiebuffer met supercaps met elkaar vergeleken kunnen worden. In figuur 3 wordt het elektrisch gedeelte van dat model weergegeven.



Figuur 3: Elektrisch gedeelte van het simulatiemodel

Bij AFE wordt er energie teruggestuurd naar het net indien er energie vrijkomt uit de applicatie. Bij een remweerstand wordt de vrijgekomen energie verbrand waarbij het dus omgezet wordt in warmte. Bij de energiebuffer met supercondensatoren wordt de buffer opgeladen tijdens het dalen en wordt die vervolgens terug ontladen wanneer het systeem energie nodig heeft. Als de buffer uitgeput is, wordt er energie onttrokken uit het net.

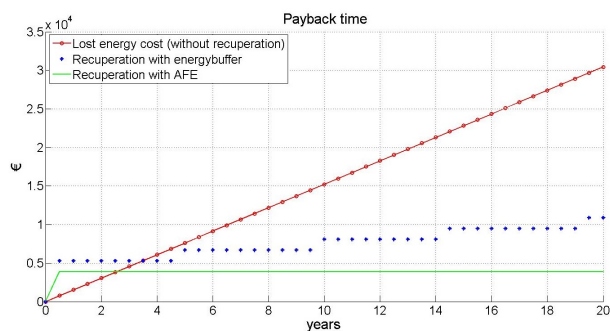
VI. MODELATIE

Aan de hand van het model worden de energiestromen van de 3 systemen geanalyseerd. Het traject dat gekozen werd, bestaat uit een val- en stijgbeweging van 10,08 m met een massa van 3450 kg. Uit die analyse volgt dat het rendement van de omvormers (DC/DC-omvormer voor de supercaps en DC/AC-omvormer voor de opstelling met AFE en de supercaps) de belangrijkste factor is om de energie-efficiëntie te bepalen. Het resultaat van de modelatie is dat een energiebuffer met supercondensatoren ongeveer 1% efficiënter werkt vergeleken met AFE.

VII. DIMENSIONERING

Aan de hand van het simulatiemodel kan het energieoverschot in DC-bus geanalyseerd worden. Met behulp van die gegevens, samen met de berekening van de levensduur van de componenten, kan de terugverdientijd berekend worden. Uit figuur 4 valt af te leiden dat een opstelling met AFE goedkoper is dan één met supercondensatoren. De supercaps moeten na verloop van tijd vervangen worden. Dat brengt een extra kost met zich mee, maar het is nog altijd beter vergeleken met het verbranden van de restenergie. Desalniettemin is de terugverdientijd kleiner dan 4 jaar.

Daarnaast kan ook berekend worden hoeveel opslag er voorzien moet worden. De benodigde capaciteit kan enkel berekend worden indien ook de minimale en de maximale spanning over de condensatorbank gekend is.



Figuur 4: Terugverdientijd met energierecuperatie

VIII. BESLUIT

Er kan besloten worden dat energieopslag via supercondensatoren efficiënter is vergeleken met AFE. Daartegenover staat wel dat de techniek van AFE goedkoper is en minder nazicht vraagt vergeleken met een buffer van supercondensatoren.

Een ander voordeel van supercaps is het opvangen van piekbelastingen van een applicatie bijvoorbeeld tijdens het accelereren. Dit zorgt ervoor dat de toevoerleidingen naar de applicatie minder belast worden en ze bijgevolg kleiner gedimensioneerd kunnen worden.

IX. SUGGESTIES VOOR VERDER ONDERZOEK

In deze thesis wordt er gefocust op een energiebuffer gebaseerd op supercondensatoren. Om de energieopslag te optimaliseren voor grotere opslaghoeveelheden, kan er onderzoek gevoerd worden naar combinatiesystemen waarbij batterijen, supercondensatoren en/of AFE gecombineerd kunnen worden. Als tweede item kan het verschil in verbruik tussen AFE en de energiebuffer meegerekend worden die nu verwaarloosd werd. Daarnaast kan de economische studie verfijnd worden door rekening te houden met de dimensionering van transformatoren en energiekabels. In de studie werd er van uitgegaan dat de omvormers met een constant rendement werken. Dit is echter niet zo. Het model kan nog uitgebreid worden met de isorendementscurve van de omvormers. Tot slot kan het effect van de inwendige weerstand van de supercap bekeken worden om een eventueel rendementsverlies in kaart te brengen.

REFERENTIES

- [1] M. Aslani, "Electrochemical double layer capacitors (supercapacitors)," 2012.
- [2] J. V. Mierlo, J.-M. Timmermans, G. Maggetto, and P. V. D. Bossche, "Peak power based fuel cell hybrid propulsion system," in *The World Electric Vehicle Association Journal*, pp. 54–61, WEVA, 2007.

Lijst met afkortingen

A

AFE Active Front End

E

ECP Electronically Conducting Polymers
EDLC Elektrolytische Dubbellaagscondensator
ESR Equivalent Series Resistance

S

SMES Supergeleidende Magnetische Energieopslag
SSA Specific Surface Area

Symbolen en fysische constantes

Symbolen

A	oppervlakte		$[m^2]$
C	capaciteit	farad	[F]
D, l	afstand	meter	[m]
E	energie	joule	[Ws of J]
E^0	normpotentiaal van het redoxkoppel	volt	[V]
I	stroom	ampère	[A]
J	inertie		$[kg \cdot m^2]$
K	temperatuur	kelvin	[K]
P	vermogen	watt	[P]
Q	lading	coulomb	[C]
R	weerstand	ohm	$[\Omega]$
T	koppel	Newtonmeter	[Nm]
U	spanning	volt	[V]
α	hoekversnelling		$[\frac{rad}{s^2}]$
ϵ_r	relatieve permittiviteit		
η	rendement		%
ω	omtreksnelheid		$\frac{rad}{s}$

Fysische constantes

$$\text{Elektrische veldconstante } \epsilon_o = 8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$$

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Bestemming van het project	1
1.2	Onderzoeksvraag	1
1.3	Overzicht	2
2	Supercaps: marktstudie en taxonomie	3
2.1	De klassieke condensator	3
2.1.1	Basisformules	4
2.1.2	Vervangingscapaciteit	4
2.2	Regeneratieve technologieën	5
2.2.1	Vliegwielen	5
2.2.2	SMES	5
2.2.3	Batterijen	5
2.2.4	Brandstofcel / <i>flow battery</i>	6
2.2.5	Active front end	7
2.2.6	Overzicht van de regeneratieve technologieën	7
2.2.7	Besluit	8
2.3	Supercondensatoren	10
2.3.1	Taxonomie van supercondensatoren	10
2.3.2	Elektrische dubbellaagscondensator	11
2.3.3	Pseudocondensatoren	15
2.3.4	Hybride condensatoren	16
2.3.5	Overzicht	17
2.3.6	Besluit	18
3	Supercaps: implementatie	19
3.1	Topologieën van de tussenkring	19
3.1.1	DC-omvormer op de DC-bus	19
3.1.2	DC-omvormer op het opslagsysteem	20
3.1.3	DC-omvormer op de DC-bus en het opslagsysteem	20
3.2	Onderzoek van de energieopslag	20
3.3	Invloed van een DC/DC-omvormer	21
3.4	Praktische problemen	23
3.5	Besluit	23
4	Theoretisch model	24
4.1	Bespreking simulatiemodel	24
4.2	Simulatie van een traject: verticale beweging	27
4.2.1	Remweerstand	29
4.2.2	Condensatorbank	30
4.2.3	AFE	31
4.2.4	Efficiëntieberekeningen	31
4.3	Simulatie van een traject: horizontale beweging	32
4.3.1	Remweerstand	33
4.3.2	Condensatorbank	33

4.3.3	AFE	34
4.3.4	Efficiëntieberekeningen	34
4.4	Conclusie	35
5	Validatie van het model	36
5.1	Het concept: energievrijgave	36
5.2	Definiëren van het traject	37
5.3	Praktische metingen	38
5.3.1	Meetopstelling	38
5.3.2	Meetgegevens	39
5.4	Vergelijking met het theoretisch model	40
5.4.1	Meetgegevens	40
5.5	Besluit	41
6	Dimensionering	42
6.1	Het economisch model	42
6.1.1	Condensatorbank	42
6.1.2	AFE	42
6.1.3	Terugverdientijd	42
6.2	Dimensioneren van supercaps	43
6.3	Besluit	44
7	Besluit	45
A	Redoxreacties	49
B	Code regeneratieve unit	50
C	Code economisch model	52

Lijst van tabellen

2.1	Overzicht van types <i>flow batteries</i>	6
2.2	Overzicht van de regeneratieve technologieën	9
2.3	Overzicht van de supercaps	17
3.1	Het primair verbruik bij de verschillende opstellingen	20
3.2	Overzicht beschikbare energiebuffers op de markt	23
5.1	Rendementen van de omvormers en de motor	39
5.2	Procentuele afwijking tussen het simulatiemodel en de testbank	40

Lijst van figuren

2.1	Opladen van een condensator	3
2.2	Ontladen van een condensator	4
2.3	De werking van een <i>flow battery</i> [1]	6
2.4	Het verschil tussen een diode- en een actieve gelijkrichting	7
2.5	Overzicht van de energiedichtheid van diverse componenten	7
2.6	Vergelijking tussen een condensator en een supercondensator (EDLC)	10
2.7	Taxonomie van supercaps	10
2.8	Principiële werking van een EDLC	11
2.9	Het equivalent schema van een EDLC	12
2.10	Werkingsprincipe van een redoxreactie [1]	15
2.11	Het op-/ontladen van een hybride condensator van het asymmetrische of het batterij-achtige type [2]	17
2.12	Evolutie van condensatoren	18
3.1	Het basismodel van de opstelling van een tussenkring	19
3.2	Tussenkring met omvormer op de DC-bus	19
3.3	Tussenkring met omvormer voor het opslagsysteem	20
3.4	Tussenkring met omvormer op de DC-bus en het opslagsysteem	20
3.5	Vergelijking van de invloed van een DC-converter	21
3.6	De invloed van de spanning op een DC/DC-omvormer	22
3.7	De invloed van de stroom een DC/DC-omvormer	22
4.1	Schematische voorstelling simulatiemodel	24
4.2	Overzicht van het elektrische gedeelte van het simulatiemodel	26
4.3	Snelheidsprofiel van de motoren	27
4.4	Energieprofiel van de verticale beweging	27
4.5	Energiedissipatie van de remweerstand	29
4.6	Energieprofiel van het net	29
4.7	Energie die naar de condensatorbank gaat	30
4.8	Energieprofiel van het net	30
4.9	Energieprofiel van het net	31
4.10	Snelheidsprofiel voor een horizontale beweging	32
4.11	Energieprofiel voor een horizontale beweging	32
4.12	Energieprofiel van het net	33
4.13	Energieprofiel van de condensatorbank	33
4.14	Energieprofiel van het net bij AFE	34
5.1	Koppel en snelheidsverloop bij een gecontroleerde vallende beweging	36
5.2	4 kwadrantenwerking van een motor [3]	37
5.3	Snelheidsprofiel van de gekozen beweging	37
5.4	Meetschema	38
5.5	Meetresultaten van de testbank	39
5.6	Vergelijking van het simulatiemodel met praktische metingen	40
6.1	Terugverdiertijd van supercondensatoren	43
6.2	Energie die naar de condensatorbank gaat	43

Lijst van figuren

A.1 Schematische weergave van de redoxreactie tussen koper en zink 49

1 Inleiding

Als een bedrijf meer concurrentiekracht wil, moeten zo weinig mogelijk indirecte kosten (of bedrijfskosten) gemaakt worden. Een manier om die kosten te drukken, bestaat erin de productie-eenheden zo energie-efficiënt mogelijk te laten functioneren.

In de industrie worden er veel elektromotoren gebruikt die ingezet kunnen worden bij toepassingen waarbij er constant versneld en afgeremd wordt, bijvoorbeeld in een automatisch magazijn. Een automatisch magazijn is een geautomatiseerde opslagplaats voor goederen. Daarbij worden kranen aangedreven om voorwerpen in een magazijn te plaatsen of eruit te halen.

Bij het afremmen verbrandt men meestal de overbodige energie via een remweerstand. Om die energie te recupereren, kan men die elektrisch opslaan in een energiebuffer gekoppeld op de tussenkring van de snelheidsregelaar. In het kader van deze masterproef zal de implementatie van supercondensatoren in een automatisch warenhuissysteem onderzocht worden.

1.1 Bestemming van het project

Egemin Automation is een bedrijf uit Antwerpen dat zich specialiseert in automatiseringsprojecten. Het bedrijf heeft als doel oplossingen te creëren voor de industrie die een competitief voordeel kunnen opleveren. In het kader van logistieke automatisering en strategisch energiebeheer kwam de vraag van Egemin Automation om een idee uit te werken om energie te recupereren in een automatisch warehouse. [4]

1.2 Onderzoeksvraag

Het doel van deze masterproef is het onderzoeken van supercondensatoren voor de opslag van remenergie in de tussenkring. Daarbij wordt geanalyseerd of supercondensatoren beter zijn dan Active Front End (AFE), waarbij de remenergie terug in het net geïnjecteerd wordt. De thesis bestaat uit 4 luiken.

- 1 Er wordt gestart met een marktonderzoek naar regeneratieve technologieën om de supercondensatoren te positioneren in de markt. Vervolgens wordt er ook in de literatuurstudie onderzocht hoe men de supercondensatoren het best in een tussenkring integreert.
- 2 In het tweede luik wordt er een theoretisch model uitgewerkt, waarbij er verschillende testbanken gesimuleerd worden. Ten eerste wordt er een analyse gemaakt om te kijken hoeveel energie er bespaard kan worden met een energiebuffer vergeleken met het verbranden van de remenergie. Ten tweede wordt er gekeken of supercondensatoren al dan niet beter zijn vergeleken met AFE.
- 3 Daarna worden die testen effectief uitgevoerd op een testbank (schaalmodel).
- 4 Tot slot wordt er via het theoretische model een dimensioneringsoefening uitgevoerd om supercondensatoren te kunnen dimensioneren. Hierbij wordt er gekeken welke parameters er van belang zijn bij een dimensionering. Daarnaast vindt er ook een economische studie plaats.

1.3 Overzicht

In hoofdstuk 2 wordt een literatuurstudie uitgevoerd naar de technische en economische eigenschappen van een supercondensator. Daarbij worden supercondensatoren vergeleken met andere regeneratieve technologieën en wordt de taxonomie van supercondensatoren besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 onderzocht hoe men de condensatorbank het best implementeert in een drive-opstelling.

Om een opstelling met supercondensatoren te kunnen vergelijken met AFE, wordt in hoofdstuk 4 gestart met de opbouw van een theoretisch model in MATLAB. Dat model bevat simulaties van 3 configuraties, namelijk een opstelling met AFE, remweerstand en supercondensatoren.

In hoofdstuk 5 wordt het simulatiemodel gevalideerd met behulp van een testopstelling. Met die conclusies wordt er in hoofdstuk 6 een dimensioneringsoefening aan gekoppeld samen met het economisch model.

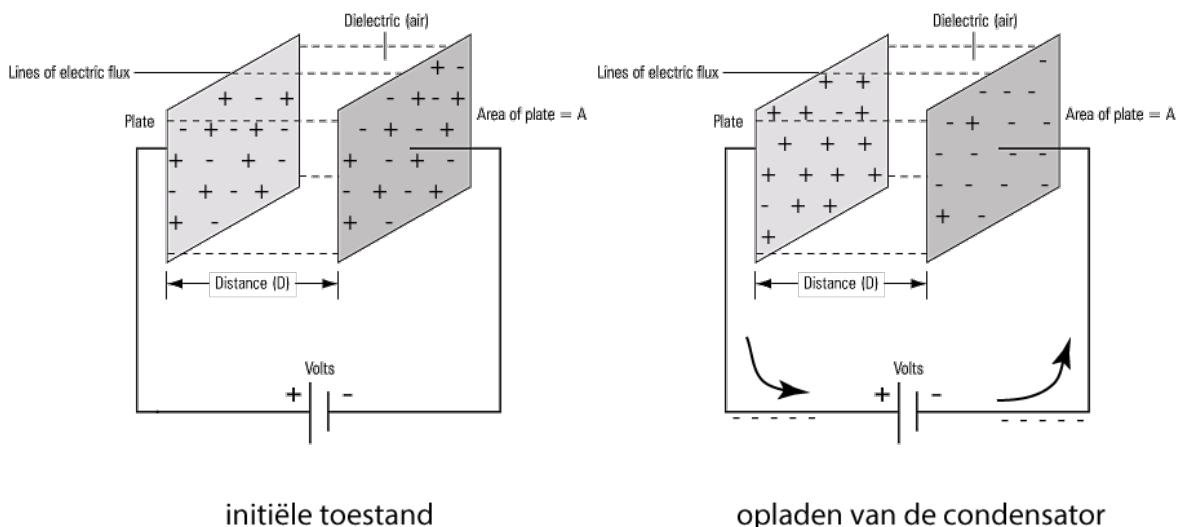
2 Supercaps: marktstudie en taxonomie

DC-remming, fluxremming en remmen via een remweerstand zijn technieken waarbij een motor tot stilstand wordt gebracht en er geen energie gerecupereerd wordt. Die energie gaat namelijk verloren in warmte. Om die energie te kunnen hergebruiken, zijn er verschillende technologieën beschikbaar. In dit hoofdstuk worden eerst een paar algemeenheden in verband met condensatoren toegelicht. Daarna worden de relevante regeneratieve technologieën besproken en met elkaar vergeleken om tot slot dieper in te gaan op de supercondensator. Daarbij wordt de taxonomie van de supercondensator gepresenteerd en wordt ieder type besproken.

2.1 De klassieke condensator

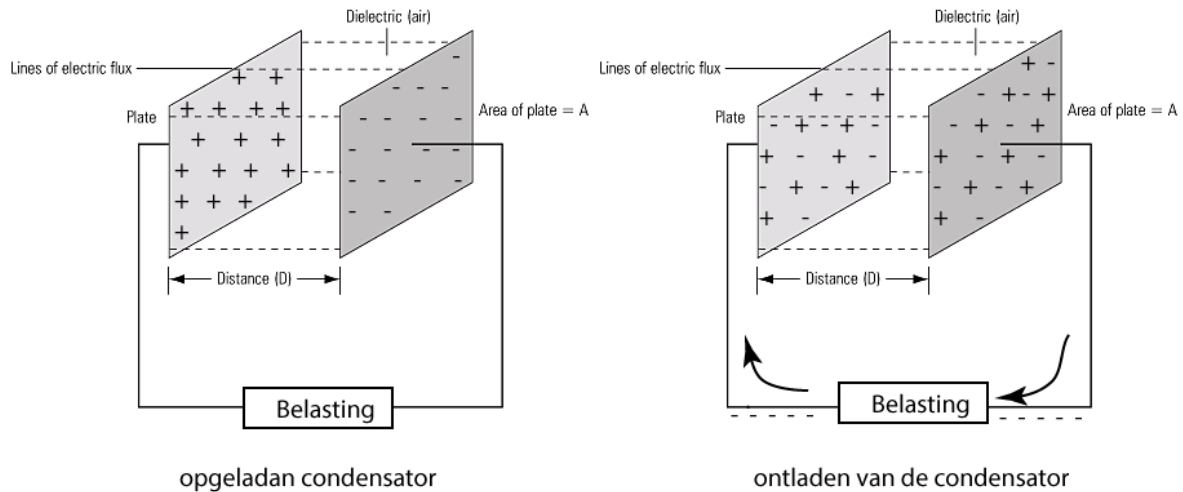
De elektrostatische condensator kan het eenvoudigst voorgesteld worden door 2 evenwijdige plaatjes (zie figuur 2.1). De plaatjes zijn geleiders die dicht bij elkaar staan en gescheiden worden door een isolator.

Als er een DC-spanning over de condensator wordt aangelegd, zal de lading zich gaan verspreiden zodat de elektroden (of plaatjes) positief respectievelijk negatief geladen worden. Daardoor ontstaat er een elektrisch veld waarbij er energie opgeslagen kan worden. Tussen de geleiders is er een isolator die ervoor moet zorgen dat de lekstroom minimaal is. De isolator, ook wel het diëlektricum genoemd, wordt gekenmerkt door de permittiviteit. Hoe groter die waarde, hoe groter de waarde van de capaciteit.



Figuur 2.1: Opladen van een condensator

Bij het ontladen van de condensator gebeurt net het omgekeerde (zie figuur 2.2). Hierbij zal de condensator zich gedragen als een bron. De elektronen verlaten de negatief geladen plaat en gaan door de belasting. Vervolgens komen de elektronen aan bij de positief geladen plaat. Hierdoor ontstaat er een interactie waarbij het elektrisch veld daalt.



Figuur 2.2: Ontladen van een condensator

2.1.1 Basisformules

De waarde van de capaciteit [C] van een condensator is recht evenredig met de lading [Q] ervan, maar omgekeerd evenredig met de spanning [U], wat weergegeven wordt in formule 2.1.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.1)$$

Diezelfde waarde kan ook berekend worden via formule 2.2, waarbij men de capaciteit berekent aan de hand van de fysische eigenschappen van de condensator. Daarbij is de capaciteit afhankelijk van het type diëlektricum [ϵ_r] alsook van de oppervlakte [A] van de geleiders en de afstand [D] ertussen.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} \quad (2.2)$$

De maximale energie die opgeslagen kan worden in een condensator wordt beschreven in formule 2.3 en is enkel afhankelijk van de waarde van de capaciteit en de spanning die over de condensator staat.

$$E_{opgeslagen} = \frac{1}{2} \cdot CU^2 \quad (2.3)$$

De hoeveelheid energie die uitgewisseld wordt met een condensator, bij een variatie van de spanning, kan berekend worden aan de hand van formule 2.4.

$$E_{uitwisseling} = \frac{1}{2} \cdot CU_{max}^2 - \frac{1}{2} \cdot CU_{min}^2 \quad (2.4)$$

2.1.2 Vervangingscapaciteit

Serieschakeling

In een serieschakeling van condensatoren is de lading in elke condensator constant. De totale spanning gelijk aan de som van de deelspanningen en de totale capaciteit is kleiner dan de kleinste capaciteit. Concreet wordt alles in de volgende formules nog eens weergegeven.

$$\frac{1}{C_{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (2.5)$$

$$Q_{tot} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

$$U_{tot} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Parallelschakeling

In een parallelschakeling van condensatoren zijn de spanningen over de condensatoren gelijk en mogen de capaciteitswaarden opgeteld worden om de totale capaciteitswaarde te kennen.

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i$$

$$U_{tot} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

Uit formule 2.1 volgt dan dat de totale lading gelijk is aan:

$$Q_{tot} = U \cdot \sum_{i=1}^n C_i$$

2.2 Regeneratieve technologieën

Energie recuperatie is vandaag de dag een hot topic. Daardoor zijn er talloze ideeën bedacht en de supercondensator is daar één van. Zo kan energie thermisch, mechanisch, chemisch of elektrisch opgeslagen worden. In wat volgt, wordt er een overzicht gegeven van de relevantste technieken voor energieopslag in een toepassing voor een automatisch warehouse.

2.2.1 Vliegwiel

Een vliegwiel stockeert mechanische energie in een ronddraaiende massa. Het wiel wordt 'opgeladen' met behulp van schakelende spoelen of met het versnellen van een elektromotor. Wanneer er energie nodig is, wordt de energie van het vliegwiel terug vrijgegeven aan de motor die als generator fungeert. Het wiel wordt voorzien van lagers en wordt meestal in een vacuüm geplaatst om wrijvingsverliezen te beperken. Die techniek wordt vooral gebruikt bij motoren in toepassingen waarbij deze aan een gelijkmatige snelheid moeten draaien of om de tijd te overbruggen om een noodgenerator op te starten bij een stroompanne. [1, 5]

2.2.2 Supergeleidende Magnetische Energieopslag (SMES)

Bij magnetische energieopslag wordt de energie opgeslagen onder de vorm van een magnetisch veld. De constructie bestaat uit een supergeleidend materiaal: een legering van niobium of titanium. Dat materiaal wordt opgebouwd in een donutvorm en wordt ondergebracht in een omgeving van gekoeld helium of stikstof dat zich in de vloeistoffase (± 4.5 K) bevindt.

De DC-stroom die in de spoel vloeit, ondervindt nagenoeg geen weerstand in de supergeleider, waardoor het rendement hoog is vergeleken met andere regeneratieve technologieën. Het nadeel aan de technologie is dat ze nog in de kinderschoenen staat. Samen met het feit dat er veel energie nodig is om de geleiders te koelen, zorgt dat ervoor dat de prijs hoog is. Daartegenover staat dat de energie die opgeslagen kan worden in een SMES systeem groot is. [1]

2.2.3 Batterijen

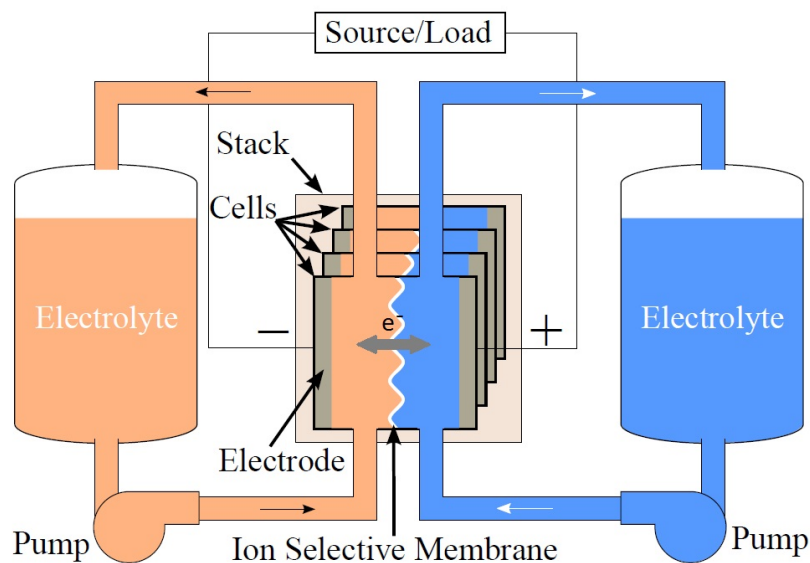
Batterijen zijn de oudste en de meest bekende vorm van energieopslag, waarbij de energie chemisch opgeslagen wordt met behulp van redoxreacties (voor de werking van redoxreacties, zie appendix A). Het proces is reversibel, waardoor de batterijen op- en ontladbaar zijn. Dat batterijen op grote schaal niet doorgebroken zijn, heeft te maken met het feit dat een batterij een lage energiedichtheid, kleine capaciteit, een relatief hoge reactietijd, hoge kosten en een korte aantal laadcyclussen heeft. Daarnaast is de ecologische impact van een batterij groot. Niettegenstaande de vele nadelen, gebeurt er nog veel onderzoek naar batterijen. Zo bestaan er verschillende types zoals nikkel-cadmium, lood, natriumsulfide en zout-nikkel. Recenter is de ontwikkeling van lithium-ionbatterijen. [5]

2.2.4 Brandstofcel / flow battery

Een brandstofcel maakt gebruik van een redoxreactie om chemische energie om te zetten naar elektrische. Er bestaan verschillende types brandstofcellen, op basis van diverse chemische stoffen: waterstof, methanol, carbonaten, oxiden en metaal-lucht. Vergeleken met een traditionele batterij moet er bij een brandstofcel een externe energietoevoer zijn van reactanten, wat je niet hebt bij een batterij. [5]

Brandstofcellen zijn misschien wel nuttig, maar een toepassing om energie te recupereren is niet mogelijk omwille van de noodzakelijke reagentia. Een variant op de brandstofcel is een *flow battery* (een vloeï- of stroombatterij) die wel in staat is om energie te recupereren. Het grootste verschil tussen een brandstofcel en een *flow battery* zit hem in het feit dat de reactie reversibel is. Het verschil tussen een *flow battery* en een batterij is dat de reagentia een batterij in een klein gesloten systeem zit, terwijl bij een *flow battery* het medium rondgepompt wordt.

In de cellen (zie figuur 2.3) vindt er een redoxreactie plaats waarbij de oxidatietrappen variëren (zie appendix A). In het reactorvat zijn de twee elektrolytoplossingen gescheiden door een semi-permeabele membraan waar enkel elektronen doorgelaten kunnen worden. Door de reactie ontstaat er langs één kant een overschot aan elektronen. Die worden via een elektrode afgevoerd, waardoor er een stroom ontstaat. In de cel kan de reactie niet oneindig lang doorgaan. Daarom moet de vloeistof ververscht worden, waarvoor er een pomp en een tank aanwezig moeten zijn. Omdat het proces reversibel is, kan de reactie ook omgekeerd gebeuren. De 'batterij' kan dus ook opnieuw opgeladen kan worden. In tabel 2.1 wordt een klein overzicht gegeven van de bestaande types. [5]



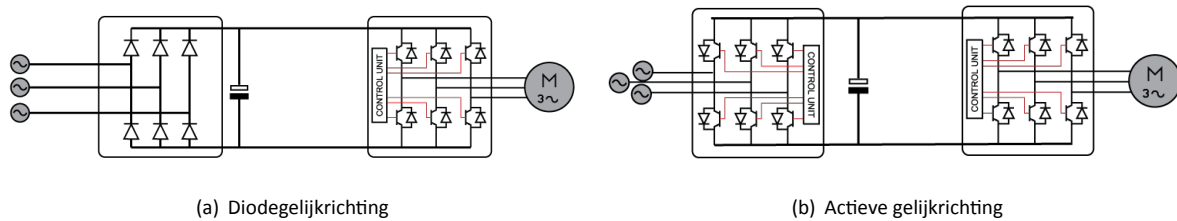
Figuur 2.3: De werking van een *flow battery* [1]

Tabel 2.1: Overzicht van types *flow batteries*

Type	Spanning V	Rendement %	Capaciteit MWh	Schaal MW
Vanadium	1.4-1.6	85	5	3
Zinkbromide	1.8	75	4	1
Polysulfide bromide	1.5	75	120	15

2.2.5 Active front end

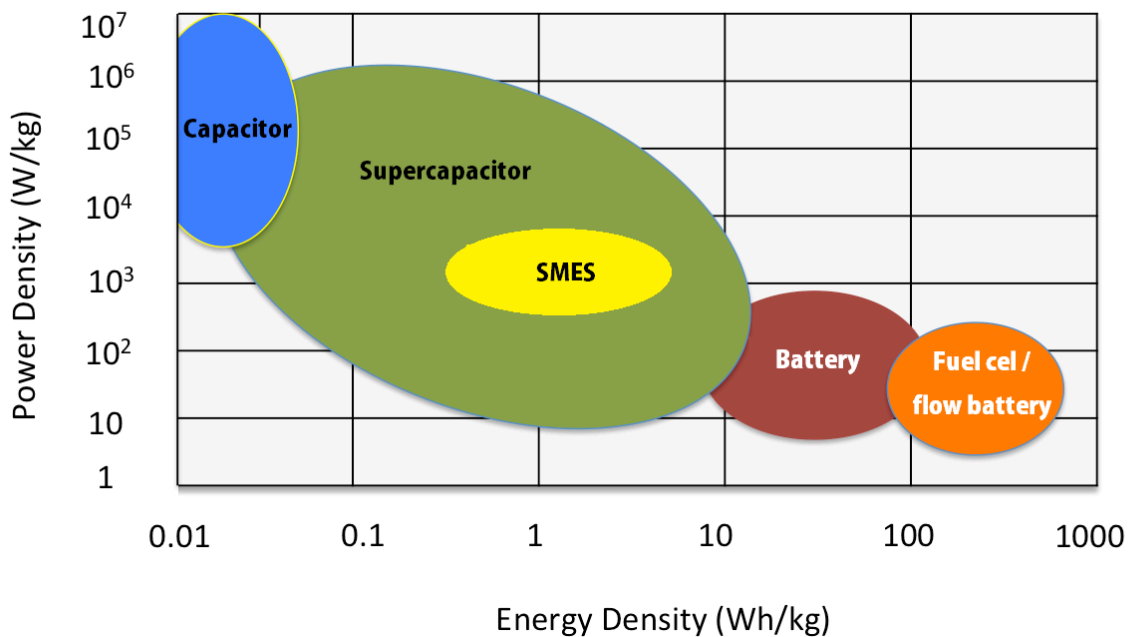
In tegenstelling tot andere technologieën slaat AFE de energie niet op, maar injecteert ze die terug in het net. Dat kan omdat de klassieke diodebrug in een drive vervangen wordt door een bidirectionele IGBT-brug. Het nadeel van die techniek is dat het net of de transformator overbelast kan worden bij grotere vermogens, zoals in het geval van een automatisch warehouse. Het rendement van die technologie ligt rond de 96%, waarbij de verliezen te wijten zijn aan harmonischen en schakelverliezen. [6] Op figuur 2.4(b) wordt een actieve gelijkrichting weergegeven die gebruikt wordt bij AFE. Die opstelling laat toe om in 4 kwadranten te kunnen werken. Op figuur 2.4(a) wordt een diodegelijkrichting weergegeven. Omdat er in een diodegelijkrichting geen vermogenselektronica aanwezig is, ligt het rendement rond de 98%.



Figuur 2.4: Het verschil tussen een diode- en een actieve gelijkrichting

2.2.6 Overzicht van de regeneratieve technologieën

In tabel 2.2 is er een algemeen overzicht weergegeven van de meest significante eigenschappen van de regeneratieve technologieën. [5, 7] In figuur 2.5 wordt een ragoneplot (gebaseerd op [8]) weergegeven van de technieken die gebruikt worden om energie elektrisch op te slaan.



Figuur 2.5: Overzicht van de energiedichtheid van diverse componenten

Condensatoren versus batterijen

Condensatoren hebben een kortere reactietijd en worden dus sneller opgeladen in vergelijking met conventionele batterijen. Ook kunnen condensatoren meer laadcyclussen aan zonder te moeten inboeten aan de efficiëntie. Door die snelle reactietijden zijn condensatoren toepasbaar om piekbelastingen op te vangen. Anderzijds hebben traditionele batterijen een grotere energiedichtheid, waardoor ze hun toepassing vinden in energieopslag voor een langere periode. [5] De intentie van supercondensatoren is om de energie-inhoud van de batterij te combineren met de snelheid van de condensator. De combinatie van die eigenschappen zorgt ervoor dat supercondensatoren geschikt zijn voor dynamische energieopslag.

Supercondensatoren versus AFE

Bij actieve gelijkrichting wordt de energie teruggestuurd naar het net. Bij het terugsturen kunnen er problemen optreden inzake *power quality*. Daarnaast kan men geconfronteerd worden met het feit dat een aanwezige transformator de energiestroom niet aankan, omdat hij daartoe niet gedimensioneerd is. Het grootste voordeel van AFE is het rendement die rond de 96% ligt.

Bij een variërende stroomvraag moeten de elektriciteitskabels groot genoeg gedimensioneerd worden om aan de vraag te kunnen voldoen. Bij het gebruik van supercondensatoren kan de kabelsectie kleiner genomen worden, omdat die de piekbelasting opvangen. Meestal is het beschikbare volume op een wagentje van een magazijnkraan niet zo groot, waardoor de supercondensatoren meestal niet op de wagen geplaatst kunnen worden.

Deze vergelijking zal in latere hoofdstukken uitgebreider aan bod komen om te kunnen besluiten wat het efficiëntst is. Daarnaast zal er ook een kostenanalyse uitgevoerd worden omtrent beide technieken.

Toekomst

De *flow battery* wordt nog volop ontwikkeld en kan dus voorlopig nog niet gebruikt worden in de testopstelling voor een automatisch magazijn. Eens de technologie op punt staat, kan die een revolutie veroorzaken inzake energieopslag¹. Om flow batteries te kunnen gebruiken, zal er een hybride systeem moeten komen waarbij supercondensatoren hun dienst kunnen bewijzen om de piekbelasting op te vangen.

2.2.7 Besluit

Uit de marktstudie kan besloten worden dat supercondensatoren een goede oplossing kan zijn voor het opvangen van piekbelastingen, al ondervindt die concurrentie van AFE. Andere besproken technieken kunnen toegepast worden in een systeem voor een automatisch warehouse, maar dan moet er rekening gehouden worden met bepaalde negatieve eigenschappen.

Zo heeft een vliegwiel een inertie, waardoor de reactiesnelheid in het gedrang kan komen, maar neemt het ook een bepaald volume in beslag die soms niet beschikbaar is. *Flow batteries* zijn nog onvoldoende ontwikkeld om op grote schaal toe te passen in de industrie. SMES heeft dan weer als nadeel dat het een groot volume in beslag neemt en een grote investeringskost met zich mee draagt. Het opslaan van energie in batterijen heeft als nadeel dat de reactiesnelheid niet voldoet aan de normen en vroegtijdige slijtagekenmerken vertoont bij piekbelastingen. En tot slot is de opslagcapaciteit van condensatoren te laag.

¹Deze techniek wordt ontwikkeld in de auto-industrie, maar zal ook kunnen functioneren in een automatisch magazijn <http://www.nanoflowcell.com/en>

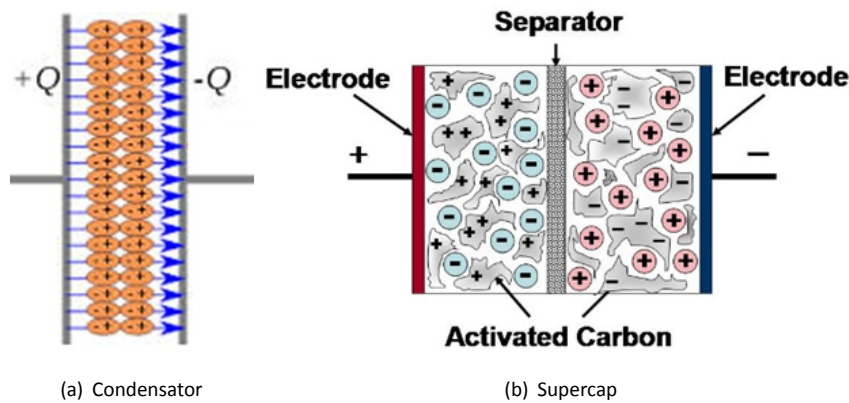
Tabel 2.2: Overzicht van de regeneratieve technologieën

Type	η %	Energie- dichtheid $\frac{Wh}{kg}$	Capaciteit MWh	Vermogen MW	Tijdspanne/ reactietijd	Aantal cyclussen	Zelfontlading $\frac{\%energie}{dag}$	installatie kost $\frac{\$}{kWh}$	Operationele kost $\frac{\$}{kWh}$
Flow battery	65 - 85	10-50	< 120	< 100	ms	> 2 000 - 14 000	<0.2	180 - 250	0.06 - 0.2
Vliegwiel	90 - 95	10 - 30	0.025	< 0.1	ms - 15 min.	> 20 000	100	300 - 5000	0.05 - 0.4
AFE	97	/	/	/	/	/	/	± 210 *	/
SMES	90 - 98	0.5 - 5	< 80	< 10	ms - 8 sec.	> 100 000	10 - 15	10 000	0.4 - 1.7
Batterijen	60 - 98	30 - 240	< 343	< 100	s - uur	500 - 10 000	0.1 - 0.6	300 - 5000	0.1 - 1
Condensator	60 - 70	0.05 - 5	$10 * 10^{-6}$	< 0.05	ms - uur	± 50 000	40	500 - 100	0.03 - 0.4
Supercaps	90 - 98	2.5 - 15	$500 * 10^{-6}$	< 0.3	ms - uur	> 1 000 000	20 - 40	8200	0.03 - 0.4

eenheid: $\frac{\$}{kWh}$
Data uit 2011.

2.3 Supercondensatoren

Supercondensatoren vormen de brug tussen de gewone condensatoren en de batterijen (zie figuur 2.5). Het verschil tussen een supercap en een gewone condensator zit hem in het feit dat supercaps een veel grotere elektrode-oppervlakte hebben en dat de elektrolyten aangepast zijn [9] (figuur 2.6). Anders gezegd, zijn de fysische eigenschappen (zie formule 2.2) geoptimaliseerd.

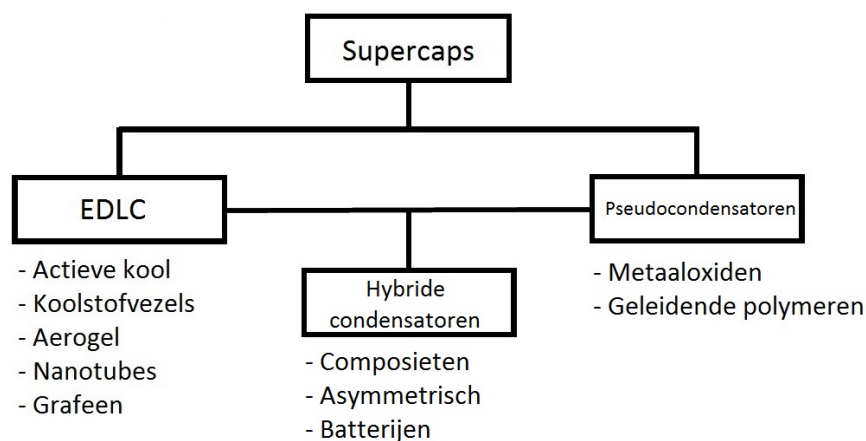


Figuur 2.6: Vergelijking tussen een condensator en een supercondensator (EDLC)

2.3.1 Taxonomie van supercondensatoren

Supercondensatoren kunnen opgedeeld worden in 3 categorieën: de Elektrolytische Dubbellaagscondensator (EDLC), pseudocondensatoren en de hybride condensator. EDLC's werken op dezelfde manier als de klassieke condensator, terwijl pseudocondensatoren gebruik maken van redoxreacties. Een hybride condensator is een combinatie van de twee. [9]

In dit deel wordt er dieper ingegaan op de verschillende types supercondensatoren. In figuur 2.7 wordt de taxonomie ervan weergegeven.



Figuur 2.7: Taxonomie van supercaps

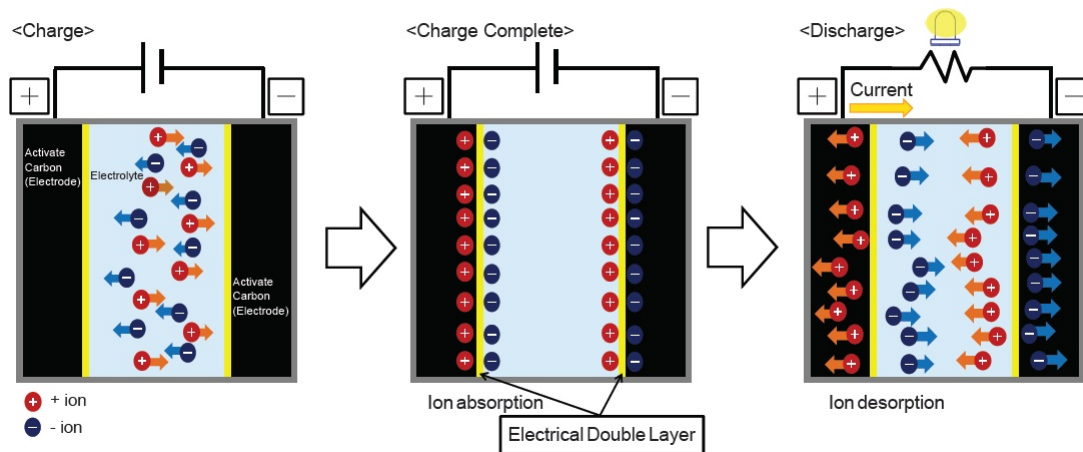
2.3.2 Elektrische dubbellaagscondensator

In een EDLC worden er 2 eigenschappen van een condensator verbeterd. Enerzijds wordt het diëlektricum aangepast, zodat de permittiviteit verhoogt. Anderzijds worden de elektroden geoptimaliseerd zodat het contactoppervlak groter wordt (dit kan gestaafd worden aan de hand van formule 2.2). In wat volgt, worden die elementen naderhand besproken.

Aanpassen van het diëlektricum

In een klassieke condensator is een isolator aanwezig die de scheiding voorziet van de twee elektroden. Als dat medium dipolen bevat, ontstaat er een tegengesteld elektrisch veld, dat op zijn beurt zorgt dat de capaciteit van de condensator verhoogt².

Men kan nog een stap verder gaan door gebruik maken van elektrolyten in plaats van dipolen. Door een spanning over de condensator aan te leggen, wordt de ene elektrode positief geladen en de ander negatief. De lading van de elektroden zorgt ervoor dat de ionen in de elektrolytoplossing aangetrokken worden. Eens de condensator opgeladen is (en de ionen dus allemaal aangetrokken zijn door een elektrode), kan er vastgesteld worden dat er een dubbele condensator ontstaat nabij de wanden van de elektroden. In figuur 2.8 wordt het principe van open ontladen van een EDLC weergegeven. [10]



Opmerking: de gele rand vormt het scheidingsoppervlak van de elektroden met de elektrolyten.

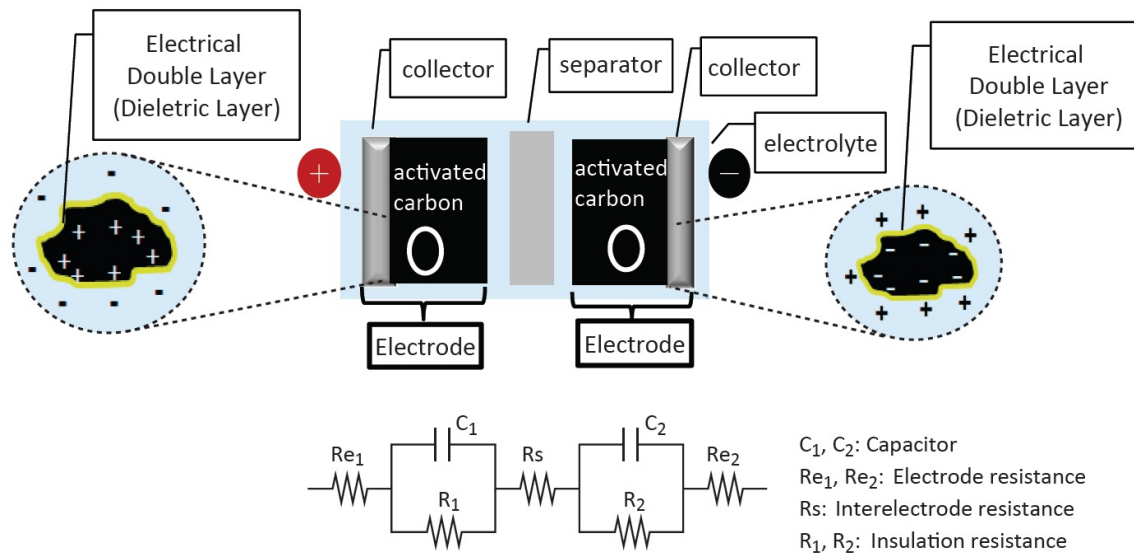
Figuur 2.8: Principiële werking van een EDLC

De elektroden zitten gedrenkt in een elektrolytoplossing, waardoor er een scheiding moet komen. Die scheiding is noodzakelijk, want ze moet ervoor zorgen dat de elektroden niet met elkaar in contact kunnen komen (figuur 2.9 bovenaan). Indien er geen wand zou zijn, kan er een kortsluiting optreden, waardoor de condensator zijn opslagmogelijkheid verliest. Om elektronentransport toe te laten, bestaat de wand uit een semi-permeabel membraan dat enkel de ionen doorlaat.

Onderaan figuur 2.9 wordt het equivalent schema afgebeeld van een EDLC. De elektroden vormen een collector voor de ionen. Het schema bestaat uit een niet-ideale condensator (C_1 met R_1 en C_2 met R_2) en een overgangswaerstand tussen het elektrodemateriaal en de connector met de geleider (Re_1 en Re_2). Tot slot is er in het midden een separator (R_s). Die vormt een serieweerstand omdat de ionen een weerstand ondervinden bij de verplaatsing door het membraan.

Omdat de deelcondensatoren in serie staan, volgt uit formule 2.5 dat de totale waarde van de capaciteit lager is dan een afzonderlijke entiteit. Maar omdat de waarde van de capaciteit zodanig groot is, is die nog altijd groter vergeleken met een elektrostatische condensator.

² $U = \int \vec{E} d\vec{l}$. Als \vec{E} daalt, daalt U en volgt uit formule 2.1 dat de waarde voor C moet stijgen.



Figuur 2.9: Het equivalent schema van een EDLC

De keuze voor een elektrolytoplossing bestaat uit het vinden van een compromis tussen de capaciteit, de equivalente impedantie (Equivalent Series Resistance (ESR)) en de spanning. De operationele spanning van supercondensatoren is meestal afhankelijk van de stabiliteit van de elektrolyt.

Waterige elektrolyten, zoals zuren (bijvoorbeeld H_2SO_4) en alkaliën (bijvoorbeeld KOH) hebben onder andere het voordeel dat ze goedkoop zijn. Daarnaast hebben ze een hoge ionische geleidbaarheid en een grotere capaciteit in vergelijking met andere, niet-waterige oplossingen. Dat komt omdat het oplosmiddel, water, een hogere diëlektrische constante heeft. Anderzijds hebben waterige elektrolyten het nadeel dat ze werken bij een lage spanning ($\pm 1.23V$).

Niet-waterige elektrolyten zijn ontwikkeld om te werken op een hogere spanning ($> 2.5V$). Aangezien de specifieke energie van supercondensator evenredig is met het kwadraat van de spanning (formule 2.3), zijn de niet-waterige elektrolyten veelvuldig gebruikt in applicaties die een hogere energie-inhoud vereisen. Voorbeelden van niet-waterige elektrolyten zijn mengsels van propyleencarbonaat of acetonitril (die opgeloste ammoniumzouten bevatten). De elektrolyten hebben als grootste nadeel dat hun elektrische weerstand een hogere waarde heeft, waardoor dat zijn weerslag heeft op het vermogen. [9--11]

Ook de grootte van de ionen speelt een rol. De ionen moeten zich in de poriën van de elektrode wringen. Als de ionen echter te groot zijn, kunnen ze niet diep genoeg indringen. Daardoor verkleint het oppervlaktecontact en zo ook de capaciteit. Een oplossing bestaat erin de structuur van de elektroden aan te passen.

Aanpassen van de oppervlakte

Een andere manier om de capaciteit te verhogen, bestaat erin het contactoppervlak te vergroten. De elektroden worden vervaardigd door poeders, micro- of nanostructuren van koolstof, waardoor het oppervlak (en de capaciteit) significant toeneemt. [10] De verschillende types worden kort besproken in de volgende paragrafen. Het kan gebeuren dat de poriën niet bereikbaar of verstopt zijn, waardoor de nuttige oppervlakte beperkt wordt. Om dat op te lossen, gaat men de condensatoren activeren. Het activatieproces bestaat uit het verhitten en het toepassen van een gasificatie op de elektroden. Een andere manier om de elektroden te activeren bestaat erin ze te verwarmen en te dehydrateren. [11]

Actieve kool De combinatie van een lage prijs en een grote graad van poreusheid, maakt van actieve kool een van de meest voorkomende elektrodes bij een EDLC. Door de complexe structuur ontstaan er poriën van verschillende grootte. Die zorgen voor een goede doorlaatbaarheid van het diëlectricum, maar de capaciteitswaarde is niet evenredig met het oppervlak van de kool. Dat valt te verklaren door het feit dat sommige poriën te klein zijn en de ionen er bijgevolg niet door kunnen. [9] Onderzoekers hebben daarom een gulden middenweg gezocht tussen de grootte van de gaten en de energiedichtheid van de stof in functie van het diëlectricum. Er werd ook rekening gehouden met het feit dat als een ion theoretisch door een porie kan, dat niet noodzakelijk wil zeggen dat het ion er in de praktijk ook in zal gaan. In de smalle gaten neemt de mobiliteit van de ionen merkbaar af, wat negatief is voor de weerstand van het systeem. Dat is van belang bij de reactiesnelheid van het systeem. In onderstaand voorbeeld werd een test gedaan met ionen met een grootte van ongeveer 0.5 nm. [12]

Poriën groter dan 1.1 nm (vormen 25% van het oppervlak) zijn toegankelijk in minder dan 0.1 s, maar gaten rond de 0.6 nm (die 70% van het oppervlak vertegenwoordigen) kunnen pas bereikt worden na 5 seconden.

Om de prestaties van actief kool te verbeteren, worden ze gemengd met zwarte koolstof of grafiet om een betere energie-inhoud te bekomen³. Die elementen kunnen tot 40% van het totale volume van de elektrode bevatten. De beperking op het toevoegen van de additieven valt te verklaren doordat die de poriën opvullen. Daardoor neemt de mobiliteit van de elektrolyten sterk af. [11]

Koolstofvezels Vergeleken met elektroden in poedervorm, bieden vezels de voordelen van een groot oppervlaktegebied, een goede elektrische geleidbaarheid en een goede insluiting van de elektrode. Bij koolstofvezels ligt het poreus gedeelte hoofdzakelijk aan de oppervlakte. Dat zorgt voor een goede bereikbaarheid van actieve delen van de vezel. Die eigenschap maakt de vezel aantrekkelijk als elektrodemateriaal, door de hoge graad van adsorptie.

Een nadeel is dat de kosten in het algemeen hoger zijn. Een ander negatief punt is dat de vezels, ondanks de lage elektrische weerstand, een grote contactweerstand hebben met de elektrode. Een oplossing daarvoor kan zijn dat men de vezels voorziet van een metaalcoating. [11]

Aerogel De op koolstof gebaseerde aerogels bestaan uit een driedimensionaal mesoporeus⁴ netwerk van nanopartikels. Die worden geproduceerd door een chemische reactie van organische stoffen. Voor die reactie is er een katalysator nodig die tevens de grootte van de poriën bepaalt. De voordelen van aerogels zijn een groot oppervlak en een lage dichtheid. [12] Omdat de stof een lage dichtheid heeft, is de inwendige weerstand van het materiaal kleiner, waardoor de verliezen dalen. Daardoor stijgt de vermogensdichtheid en daarbij ook de capaciteit. [9]

Nanotubes Nanobuisjes hebben een veel kleinere afmeting vergeleken met bovenstaande types. Door hun unieke vorm zijn de poriën met elkaar verbonden. Daardoor verspreidt de lading zich gemakkelijker over het gehele oppervlak. Dat zorgt er dan weer voor dat het oppervlaktecontact efficiënter gebruikt wordt in vergelijking met actieve kool. De structuur zorgt er ook voor dat de inwendige weerstand kleiner wordt en dat impliceert een hogere energiedichtheid. [9]

Grafeen In plaats van een koolstoflaag op te rollen zoals bij nanobuisjes, kan je een 1-atomige laag uitgestrekt laten liggen, waardoor je een elektrode krijgt op basis van grafeen. Het voordeel van dat type is de grote cyclusstabiliteit en de energiedichtheid. Omdat de techniek nog in de kinderschoenen staat, zijn de waarden van de specifieke capaciteit en de energiedichtheid nog laag (vergeleken met de pseudocondensatoren). [13] Grafeen werd nog niet zo lang geleden ontdekt. Door zijn unieke fysische eigenschappen gebeurt er op dit moment veel onderzoek naar het materiaal van de toekomst.

³Carbon blacks hebben een lage dichtheid en een hoge bindingsgraad.

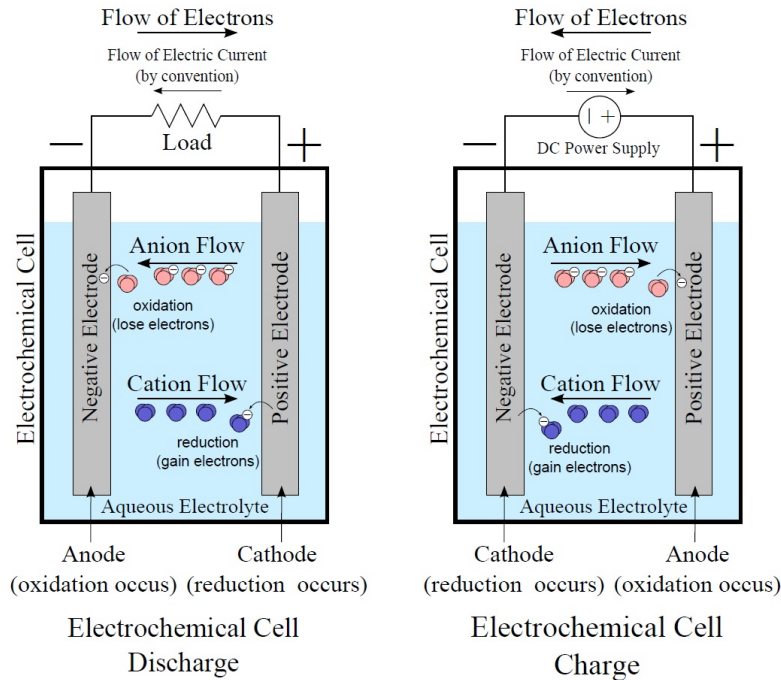
⁴Een mesoporeus materiaal is een stof met poriën van tussen de 2 en de 50 nm .

Het gebruik van koolstof

De elektroden die gebruikt worden in een EDLC zijn allemaal koolstofmaterialen. Koolstof is een interessant element, want het zorgt voor een goede geleidbaarheid (elektrisch alsook thermisch), is goedkoop en bezit een goede oppervlakverdeling en porositeit in de 3 dimensies. [11, 12]

2.3.3 Pseudocondensatoren

Pseudocondensatoren of redoxcondensatoren maken gebruik van chemische reacties, redoxreacties, om energie te bufferen. Een pseudocondensator heeft 2 grote voordelen ten opzichte van een EDLC: zowel de capaciteitswaarde als de energie-inhoud is groter. [9, 11].



Figuur 2.10: Werkingsprincipe van een redoxreactie [1]

Figuur 2.10 toont een redoxreactie⁵ die eveneens gebruikt wordt bij een klassieke batterij. Het verschil tussen pseudocondensatoren en batterijen is moeilijk af te baken. Criteria die gebruikt worden, liggen in het gebied van de specifieke energie. Er wordt verondersteld dat een supercap sneller energie uitwisselt, maar tevens een lagere energie-inhoud bezit. [14] Er bestaan 2 soorten pseudocondensatoren: de geleidende polymeren en de metaaloxiden.

Geleidende polymeren

Electronically Conducting Polymers (ECP) hebben een redelijk grote capaciteitswaarde en geleidbaarheid, maar wanneer men dat type condensator wil opladen en er dus een geforceerde redoxreactie optreedt (elektronen toevoegen, n-doteren en elektronen weghalen, p-doteren), ontstaat er een instabiliteit bij de negatief gedoteerde polymeren. Omdat ze slecht bestand zijn tegen de interne mechanische belasting (lees: krachtwerking) daalt het rendement van de n-gedoteerde polymeren. Door de verminderde stabiliteit tijdens de reactie worden ze vandaag de dag nauwelijks verder ontwikkeld. [9] De meest gebruikte types zijn aminobenzeen, polypyrrolen en derivaten van polythiofeen. [11]

Metaaloxiden

Metalen hebben een goede geleidbaarheid. Het meest in het oog springend element is ruthenium oxide (RuO_2). De capaciteit van ruthenium oxide wordt verkregen door een variatie van de protonen in zijn amorfe structuur. In de waterhoudende vorm is de capaciteit groter vergeleken met een EDLC en geleidende polymeren. Bovendien heeft een opstelling met RuO_2 een lagere inwendige weerstand vergeleken met andere elektrodematerialen. Het grote minpunt aan de techniek is het prijskaartje dat eraan verbonden is. [9]

⁵Het werkingsprincipe van een redoxreactie kan teruggevonden worden in Appendix A.

2.3.4 Hybride condensatoren

Een hybride condensator combineert de eigenschappen van een EDLC met die van een pseudocondensator om de prestaties te verbeteren. Met die combinatie wordt de energie-inhoud en de energiedichtheid opgekrikt zonder in te boeten aan stabiliteit, wat wel een probleem is bij een redoxcondensator.

Composieten

Bij een hybride condensator bestaan de elektroden uit koolstofhoudende materialen (zoals bij een EDLC, meestal op basis van nanotubes) met daarin een elektrolyt op basis van geleidende polymeren of metaaloxiden (zoals bij een redoxcondensator). Door die structuur bevat dat type zowel een fysische als chemische lading, waardoor de opslagcapaciteit stijgt. Verschillende experimenten hebben aangetoond dat die combinatie in staat is om grotere capaciteit te leveren vergeleken met de 2 aparte entiteiten. [9]

Asymmetrisch

In tegenstelling tot de composieten maken de asymmetrische hybriden gebruik van 2 verschillende types elektroden. Eén elektrode bestaat uit een koolstofmateriaal (volgens het principe van EDLC) en de andere elektrode werkt volgens het principe van een geleidende polymeer (zie sectie 2.3.3). Die elektrode bepaalt de keuze van de elektrolyt.

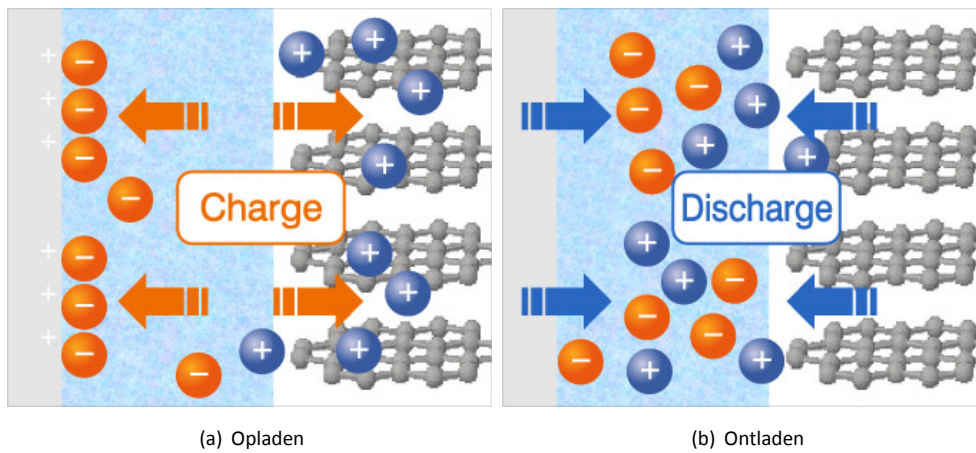
Pseudocondensatoren van het type met geleidende polymeren ondervinden een probleem met de stabiliteit van een negatief geladen polymeer. In de constructie van die hybride wordt dat omzeild door ervoor te zorgen dat de elektrode met de polymeer positief geladen wordt. De elektrode op basis van het EDLC-principe wordt vervolgens negatief geladen. [9]

Batterijtypes

De batterij-achtigen zijn een buitenbeentje betreffende supercondensatoren. Dat type leunt het meest aan bij batterijen, waardoor het verschil tussen een supercap en een batterij heel klein wordt.

Net als asymmetrische hybriden, bestaan batterij-achtige hybriden uit twee verschillende types elektroden. Het verschil is dan dat de positieve elektrode bestaat uit een metaaloxide in plaats van een polymeer. Onderzoek heeft zich gericht op het gebruik van nikkel-hydroxide, looddioxide en vooral op LTO ($Li_4Ti_5O_{12}$, beter bekend als de Li-iontechnologie) als elektrodemateriaal voor de positieve elektrode. Ondanks de veelbelovende resultaten, is er in het algemeen consensus over het feit dat er meer onderzoek nodig zal zijn om het potentieel van de batterij-achtige hybriden te maximaliseren. [9]

In figuur 2.11 wordt het op- en ontladprincipe weergegeven. Aan de linkerkant van de figuur wordt de koolstofelektrode (grijze zone) weergegeven, aan de rechterkant zie je de metaaloxide-elektrode en in het midden heb je de elektrolytoplossing (lichtblauw).



Figuur 2.11: Het op-/ontladen van een hybride condensator van het asymmetrische of het batterij-achtige type [2]

2.3.5 Overzicht

In tabel 2.3 wordt er een algemeen overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen van de types supercaps. [9, 11, 13]

Tabel 2.3: Overzicht van de supercaps

type	ESR	energie-inhoud	energie-dichtheid	aantal cycli	cyclus-stabiliteit	prijs
EDLC	Actieve kool	---	+	++	++	+++
	Koolstofvezel	---	+	++	++	+
	Aerogel	--	++	+	++	+
	Nanotubes	-	+++	++	++	+
	Grafeen	-	+++	+++	++	+++
Pseudocaps	Metaaloxiden	-	+++	+++	--	++
	Polymeren	-	++	++	--	---
Hybride	Composieten	-	+++	+++	+++	++
	Asymmetrisch	-	+++	+++	+++	+
	Batterijen	-	+++	+++	+++	++

+++ : positief resultaat

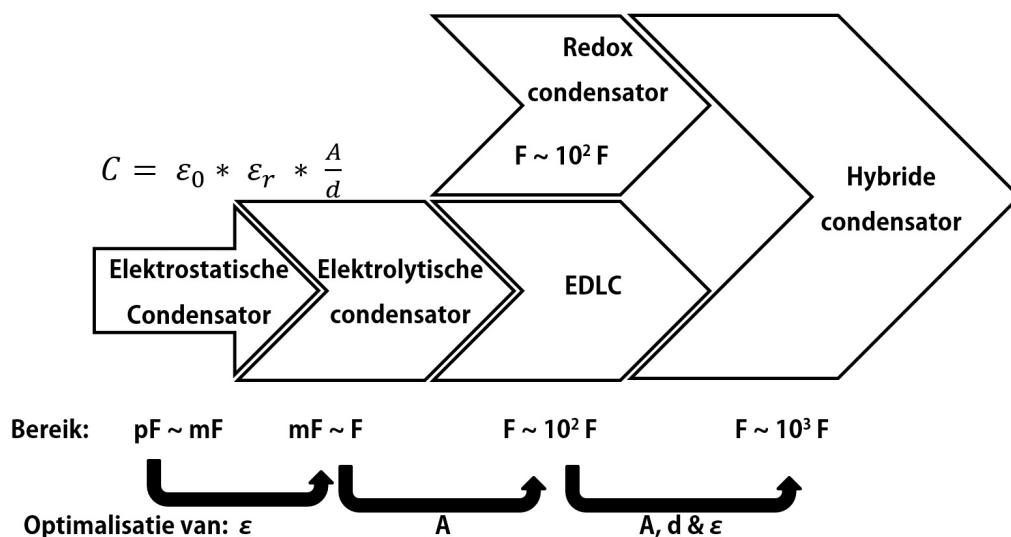
--- : negatief resultaat

2.3.6 Besluit

Door hun flexibiliteit kunnen supercondensatoren de rollen vervullen waarvoor traditionele batterijen en condensatoren minder goed geschikt zijn. Supercondensatoren hebben een groot potentieel voor toepassingen waarbij zowel een hoog vermogen, een korte oplaadtijd, een hoge cyclusstabiliteit als een lange houdbaarheid vereist zijn.

Vandaag de dag is er een grote belangstelling voor het ontwikkelen van supercondensatoren voor eilandsystemen zoals een elektrisch voertuig, hybride aandrijfsystemen en variërende vermogenstoepassingen. Ook is er belangstelling voor supercondensatoren als back-up en noodvoorzieningen.

Ondanks de voordelen van supercondensatoren is de implementatie tot op heden beperkt. De belangrijkste reden daarvoor is het feit dat supercondensatoren werken op een lage spanning ($\pm 2.8V$), waardoor er problemen kunnen ontstaan bij rechtstreekse implementatie. Niettegenstaande werd er reed veel onderzoek gevoerd om de capaciteit van een condensator te verbeteren (figuur 2.12). Zo werden de twee types condensatoren (EDLC en pseudocondensatoren) gecombineerd tot een derde soort, de hybriden, met de beste eigenschappen van de twee oorspronkelijke types. Het doel daarvan was om zowel de levensduur als de energie-inhoud te doen toenemen. Ook de elektrolyten werden geoptimaliseerd. Die optimalisatie helpt om de inwendige weerstand te doen dalen, maar ook om de energiedichtheid te doen toenemen. Tot slot wordt er gewerkt aan zelfontlading, dat typisch is voor elektrochemische systemen vanwege de thermodynamica⁶. [9]



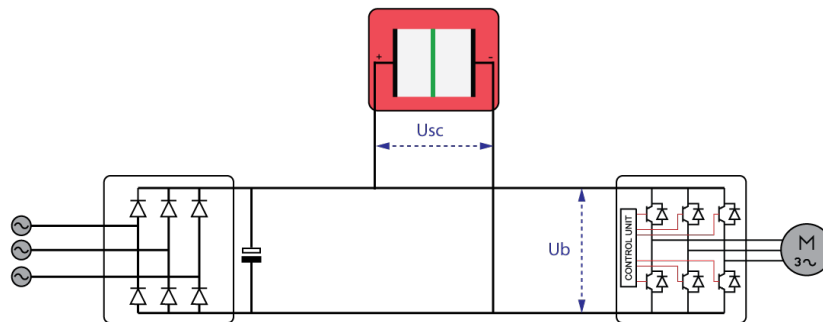
Figuur 2.12: Evolutie van condensatoren

⁶Een opgeladen batterij bezit een hoger energieniveau, waardoor de chemische reacties niet volledig gestopt kunnen worden.

3 Supercaps: implementatie

In sectie 2.2.6 werd geconcludeerd dat energierecuperatie via supercondensatoren op dit moment een goede technologie is om energie dynamisch te stockeren voor een automatisch magazijn. Er ontstaat echter een probleem: de typische spanning van de DC-bus (U_b) bedraagt al snel 600 V, terwijl de spanning over een supercondensator (U_{SC}) is beperkt (zie sectie 2.3.6). Om supercaps te kunnen integreren in de tussenkring, moeten er bepaalde zaken in rekening gebracht worden. Zo mag de maximale spanning die over een condensator staat, niet overschreden worden, mag de waarde van de stroom niet te groot zijn en moet de energieopslag zo efficiënt mogelijk gebeuren. Omwille van de voorgaande problemen groeit de noodzaak om samen met de supercondensatoren een DC/DC-omvormer te integreren.

In dit hoofdstuk worden verschillende constructiemogelijkheden van de integratie van condensatorbatterijen in de tussenkring kort besproken met hun respectievelijke voor- en nadelen. In figuur 3.1 wordt een basisopstelling zonder omvormers weergegeven waarbij de condensatoren rechtstreeks op de DC-bus zitten.



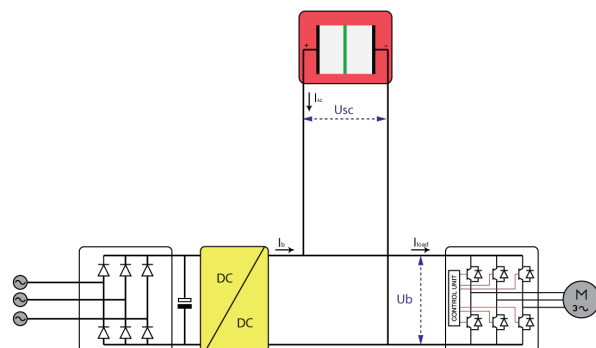
Figuur 3.1: Het basismodel van de opstelling van een tussenkring

3.1 Topologieën van de tussenkring

3.1.1 DC-omvormer op de DC-bus

In figuur 3.2 wordt een opstelling weergegeven met een DC/DC-omvormer op de DC-bus, waarbij de supercondensatoren rechtstreeks op de DC-bus geschakeld zijn.

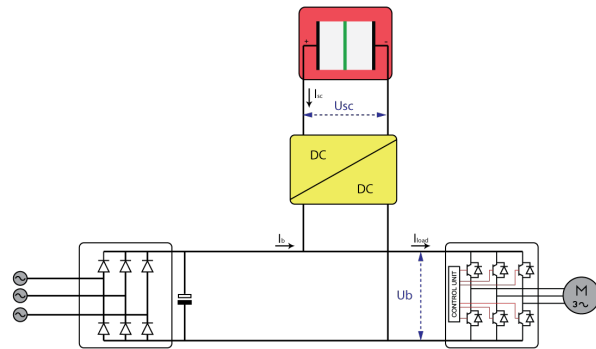
De hoeveelheid energie die opgeslagen kan worden in een supercondensator hangt af van de spanningsvariatie (zie formule 2.4) over een condensatorbank. Voor een optimaal gebruik van de supercaps mag de spanning variëren tussen 50% en 100% van de nominale spanning van de supercondensator. Omdat de spanning die over supercondensatoren mag staan, laag is en de caps rechtstreeks op de DC-bus geschakeld zijn, is bijgevolg ook de spanning over de DC-bus laag. Daardoor neemt de reactiesnelheid en het accelererend vermogen van het systeem af. Een voordeel van dit systeem is dat er geen complex regelcircuit nodig is. [15, 16]



Figuur 3.2: Tussenkring met omvormer op de DC-bus

3.1.2 DC-omvormer op het opslagsysteem

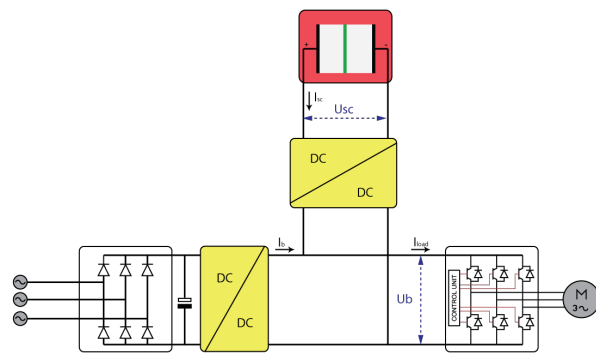
In plaats van de omvormer op de DC-bus te plaatsen zoals in figuur 3.2, kan men die tussen de DC-bus en de condensatorbatterij plaatsen, zoals weergegeven op figuur 3.3. Een voordeel vergeleken met de opstelling in figuur 3.2, is dat de spanning over de DC-bus groter is, waardoor het beschikbare vermogen voor de toepassing niet afneemt. Door het plaatsen van een bidirectionele DC-omvormer bij het opslagsysteem kan de energieopslag in de condensatorbatterij gemaximaliseerd worden, omdat het circuit van de caps losgekoppeld is van de bus. Om dat te kunnen maximaliseren, moet er een regelcircuit aanwezig zijn in de DC/DC-omvormer, waardoor de kostprijs hoger is vergeleken met de andere opstelling. [15, 16]



Figuur 3.3: Tussenkring met omvormer voor het opslagsysteem

3.1.3 DC-omvormer op de DC-bus en het opslagsysteem

Een derde topologie wordt in figuur 3.4 weergegeven. In deze opstelling worden er 2 omvormers gebruikt. Eén omvormer wordt gebruikt voor de controle van de spanning over de DC-bus en één voor de controle van de spanning over de condensatorbank. Het voordeel van dat systeem is dat je de volledige controle hebt over de energiestroom in de DC-kring, waardoor de vermogenstroom geoptimaliseerd kan worden. Een nadeel van het systeem is dat je 2 omvormers nodig hebt, waardoor het rendement van het systeem iets lager ligt. [16]



Figuur 3.4: Tussenkring met omvormer op de DC-bus en het opslagsysteem

3.2 Onderzoek van de energieopslag

In een TETRA-project aan de VUB werd het brandstofverbruik van een hybridewagen onder de loep genomen. Om het verbruik te minimaliseren, werd de DC-tussenkring aangepast met de verschillende opstellingen zoals beschreven in sectie 3.1, met dat verschil dat de energietoevoer niet het net is, maar wel een benzinemotor. Dat onderzoek toonde aan dat de opstelling met 1 DC-omvormer tussen de DC-bus en de condensatorbank (sectie 3.1.2) het efficiëntst was. Tabel 3.1 geeft het brandstofverbruik weer na een test van de verschillende opstellingen. [16]

Tabel 3.1: Het primair verbruik bij de verschillende opstellingen

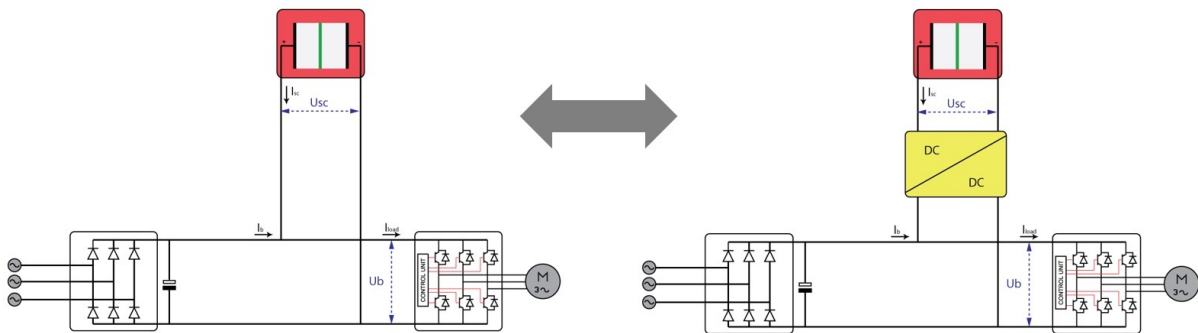
Type opstelling	verbruik $\frac{kg}{100km}$
1 omvormer op de DC-bus	0.92
1 omvormer voor het opslagsysteem	0.76
2 omvormers	0.96

Uit tabel 3.1 kan er vastgesteld worden dat het systeem met 2 omvormers (analoog aan figuur 3.4) het meeste energie verbruikt, of, met andere woorden, het minste energie kan recupereren. Dat valt te verklaren doordat er 2 omvormers aanwezig zijn die elk een rendement hebben van $< 100\%$. Daardoor zijn de verliezen groter zijn vergeleken met een systeem met maar 1 omvormer.

De systemen waar er 1 omvormer is scoren beter, maar de energiewinst bij de topologie met 1 omvormer op de DC-bus is niet groot (naar analogie met figuur 3.2). Dat heeft 2 redenen. Een eerste reden is dat de spanning over de DC-bus laag is, waardoor het beschikbaar vermogen in de DC-bus lager is. Een tweede reden, is dat de energie die opgeslagen kan worden, beperkt is. De voorkeur gaat uit naar een systeem waarbij er 1 omvormer gebruikt wordt tussen de DC-bus en de condensatorbank (analoog aan figuur 3.3). Het grootste voordeel is dat de condensatorbatterij gescheiden wordt van de DC-bus, waardoor de energieopslag gemaximaliseerd kan worden.

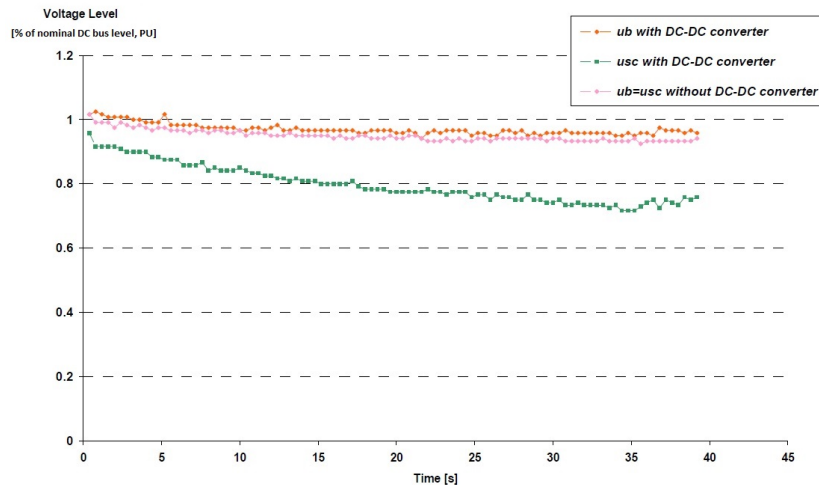
3.3 Invloed van een DC/DC-omvormer

Omwille van de lage spanning die over een supercondensator mag staan en de maximalisatie van de energieopslag, is het noodzakelijk om een DC/DC-omvormer te integreren. Uit sectie 3.2 kan vastgesteld worden dat een opstelling zoals weergegeven in figuur 3.5 (rechts) het beste resultaat oplevert. Die opstelling wordt nu vergeleken met de basisopstelling (zonder omvormer tussen de caps en de DC-bus) zoals weergegeven in figuur 3.5 (links), om de invloed van de DC/DC-omvormer te analyseren.

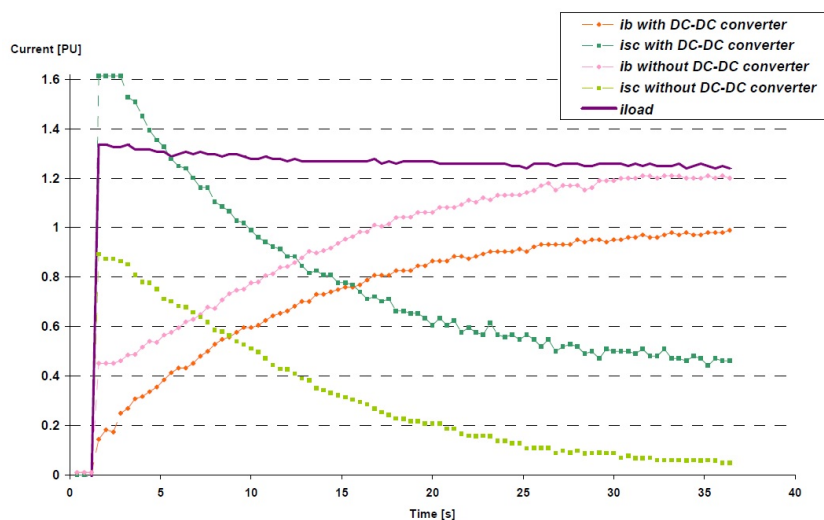


Figuur 3.5: Vergelijking van de invloed van een DC-converter

Bij figuur 3.6 en 3.7 wordt er een stapbelasting aangelegd, waardoor de energiestromen te volgen zijn bij het aanleggen van een belasting. Op figuur 3.6 wordt het spanningsverloop weergegeven in de condensatorkring (U_{sc}) alsook het verloop van de spanning over de DC-bus (U_b). Op figuur 3.7 worden de stromen met elkaar vergeleken. I_{load} is de stroom die naar de belasting gaat. Dat is de som van de stroom afkomstig van de supercondensatoren (I_{sc}) en de bronstroom I_b . De situatie wordt weergegeven voor de opstelling, zowel met als zonder omvormer. [17]



Figuur 3.6: De invloed van de spanning op een DC/DC-omvormer



Figuur 3.7: De invloed van de stroom een DC/DC-omvormer

De invloed van de spanning bij een DC/DC-omvormer

In figuur 3.6 kan er vastgesteld worden dat de spanning over de DC-bus met een DC-omvormer hoger ligt vergeleken met de spanning zonder de omvormer. Dat komt doordat de energiekring van de supercondensatoren gescheiden is van de energiestroom in de DC-bus. Het verschil in spanning is een paar procent, maar de opstelling met omvormer zorgt er wel voor de spanning op de bus constanter blijft. Daardoor blijft er meer vermogen ter beschikking voor de last. Om het energieniveau in de DC-bus te kunnen handhaven, wordt er bij belasting energie onttrokken uit de condensatorkring. De spanning U_{sc} daalt, wat betekent dat de supercaps ontladen. [17]

De invloed van de stroom bij een DC/DC-omvormer

Het is opvallend dat, in het systeem met een omvormer en wanneer er een stapbelasting wordt aangelegd (zie figuur 3.7), de supercondensatoren een grotere stroom (i.e. van langere duur) leveren in vergelijking met het systeem waarbij er geen omvormer is. Doordat de vraag ongeveer constant blijft, moet de bron minder energie in het systeem injecteren. Daardoor neemt het verbruik van de bron met ongeveer 20% af. [17]

3.4 Praktische problemen

Vandaag de dag is de omvormer de *bottleneck*, omdat die commercieel nog niet beschikbaar zijn. De systemen die nu gebruikt worden voor onderzoek, zijn op de universiteiten ontwikkeld. De weinige omvormers die beschikbaar zijn, worden op maat gemaakt.

De energiebuffers die op de markt zijn, zijn condensatoren die een hoog voltage aankunnen. Uit de marktstudie kan er afgeleid worden dat het geen supercondensatoren zijn, omdat die werken op een laag voltage. Omwille van die reden kan er ook geconcludeerd worden dat de opslaghoeveelheden niet groot zijn (zie tabel 3.2 [18--21]).

Tabel 3.2: Overzicht beschikbare energiebuffers op de markt

	Opslaghoeveelheid (Ws)
Moog	1 600 - 10 000
Koch	1 200 - 1 600
Fanuc	700 - 1 700
SEW	1 000 - 10 000

3.5 Besluit

De motor die aangestuurd wordt, mag zijn dynamiek niet verliezen. Daarom heeft de controle van de spanning over de DC-bus een grotere prioriteit vergeleken met de spanning over de supercondensatoren. Om die reden kan men gebruik maken van een DC-converter tussen de DC-bus en de opslagunit (zie figuur 3.3). Als de motor vervolgens accelereert en dus energie uit de tussenkring onttrekt, daalt de spanning over de tussenkring minder snel omdat de condensatorkring energie injecteert. Daardoor blijft het beschikbaar vermogen voor de belasting constanter.

Om de remenergie zo efficiënt mogelijk op te slaan, kan men het best gebruik maken van dezelfde opstelling en wordt er aangeraden de spanning over de condensatorkring te laten variëren tussen 100% en 50% van de nominale spanning van de condensator¹. Indien het spanningsbereik groter zou zijn, moet de DC-DC omvormer werken met een grotere spanningsratio, waardoor de constructie een negatieve invloed op de kostprijs uitoefent. [15--17]

Voor een verhoging van de levensduur van de condensatorbank kan een parallelschakeling van supercondensatoren en batterijen gebruikt worden. Daarbij vangen de condensatoren de piekbelasting op en de batterijen de rest². [17]

¹Dat komt neer op 75% van de totale capaciteit in een condensator.

²Die piste wordt niet onderzocht en valt daarom buiten het bestek van de masterproef.

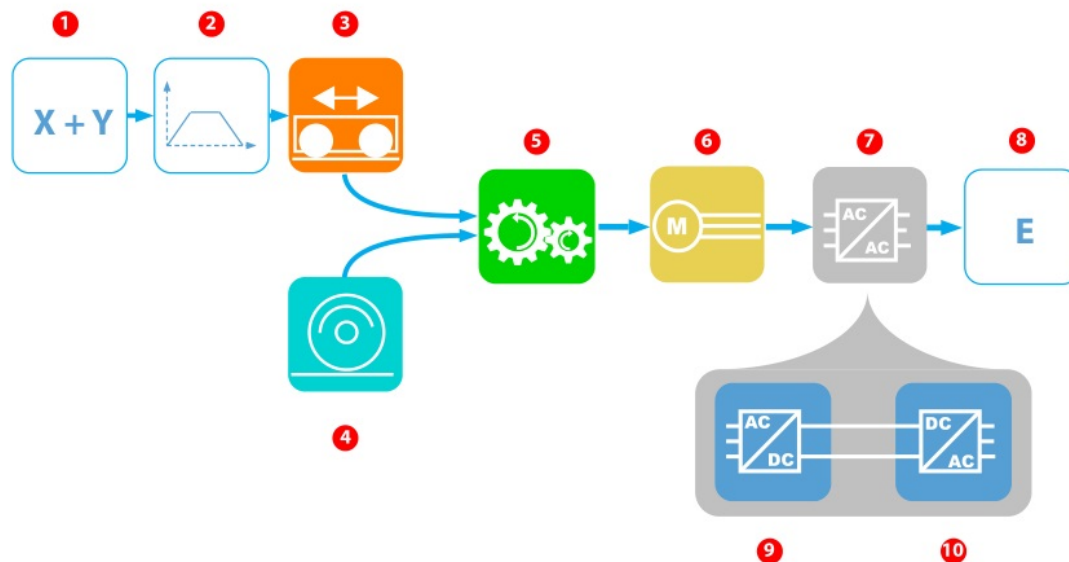
4 Theoretisch model

In het theoretisch model wordt er ten eerste een analyse gemaakt om te kijken hoeveel energie er bespaard kan worden met een energiebuffer van supercaps vergeleken met het verbranden van de remenergie. Ten tweede wordt er gekeken of supercondensatoren al dan niet beter zijn dan AFE. In het model worden drie simulaties uitgevoerd, namelijk: waarbij de remenergie opgesoupeerd wordt door een remweerstand, een simulatie uitgevoerd om het gedrag van een condensatorbank na te gaan en tot slot wordt het simulatiemodel doorlopen, waarbij de energie teruggestuurd wordt naar het net (met AFE).

4.1 Bespreking simulatiemodel

Om het energierecuperatiesysteem te testen en in een later stadium een dimensionering uit te voeren, wordt er gewerkt met in het worstcase scenario. Daarbij wordt er een valbeweging (in verticale richting) gesimuleerd, vertrekkende van de maximale hoogte en het maximum toelaatbare gewicht dat een kraan in een bepaalde opstelling kan dragen¹.

Er wordt gestart met het opstellen van een simulatiemodel van een magazijnkraan (schematische voorstelling, zie figuur 4.1). In het kraanmodel wordt het gedrag van de kraan gesimuleerd aan de hand van een snelheidstraject (① en ②). In het systeem zijn er 2 significante motoren aanwezig. Een voor de horizontale en een voor de verticale beweging van de kraan². Daarnaast worden de verliezen zoals wrijving en overbrengingen in rekening gebracht per beweging (④ en ⑤). Nadat alles in rekening werd gebracht, blijft er een bepaald motorvermogen over waarbij er energie gegenereerd wordt bij een valbeweging of bij het remmen in een horizontale beweging. In het andere geval wordt er vermogen gevraagd (⑥). De rest van het simulatiemodel (⑦ tot en met ⑩) bevat het elektrisch gedeelte. Dat wordt verder besproken met behulp van figuur 4.2.



Figuur 4.1: Schematische voorstelling simulatiemodel

¹In dat geval is de vrijgave van potentiële energie het grootst.

²De z-beweging waarbij er een pallet uit het magazijn gehaald wordt, werd niet in rekening gebracht.

Het totale gevraagde vermogen³ voor een beweging (AC), wordt door een actieve wisselrichter geleverd vanuit de DC-bus, wat in het groen weergegeven wordt in figuur 4.2. In die figuur zijn er 2 groene functieblokken: de ene is voor de horizontale en de andere is voor de verticale beweging. Het totaal gevraagd vermogen in de DC-bus wordt voor de x- en y-beweging opgeteld. Dat vermogen wordt geleverd door een actieve gelijkrichter (oranje in figuur 4.2) die een connectie heeft met het net. Op de DC-bus is er ook een regeneratieve unit aanwezig (in het blauw op figuur 4.2). In appendix B wordt de code van het simulinkblok 'regeneratieve unit' weergegeven. In het blok wordt een systeem uitgewerkt waarbij de 3 systemen (AFE, supercaps en remweerstanden) vervat zitten.

In het geval van AFE wordt het ingaande vermogen doorgelust naar het uitgaande vermogen, omdat er bij die techniek energie teruggestuurd wordt naar het net en er dus geen recuperatie is.

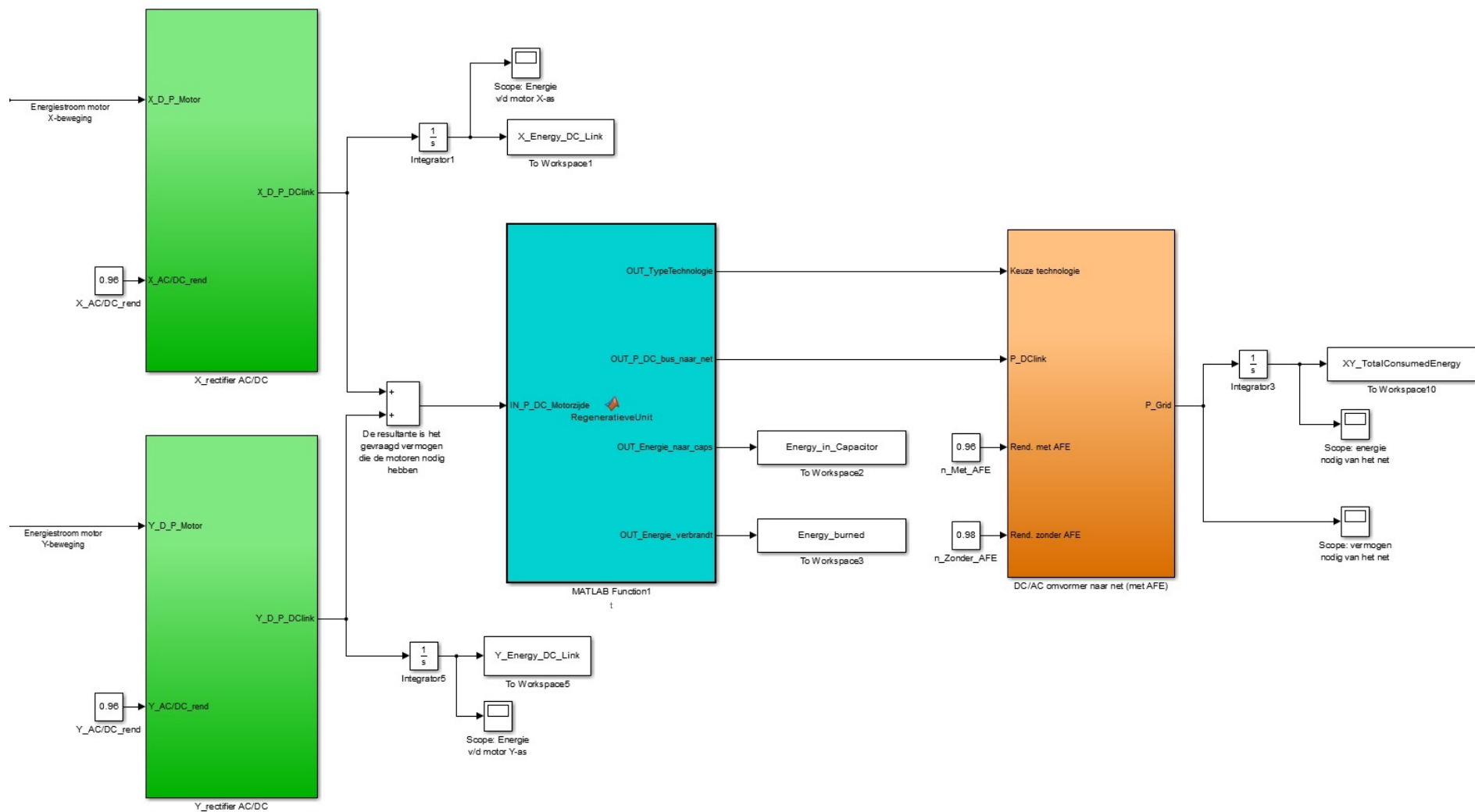
Indien er gekozen wordt voor supercaps, wordt de energie die vrijkomt in de buffer opgeslagen. Als er vermogen gevraagd wordt door de motoren, wordt de energie eerst uit de buffer gehaald. Als de buffer leeg is, wordt de benodigde energie aangevuld vanuit het net.

Tot slot is er een systeem waarbij er gewerkt wordt met remweerstanden. Als er energie vrijkomt, wordt die door de remweerstanden verbrand. Bij het leveren van energie naar de motoren wordt er energie gebruikt vanuit het net.

OPMERKING: 1) in het model wordt verondersteld dat er geen energie in de DC-bus gestockeerd wordt. Met andere woorden, de DC-spanning blijft constant. In de praktijk is dat echter niet het geval.

2) In dit hoofdstuk zijn er verschillende grafieken opgenomen. Voor de duidelijkheid van die grafieken werden de schalen aangepast.

³De redenering kan analoog gemaakt worden voor in het geval dat er energie vrij komt door een valbeweging.



In geval van een zwart-witweergave:

Groen: links op figuur

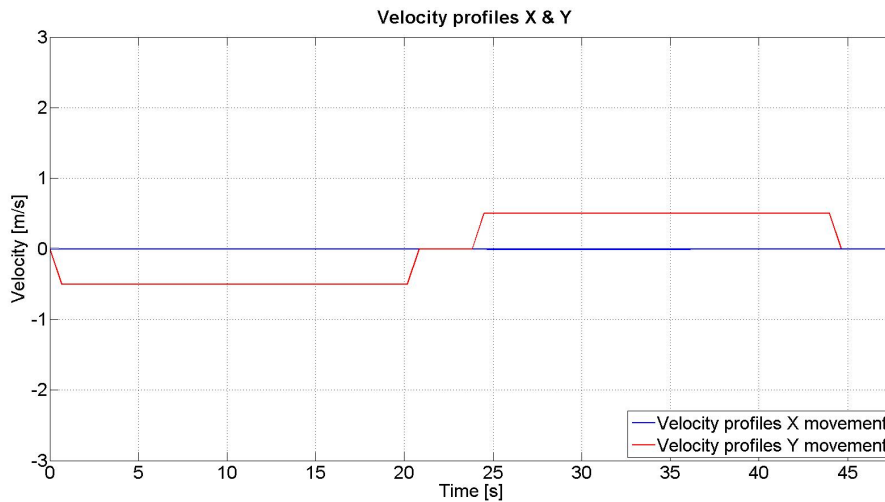
Blauw: midden op figuur

Oranje: rechts op figuur

Figuur 4.2: Overzicht van het elektrische gedeelte van het simulatiemodel

4.2 Simulatie van een traject: verticale beweging

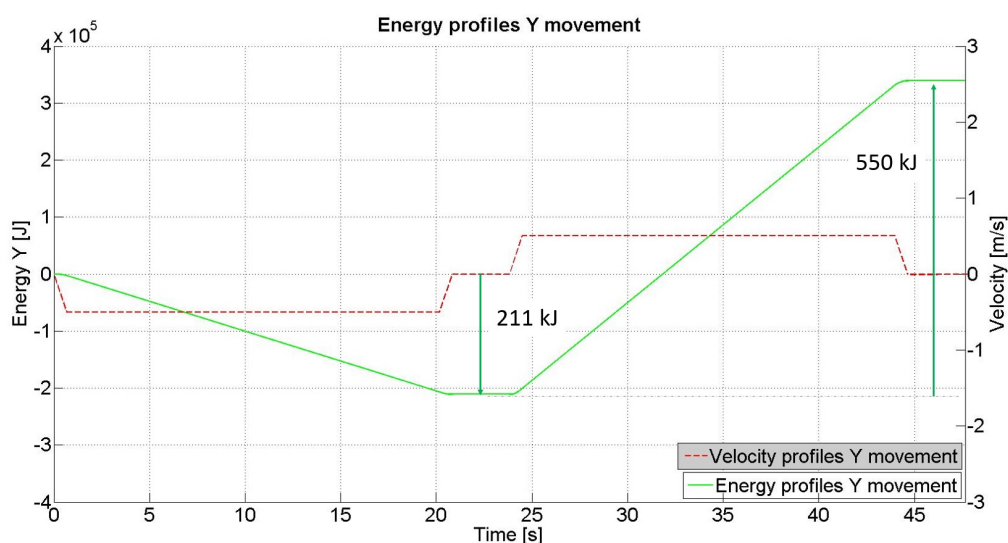
Het simulatiemodel wordt besproken aan de hand van een snelheidstraject. Als traject wordt er gekozen voor een verticale beweging naar beneden met een hoogteverschil van 10.08 m en een massa van 3450 kg^4 . Daarna volgt een stijgende beweging met dezelfde parameters. In figuur 4.3 wordt het snelheidsprofiel van de magazijnkraan weergegeven.



Figuur 4.3: Snelheidsprofiel van de motoren

In figuur 4.4 wordt het energieprofiel van de motor voor de verticale beweging weergegeven. Bij de dalende beweging komt er 211 kJ vrij in de DC-bus. Voor de stijgende beweging is 550 kJ nodig⁵. De reden van dat verschil kan simpel verklaard worden door het feit dat er verliezen zijn in het systeem. Bij het dalen van de last komt er energie vrij. Een deel van die energie gaat verloren en de rest gaat naar de DC-bus. Omgekeerd, bij het stijgen van een last, heb je een bepaalde energiehoeveelheid nodig. Maar omdat er verliezen in het systeem zijn, moet er extra energie uit de DC-bus onttrokken worden om die verliezen te compenseren.

Omdat er geen horizontale beweging uitgevoerd wordt, wordt het energieprofiel van de horizontale motor niet weergegeven.



Figuur 4.4: Energieprofiel van de verticale beweging

⁴Dit is gebaseerd op een opstelling geplaatst door Egemin.

⁵Energiewaarde in de DC-bus.

Verklaring van de energiewaarden

In deze paragraaf worden de energiewaarden berekend van de energie die vrijkomt of nodig is in de DC-bus door het uitvoeren van het gekozen traject aan de hand van de gegevens uit figuur 4.4.

Gegevens

- Hoogte: 10.08 m
- Gewicht: 3450 kg
- Vrijgekomen energie bij het dalen: 211 kJ
- Benodigde energie bij het stijgen: 550 kJ

Energiebalans

De potentiële energie die vrijkomt of nodig is:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h = 3450 \cdot 9.81 \cdot 10.08 = 341 \text{ kJ}$$

Het rendement van het systeem:

$$\eta = \frac{E_{DC}}{E_{In}} = \frac{211}{341} = 62\%$$

$$\eta = \frac{E_{Out}}{E_{DC}} = \frac{341}{550} = 62\%$$

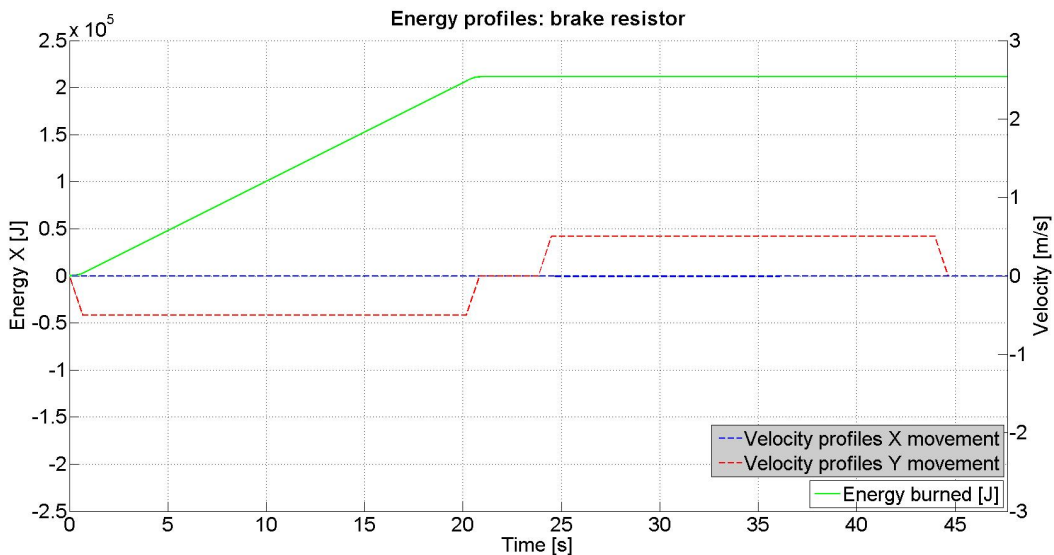
Uit de berekening blijkt dat het systeem een rendement heeft van 62%. Met andere woorden, er gaat ongeveer 38 % van de potentiële energie verloren door verliezen in het systeem. Die verliezen zijn:

- Verliezen in de mechanica (overbrenging, motor, wrijving)
- Verliezen in de elektronica (actieve gelijkrichter)
- Luchtweerstand
- Inertie van het systeem
- Type bewegingsprofiel

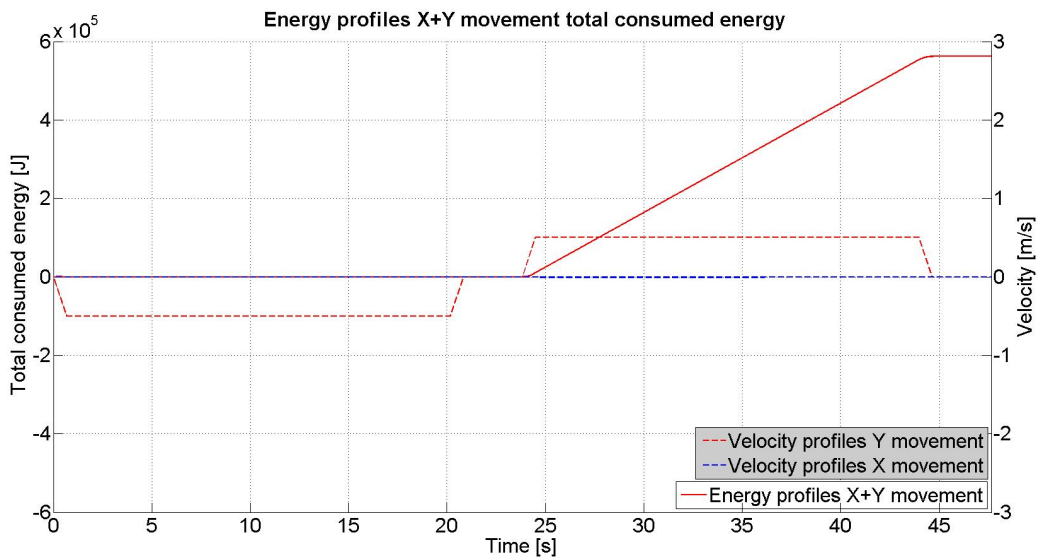
4.2.1 Remweerstanden

Bij een vallende beweging wordt de energie die vrijkomt, verbrand door een remweerstand. Voor die simulatie wordt er 211 kJ gedissipeerd door de remweerstand (zie figuur 4.5). Omdat de energie niet gerecupereerd wordt, is het triviaal dat de energie die naar het net gaat nihil is (zie figuur 4.6).

Bij een stijgende beweging wordt er 562 kJ⁶ van het net onttrokken (zie figuur 4.6).



Figuur 4.5: Energiedissipatie van de remweerstand

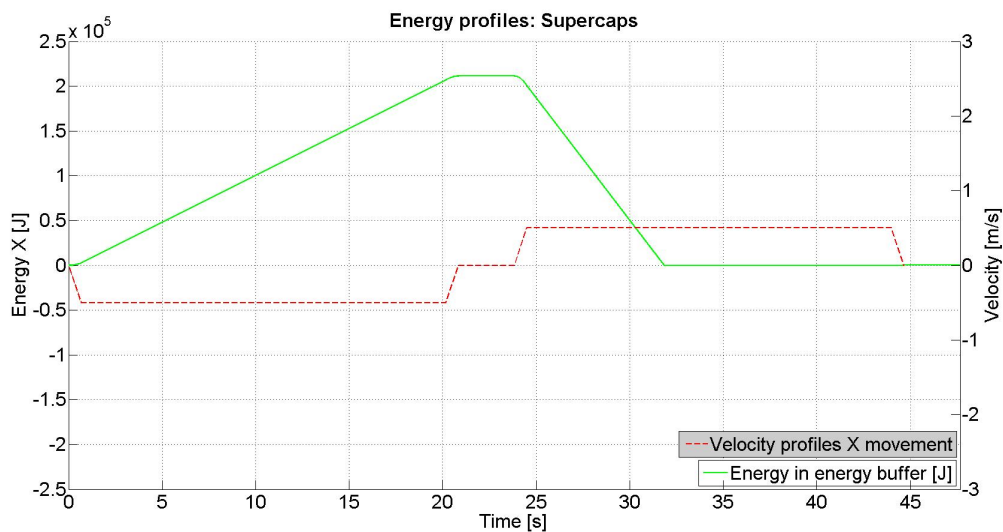


Figuur 4.6: Energieprofiel van het net

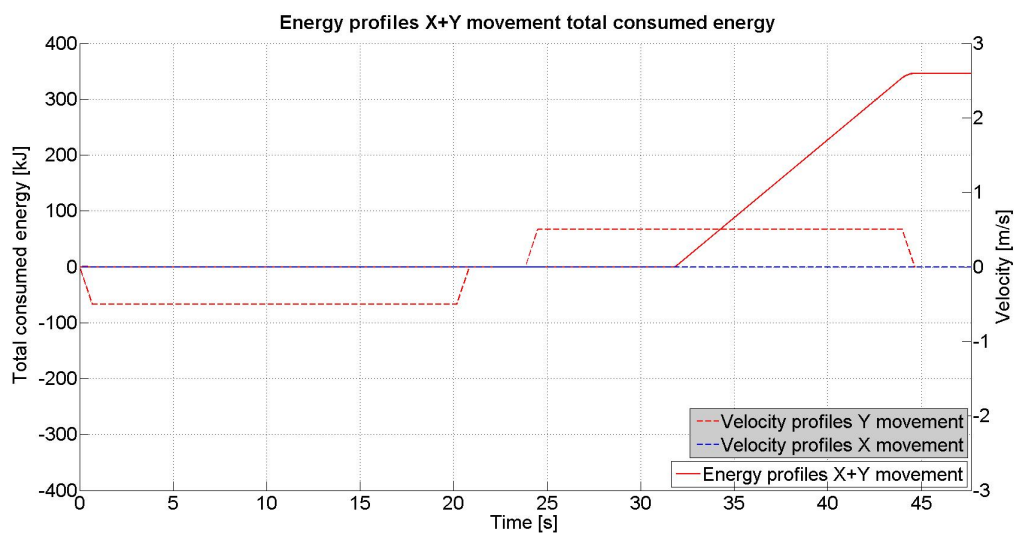
⁶Er wordt gerekend met een rendement van 98% voor de gelijkrichter, zie figuur 4.2.

4.2.2 Condensatorbank

In het simulatiemodel wordt er nu gewerkt met een condensatorbank. De energie die vrijkomt door een valbeweging van de kraan (211 kJ, zie figuur 4.7), wordt in de condensatorbank opgeslagen. De energie die beschikbaar is in de DC-bus, is niet de energie die opgeslagen wordt in de condensatoren. Er wordt namelijk een DC/DC-omvormer gebruikt die geplaatst wordt tussen de DC-bus en de condensatorbatterij (zie sectie 3). Omdat er een omvormer tussen de DC-bus en de condensatorbank is, treden er omzettingsverliezen op. Het rendement van zo een omvormer is moeilijk te achterhalen, omdat dit type omvormer op maat gemaakt wordt (zie sectie 3.4). Een richtwaarde voor de efficiëntie van een DC/DC-omvormer ligt rond de 95%⁷. Bij een stijgende beweging is er 550 kJ⁸ nodig. Om die energie te kunnen leveren, wordt er eerst energie onttrokken vanuit de condensatorbank (zie figuur 4.7). Eens de buffer uitgeput is, wordt er energie (346 kJ⁹) toegevoerd van het net (zie figuur 4.8).



Figuur 4.7: Energie die naar de condensatorbank gaat



Figuur 4.8: Energieprofiel van het net

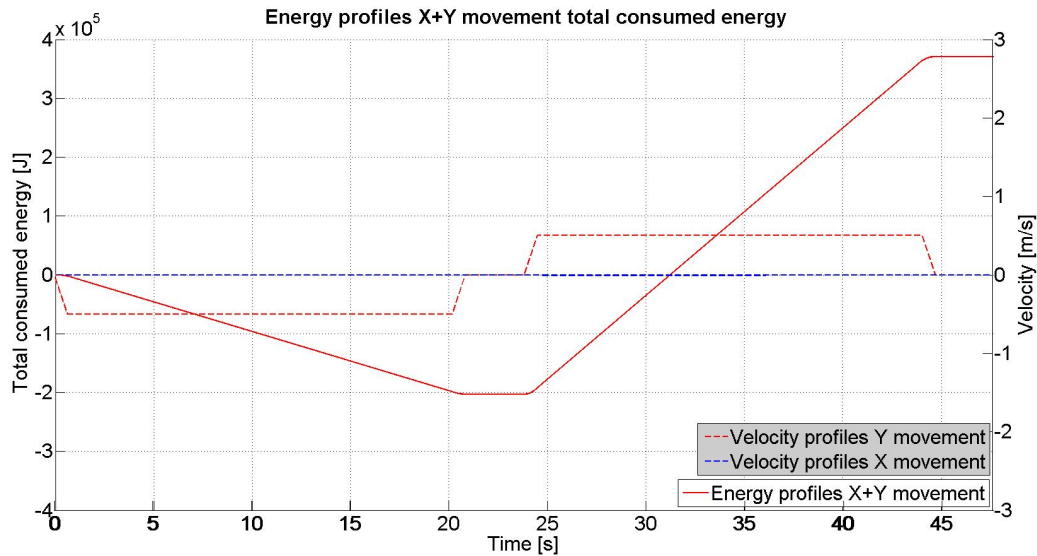
⁷Het rendement van de DC/DC-omvormer werd niet opgenomen in het simulatiemodel.

⁸Energiewaarde in de DC-bus.

⁹Er is 550 kJ nodig. Daarvan wordt er 211 kJ geleverd door de buffer. Er blijft nog 339 kJ over. Dat wordt geleverd vanuit het net. Rekening houdende met een rendement van 98% van de omvormer, is er dus nog 346 kJ nodig.

4.2.3 AFE

Bij AFE wordt de energie die vrijkomt door het dalen van de last teruggestuurd naar het net. Voor dit model betekent dat een injectie 202 kJ^{10} (zie figuur 4.9). Omgekeerd zal bij het stijgen van de last 573 kJ^{11} nodig zijn van het net.



Figuur 4.9: Energieprofiel van het net

4.2.4 Efficiëntieberekeningen

In deze paragraaf zal er bekeken worden welke technologie, AFE of een energiebuffer, het efficiëntst is aan de hand van het traject dat gebruikt werd in dit hoofdstuk.

Energiebuffer

In het model werd er geen rekening gehouden met het rendement van de DC/DC-omvormer. Laten we nu veronderstellen dat het rendement 95% bedraagt [16]. De energie die gebufferd wordt, wordt dan:

$$Energie_{buffer} = 211 \cdot 0.95 = 200 \text{ kJ}$$

Als die energie vervolgens uit de buffer gehaald wordt, is de energie die beschikbaar wordt in de DC-bus voor de last gelijk aan:

$$Energie_{beschikbaar} = 200 \cdot 0.95 = 190 \text{ kJ}$$

Het nettoverbruik van de installatie wordt dan:

$$Energie_{verbruik} = \frac{550 - 190}{0.98} = 367 \text{ kJ}$$

AFE

Het nettoverbruik van de installatie met AFE bedraagt:

$$Energie_{verbruik} = 573 - 202 = 371 \text{ kJ}$$

Uit de berekening kan geconcludeerd worden dat het gebruik van een energiebuffer ongeveer 1% efficiënter is vergeleken met het terugsturen van de energie naar het net.

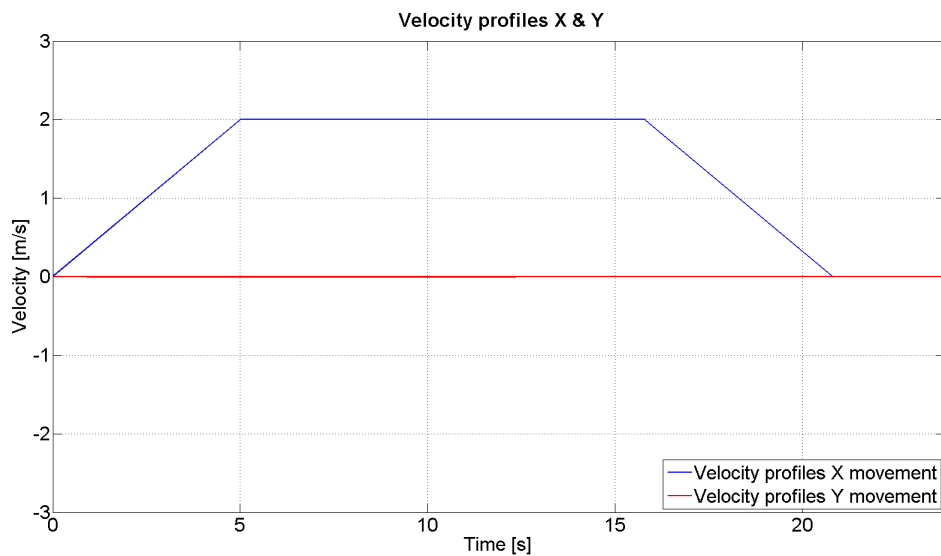
¹⁰In de DC-bus komt er 211 kJ vrij. Als men het rendement van de omvormer (96%) in rekening brengt, betekent dat er 202 kJ terug geïnjecteerd wordt.

¹¹In de DC-bus is er 550 kJ nodig. Als men het rendement van de omvormer (96%) in rekening brengt, betekent dat dat er 573 kJ nodig is.

4.3 Simulatie van een traject: horizontale beweging

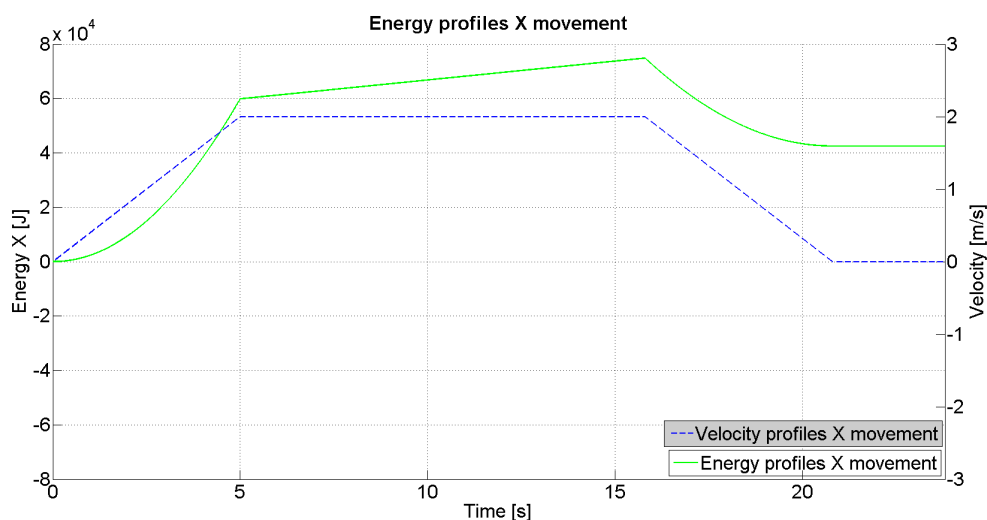
In de voorgaande sectie werd de invloed nagegaan van een verticale beweging op de energiestromen. In dit deel wordt er nagegaan wat de effecten zijn bij een horizontale beweging. Bij het horizontaal bewegen van de magazijnkraan, is er energie nodig om de kraan te versnellen en op snelheid te houden. Indien er gekozen wordt voor een opstelling met AFE, moet er rekening gehouden worden met de efficiëntie van de omvormer die 96% bedraagt. Een opstelling met supercondensatoren gebruikt een ander type gelijkrichter waardoor de efficiëntie stijgt tot 98%. Bij het afremmen van de kraan kan de remenergie gerecupereerd worden.

Als traject wordt er gekozen voor een horizontale beweging van 30 m. Het snelheidsprofiel wordt weergegeven in figuur 4.10.



Figuur 4.10: Snelheidsprofiel voor een horizontale beweging

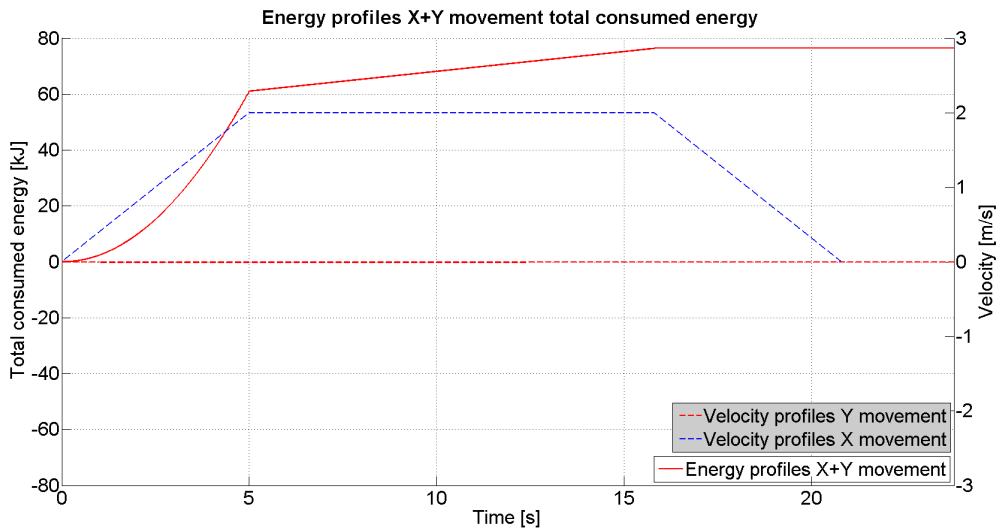
Via het simulatiemodel kan er uit het snelheidsprofiel een energieprofiel opgesteld worden, zoals weergegeven op figuur 4.11. Er kan vastgesteld worden dat de energie die nodig is om te versnellen kwadratisch toeneemt. Eens de kraan op snelheid is, moeten enkel de verliezen gecompenseerd worden. Bij het afremmen van de kraan wordt de kinetische energie terug omgezet in elektrische energie.



Figuur 4.11: Energieprofiel voor een horizontale beweging

4.3.1 Remweerstanden

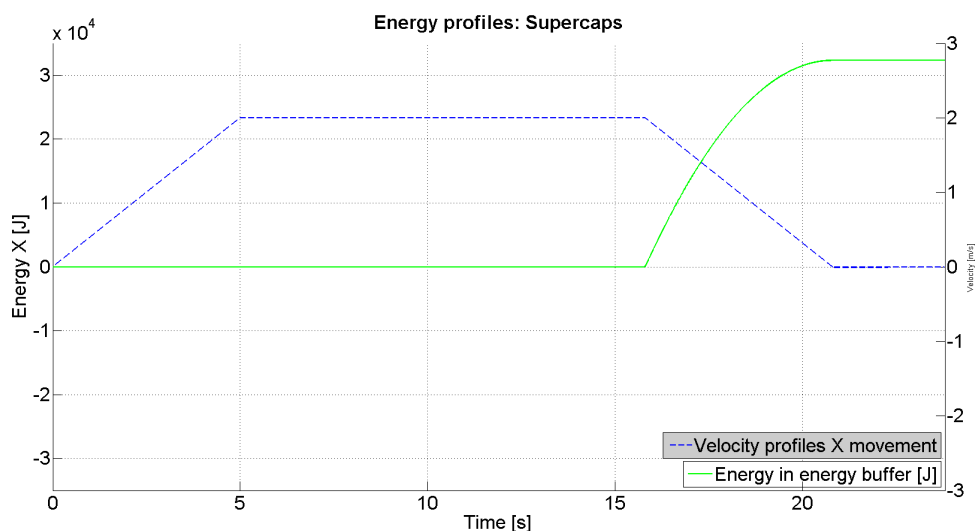
In figuur 4.12 wordt het energieprofiel weergegeven van het net indien er geen recuperatie is. De energie die nodig is er voor de versnelling en het constant houden van de snelheid bedraagt 74.8 kJ in de DC-bus (of 76.4 kJ vanuit het net¹²). Dit wordt weergegeven in figuur 4.12.



Figuur 4.12: Energieprofiel van het net

4.3.2 Condensatorbank

In dit stuk wordt het simulatiemodel uitgevoerd waarbij er gekozen werd voor een opstelling met supercondensatoren. In figuur 4.13 kan er vastgesteld worden dat er enkel energie gebufferd wordt bij het afremmen. In totaal is er 32.3 kJ beschikbaar in de DC-bus. Omwille van rendementsverlies van de DC/DC-omvormer wordt er 30.7 kJ opgeslagen¹³.



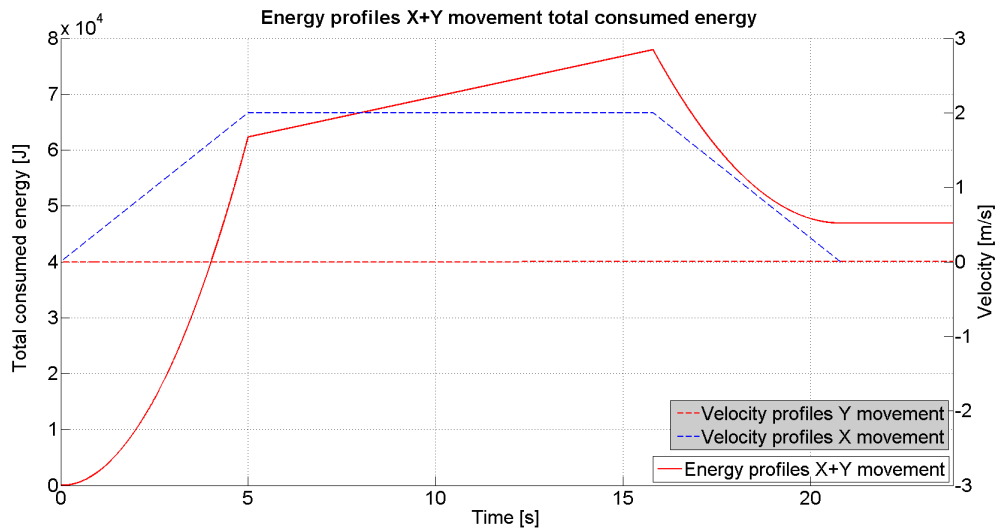
Figuur 4.13: Energieprofiel van de condensatorbank

¹²Bij remweerstanden wordt er gebruik gemaakt van een diodegelykrichting. De efficiëntie van de omvormer bedraagt 98%.

¹³Uitgaande dat het rendement van de DC/DC-omvormer 95% is.

4.3.3 AFE

De resulterende energiewaarde voor de simulatie met AFE kan teruggevonden worden op figuur 4.14. Er kan vastgesteld worden dat de magazijnkraan 78 kJ nodig heeft om te versnellen en daarna zijn snelheid constant te houden. Bij het afremmen komt er energie vrij. De nettoconsumptie van energie bedraagt 46.9 kJ.



Figuur 4.14: Energieprofiel van het net bij AFE

4.3.4 Efficiëntieberekeningen

Aan de hand van bovenstaande gegevens wordt er berekend welke techniek, AFE of energiebuffering, het efficiëntst is.

Condensatorbank

Om de beweging uit te voeren is er 74.8 kJ nodig uit de DC-bus. Bij het remmen komt er 32.3 kJ vrij in de DC-bus. Die energie wordt eerst in de energiebuffer geïnjecteerd om het daarna te kunnen gebruiken in de volgende cyclus. Omwille van rendementsverlies van de DC/DC-omvormer is niet alle energie beschikbaar voor de volgende cyclus. De hoeveelheid beschikbare energie in de DC-bus met inbegrip van het rendementsverlies is gelijk aan:

$$Energie_{beschikbaar} = 32.2 \cdot 0.95 \cdot 0.95 = 29.1 \text{ kJ}$$

Het nettoverbruik van de installatie wordt dan:

$$Energieverbruik = \frac{74.8 - 29.1}{0.98} = 46.6 \text{ kJ}$$

AFE

Uit sectie 4.3.3 kon er afgeleid worden dat het nettoverbruik bij een opstelling met AFE gelijk is aan 46.9 kJ.

Net zoals bij de verticale beweging kan er bij de horizontale beweging vastgesteld worden dat een energiebuffer gebaseerd op supercondensatoren ongeveer 1% efficiënter is.

4.4 Conclusie

Als er een remweerstand op het systeem wordt toegepast, wordt het energieoverschot dat in de DC-bus terecht komt gedissipeerd door een weerstand. Als die remweerstand vervangen wordt door een condensatorbank, wordt die energie gestockeerd in supercondensatoren om het in een later stadium terug vrij te geven als de netto-energievraag van de motoren positief is. Bij AFE wordt het energieoverschot in de DC-bus naar het net gestuurd. Tot slot kan er geconcludeerd worden dat de energieopslag met behulp van supercondensatoren efficiënter is vergeleken met het terugsturen van die energie naar het net. Dat valt te verklaren door het feit dat het rendementsverlies van de DC/DC-omvormer opgevangen wordt door het rendement van een bidirectionele omvormer (AFE) die lager ligt in vergelijking met een diodegelijkrichter (supercondensatoren). Omdat ervan uitgegaan wordt dat de opgeslagen energie in de buffer in de volgende cyclus terug gebruikt wordt, wordt het effect van zelfontlading verwaarloosd.

5 Validatie van het model

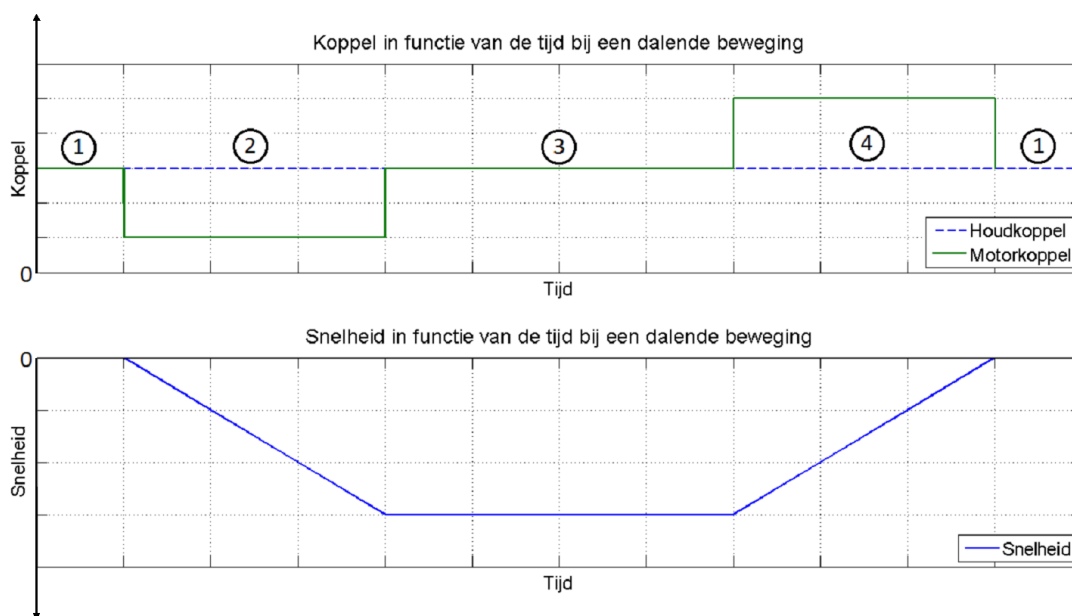
Het theoretisch model dat opgesteld werd in hoofdstuk 4, wordt aan de hand van een testmodel gevalideerd. Hierbij wordt er een snelheidsprofiel en een lastkoppel gekozen zodat er een uniforme meting kan gebeuren. Die resultaten worden vergeleken met elkaar om zo de afwijking van het simulatiemodel met de realiteit te kunnen bepalen. Voor de validatie wordt er enkel geopteerd om de verticale valbeweging te analyseren. Omwille van gelijkaardige conclusies in hoofdstuk 4, kan de redenering doorgetrokken worden voor de x-beweging.

5.1 Het concept: energievrijgave

Om een massa (lees: de last van de kraan) op een positie te houden, wordt er een houdkoppel gevraagd aan de motor (zie ① figuur 5.1). Om de massa te laten zakken, wordt het koppel dat de motor levert, vermindert ②. Omdat het tegenwerkend koppel van de motor kleiner is dan het houdkoppel, komt de last in beweging. De versnelling kan bepaald worden volgens volgende formule:

$$\Delta T = \alpha \cdot J \tag{5.1}$$

met ΔT het verschil tussen het houdkoppel en het motorkoppel, α de versnelling en J de inertie van het systeem. Als de dalende last zijn maximale snelheid heeft bereikt ③, wordt het koppel dat de motor levert terug gelijk aan het houdkoppel. Daardoor stopt de last met versnellen (volgens vergelijking 5.1: $\Delta T = 0 \Rightarrow \alpha = 0$). Als de eindpositie van de last dichterbij komt, moet de last vertragen ④. Dat gebeurt door een koppel te genereren dat groter is dan het houdkoppel. Met behulp van formule 5.1 kan bepaald worden dat de versnelling verschillend is van 0. Omdat het koppel groter is dan het houdkoppel, zal de massa een kracht naar boven ondervinden.



Figuur 5.1: Koppel en snelheidsverloop bij een gecontroleerde vallende beweging

Tijdens het dalen van de last beweegt de massa met een bepaalde snelheid. Omdat die massa verbonden is met de motor, zal de motor dus draaien aan een equivalente hoeksnelheid. Volgende formule kan in rekening worden gebracht:

$$P = \omega \cdot T$$

waarbij ω negatief en T positief is. Hieruit volgt dat de motor een negatief vermogen levert. Met andere woorden is de motor in regeneratiemodus. De kwadrantenwerking wordt weergegeven in figuur 5.2. Voor deze toepassing wordt er gewerkt in kwadrant 2 en 4.

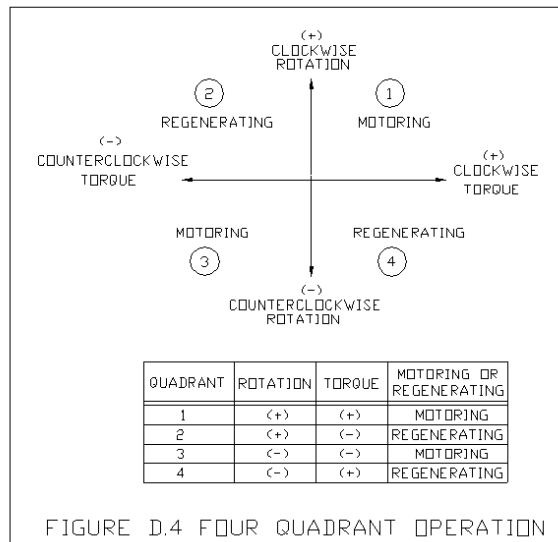
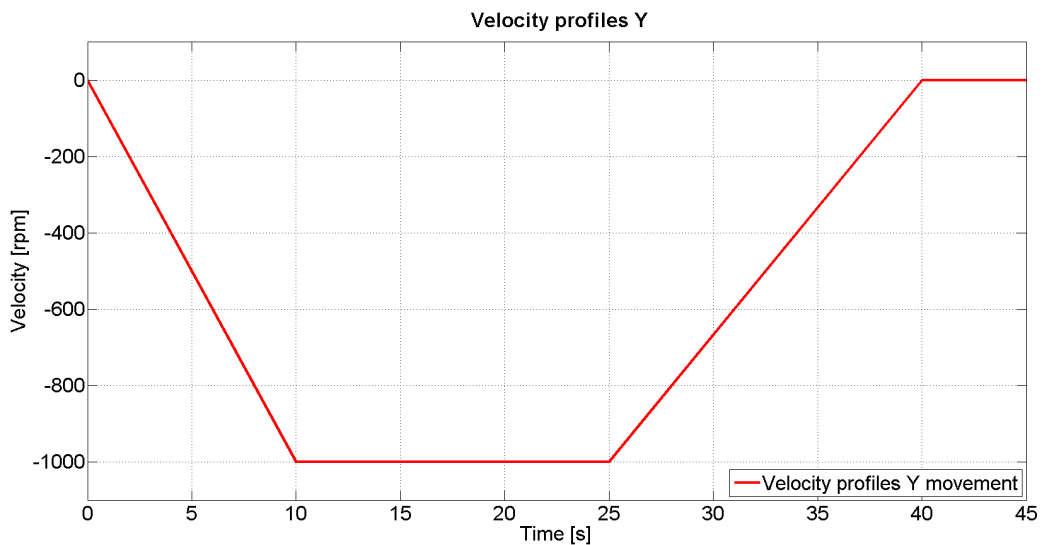


FIGURE D.4 FOUR QUADRANT OPERATION

Figuur 5.2: 4 kwadrantenwerking van een motor [3]

5.2 Definiëren van het traject

Uit sectie 5.1 kan er geconcludeerd worden dat er 2 zaken belangrijk zijn om energie te kunnen recupereren, namelijk koppel en snelheid. Om het simulatiemodel te kunnen vergelijken met een praktische opstelling, worden er 4 punten geanalyseerd. Die meetpunten zijn een combinatie van 2 toerentallen (500 en 1000 rpm) en 2 koppels (52.5 en 70 Nm). In wat volgt, wordt enkel het meetpunt van 1000 rpm / 70 Nm geanalyseerd. Voor de conclusie wordt er opnieuw gewerkt met alle gegevens. Het snelheidsprofiel wordt weergegeven in figuur 5.3.

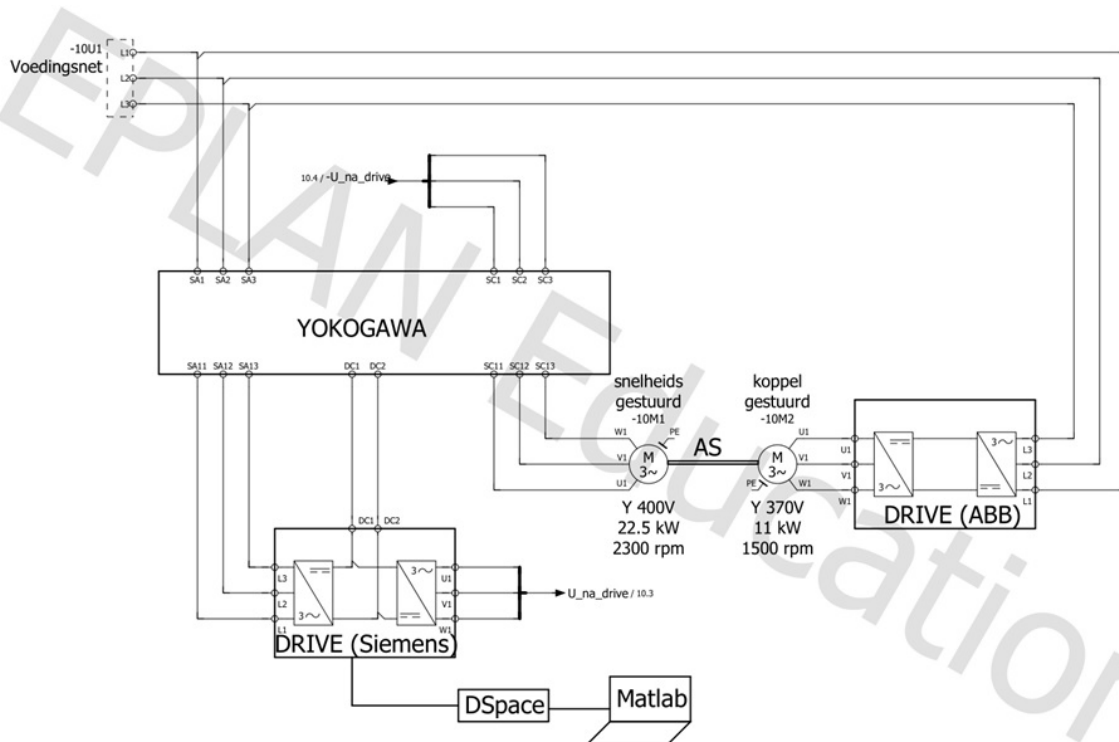


Figuur 5.3: Snelheidsprofiel van de gekozen beweging

5.3 Praktische metingen

5.3.1 Meetopstelling

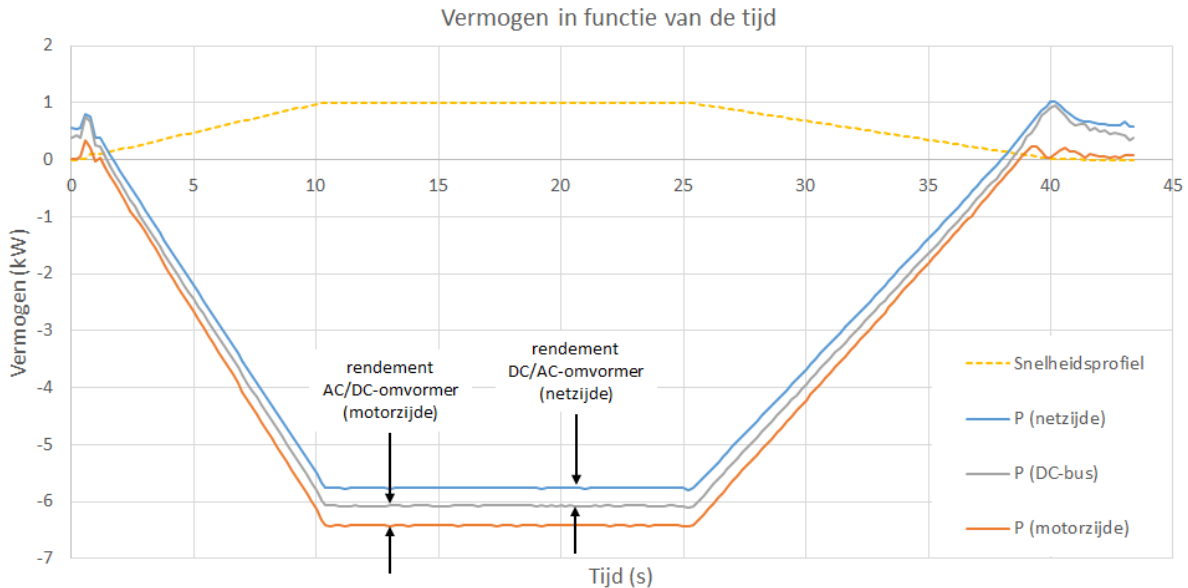
Voor het uitvoeren van de metingen worden er 2 motoren aan elkaar gekoppeld (zie figuur 5.4). Hierbij levert de ene motor het houdkoppel (in dit voorbeeld 70 Nm) en de andere motor wordt in snelheid gestuurd. Het gekozen traject dat in Matlab gedefinieerd werd (figuur 5.3), wordt via een DSpace-module vertaald naar stroomwaarden voor de motor. Het vermogen dat de motor verbruikt, wordt op 3 verschillende plaatsen gemeten met de Yokogawa WT 1600. De drie posities waar er gemeten wordt, zijn: het vermogen onttrokken aan het net (voor de drive), het vermogen in de DC-bus en het vermogen (na de drive) dat naar de motor zelf gaat.



Figuur 5.4: Meetschema

5.3.2 Meetgegevens

In figuur 5.5 worden de diverse vermogensmetingen weergegeven voor het snelheidsprofiel dat met een gele stippe lijn wordt weergegeven. Er kan vastgesteld worden dat het vermogen aan de motorzijde het grootst is bij recuperatie, wat normaal is aangezien er bij de andere metingen telkens een omvormer tussen zit.



Figuur 5.5: Meetresultaten van de testbank

Uit figuur 5.5 kunnen de omvormerrendementen berekend worden. Die resultaten worden weergegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1: Rendementen van de omvormers en de motor

Gemiddeld rendement bij constant toerental				
snelheid	koppel	η AC/DC (motor)	η DC/AC (net)	η motor
RPM	Nm	%	%	%
500	75	92.1	90.7	79
1000	75	94.6	95	88.4
500	52.5	90	89.2	80.4
1000	52.5	93	94.4	88.3

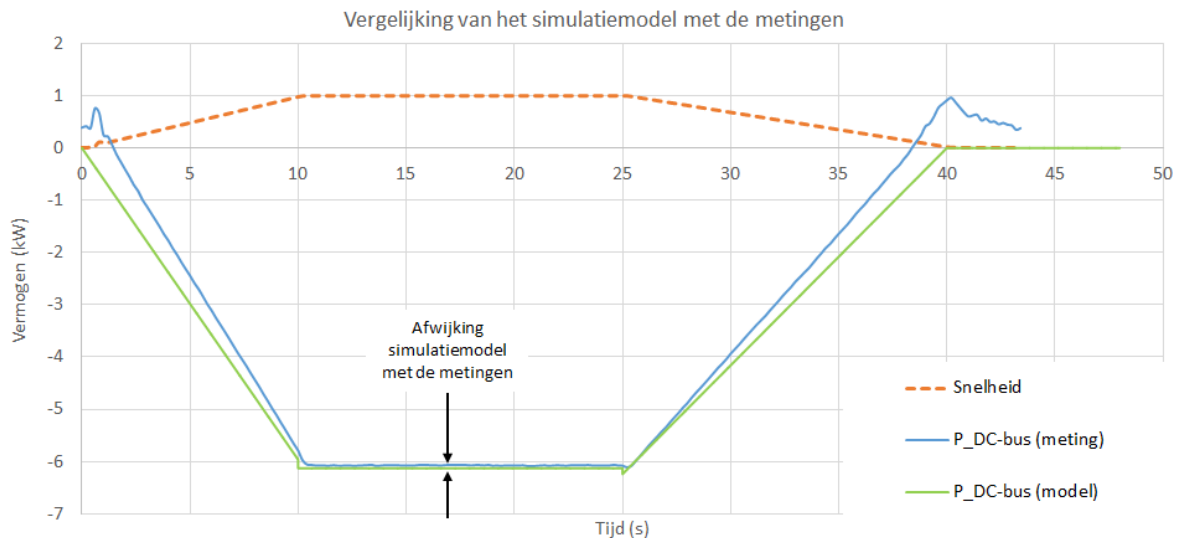
Uit tabel 5.1 kan er vastgesteld worden dat het rendement van de omvormers varieert. Als die waarden vergeleken worden met de initieel ingestelde waarden uit hoofdstuk 4 (96%), blijkt dat de rendementen onder die maximale waarde blijven. Uit die resultaten kan er geconcludeerd worden dat het rendement van de omvormer afhankelijk is van de belasting.

5.4 Vergelijking met het theoretisch model

Rekening houdend met met de deellastrendementen van de omvormers die berekend werden in sectie 5.3.2, wordt het model met die specifieke rendementen aangepast om het theoretisch model te kunnen staven.

5.4.1 Meetgegevens

In figuur 5.6 wordt de vergelijking gemaakt tussen het simulatiemodel en de testopstelling. Hierbij wordt het vermogen in functie van de tijd weergegeven in de DC-bus van het traject gedefinieerd in sectie 5.2.



Figuur 5.6: Vergelijking van het simulatiemodel met praktische metingen

Uit figuur 5.6 kan er afgeleid worden dat er weinig afwijking is van het vermogen zodra de snelheid constant is. De grootste afwijking zit in het begin, omdat het model geen rekening houdt met het eigenverbruik van de omvormers. Omdat er een offset ontstaat in het begin en de motor na 10 seconden op zijn maximale snelheid moet zijn, krijg je bijgevolg ook een afwijking bij het versnellen en het vertragen van de motor. Die afwijkingen worden weergegeven in tabel 5.2.

Tabel 5.2: Procentuele afwijking tussen het simulatiemodel en de testbank

Afwijking (%)			
snelheid	koppel	Energiewaarde	Vermogen bij constante snelheid
RPM	Nm	%	%
500	75	5.2	0.7
1000	75	4.8	1
500	52.5	4.8	0.5
1000	52.5	3.4	0.4

Uit tabel 5.2 valt er af te leiden dat de afwijking van het vermogen, wanneer de motor op snelheid is, kleiner is dan 1%. Omwille van het eigenverbruik van de omvormers, dat niet in rekening wordt gebracht, schommelt de afwijking op de totale energetische waarde rond de 5%¹.

¹Die waarde stijgt als het gegenereerd vermogen daalt.

5.5 Besluit

Uit dit hoofdstuk kan er besloten worden dat omvormers werken met een efficiëntie die afhankelijk is van de belasting. Omdat in deellast de maximale efficiëntie niet behaald wordt, kan er besloten worden dat de efficiëntie van een energiebuffer met supercaps ten opzichte van AFE in het algemeen groter wordt dan 1% (zie sectie 4.2.4). Voor de vergelijking van het simulatiemodel met de testmeting vormt dit geen probleem omdat de rendementen instelbaar zijn. Een oplossing voor dit euvel is het maken van isorendementscontouren van de omvormers.

Daarnaast werd het simulatiemodel gevalideerd met een testopstelling. Uit die analyse blijkt dat het model geen rekening houdt met het eigenverbruik van de drives. Daardoor ontstaat er een kleine afwijking. De afwijking is het grootst bij het stilstaan van de motor, en verkleint tot een minimum zodra de motor op constante snelheid draait.

6 Dimensionering

Aan de hand van de data uit het simulatiemodel (voor dit voorbeeld wordt het model genomen uit hoofdstuk 4) kan er een dimensioneringsoefening uitgevoerd worden. Daar wordt een economische studie aan gekoppeld. In sectie 4.2.4 kon er geconcludeerd worden dat een energiebuffer iets efficiënter is vergeleken met AFE. Omdat het verschil klein is, wordt er voor het economisch model aangenomen dat het verbruik gelijk is.

6.1 Het economisch model

In appendix C kan de code teruggevonden worden met de berekeningen voor het plotten van de grafiek van de terugverdientijd zoals weergegeven op figuur 6.1. Voor die economische studie wordt er gewerkt met de maximale energiewaarde uit de simulatie van het model. Om alle kosten in rekening te kunnen brengen wordt alles omgezet van J naar kWh.

6.1.1 Condensatorbank

Er wordt verondersteld dat de omvormer een levensduur heeft van 20 jaar. Volgens diverse datasheets die terug te vinden zijn op het internet [22] kan een supercondensator 1 miljoen cyclussen aan. Uitgaande van 125 cyclussen per uur (± 30 seconden per cyclus), het aantal werkuren per dag en het aantal werkdagen in een jaar, kan de levensduur van een supercap berekend worden. De kosten die verbonden zijn met een energiebuffer gebaseerd op supercondensatoren worden weergegeven met een blauwe lijn in figuur 6.1. Die data werd verkregen door een onderzoek van Bluways [23].

6.1.2 AFE

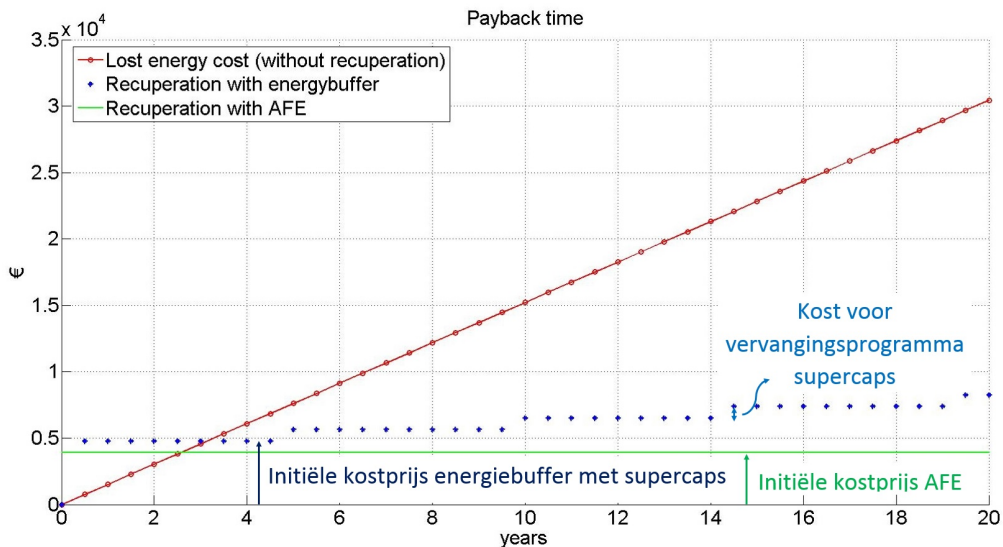
Ook hier wordt er van uitgegaan dat de omvormer een levensduur heeft van 20 jaar. In tegenstelling tot een condensatorbank is de omvormer hier de enigste kost [24] (zie groene lijn in figuur 6.1).

6.1.3 Terugverdientijd

De energiebesparing die gerealiseerd kan worden, is de totale hoeveelheid aan energie die niet verbrand wordt door een remweerstand, weergegeven met een rode lijn in figuur 6.1.

OPMERKING: bij dit simulatiemodel wordt verondersteld dat er altijd op maximum belasting gewerkt wordt. In de realiteit is dat niet zo, maar wegens een gebrek aan bezettingsfactoren van een magazijn, kan die factor niet in rekening gebracht worden.

Uit figuur 6.1 kan er vastgesteld worden dat AFE goedkoper is dan een opstelling met supercondensatoren. Niettegenstaande de hogere prijs, bedraagt de terugverdientijd van een installatie met supercondensatoren ongeveer 3 jaar. Na ongeveer 4.5 jaar dienen de condensatoren vervangen te worden. Dat brengt een nieuwe kost met zich mee, maar het weegt niet op met de energiebesparing ten opzichte van een remweerstand die gerealiseerd wordt.



In geval van zwart-witweergave:

Rode lijn: lijn met bolletjes

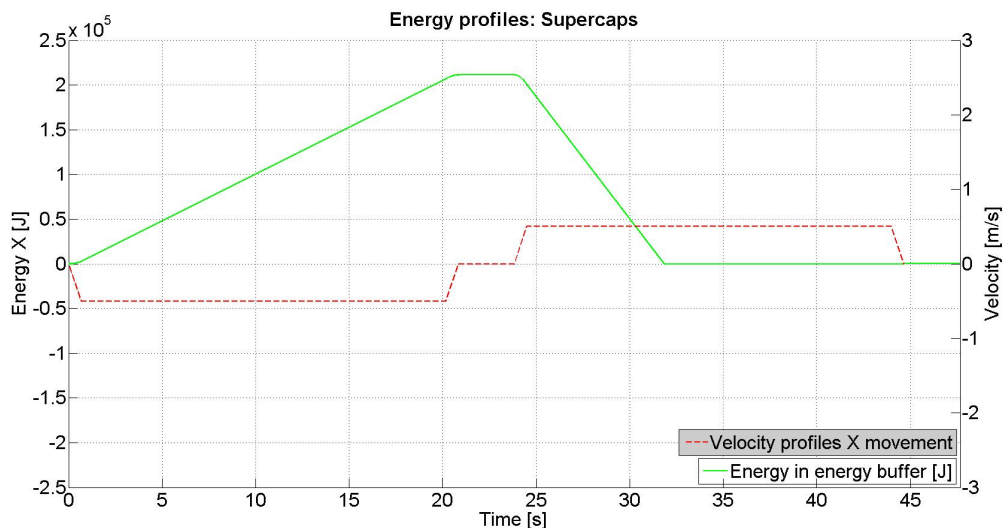
Blaue lijn: sterretjeslijn

Groene lijn: effen lijn

Figuur 6.1: Terugverdientijd van supercondensatoren

6.2 Dimensioneren van supercaps

In dit simulatiemodel wordt er data gegenereerd van de energie in functie van de tijd die beschikbaar is voor de energiebuffer (figuur 6.2, is een herhaling van figuur 4.7). Aan de hand van dat verloop kan er een dimensionering uitgevoerd worden.



Figuur 6.2: Energie die naar de condensatorbank gaat

Er wordt gerekend met het worstcase geval. Voor deze simulatie betekent het dat er 211 kJ vrijkomt. Met andere woorden is dat het overschot in de DC-tussenkring. Als men rekening houdt met een DC/DC-omvormer met een efficiëntie van ongeveer 95% komt dat neer op ongeveer 200 kJ die gebufferd moet worden.

Het is de omvormer die bepaalt wat de spanning is over de energiebuffer en met formule 2.4 kan de totale capaciteit berekend worden die nodig is om het energieoverschot te kunnen bufferen.

Dimensioneringsoefening

Aan de hand van bovenstaande gegevens wordt er nu een voorbeeld uitgewerkt. Er moet een totale hoeveelheid van 200 kJ gebufferd worden. Vervolgens veronderstellen we een DC/DC-omvormer die een secundaire spanning heeft van maximaal 24 V. Voor een optimaal gebruik van de supercaps wordt er gewerkt met een spanningsrange tussen 50% en 100%. De totale benodigde capaciteit wordt dan met behulp van formule 2.4:

$$C = \frac{2 \cdot E}{U_{max}^2 - U_{min}^2}$$

$$C = \frac{2 \cdot 211k}{24^2 - 12^2}$$

$$C = 976.9F$$

De spanning die maximaal over een supercap mag staan ligt rond de 2.7 V. Omdat de spanning in de condensatorbank (na de omvormer) kan oplopen tot 24 V, kan er geconcludeerd worden dat er 9 supercondensatoren in serie moeten staan.

In dit voorbeeld wordt er gekozen voor supercondensatoren van 3000 F [25]. Met behulp van formule 2.5 kan de totale capaciteit van de seriekring berekend worden. C_{tot} wordt dan 500 F. Omdat er in totaal 976.9 F gebufferd moet worden, moeten er dus 2 parallelketens komen.

6.3 Besluit

Uit het economisch model kan er afgeleid worden dat zowel AFE als een energiebuffering met supercondensatoren rendabel is. De terugverdiëntijd van AFE is iets korter vergeleken met een energiebuffer van supercondensatoren. Daarnaast worden bij energiebuffering met supercondensatoren geen rekening gehouden met het feit dat die buffer piekbelasting opvangt. Omdat de buffer piekbelasting kan opvangen, kunnen de energiekabels naar het magazijn kleiner gedimensioneerd worden. Het kan zelfs gebeuren dat de transformator kleiner gedimensioneerd kan worden. Omdat die effecten buiten de doelstellingen van de masterproef vallen, werden ze niet meegerekend.

Aan de hand van het simulatiemodel kan de energiebuffer gedimensioneerd worden. Omdat er gewerkt wordt met de maximale waarde van de energie die vrijkomt, is de buffer berekend op het worstcasegeval. De parameters om aan die energiewaarden te geraken zijn:

- De massa van het bewegend deel (bepalen potentiële energie)
- Maximale hoogte dat die massa kan vallen (bepalen potentiële energie)
- Snelheidsprofiel (om energiestroom te kennen in de tijd)
- Verliezen in het systeem
 - motor
 - transmissie
 - wrijving

De energievrijgave is niet altijd maximaal, daarom kan er eventueel een extra remweerstand in het systeem opgenomen worden om de kosten te toen dalen. De energie die verbrand wordt dient, geregeld te worden. Daardoor wordt het systeem complexer, maar dat valt buiten het bestek van de masterproef.

7 Besluit

Het doel van de masterproef was om na te gaan wat de mogelijkheden zijn van supercondensatoren om ze te integreren in de tussenkring van de snelheidsregelaar van een motor. De energie die vrijkomt door het dalen van een last, zou dan in die energiebuffer met supercaps opgeslagen kunnen worden.

De masterproef start met een literatuurstudie. In de studie werden eerst een aantal regeneratieve technologieën overlopen die relevant kunnen zijn voor de energieopslag in een automatisch magazijn. Batterijen slaan hun energie chemisch op. Daardoor kunnen ze meer energie opslaan in vergelijking met condensatoren. Condensatoren daarentegen slaan energie op in een elektrisch veld, waardoor hun opslaghoeveelheid kleiner is, maar ze kunnen sneller werken vergeleken met batterijen. Bij supermagnetische energieopslag wordt de energie opgeslagen in een magnetisch veld. Omwille van dat feit kan er meer energie opgeslagen worden als men dat vergelijkt met condensatoren, maar de kostprijs voor een SMES-installatie is heel groot. AFE is een buitenbeentje betreffende energieopslag, omdat het distributienet gebruikt wordt als buffer. Het voordeel is dat je theoretisch gezien oneindig veel energie kan bufferen. In de toekomst kunnen flow batteries de markt van de batterijen overnemen. Ze zijn het best te vergelijken met een brandstofcel met dat verschil dat een flow battery een reversibel proces heeft. Op dit moment zitten flow batteries nog in hun ontwikkelingsfase.

Supercondensatoren mogen beschouwd worden als getunedede condensatoren. Ze kunnen in 3 klassen opgedeeld worden: EDLC's, pseudocondensatoren en hybride condensatoren. De EDLC heeft zijn gradaties op grootte van het elektrodemateriaal. EDLC's op basis van actief kool bestaan op dit moment het langst, wat zich vertaalt in een gunstige prijs. Hoe kleiner het elektrodemateriaal wordt, hoe groter de energie-inhoud is of zal worden. De nieuwste ontwikkelingen zijn EDLC's op basis van grafeen. Het spreekt voor zich dat de technologie nog niet volledig doorgrond is en met andere woorden nog niet gebruikt wordt in de industrie. Pseudocondensatoren op basis van polymeren ondervinden stabiliteitsproblemen bij het op- en ontladen. De pseudocaps op basis van metaaloxiden worden ook niet veel toegepast, omdat de prijs te hoog ligt vergeleken met andere supercaps. Door stabiliteitsproblemen en het kostenplaatje worden pseudocondensatoren in het algemeen niet meer verder ontwikkeld. Een hybride condensator combineert een EDLC met een pseudocondensator. Omdat die energieopslag zowel elektrisch als chemisch gebeurt, heeft het de grootste energie-inhoud. Het product is nog volop in ontwikkeling, waardoor de prijs hoog ligt ten opzichte van andere types supercondensatoren.

Een energiebuffer kan op meerdere manieren geïntegreerd worden in een tussenkring. De efficiëntste manier is door gebruik te maken van een DC/DC-omvormer tussen de energiebuffer en de tussenkring. Daardoor kan de spanning in de tussenkring hoog blijven, wat het reactievermogen van opstelling niet beïnvloedt. Een tweede voordeel is het feit dat de spanning over de energiebuffer geregeld wordt, waardoor de energieopslag geoptimaliseerd kan worden. Het grootste nadeel is de DC/DC-omvormer zelf. Die omvormers zijn namelijk nog niet commercieel beschikbaar.

Er werd een simulatiemodel gebouwd die de kraanbewegingen moest simuleren. Parameters die opgenomen werden in het model zijn: de maximale massa van het bewegend deel, de maximale valhoogte, het snelheidsprofiel en de verliezen in het systeem. In het model werd een snelheidstraject aangelegd waarbij de last van de kraan eerst daalde en vervolgens terug steeg. Uit het energieverbruik kan er geconcludeerd worden dat een energiebuffer, waarbij de DC/DC-omvormer tussen de buffer en de tussenkring zit, 1% efficiënter is vergeleken met AFE.

Vervolgens werd het simulatiemodel vergeleken met een testopstelling. Daaruit blijkt dat er in het model geen rekening gehouden werd met het rendement van de omvormers als ze in deellast werken. Dat vormt op zich geen probleem, daar ze in het model instelbaar zijn. Omdat het rendement van de omvormers in deellast kleiner is dan

voorgesteld, kan er geconcludeerd worden dat een opstelling met supercaps nog efficiënter is vergeleken met AFE. Verder werd er geen rekening gehouden met het eigenverbruik van de drives, zodat er op het model een kleine afwijking ontstaat.

In het economisch gedeelte van de masterproef wordt de kost van AFE vergeleken met een opstelling met supercondensatoren. De energie die bespaard kan worden, is de energie die bij een remweerstand verbrand zou worden. Voor deze studie wordt het verschil in verbruik tussen AFE en supercondensatoren verwaarloosd. Er kan geconcludeerd worden dat AFE goedkoper is dan de energie te bufferen. Niettegenstaande het feit dat een opstelling met supercondensatoren een terugverdientijd heeft van 3 jaar.

Als eindconclusie kan er gesteld worden dat het gebruik van supercondensatoren als energiebuffer een volwaardig alternatief is vergeleken met het terugsturen van de energie naar het net. In wat volgt, worden kort de pro's en contra's meegegeven voor de keuze van AFE of een energiebuffer van op basis van supercondensatoren.

AFE		Energiebuffer met supercondensatoren	
Goedkoper	(+)	Efficiënter	(+)
Minder onderhoud	(+)	Vervangingsprogramma voor de condensatorbank	(-)
Transformator kan grote energiestromen niet aan	(-)	De kabels kunnen kleiner gedimensioneerd worden	(+)
Overbelasting van het distributienet mogelijk	(-)	Opvangen piekbelasting / belasten het net minder	(+)
		Minder taxen op piekvermogens (MS-klanten)	(+)

Er is al veel werk verricht, maar toch zijn er nog veel optimalisatiemogelijkheden voor een volgend onderzoek. Er werd beslist om vervolg te breien aan dit onderzoek in het kader van een nieuwe masterproef. Daarvoor wordt er een testopstelling aangekocht met supercondensatoren om het onderzoek te vervolledigen.

Om de energieopslag te optimaliseren voor grotere opslaghoeveelheden, kan er onderzoek gevoerd worden naar combinatiesystemen waarbij er parallel aan de supercondensatoren batterijen worden gekoppeld. Op economisch gebied kan er onderzoek gevoerd worden naar de combinatie van AFE en energiebuffering of een energiebuffer en een remweerstand. Dat laatste kan de kost van het systeem drukken. Op dit moment is de energiebuffer gedimensioneerd op het worstcasegeval, namelijk op een maximale energieopslag. In de realiteit komt dat echter niet altijd voor, waardoor de opslagcapaciteit niet ten volle benut wordt. Als tweede item kan de economische studie verfijnd worden door rekening te houden met de dimensionering van transformatoren en energiekabels. Daarnaast kan het verschil in verbruik tussen AFE en de energiebuffer meegerekend worden die nu verwaarloosd werd. In de studie werd er van uitgegaan dat de omvormers met een constant rendement werken. Dat is echter niet zo. Het model kan nog uitgebreid worden met de isorendementscurve van de omvormers. Tot slot kan het effect van de inwendige weerstand van de supercap bekeken worden om een eventueel rendementsverlies in kaart te brengen.

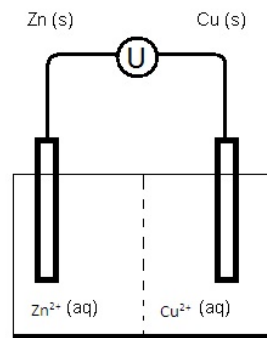
Literatuurlijst

- [1] K. Bradbury, "Energy storage technology review," 2010. [Datum van opzoeking:15/09/2014].
- [2] <http://www.afec.co.jp/english/lic/feature>. [Datum van opzoeking:03/11/2014].
- [3] <http://www.carotron.com/applications/csag-d/>. [Datum van opzoeking:15/05/2015].
- [4] <http://www.egemin-automation.be/nl/>. [Datum van opzoeking:05/12/2014].
- [5] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291 -- 312, 2009. [Datum van opzoeking:05/09/2014].
- [6] K. Stockman, *Elektromechanische aandrijfsystemen I*, ch. Inductiemachine of asynchrone machine. 2013-2014. [Datum van opzoeking:17/09/2014].
- [7] M. Skyllas-Kazacos, M. H. Chakrabarti, S. A. Hajimolana, F. S. Mjalli, and M. Saleem, "Critical review in electrochemical and solid-state science and technology," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 8, pp. R55 -- R79, 2011. [Datum van opzoeking:22/05/2015].
- [8] M. Aslani, "Electrochemical double layer capacitors (supercapacitors)," 2012. [Datum van opzoeking:10/11/2014].
- [9] M. S. H. en James C. Ellenbogen, "Supercapacitors: A brief overview," tech. rep., MITRE, maart 2006. [Datum van opzoeking:01/09/2014].
- [10] muRata, *High Performance Electrical Double-Layer Capacitors*. [Datum van opzoeking:11/09/2014].
- [11] A. Pandolfo and A. Hollenkamp, "Carbon properties and their role in supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 157, no. 1, pp. 11 -- 27, 2006. [Datum van opzoeking:12/09/2014].
- [12] E. Frackowiak and F. Béguin, "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors," *Carbon*, vol. 39, no. 6, pp. 937 -- 950, 2001. [Datum van opzoeking:12/09/2014].
- [13] W. Wang, S. Guo, I. Lee, K. Ahmed, J. Zhong, and Z. Favors, "Hydrous ruthenium oxide nanoparticles anchored to graphene and carbon nanotube hybrid foam for supercapacitors," *Scientific Reports*, 25 maart 2014. [Datum van opzoeking:10/11/2014].
- [14] M. Mastragostino, C. Arbizzani, and F. Soavi, "Polymer-based supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 97-98, no. 0, pp. 812 -- 815, 2001. Proceedings of the 10th International Meeting on Lithium Batteries [Datum van opzoeking:09/09/2014].
- [15] Y. Cheng, J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, and P. Lataire, "Super capacitor based energy storage as peak power unit in the applications of hybrid electric vehicles," in *IEE conference publication*, pp. 404--408, Institution of Electrical Engineers, 2006. [Datum van opzoeking:11/09/2014].
- [16] J. V. Mierlo, J.-M. Timmermans, G. Maggetto, and P. V. D. Bossche, "Peak power based fuel cell hybrid propulsion system," in *The World Electric Vehicle Association Journal*, pp. 54--61, WEVA, 2007. [Datum van opzoeking:11/09/2014].
- [17] J. Timmermans, P. Zadora, Y. Cheng, J. Van Mierlo, and P. Lataire, "Modelling and design of super capacitors as peak power unit for hybrid electric vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, pp. 8--pp, IEEE, 2005. [Datum van opzoeking:11/09/2014].
- [18] <http://www.moog.com/products/servodrives-drives-drive-systems/dynamic-energy-unit-servo-drive-accessory/>. [Datum van opzoeking:12/03/2015].

- [19] <http://www.bremsenergie.de/en/products/des/des-3-0-des-4-0>. [Datum van opzoeking:12/03/2015].
- [20] <http://www.moviaxis.com/systemkomponenten.html>. [Datum van opzoeking:12/03/2015].
- [21] Interne nota verkregen via Maxime Vuylsteke [Datum van opzoeking:16/10/2014].
- [22] <http://www.mouser.be/Search/Refine.aspx?N=9947044>. [Datum van opzoeking:05/03/2015].
- [23] W. Driesen, "Energiereducatie- en energieopslag," tech. rep., Sirris and Flanders Make, 2014. [Datum van opzoeking:05/03/2015].
- [24] Prijslijst van regeneratieve units van SEW [Datum van opzoeking:15/04/2015].
- [25] <http://www.mouser.be/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BCAP3000-P270-K05/?qs=sGAEpiMZZMuDCPMZUZ%252bY14vDGR228uRDQHzsOTIV6xw%3d>. [Datum van opzoeking:21/05/2015].
- [26] C. Merlevede, *Cursus analytische chemie*, ch. A. Redoxanalyse. 2009-2010. [Datum van opzoeking:17/09/2014].

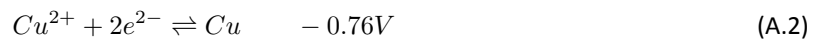
A Redoxreacties

Een redoxreactie is een chemisch proces waarbij er elektronen uitgewisseld worden tussen verschillende moleculen. Tijdens het proces staat de reductor¹ elektronen af die een oxidator² opneemt. De werking van een redoxreactie wordt aan de hand van een voorbeeld geïllustreerd³. In dit voorbeeld wordt er gewerkt met de metalen koper en zink, en hun zouten.

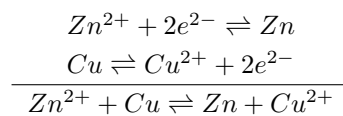


Figuur A.1: Schematische weergave van de redoxreactie tussen koper en zink

Bij deze opstelling vinden er 2 deelreacties plaats:



Iedere vergelijking heeft een redoxpotentiaal. Die worden via een spanningsreeks (met bijvoorbeeld waterstof als referentie) bepaald. Daarbij geldt dat de stof met het grootste potentiaal de sterkste oxidator is. In het voorbeeld is dat zink (vergelijking A.1). Dat wil zeggen dat zink fungeert als oxidator en koper als reductor. Omdat de elektronenbalans moet kloppen⁴, zal koper (vergelijking A.2) zijn elektronen moeten afstaan, waardoor die vergelijking omkeert. De reactie wordt dan:



De reactie heeft een potentiaal van:

$$\begin{aligned} \Delta E^0 &= E_{oxidator}^0 - E_{reductor}^0 \\ \Delta E^0 &= 0.34 - (-0.76) = 1.1V \end{aligned}$$

De reactie heeft een potentiaalverschil dat groter is dan 0.3 V. Dat wil zeggen dat de reactie aflopend is en dat ze dus geen probleem heeft om door te gaan.

In een redoxcondensator (of pseudocondensator) is het belangrijk dat de reactie reversibel is, zodat het systeem zonder al te veel verlies op- en ontladen kan worden. Om de cellen in dit voorbeeld terug op te laden, moet de externe spanning dus groter zijn dan 1.4 V. De grootte van de spanning zegt niets over de reactiesnelheid waarmee de reactie gebeurt. Daarom is het soms noodzakelijk om een katalysator aan het systeem toe te voegen. [26]

¹Is een stof die een andere stof reduceert en zelf oxideert

²Is een stof die een andere stof oxideert en zelf reduceert.

³In de pseudocondensatoren vinden er meestal complexe reacties plaats die analoog verlopen met dit voorbeeld. In het voorbeeld worden er 2 verschillende stoffen genomen om verwarring te vermijden.

⁴Een redoxreactie is gekoppeld. Dat wil zeggen dat het elektrontransport rechtstreeks gebeurt, van de reductor naar de oxidator.

B Code regeneratieve unit

```
function [OUT_TypeTechnologie, OUT_P_DC_bus_naar_net, OUT_Energie_naar_caps, OUT_Energie_verbrand]
= RegeneratieveUnit (IN_P_DC_Motorzijde, EnergieInDeCaps, t, TypeTechnologie)

%% Initialisatie

% Onthouden van de waarden in de vorige cyclus
persistent Energy_in_caps
persistent Energy_burned

% Ophalen van de initiële waarde uit de workspace
if isempty(Energy_in_caps);
    Energy_in_caps = EnergieInDeCaps;
    Energy_burned = 0;
end

% 'Type technologie' wordt hier opgeroepen vanuit de workspace en wordt ook gebruikt, maar wordt
% tevens naar buiten gebracht voor een andere functieblok
OUT_TypeTechnologie = TypeTechnologie;

%% Verwerking van de data

    %% AFE
% Bij AFE moet er in dit blok niets gebeuren en wordt dus doorgelust
if TypeTechnologie == 1
    OUT_P_DC_bus_naar_net = IN_P_DC_Motorzijde;

    % er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt er een
    % 0 uitgestuurd
    OUT_Energie_naar_caps = 0;
    OUT_Energie_verbrand = 0;

    %% supercaps
elseif TypeTechnologie == 2
    % als de waarde van het vermogen negatief is, wordt er energie gerecupereerd (van
    % motor naar de condensatoren). => *-1 om het vermogen positief voor te stellen voor
    % injectie naar de caps. Als de waarde van het vermogen positief is, wordt er energie
    % naar de motoren gestuurd.

    if IN_P_DC_Motorzijde <= 0
        % De condensatoren worden OPGELADEN
        Energy_in_caps = Energy_in_caps - t*IN_P_DC_Motorzijde;
        OUT_P_DC_bus_naar_net = 0;
        OUT_Energie_naar_caps = Energy_in_caps;

        % er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt er
        % een 0 uitgestuurd
        OUT_Energie_verbrand = 0;
    else
        % De condensatoren worden ONTILADEN
        if (Energy_in_caps - IN_P_DC_Motorzijde*t) > 0
            Energy_in_caps = Energy_in_caps - IN_P_DC_Motorzijde*t;
            OUT_P_DC_bus_naar_net = 0;
            OUT_Energie_naar_caps = Energy_in_caps;
        end
    end
end
```

Appendix B. Code regeneratieve unit

```
% er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt
% er een 0 uitgestuurd
OUT_Energie_verbrand = 0;
else
    %Energy_in_caps = 0;
    OUT_P_DC_bus_naar_net = IN_P_DC_Motorzijde*t;
    OUT_Energie_naar_caps = 0;

    % er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt
    % er een 0 uitgestuurd
    OUT_Energie_verbrand = 0;
end
end

%% Remweerstand
elseif TypeTechnologie == 3
    % als de waarde negatief is, wordt er energie verbrand (van motor naar de caps).
    % => *-1 om het vermogen positief voor te stellen voor de injectie naar de remweerstand.
    % Als de waarde van het vermogen positief is, wordt er energie naar de motoren gestuurd.
    if IN_P_DC_Motorzijde <= 0
        % Verbranden van energie
        Energy_burned = Energy_burned - t*IN_P_DC_Motorzijde;
        OUT_P_DC_bus_naar_net = 0;
        OUT_Energie_verbrand = Energy_burned;

        % er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt er
        % een 0 uitgestuurd
        OUT_Energie_naar_caps = 0;
    else
        % Energie nodig van het net
        OUT_P_DC_bus_naar_net = IN_P_DC_Motorzijde;
        OUT_Energie_verbrand = 0;

        % er wordt een uitgang verwacht, maar omdat ze hier niet gebruikt worden, wordt er
        % een 0 uitgestuurd
        OUT_Energie_naar_caps = 0;
    end

    %% Error
else
    error('De parameter "TypeTechnologie" werd niet correct ingevuld.');
```

C Code economisch model

Op de volgende bladzijden (start op pagina 53) wordt de Matlabcode van het economisch model weergegeven.

```

%% Het economisch model

% Tijdsbestek waarover gemeten wordt.
jaar = 20;
x = 0:0.5:jaar;

% Energiekost
prijsElek = 0.13;

%% Condensatorbank
% Kosten
PrijsCaps = 15615;
% voor een installatie gedimensioneerd op een stockage van 200 kJ. (bij een
PrijsOmvormer = 70000;

% Levensduur componenten
levensduurOmvormerCondensatorbank = 20;

CyclussenCaps = 1000000;
    CyclussenPerUur = 125;
    WerkurenPerDag = 8;
    WerkdagenPerJaar = 210;
CyclussenPerJaar = CyclussenPerUur*WerkurenPerDag*WerkdagenPerJaar;

levensduurCaps = CyclussenCaps/CyclussenPerJaar;

% Selecteren van de benodigde energie in de caps
Percentage = 100/100;
Percentage = Percentage*0.95;
EnergieMax = Percentage*max(Energy_in_Capacitor(:,1));
EnergieMax = EnergieMax/3600000;
EnergieverbruikPerJaar = EnergieMax*CyclussenPerJaar;

% Berekeningen voor de plot
PlotCaps = zeros(1,length(x));
PrijsCaps = PrijsCaps*EnergieMax;
PrijsOmvormer = PrijsOmvormer*EnergieMax;

positie = 1;
while positie <= length(x)
    PlotCaps(1,positie) = ceil(x(1,positie)/levensduurOmvormerCondensatorbank)*PrijsOmvormer + ceil(x(1,positie)/levensduurCaps)*PrijsCaps;

```



```

        positie = positie + 1;
    end

%% AFE
levensduurOmvormerAFE = 20; % jaar

tijdSimulatie = max(OrderMatrix.Result.t_tijd); % tijdsduur van de simulatie

Pafe = Pgem/1000; % berekenen gemiddeld vermogen (kW)
PrijsAFE = 37.683*Pafe + 1008.7; % gebaseerd op prijzen van SEW

% Berekeningen voor de plot
positie = 1; % invullen van de waarden in de array
while positie <= length(x)
    PlotAFE(1,positie) = ceil(x(1,positie)/levensduurOmvormerAFE)*PrijsOmvormer;
    positie = positie + 1;
end

%% energie verbrand
% Berekeningen voor de plot.
PlotGewoon = zeros(1,length(x)); % maken van een lege array
KostGewoonVerbruikPerJaar = EnergieverbruikPerJaar*prijsElek; % energiekost per jaar zonder recuperatie
positie = 1; % invullen van de waarden in de array
while positie <= length(x)
    PlotGewoon(1,positie) = KostGewoonVerbruikPerJaar*x(1,positie);
    positie = positie + 1;
end

%% plot
figure
hold on
grid on
title('Payback time')
plot(x,PlotGewoon,'Color','r')
plot(x,PlotCaps,'Color','b')
plot(x,PlotAFE,'Color','g')
xlabel('years')
ylabel(' ')
legend('Without recuperation of brake energy','Recuperation with energybuffer','Recuperation with AFE')
hold off

```

