

PHASE TO PHASE

**B4U, Invloed van decentrale opwekking en
opslagsystemen op de modellering van LS-netten.
Beschrijving model opslagsystemen**

01 184 pmo

10-8-2001

Phase to Phase BV
Utrechtseweg 310
Postbus 100
6800 AC Arnhem
T: 026 356 38 00
F: 026 356 36 36
www.phasetophase.nl

INHOUD

1 Inleiding3

 1.1 Probleemstelling3

 1.2 Doelstelling3

 1.3 Aanpak.....3

2 Model opslagsystemen.....5

 2.1 Opladen..... 6

 2.2 Ontladen7

3 Toepassing in een rekenprogramma 9

4 Conclusie..... 11

1 INLEIDING

1.1 Probleemstelling

De huidige elektriciteitsnetten zullen steeds dichterbij de grenzen van hun capaciteit worden bedreven. Netstructuren en hiermee ook de leveringszekerheid veranderen door steeds meer toepassing van WKK en de introductie van opwekking met behulp van wind, zon, brandstofcel en de mini WK. Daarnaast zullen ook elektrische opslagsystemen hun intrede gaan vinden. Naast de leveringszekerheid van dergelijke systemen zijn er ook andere vraagstukken die een directe relatie hebben met decentrale opslag en opwekking in elektriciteitsnetten. Een belangrijk vraagstuk in de nabije toekomst zal bijvoorbeeld zijn waar men decentrale opslag of opwekking dient te plaatsen in het netwerk (lokaal bij de verbruikers of op middenspanningsniveau) en hoeveel en hoe groot de te gebruiken componenten dienen te zijn. De ontwerpen moeten bovendien worden beoordeeld op technische haalbaarheid, waar zaken aan de orde komen als: netbelasting, over- en onderspanning, spanningsfluctuaties en aanraakveiligheid.

Het gedrag van decentrale opwekkers varieert sterk in de tijd. Het is onzeker welk tijdinterval benodigd is om de opwekkers optimaal te beschrijven. Een te groot tijdinterval geeft een onvoldoende beschrijving. Een te klein tijdinterval vraagt een onnodig grote inspanning van de ontwerper. Het model van PV-systemen is nog niet voldoende beschreven voor implementatie in netberekeningen. De invloed van temperatuur op de opwekking met micro WKK is een complicatie. Het gedrag van opslagsystemen is afhankelijk van externe aansturing, invloed van spanning en stroom op het opslaan, het specifieke oplaad- en ontladgedrag van de accu en de capaciteit (geheugenwerking). De invloed van een opslagsysteem is nog niet eerder meegenomen in een netberekening. Dit zijn factoren die een gedegen netstudie in de toekomst vrij complex kunnen maken. Een goede netberekeningsmethode die op een praktisch bruikbare wijze met deze factoren rekening houdt, is nog niet op de markt.

1.2 Doelstelling

Ontwikkeling van een praktisch bruikbare methode om het gedrag van decentrale opwekkers en opslagsystemen in te voeren in de bestaande methode voor ontwerp van netten voor laagspanningsdistributie (230/400 V).

1.3 Aanpak

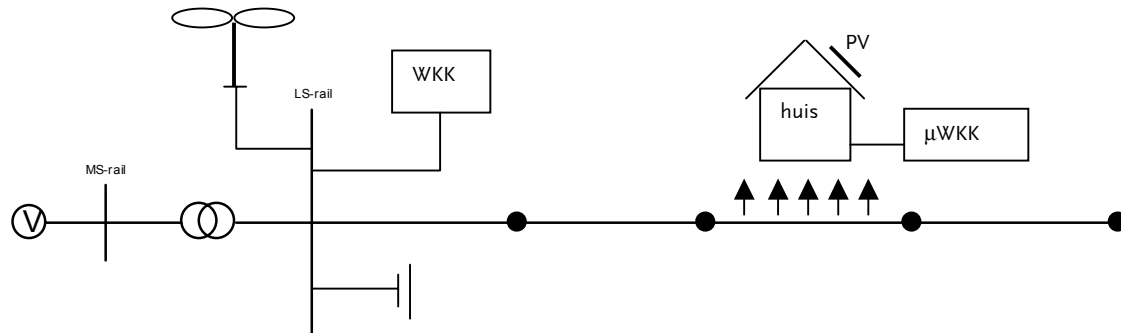
De belastingen en decentrale opwekkers in een net worden beschreven met behulp van tijdreeksen. Een tijdreeks beschrijft het gedrag van een bepaald type belasting of opwekking. In combinatie met andere kenmerken, zoals maximum grootte van de belasting of opwekking, kunnen de momentane waarden worden vastgesteld, waarmee de netberekening kan worden uitgevoerd. In principe is een netberekening niet tijdafhankelijk, maar het gedrag van opslagsystemen maakt een nieuwe voorziening voor de tijdafhankelijkheid nodig in de netberekening.

Momenteel voeren de elektriciteitsbedrijven diverse projecten uit, waarin de invloed van decentrale opwekking en decentrale batterij opslag bestudeerd wordt. In die projecten worden diverse simulaties uitgevoerd aan MS/LS netten, waar de belasting en opwekking in discrete tijdstappen van meestal 5 minuten gedefinieerd zijn.

Onderstaande elementen komen in de studienetten op LS-niveau (400 V) voor:

- belasting in MS/LS distributiestations
- decentrale opwekking (middelgrote WKK's) in MS/LS distributiestations
- windturbines in MS/LS distributiestations
- batterij opslag in MS/LS distributiestations

- belastingen achter huisaansluitingen
- micro WKK's achter huisaansluitingen
- zonnecellen (PV) achter huisaansluitingen.



Figuur 1 Elementen in de studienetten op LS-niveau

Het te ontwikkelen computerprogramma (werknaam B4U) rekent de gevolgen van momentane opname of afname van elektrisch vermogen uit. Het in tijd variërende gedrag van belasting en opwekking wordt met behulp van tijdreeksen beschreven. Hiermee kan worden gesimuleerd:

- willekeurig ongelijktijdig gedrag elektriciteitsverbruiker
- willekeurig gelijktijdig gedrag PV
- willekeurig zwak gelijktijdig gedrag micro WKK's
- gepland gedrag WKK
- willekeurig gedrag windturbine
- vermogensuitwisseling batterij opslag met oplaad- en ontladgedrag als functie van tijd.

De elementen kunnen op de knooppunten in het netwerk worden aangesloten en op de kabels als verdeelde belasting.

Het model van de batterij opslag is een constante PQ-belasting, die wordt aangestuurd door een model van een vermogenselektronische regelaar. Het model heeft onderstaande eigenschappen:

- aansturing extern (opslaan/ontladen)
- spannings- en stroomgeregeld opslaan/ontladen (eventueel voorrang boven aansturing)
- oplaad-/ontlaadcurve
- capaciteit (geheugenwerking).

De tijdreeksen worden ingevoerd met behulp van een Excel-bestand. Daarvan beschrijft elke kolom het gedrag van een specifieke belasting of opwekking. Elke kolom bevat een tijdreeks van een factor, waarmee de hoeveelheid belasting of opwekking wordt geregeld. Het model van de regeling van de batterij opslag kent een aantal nader te specificeren parameters.

Het onderzoek wordt uitgevoerd met de volgende fasering:

- Beschrijving modellen van de decentrale opwekkers
- Beschrijving modellen van de opslagsystemen.

Dit rapport beschrijft de modellen van de opslagsystemen en het gebruik in een rekenprogramma voor de analyse van het gedrag.

2 MODEL OPSLAGSYSTEMEN

In een traditioneel distributienet is de stroomrichting altijd van een centraal voedingspunt naar de klant, die steevast verbruiker werd genoemd. Met opkomst van decentrale opwekking kan de stroomrichting omkeren van klant naar centraal voedingspunt. Dit heeft diverse gevolgen die bij de netaanleg om een bijzondere aandacht vragen. Introductie van decentrale opwekkers als PV- en windenergiesystemen hebben tot gevolg dat de stroomrichting niet zonder meer door het elektriciteitsbedrijf te beïnvloeden is. Een systeem voor energieopslag maakt het mogelijk naast de stroomrichting ook de actuele belastingvraag van een deelnet te beïnvloeden. Hierdoor is het mogelijk het onvoorspelbare gedrag van decentrale opwekkers te compenseren, waardoor deze bronnen aantrekkelijker worden voor de energiebedrijven.

Dit hoofdstuk beschrijft een model van een opslagsysteem. Opslag van elektrische energie kan met behulp van diverse soorten accu's. Het juiste type is in principe voor een netanalyse niet van belang, maar bepaalt wel de opslagcapaciteit en het gedrag in een net. Voor het modelleren gelden onderstaande uitgangspunten:

- de ontlaadstroom is afhankelijk van de belasting
- de lekstroom is continu en treedt op in toestanden van opladen, ontladen en rust
- de laadstroom is constant
- de beschikbare capaciteit van de accu wordt bepaald door de hoeveelheid reeds opgeslagen elektrische energie
- invloeden van buiten het opslagsysteem, zoals temperatuur, worden verwaarloosd (dat mag omdat we aannemen dat de opslagsystemen in woonruimtes staan).

Een batterijsysteem heeft een aantal karakteristieken, die het gedrag bepalen. Deze karakteristieken zijn in het model terug te vinden. Deze karakteristieken zijn:

- nominale capaciteit per batterij cel ($C_{\text{cel,nom}}$ in Ah)
- nominale duur van het ontladen ($T_{\text{ontlaad,nom}}$ in h)
- aantal cellen in serie per parallelle tak (n_s)
- aantal parallelle takken (n_p)
- celspanning (U_{cel} in V)
- lek (% per maand, variërend van 1 tot 15 %)
- oplaadrendement (η in %)
- maximaal toegestane oplaadstroom per Ah celcapaciteit ($I_{\text{charge,max}}$ in A)
- maximaal toegestane ontlaadstroom per Ah celcapaciteit ($I_{\text{decharge,max}}$ in A)
- initiële ladingstoestand of Procentuele Rest Capaciteit (PRC in % van de nominale capaciteit)
- toegestane ondergrens van de ladingstoestand (RC_{min} in Ah)

De accu is opgebouwd uit cellen die in serie geschakeld zijn en gezamenlijk een tak vormen. Een cel heeft een eigen constante spanning. Deze spanning ligt tussen 1 en 1,5 Volt. Door serieschakeling van cellen wordt een hogere spanning verkregen, waardoor het elektronische omzettingsproces beter verloopt. Voor vergroting van de capaciteit en het vermogen worden de takken parallel geschakeld.

De nominale capaciteit van het batterijsysteem is afhankelijk van het aantal cellen en de capaciteit per cel:

$$C_{\text{nom}} = n_s \cdot n_p \cdot C_{\text{cel}} \quad (1)$$

De nominale spanning van het opslagsysteem is bepaald door de nominale celspanning en de hoeveelheid cellen in serie:

$$U_{nom} = n_s \cdot U_{cel} \quad (2)$$

De maximale ontlaadstroom van het gehele systeem wordt bepaald door de individuele celcapaciteit en het aantal parallel geschakelde takken:

$$\begin{aligned} I_{c,max} &= I_{charge,max} \cdot n_p \\ I_{o,max} &= I_{decharge,max} \cdot n_p \end{aligned} \quad (3)$$

De beschikbare capaciteit (de Rest Capaciteit) is het product van de nominale capaciteit en de initiële ladingstoestand of Procentuele Rest Capaciteit:

$$RC = C_{nom} \cdot PRC \quad (4)$$

De hoeveelheid energie, die nominaal in het opslagsysteem is opgeslagen, is (in Wh):

$$E_{nom} = C_{nom} \cdot U_{nom} \quad (5)$$

De lek is gedefinieerd als de hoeveelheid energie die per maand uit het opslagsysteem weglekt. Een maand is een periode met gemiddeld $24 \times 365/12 = 730$ uren. Het lekvermogen wordt berekend uit de hoeveelheid opgeslagen energie en de opgegeven lek:

$$P_{lek} = \frac{lek}{100} \cdot \frac{E_{nom}}{730} \quad (6)$$

Hieruit kunnen de lekweerstand en de lekstroom worden bepaald:

$$\begin{aligned} R_{lek} &= \frac{U_{nom}^2}{P_{lek}} \\ I_{lek} &= \frac{U_{nom}}{R_{lek}} \end{aligned} \quad (7)$$

De actuele variabelen, die het gedrag van het systeem in een simulatie beschrijven zijn:

- in/uit bedrijf
- toestand: opladen/ontladen
- I_{charge} : actuele laadstroom
- $I_{decharge}$: actuele ontlaadstroom
- tijdsduur: tijdsinterval in seconden, gedurende welke de simulatie geldt.

2.1 Opladen

De oplaadstroom mag niet groter zijn dan het maximum $I_{c,max}$. Niet alle energie wordt opgeslagen in da accu, omdat een gedeelte wordt omgezet in warmte. Het oplaadrendement wordt in onderstaande vergelijking meegenomen.

$$\Delta RC = \frac{I_c \cdot \Delta t}{3600} \cdot \eta \quad (8)$$

$$RC_t = RC_{t-1} + \Delta RC$$

Waarin:

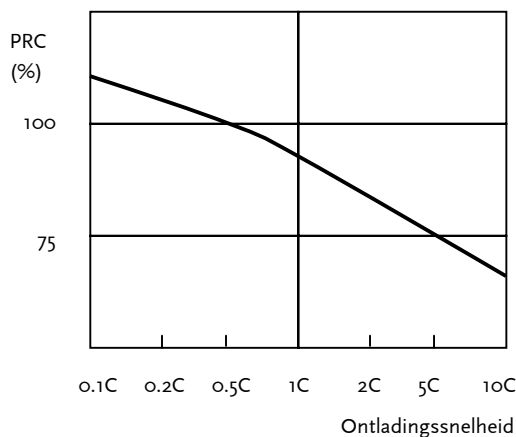
Δt : oplaadtijd in (s)

ΔRC : de toename van de lading.

Mocht blijken dat de resulterende restcapaciteit RC_t groter wordt dan de maximale capaciteit C_{nom} , dan is de accu vol en wordt de restcapaciteit gelijk gesteld aan C_{nom} .

2.2 Ontladen

Een ideale accu heeft een constante spanning en een constante capaciteit. De ontladttijd is gelijk aan de capaciteit gedeeld door de ontladstroom. Een werkelijke accu is echter niet ideaal en spanning en capaciteit zijn niet constant. Bij afnemende lading neemt de spanning ook af, volgens een niet-lineaire curve (Martin, Siewiorek). De capaciteit is ook afhankelijk van de belasting. Ten aanzien van de capaciteit zijn er twee belangrijke effecten, namelijk verlies van capaciteit door een hoge belasting en herstel door een intermitterende belasting. Onderstaande figuur geeft het typische verband tussen initiële capaciteit PRC en de ontladingsnelheid.



Figuur 2 Initiële capaciteit als functie van de ontladingsnelheid

Opvallend is dat de initiële capaciteit zelfs groter dan 100% kan zijn. Bij een ontladingsnelheid van 0,5 C is de initiële capaciteit 100%. Bij een verder toenemende ontladingsnelheid, veroorzaakt door een grotere ontladingsstroom, neemt de capaciteit sterk af. Dit effect wordt in de literatuur het Peukert's effect genoemd (Lee et al, 2000; Robbins et al, 1994). Het Effect wordt beschreven met de Peukert's vergelijking:

$$Const = I^n \cdot t \quad (8)$$

Hierin is:

Const: de Peukert capaciteit

I: de ontladstroom

n: de Peukert's exponent.

De Peukert's exponent is altijd groter dan 1. Hoe groter n is, des te slechter de accu presteert bij grote ontladstromen. De Peukert's exponent kan worden berekend uit de ontladingstabel van de accu. Als voor twee verschillende ontladstromen I_1 en I_2 de bijbehorende ontladttijden t_1 en t_2 zijn gemeten, dan geldt:

$$Const = I_1^n \cdot t_1 = I_2^n \cdot t_2 \quad (9)$$

en daaruit volgt:

$$n = \frac{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} \quad (10)$$

Voor een drietal accu's is de capaciteit gemeten bij verschillende ontladingstijden. De ontladstromen en de Peukert's exponenten volgen dan uit vergelijking (10):

Accu type	100 h ontlading		8 h ontlading		Peukert's exponent
	Capaciteit (Ah)	Ontlaadstroom (A)	Capaciteit (Ah)	Ontlaadstroom (A)	
Concorde PVX	255	2.55	183	22.875	1.15
Surette CH-375	429	4.29	282	35.25	1.20
Surette CS-25-PS	974	9.74	639	79.875	1.20

De Peukert's vergelijking kan ook zodanig geschreven worden dat de relatie tussen ontladsnelheid en ontladstroom duidelijk wordt. Uit (8) volgt:

$$t = C_p \cdot I^{-n} \\ \Rightarrow I \cdot t = Cap = C_p \cdot I^{1-n} \quad (11)$$

Waarin:

Cap: accucapaciteit, behorend bij een ontladsnelheid t en ontladstroom I

De verhouding tussen Cap en I^{1-n} blijft voor diverse ontladsnelheden gelijk aan de Peukert's constante C_p , zodat geschreven kan worden:

$$\frac{Cap_1}{I_1^{1-n}} = \frac{Cap}{I^{1-n}} \\ \Rightarrow Cap_1 = Cap \cdot \frac{I_1^{1-n}}{I^{1-n}} = Cap \cdot \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1} \quad (12) \\ \Rightarrow \frac{1}{Cap} = \frac{1}{Cap_1} \cdot \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1}$$

De relatieve afname van de lading is gelijk aan de gevraagde hoeveelheid Ampere-uren, gedeeld door de bij de gevraagde stroom behorende capaciteit Cap. Door combinatie met (12) volgt de uitdrukking voor wijziging van de State of Charge, ΔSOC, als functie van de gevraagde stroom I en een referentiemeting voor I_1 en Cap_1 (Lee, et al, 2000):

$$\Delta SOC = -\frac{I \cdot t}{Cap}$$

$$\Rightarrow \Delta SOC = -\frac{I \cdot t}{Cap_1} \cdot \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1} = -\frac{I \cdot \Delta t}{3600 \cdot Cap_1} \cdot \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1} \quad (13)$$

Waarin:

Δt : tijdstap (s)

I_n, Cap_n : gegeven combinatie van ontladingsstroom (A) en ontladingstijd (h)

n : Peukert's exponent (tussen 1,15 en 1,35 voor typische lood-zuur accu's)

I : actuele ontladingsstroom (A).

De nieuwe lading wordt berekend volgens:

$$RC_t = RC_{t-1} + \Delta SOC \cdot C_{nom} \quad (14)$$

Indien de nieuwe lading negatief is, is de accu geheel ontladen en wordt de lading gelijk aan nul gesteld.

De ontlaadstroom is gelijk aan de som van de gevraagde stroom en de lekstroom. De totale stroom mag niet groter zijn dan het maximum $I_{o,max}$.

3 TOEPASSING IN EEN REKENPROGRAMMA

In een te analyseren net mag op elk knooppunt een of meer batterijsystemen worden gemodelleerd. Per batterijsysteem liggen de vaste gegevens vast in een typedefinitie. De variabele gegevens, zoals de initiële ladingstoestand, worden per accusysteem opgegeven.

De analyse bestaat uit het doorrekenen van de totale belastingstoestand van het net voor discrete tijdstippen in een specifiek tijdsinterval. Voor elk tijdstip zijn opwekking en belasting in het net gegeven. De instelling en het gedrag van de accu bepalen of en hoeveel elektrische energie de opslagsystemen opnemen of afgeven.

Het opslagsysteem heeft een aantal vaste parameters, afhankelijk van het type, en een aantal variabelen ten behoeve van de simulatie. De vaste parameters zijn:

- Cap_{nom} : Nominale capaciteit (Ah)
- I_{nom} : Nominale ontlaadstroom, behorend bij de nominale capaciteit (A)
- $I_{o,max}$: Maximale ontlaadstroom (A)
- $I_{c,max}$: Maximale oplaadstroom (A)
- RC_{min} : Minimale Rest Capaciteit (Ah)
- Lek (% van nominale capaciteit per maand)
- η : Oplaa rendement (%)
- U_{nom} : Nominale spanning van het oplaadsysteem (V)

De variabelen zijn:

- PRC: initiële ladingstoestand (% van de nominale capaciteit)
- Δt : grootte van de tijdstap van de simulatie (s)
- I : oplaad- en ontlaadstroom: positief=opladen; negatief=ontladen (A)

Het algoritme kent een initialisatie en een simulatiecyclus. Het initialiseren van de accu is éénmaal nodig:

Bereken startcapaciteit: $RC_k = Cap_{nom} \times PRC/100$

Bereken de lekstroom volgens vergelijkingen (6) en (7)

Stel de Peukert's exponent gelijk aan 1,2 (Alternatief: berekenen volgens vergelijking (10), maar dan is input van een extra getallencombinatie Capaciteit en Ontlaadstroom als invoer nodig)

Het opladen en ontladen is afhankelijk van het tijdsinterval en de gekozen stroomsterkte. De stroomsterkte is direct af te leiden van het gevraagde vermogen:

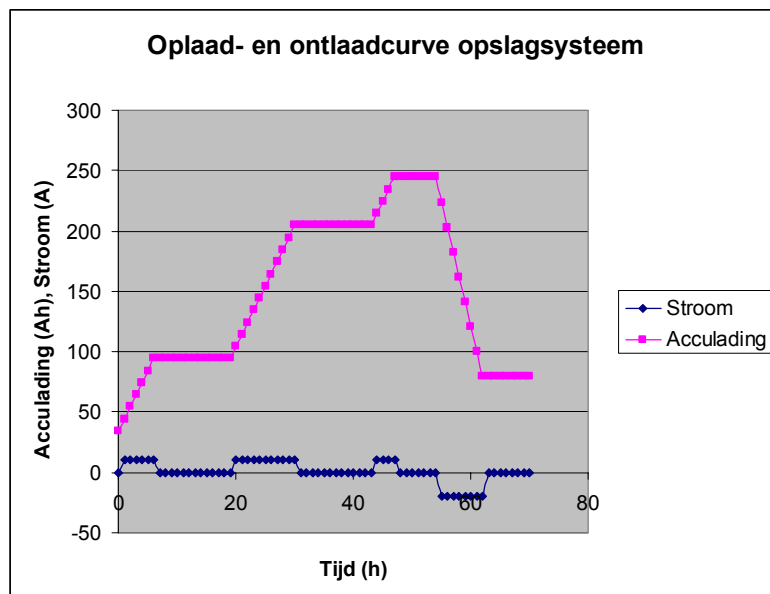
$P = S \cos(\varphi)$

$I = P / U_{nom}$

Het eventuele door het opslagsysteem opgenomen blindvermogen wordt als constant vermogen gedissipeerd.

$I := I - I_{lek}$	
$Y: opladen \setminus$	$I > 0 ?$ / $N: ontladen$
$Y \setminus$	$I > I_{c,max} ?$ / N $Y \setminus$ / N
$I := I_{c,max}$	$I := I_{o,max}$
$RC_k := \text{Min}\{(RC_{k-1} + I \times \Delta t / 3600 \times \eta / 100), (Cap_{nom})\}$	
$\Delta SOC := \frac{-I \cdot \Delta t}{3600 \cdot Cap_{nom}} \cdot \left(\frac{-I}{I_{nom}}\right)^{n-1}$	
$RC_k := \text{Max}\{(RC_{k-1} + \Delta SOC \times Cap_{nom}), (0)\}$	

Onderstaand diagram geeft een voorbeeld van een oplaad- en ontladcyclus van een opslagsysteem gedurende 70 uren. De accu heeft een nominale capaciteit van 344 Ah en een nominale ontladstroom van 17,2 A bij een 20 uren durende volledige ontlading. Het opslagsysteem is in de nachtelijke uren van de eerste dag opgeladen met een constante stroom van 10 A. Om 07:00 uur 's-ochtends is het opladen gestopt. Van 20:00 uur 's-avonds tot 07:00 uur de volgende ochtend is het systeem weer opgeladen met een constante stroom van 10 A. Deze cyclus herhaalt zich tot 24:00 uur aan het einde van de tweede dag. Van 07:00 uur de derde dag tot 15:00 uur moet het systeem een constante stroom van 20 A leveren.



Figuur 3 Simulatie van 3 dagcycli voor een opslagsysteem.

4 CONCLUSIE

Een praktisch toepasbaar model voor een opslagsysteem voor elektrische energie is afgeleid. De geraadpleegde literatuur is voornamelijk geënt op toepassing in de automobielenindustrie, maar de werking van een accu is redelijk goed beschreven. De minimaal benodigde parameters voor identificatie van het type en de toestandsvariabelen voor het actuele gedrag zijn beschreven. Tezamen met de afgeleide formules is het model van het opslagsysteem compleet.

Het model kan zonder verdere aanpassingen geïmplementeerd worden in simulatiesoftware voor het berekenen van netten voor distributie van elektriciteit. Op die manier kan de impact van opslagsystemen in moderne distributiesystemen onderzocht worden.

LITERATUUR

EnergieNed, 1996: "Elektriciteitsdistributienetten", Kluwer Techniek.

T.L. Martin, D.P. Siewiorek: "Non-ideal Battery Properties and Low Power Operation in Wearable Computing", Institute for Complex Engineered Systems, Carnegie Mellon University, Pittsburg, USA.

T. Robbins, J. Hawkins: "Battery Model for Over-Current Protection Simulation of DC Distribution Systems", IEEE, 1994.

W. Lee, H. Park, M. Sunwoo, D. Kim, B. Kim: "Vehicle Electric Power Simulator for Optimizing the Electric Charging System", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, June 12-15, 2000, Seoul, Korea.